

Evaluación del impacto de prácticas de manejo agrícola y pecuario en diferentes sistemas productivos

Evaluation of the impact of agricultural and livestock management practices in different production systems

Diana Carolina Parra Giraldo¹ y Mayra Alejandra Hernández Gómez²
Asesora: Victoria Eugenia Vallejo Quintero³

Resumen

El presente estudio evaluó el efecto del manejo agropecuario sobre la calidad del suelo en diferentes sistemas productivos (SP) en el municipio de Cachipay (Cundinamarca). Para ello, se compararon una serie de parámetros físicos (densidad aparente, resistencia a la penetración, distribución y estabilidad de agregados) y microbiológicos (recuento de heterótrofos totales y actividad enzimática de la catalasa) en 4 SP representativos del Campo Experimental de Tecnologías Ambientales (cultivo de café orgánico, cultivo de guatila, policultivo y pastizal convencional en descanso), mediante la toma de dos muestras compuestas (0-15 cm de profundidad) en cada una de las áreas. En general, el policultivo y el cultivo de café orgánico presentaron los menores valores de densidad aparente (DA) y resistencia a la penetración (RP), así como mayores índices de estabilidad (IE) y estados de agregación (EA), lo que

probablemente generó un mejor ambiente físico para los microorganismos edáficos, evidenciado en una mayor densidad de heterótrofos y actividad biológica (catalasa). Por el contrario, el pastizal convencional en descanso mostró un detrimento de su calidad edáfica reflejado en el comportamiento de sus propiedades fisicoquímicas y microbiológicas, lo cual posiblemente se debe al manejo convencional implementado durante varios años en este sistema, aun estando en periodo de descanso.

¹ Estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Central. Miembro del Grupo de Investigación Agua y Desarrollo Sostenible.
Correo: dparrag3@ucentral.edu.co.

² Estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Central. Miembro del Grupo de Investigación Agua y Desarrollo Sostenible.
Correo: mhernandezg5@ucentral.edu.co

³ Profesora asociada de tiempo completo del Departamento de Ingeniería Ambiental de la Universidad Central y líder del Grupo de Investigación Agua y Desarrollo Sostenible.
Correo: evallejoq@ucentral.edu.co.

Palabras clave: sistemas productivos, indicadores de calidad edáfica, degradación del suelo, tecnologías ambientales.

Abstract

The present study evaluated the effect of agricultural management on soil quality in different production systems (SP) in the municipality of Cachipay (Cundinamarca-Colombia). For this, it was compared physical parameters (apparent density, penetration resistance, distribution and stability of aggregates), and microbiological parameters (heterotrophs total count and enzymatic activity of catalase) in 4 representative SPs from the Experimental Field of Environmental Technologies (organic coffee crop, guatila crop, polyculture and conventional pasture at rest), through the taking of two composite samples (0-15

cm of depth), in each of the areas. In general, polyculture and organic coffee cultivation presented the lowest values of apparent density (DA) and resistance to penetration (PR), as well as higher stability indexes and aggregation states, generating a better physical environment for edaphic microorganisms, evidenced in a higher density of heterotrophs and biological activity (catalase). On the contrary, the conventional pasture at rest showed a detrimental effect on its edaphic quality reflected in the behavior of its physicochemical and microbiological properties, possibly associated with the conventional management implemented for several years in this system, even though this system was in rest period.

Keywords: production systems, quality indicators, soil degradation, environmental technologies.

1. Introducción

La calidad edáfica ha sido definida por muchos autores, pero la definición más aceptada y completa hasta el momento es la establecida por Doran, Coleman, Bezdicek, y Stewart (1994):

La calidad edáfica es la capacidad específica que tiene el suelo para funcionar dentro de los límites del ecosistema (natural o antrópico), para sostener la productividad de plantas y animales; mantener la calidad del aire y del agua y favorecer la salud de plantas, animales y humanos.

Dicha calidad es variable, y puede ser afectada positiva o negativamente según el manejo agropecuario al cual se someta el suelo (Friedman, Hubbs, Tugel, Seybold, y Sucik, 2001). Algunos autores han determinado que, en sistemas agrícolas y pecuarios, un suelo de alta calidad y buena salud provee un crecimiento productivo y sostenible de los cultivos, debido a un mayor ingreso y disponibilidad de nutrientes, mejor aireación, mayor estabilidad estructural y buena retención de humedad (Cruz, Barra, Castillo y Gutiérrez, 2004; Orozco, 2011).

Por el contrario, Ramírez, Limas, Ortiz y Díaz (2011) han evidenciado que algunas prácticas agrícolas deterioran la calidad edá-

fica, tales como: la labranza convencional, el empleo del monocultivo, el uso de insumos químicos externos (fertilizantes y plaguicidas), el sobrepastoreo, la quema y el riego. Por lo tanto, resulta necesario contar con herramientas que permitan monitorear dicha calidad en el tiempo, lo cual contribuirá a establecer la sostenibilidad de diferentes sistemas y prácticas de manejo (Vallejo, 2013). Así mismo, la evaluación de la calidad del suelo permitirá entender, revertir o mitigar la degradación edáfica, la cual se conoce como la disminución o pérdida de utilidad actual o potencial del suelo, para producir bienes y servicios ecosistémicos (Wildner y Veiga, 2016).

Para valorar la calidad del suelo, se han empleado indicadores (propiedades edáficas) que, generalmente, hacen parte de un conjunto mínimo de datos (CMD) y que integran variables físicas, químicas y biológicas. Estas propiedades indican el estado y funcionamiento del suelo, y, por lo tanto, reflejan su condición actual (Navarrete, Vela, López y Rodríguez, 2011; Vallejo, 2013). Según Ramírez (2004), estos indicadores deben ser sensibles a los cambios que sufre el suelo, tanto en los procesos de degradación como en los de recuperación; y deben tener una alta correlación con los procesos del ecosistema. Dada la compleja naturaleza del suelo, los servicios multifuncionales que este proporciona y su alta variabilidad espacial, la selección y medición de los indicadores de calidad edáfica se convierte en uno de los desafíos científicos más importantes (Vallejo, 2013).

En un estudio realizado en Argentina por Álvarez, Osterrieth, Laborde y Montti (2008), se evaluó la estabilidad y la morfología de distintos tamaños de agregados como indicadores de calidad en distintos usos de suelo e intensidades de manejo. Los autores evidenciaron que el suelo no labrado y la pastura natural

con ganado vacuno presentaron valores de estabilidad de agregados que se aproximaron al 100%. Por otra parte, los suelos con más de 30 y 40 años dedicados a rotaciones de cultivos de avena-papa, avena-zanahoria-maíz, trigo-maíz y trigo-soja presentaron valores intermedios de estabilidad, entre el 55 y 80%, respectivamente.

Por otra parte, en Francia, Bottinellia et ál. (2017) realizaron un estudio en suelos bajo tratamientos de labranza superficial (cosecha de trigo y maíz), siembra directa y tratamiento orgánico con estiércol avícola, donde se reportó una EA mayor en suelos bajo siembra directa con fertilizante orgánico, de 1,55 mm, lo que sugiere que este comportamiento está relacionado con la acumulación de materia orgánica en la superficie del suelo. Además, en Veracruz (México), Meza y Geissert (2003) indican que la estabilidad de agregados se clasifica como muy estable (EA > 80%), estable (EA de 65 a 80%), moderadamente estable (EA de 50 a 65%) e inestable (EA < 50%).

En Cuba, Villazón, Martín, Rodríguez y Cobo (2015) determinaron la influencia del uso de la tierra, el sistema de labranza y el sitio de muestreo sobre la resistencia a la penetración en diferentes usos de la tierra (silvopastoreo, pasto natural, cultivos varios y caña de azúcar). La mayor resistencia a la penetración se encontró en las áreas con fines pecuarios (1,64 y 1,71 g/cm³ en pasto natural y silvopastoreo, respectivamente). Los autores atribuyeron este comportamiento al uso frecuente de implementos agrícolas (rotura con arado de discos y surcado) y al pastoreo de animales, que provocó el incremento de la densidad y una disminución del volumen de macroporos.

Samuel, Domuta, Ciobanu y Sandor (2008) evaluaron la actividad enzimática de la catalasa en suelos bajo rotaciones de 2 y 6 cultivos (trigo, avena, soja, trébol y maíz), donde evi-

denciaron que el suelo bajo cultivos de maíz y trigo en ambas rotaciones fue más activo, atribuyendo este comportamiento a los diferentes aportes de nutrientes y microorganismos que se generan por esta práctica que, a su vez, pueden estimular la biodiversidad del suelo y la actividad microbiana, en comparación con el monocultivo. Por otra parte, en la ciudad de Nanping en China, Weiming et ál. (2013) evidenciaron mayor actividad de la enzima catalasa en sistemas de pastizales y tierras de cultivo (maíz, primaveral y batata) e indicaron que esto pudo deberse a la incorporación de estiércol orgánico, que aumenta la concentración de carbono orgánico y nitrógeno total. Por el contrario, atribuyen la causa del descenso de la actividad en su mayoría a las intervenciones antrópicas, asociadas con el manejo convencional de los sistemas.

Un estudio realizado en Sumapaz (Cundinamarca) por Daza, Hernández y Triana (2014) encontró valores de DA entre 0,9-1,15 y 0,83-1,24 g/cm³ en sistemas de monocultivo de papa y ganadería, respectivamente. Los mayores valores de DA en los cultivos de papa fueron atribuidos a las actividades de labranza convencional, que causaron la destrucción de los agregados del suelo (disminuyendo el porcentaje de macroporos e incrementando los microporos) y generaron compactación. Esta conclusión coincide con lo hallado por Estupiñán, Gómez, Barrantes y Limas (2009) en el páramo de Granizo (Cundinamarca), quienes encontraron valores de DA entre 0,61 y 0,63 g/cm³ y de RP de 1,47 mpa y 2,12 mpa en monocultivos de papa y pastoreo semiintensivo, respectivamente.

Por otra parte, Ávila y Cruz (2008) evaluaron el efecto de coberturas vegetales y época climática sobre la densidad de microorganismos totales y heterótrofos en suelos de la ecoregión cafetera, donde se reportaron datos de

log 8,6, 8,3 y 8,1 UFC/gps, en sistemas productivos de bosque, pastizal y cafetal sin sombrero, respectivamente. Los autores indican que los bajos valores de heterótrofos totales presentes en las coberturas más intervenidas, tales como cafetal sin sombrero y pastizal, podrían asociarse al uso de fertilizantes químicos, el control intensivo de malezas con herbicidas y la eliminación de los árboles de sombra para elevar la productividad, lo cual repercute en las propiedades fisicoquímicas edáficas y, por lo tanto, en las densidades microbianas.

Por otra parte, los resultados obtenidos en el sistema productivo de guatila difieren con Beltrán (2014), quien reportó valores de heterótrofos totales entre 2,62 y 3,69 Log de UFC/gps en cultivos de guatila en el municipio de Ventaquemada (Boyacá), bajo fertilización química. Los bajos valores de recuento de heterótrofos totales fueron atribuidos al pH ácido de los cultivos, que actúa sobre la disponibilidad o fijación de minerales nutritivos, lo que afectó las densidades de microorganismos asociados a los suelos.

Si bien existen estudios a nivel mundial que evalúan el efecto de prácticas de manejo agropecuario sobre la calidad del suelo, actualmente no existen indicadores de calidad universales (García, Ramírez y Sánchez, 2012). Teniendo presente que diferentes actividades agropecuarias en Cundinamarca han generado degradación edáfica, el objetivo de este trabajo es evaluar el efecto del manejo agropecuario implementado en los sistemas productivos más representativos del Campo Experimental de Tecnologías Ambientales (CETA) en Cachipay, Cundinamarca, sobre la calidad edáfica, a través de la comparación de las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas, para identificar cuál sistema productivo alberga una mejor calidad. Este estudio podría además servir de base para, en un futuro, promover e im-

plementar nuevos sistemas de manejo agrícola que logren conservar y mejorar dicha calidad.

2. Materiales y métodos

2.1 Descripción del área de estudio

El suelo recolectado fue tomado de la Casa de Retiro y Encuentros Nazaret, de la comunidad religiosa Hermanas de la Caridad Dominicanas de la Presentación de la Santísima Virgen, ubicada a 61 km de Bogotá, al norte del municipio de Cachipay (Cundinamarca), en la vereda Petaluma (4°44'52,3»N, 74°25'32,7»W). La finca tiene un área de 9,61 ha, distribuida entre territorios artificializados, agrícolas, bosques-áreas seminaturales y superficies de agua. Estos últimos representan la mayor parte, por lo cual su vocación es predominantemente agropecuaria (80%) (Cepeda y Sánchez, 2014).

2.2 Descripción y recolección del suelo

Se realizó un evento de muestreo en el mes de mayo de 2016, en el cual se seleccionaron dos áreas independientes de muestreo para cada uno de los cuatro SP del suelo seleccionado (tabla 1). Dentro de cada área se establecieron dos cuadrantes (2,5 x 2,5 m), en los que se seleccionaron muestras aleatorias. De cada una de ellas se tomaron dos muestras compuestas, constituidas de mínimo 25 submuestras a una profundidad de 0-15 cm haciendo uso de barrenos metálicos de un metro por una pulgada. Por lo tanto, para cada sistema productivo (4) se tomaron 2 muestras compuestas, para un total de 16 muestras. Finalmente, cada muestra compuesta de cada sistema se guardó en bolsas de plástico; algunas de ellas (cuatro muestras) fueron refrigeradas a 4°C (análisis biológicos), para su posterior análisis en el Laboratorio de Suelos de la UC.

Tabla 1. Descripción de los usos en el área de estudio

Sistema productivo	Características	Prácticas realizadas
Policultivo	<ul style="list-style-type: none"> Constituido por cultivos de plátano, flores, anturios, yuca y maíz sembrados entre filas y zanjas, con el fin de brindar sombra al cultivo de anturios mediante el plátano y el 6 maíz. Edad de establecimiento: 4 años. Extensión del sistema productivo: 1,3 ha. Manejo orgánico. Nivel de mecanización bajo. 	<ul style="list-style-type: none"> Labranza manual con ayuda de azadón y pica, en momento de siembra y cosecha. Fertilización orgánica cada 3 meses con cereza de café y hierbas derivadas de los diferentes sistemas productivos existentes. Aplicación del insecticida Lorsban cada año para manejo de plagas y enfermedades.
Café	<ul style="list-style-type: none"> Especie de café arábica. Prácticas poscosecha: recolección manual, despulpación semimecánica, lavado, secado al sol y recolección de café cada 2 años Edad de establecimiento: 3 años. Extensión del sistema productivo: 0,6 ha. Manejo orgánico. Nivel de mecanización bajo. 	<ul style="list-style-type: none"> Labranza manual con ayuda de azadón y pica, en momento de siembra y cosecha. Fertilización orgánica cada 6 meses con cereza de café y hierbas derivadas de los diferentes sistemas productivos existentes. Aplicación del insecticida Lorsban cada dos años para manejo de plagas y enfermedades.

Continúa...

... Viene

Sistema productivo	Características	Prácticas realizadas
Pastizal	<ul style="list-style-type: none"> Pastoreo de animales bovinos (aproximadamente 10 vacas). Tiempo de descanso: 9 meses. Tipo de pastos predominantes: Kikuyo y <i>Cynodon dactylon</i> (Gramma). Edad de establecimiento: 5 años. Extensión del sistema ganadero: 2,0 ha. 	<ul style="list-style-type: none"> Manejo tradicional. Nivel de mecanización medio. Labranza mecánica con azadón, pica y tractor. Uso de glifosato y ronda aplicada cada 3 meses, para el control y eliminación de hierbas y arbustos.
Guatila	<ul style="list-style-type: none"> Especie de guatila <i>Sechium edule</i>. Dispuesto en enredadera de 1 metro. Edad de establecimiento: 3 años. Extensión del sistema ganadero: 0,1 ha. Manejo orgánico. Nivel de mecanización bajo. 	<ul style="list-style-type: none"> Labranza manual con ayuda de azadón y pica, en momento de siembra y cosecha. Fertilización orgánica con gallinazo, cada 8 meses. Aplicación del insecticida Lorsban cada año para manejo de plagas y enfermedades.

Fuente: elaboración propia.

2.3 Métodos físicos y biológicos

A continuación se enumeran los métodos utilizados y empleados para el presente estudio (tabla 2).

Tabla 2. Métodos empleados para el estudio.

Análisis	Propiedad	Método
Análisis físicos	Distribución de agregados y estabilidad estructural	Lobo y Pulido (2006)
	Humedad	Peso seco; IGAC (1990)
	Densidad real	Picnómetro; Norma Oficial Mexicana-021 (2002)
	Densidad aparente	Agostini, Monterubbianesi, Studdert y Maurette (2014)
	Textura	Kit de La Motte
	Color	Tabla de Munsell
Análisis microbiológicos	Recuento de heterótrofos totales	Recuento en placa con agar nutritivo; APHA (2000).
	Actividad enzimática de la catalasa	Johnson y Temple (1964)

Fuente: elaboración propia.

2.3.1 Análisis microbiológicos

Recuento de heterótrofos totales: Para el análisis microbiológico del suelo se realizó el conteo de poblaciones microbianas por dilución en placa. Este es un método simple y rápido para la cuenta viable de células microbianas en el suelo.

Determinación de la actividad enzimática de la catalasa: Se utilizó el método de Johnson y Temple (1964), que mide el H_2O_2 residual, para lo cual se adicionó una cantidad determinada de este al suelo incubado a 20 °C durante un tiempo determinado (24 horas), tiempo en el que actúa la enzima.

2.3.2 Análisis estadístico

Se utilizó el test Shapiro Wilk para garantizar la homogeneidad de las varianzas y la distribución normal de los datos. Para evaluar el impacto de los diferentes SP del suelo sobre las propiedades físicas y biológicas, se utilizó el análisis de la varianza (Anova) y la prueba de Tukey post-hoc, utilizando una significancia del 5 % mediante el *software* IBM SPSS Statistics 24 2010. Finalmente, se realizó un análisis

multivariado empleando el programa PAST (Paleontological Statistics), versión 2.17, y por ende se pudieron analizar las variables a través de componentes principales (ACP). De acuerdo con lo anterior, se determinó la importancia relativa de cada una de las variables fisicoquímicas y microbiológicas evaluadas en la diferenciación de los grupos evidenciados (SP), así como su posible uso potencial como indicadores de calidad.

3. Resultados y discusión

3.1 Propiedades físicas

3.1.1 Densidad aparente y resistencia a la penetración

La densidad aparente (DA) y la resistencia a la penetración (RP) mostraron diferencias significativas (Anova $p \leq 0,05$; 0,009 y 0,002) entre los SP evaluados. Para el caso de la DA, se evidenció que esta fue significativamente diferente entre el pastizal y la guatila frente al cultivo de café (Tukey $p \leq 0,05$; 0,016 y 0,038 respectivamente) (figura 1). Por otra parte, con relación a la variable RP, se evidenció que esta fue significativamente mayor en el pastizal en comparación con los demás SP, con excepción del cultivo de guatila (Tukey $p \leq 0,05$; policultivo: 0,002, café: 0,005) (figura 2).

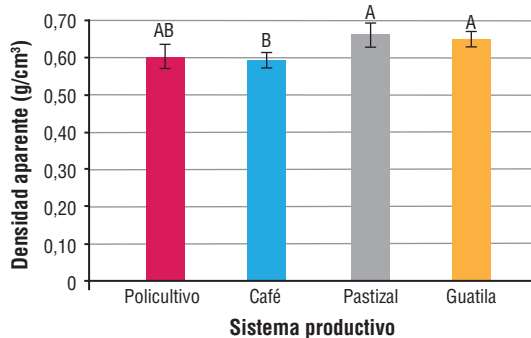


Figura 1. Valores de densidad aparente.

Fuente: elaboración propia.

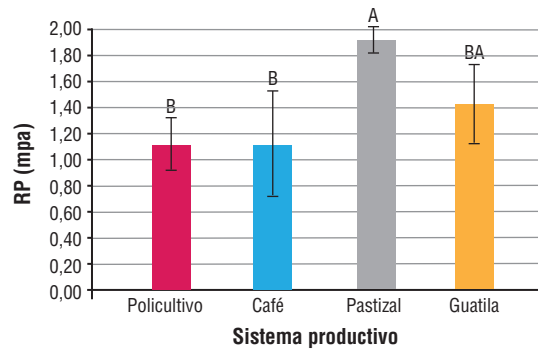


Figura 2. Valores de resistencia a la penetración.

Fuente: elaboración propia.

Los valores evidenciados de DA y RP encontrados en el pastizal y el cultivo de guatila coinciden con lo reportado por Estupiñán, Gómez, Barrantes y Limas (2009), quienes afirman que los mayores valores de estas dos variables pueden deberse al uso del monocultivo, a la labranza convencional para el arado del suelo y al pisoteo permanente del ganado por actividades de pastoreo semiintensivo. Esto conduce a una pérdida de estructura y una disminución del espacio poroso. Lo anterior también concuerda con lo encontrado por Daza, Hernández y Triana (2014), y Villazón, Martín, Rodríguez y Cobo (2015), quienes determinaron mayores valores de estas variables en áreas con fines pecuarios, con base en esto se puede afirmar que los SP de cultivo de guatila y de pastizal, a pesar del estado en reposo de este último, presentan compactación.

Los resultados obtenidos en el pastizal también se ven influenciados por la ausencia de cobertura arbórea, dado que, al estar expuesto directamente a temperaturas elevadas, la descomposición de la materia orgánica es más rápida, lo cual hace que el suelo disminuya la capacidad de absorción y retención de humedad. Esto se ve reflejado en menores densidades de microorganismos edáficos, encargados de mejorar la estructura y la porosidad, así como de generar mayor resistencia a

la compactación (Díaz, Hernández y Cabello, 2004; Vallejo et ál., 2012).

Los menores valores de DA y RP en el policultivo del presente estudio pueden deberse a la asociación de cultivos, que contribuye al aumento de la biodiversidad en el suelo, con lo cual evita el agotamiento fácil de los nutrientes debido al ingreso continuo de materia orgánica de variada calidad (Altieri, 1999). Además, los cultivos son ordenados en zanjas con el fin de que el agua no sature la tierra, para evitar el arrastre de materia orgánica y que el suelo quede descubierto, lo que se manifiesta en menores valores de RP y DA (Noguera y Vélez, 2011). Por otra parte, se logra un aprovechamiento óptimo del suelo tanto en el policultivo como en el cultivo de café orgánico gracias a que, al cubrirlos con biomasa vegetal derivada de los diferentes SP, se reprime la aparición de malezas y se evita la erosión por efecto del agua y del viento. Así mismo, el suelo cubierto guarda una mayor humedad, lo que beneficia a las comunidades biológicas encargadas de proveer diferentes servicios ecosistémicos (Prager y Castellanos, 1990).

3.1.2 Índice de estabilidad y estabilidad de agregados (IE y EA)

Con relación al índice de estabilidad (IE) y la estabilidad de agregados (EA), se encontraron diferencias significativas en los SP (Anova $p \leq 0,05$; 0,002 y 0,002). Para el caso del IE, se evidenció que esta fue significativamente mayor entre el policultivo y el cultivo de café frente al pastizal (Tukey $p \leq 0,05$; 0,001 y 0,009, respectivamente) (figura 3). Con relación a la variable EA, se evidenció que esta fue significativamente mayor en el pastizal en comparación con los demás sistemas productivos (Tukey $p \leq 0,05$; policultivo: 0,001, café: 0,007 y guatila: 0,003) (figura 4).

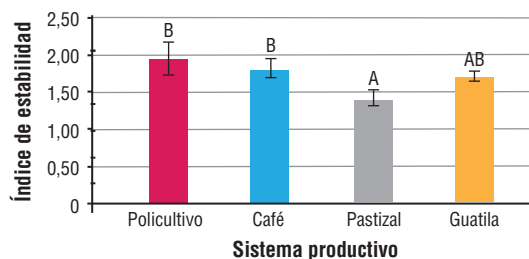


Figura 3. Índice de estabilidad de agregados. Fuente: elaboración propia.

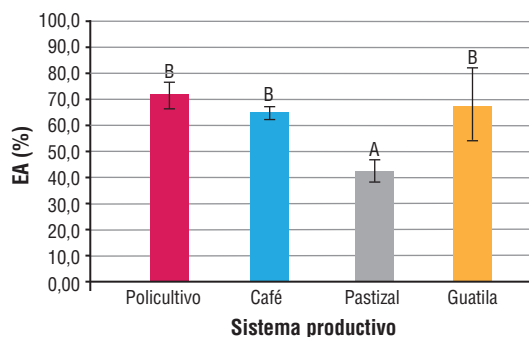


Figura 4. Estado de agregación. Fuente: elaboración propia

El policultivo y los cultivos de café y guatila presentaron mayores valores de EA (70%, 62% y 65%, respectivamente), en comparación con el del pastizal, que fue de 40%. Estudios realizados por Bottinellia et ál. (2017) han indicado que el estado de agregación es mayor en sistemas productivos bajo labranza reducida y fertilización orgánica que bajo fertilización química y labranza convencional (laboreo del suelo anterior a la siembra con maquinaria (arados), que corta e invierte total o parcialmente los primeros 15 cm de suelo).

El resultado obtenido de EA en el pastizal es menor al reportado por Álvarez et ál. (2008) en una pastura natural con ganado (98-100%) en Argentina. Este comportamiento se debe posiblemente al manejo convencional, que disminuyó el contenido de microorganismos, lo cual ocasiona un detrimento en la estructura y agregación de los suelos. Además, los autores también reportan

valores de estabilidad para asociaciones de cultivos ente 55 y 80%, rango en el que se encuentra el valor obtenido en el policultivo del presente estudio. Lo anterior se atribuye a la asociación de distintos cultivos, dado que esto incorpora materia orgánica al suelo a través del enterramiento manual de rastrojos, contribuyendo a una mayor estabilidad estructural y generando protección contra la erosión. Por otra parte, en relación con los cultivos de guatila, café orgánico y policultivo, Bottinellia et ál. (2017) reportaron una EA mayor en suelos bajo siembra directa con fertilizante orgánico (1,55 mm), lo cual sugiere que este comportamiento está relacionado con la acumulación de materia orgánica en la superficie del suelo. Además, de acuerdo con la clasificación realizada por Meza y Geissert (2003), se estima que el policultivo y la guatila presentan una mejor estabilidad en comparación con el cultivo de café (moderadamente estable) y el pastizal (inestable).

Además, para el caso del pastizal, es probable que la baja estabilidad y agregación del suelo sea consecuencia de actividades como la labranza convencional, que se encarga de disminuir el contenido de microorganismos y la proporción de macroagregados, lo cual es desfavorable para el mantenimiento de comunidades de hongos formadores de micorrizas y de agregados estables en el suelo (Lozano, Armbrrecht y Montoya, 2015). También se debe tener en cuenta que el pastoreo semiintensivo llevado a cabo por más de cinco años posiblemente contribuyó al rompimiento de los macro- y microagregados del suelo, y que, a pesar de que se encontraba en periodo de descanso, este tiempo no ha sido suficiente para la recuperación de su estabilidad estructural (Ayoubi, Emami, Ghaffari, Honarjoo y Sahrawat, 2014).

3.2 Propiedades biológicas

3.2.1 Recuento de heterótrofos totales y actividad enzimática de la catalasa

El recuento de heterótrofos totales y la actividad enzimática de la catalasa mostraron diferencias significativas entre los SP (Anova $p \leq 0,05$; 0,020 y 0,001). Para el recuento de heterótrofos totales, se evidenció que fue significativamente mayor para los cultivos de café y guatila frente al pastizal (Tukey $p \leq 0,05$; 0,031 y 0,026, respectivamente) (figura 5). Por otra parte, la actividad enzimática de la catalasa demostró ser significativamente mayor en el pastizal en comparación con los demás sistemas productivos (Tukey $p \leq 0,05$; policultivo: 0,000, café: 0,011 y guatila: 0,023) (figura 6).

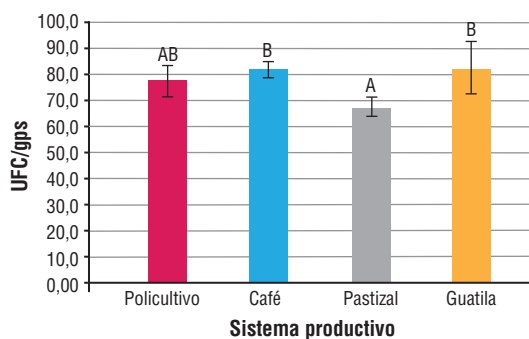


Figura 5. Recuento de heterótrofos totales.

Fuente: elaboración propia.

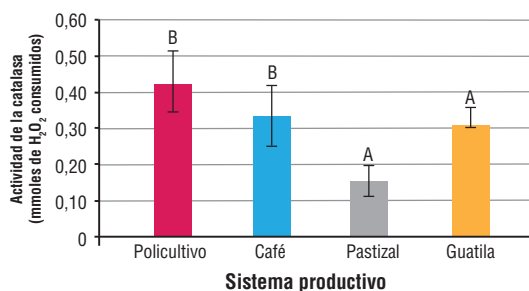


Figura 6. Actividad enzimática de la catalasa.

Fuente: elaboración propia.

Los datos obtenidos concuerdan con Ávila y Cruz (2008), que reportaron datos de log 8,6, 8,3 y 8,1 UFC/gps en sistemas productivos de bosque, pastizal y cafetal sin sombrero, respectivamente. Los resultados obtenidos en el pastizal se deben posiblemente a la labranza convencional utilizada, dado que reemplaza la estratificación del suelo por unas zonas más homogéneas con respecto a las características y distribución de los residuos, lo que lleva a una disminución en la densidad de microorganismos heterótrofos (Altieri, 1999). Otro factor importante que hay que tener en cuenta es el pisoteo del ganado, ya que este ocasiona la compactación del suelo y, con ello, modifica su estructura disminuyendo el volumen de los poros ocupados con aire y agua, lo cual genera un efecto negativo en la densidad de microorganismos edáficos, encargados de liberar enzimas en el suelo (Cardona y Sadeghian, 2005; Vallejo, 2013).

Por otra parte, los resultados obtenidos en el sistema productivo de guatila difieren con Beltrán (2014), quien reportó valores de heterótrofos totales entre 2,62 y 3,69 log de UFC/gps. Estas diferencias pueden estar determinadas por el tipo de manejo; por ejemplo, se ha evidenciado que el tipo de fertilización influye sobre la densidad, estructura y composición de las comunidades microbianas (Cubillos et ál., 2016). Además, el contenido de agua, materia orgánica y, en general, la disponibilidad de nutrientes limitaron el crecimiento de microorganismos heterótrofos.

Los valores de actividad enzimática de la catalasa difieren con Weiming et ál. (2013), quienes reportaron mayores valores en sistemas de pastizales y tierras de cultivo; en cambio, en el presente estudio se presentó mayor actividad biológica en los SP de policultivo, café y guatila, en comparación con el pastizal. Estas diferencias se deben posiblemente

al uso intensivo al que se sometió el suelo bajo este sistema, dado que la enzima catalasa es sensible a las prácticas agrícolas y pecuarias sostenidas por largos periodos de tiempo (Gawronska, Kulinska, Lenart y Jaskowska, 1992). De acuerdo con esto, se determinó que los valores altos de actividad biológica en los sistemas de policultivo y café pueden ser causa de su mayor porosidad y mejor estructura en comparación con los sistemas de guatila y pastizal. En este sentido, hay que tener en cuenta que la actividad biológica puede ser el resultado de cambios físicos y químicos del suelo, por lo que hay una expresión directa sobre la biomasa microbiana y la actividad enzimática (Samuel, Domuta, Ciobanu y Sandor, 2008).

Por otra parte, Samuel, Domuta, Ciobanu y Sandor (2008) evidenciaron mayor actividad enzimática en suelos bajo rotaciones de 2 y 6 cultivos. Esta situación se asemeja al sistema de policultivo analizado en el presente trabajo, que registró una mayor actividad enzimática de la catalasa, lo que indicaría la existencia de un microhábitat para la actividad microbiana, ya que una buena estructura del suelo protege el sitio activo de la enzima (Zhang, Zhijie, Chen, Jiang y Dongpo, 2009). Además, como lo indican Audesirk, Audesirk y Byers (2003), en este se desarrolla el complejo enzima-sustrato, a fin de promover las reacciones químicas dentro de la enzima.

3.3 Análisis multivariado

El análisis multivariado (ACP) permitió evaluar matrices complejas, con numerosas variables, y su principal ventaja consistió en conjugar en unas pocas variables, llamadas *componentes*, alta cantidad de información con base en las correlaciones existentes (Ramírez, Restrepo y Viña, 1997). Este análisis indicó un efecto significativo del uso del suelo sobre las propiedades físicas y biológicas, donde

las diferencias que se presentaron se pueden explicar en su mayoría, un 65% aproximadamente, de los cuales un 49% correspondió al componente 1 y un 16% al componente 2 (figura 7). Este efecto fue evidente en el diagrama de ordenación, en el cual es clara

la separación entre los diferentes usos de suelo: policultivo, pastizal y los cultivos de café y guatila. Allí se puede determinar que el pastizal presentó mayor diferencia respecto al resto de SP, como consecuencia de las diferencias en el manejo agrícola.

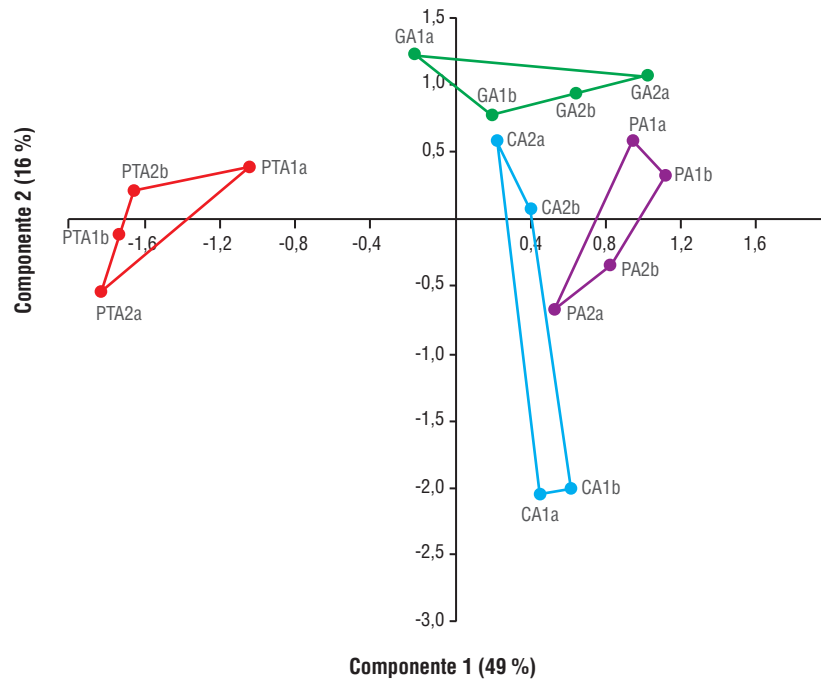


Figura 7. ACP de las variables fisicoquímicas y biológicas evaluadas para los diferentes usos de suelo (n = 4).

Fuente: elaboración propia.

Nota: Se muestra entre paréntesis el porcentaje de varianza explicada para cada componente principal. PT: pastizal; G: cultivo de guatila; P: policultivo, y C: cultivo de café orgánico.

Por otra parte, se evidenció que las variables que más contribuyeron a la separación entre los agrupamientos observados, en orden de importancia, fueron la estabilidad de agregados y la actividad enzimática de la catalasa, principalmente (tabla 3), lo que indica que estas variables demostraron ser más sensibles al cambio en el uso del suelo. Esto se debe principalmente a la capacidad para respon-

der a periodos de tiempo corto. Lo anterior concuerda con Ferreras et ál. (2009) y Vallejo (2013), quienes han determinado que los parámetros biológicos y físicos reaccionan de manera más rápida y son más sensibles a los cambios producidos por el manejo pecuario y agrícola; por lo tanto, podrían constituir una señal temprana y de utilidad para estimar la calidad edáfica.

Tabla 3. Valores de carga de cada variable (loadings)

Variable evaluada	Axis 1	Axis 2
EA	0,9511	0,0286
Actividad enzimática de la catalasa	0,8519	0,0849
RP	0,8451	0,1823
IE	0,7849	0,3709
Recuento de heterótrofos totales	0,5175	0,1611
DA	0,2831	0,7096

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

- El sistema productivo que presenta mejor calidad edáfica y, por lo tanto, es el sistema más sostenible es el policultivo. Esto se debe principalmente al gran aporte de materia orgánica y nutrientes que generan las asociaciones de cultivos que lo conforman, como también la fertilización orgánica realizada, lo que permite una mejor condición física, reflejada en una menor DA, RP y mayor estabilidad de agregados, factores que permiten la estimulación de la actividad y densidad biológica en el suelo. Por el contrario, el pastizal, a pesar de estar en reposo, evidencia un detrimento en su calidad edáfica, debido principalmente al manejo convencional recibido por varios años. Este manejo convencional puede haber contribuido a una menor cantidad y estabilidad de los agregados, así como una mayor compactación, lo que genera un ambiente poco adecuado para los microorganismos edáficos.
- Se evidenció que las variables físicas (estabilidad e índice de agregados) y biológicas (actividad enzimática de la catalasa) mostraron una mayor sensibilidad al manejo agrícola y pecuario en comparación con otras propiedades químicas. Además, se

evidenció un claro efecto del manejo agrícola entre los SP evaluados, de los cuales el pastizal es el que presentó una mayor diferencia en su comportamiento.

5. Recomendaciones

- Plantear estrategias de ganadería diferentes a las convencionales como, por ejemplo, sistemas agroforestales que integran simultánea y continuamente diferentes tipos de cultivos (p. ej., árboles, ganado y pasto), dado que mantienen protegido el suelo y diversifican y optimizan la producción sostenible. La implementación de buenas prácticas agrícolas en los sistemas productivos de pastizal y guatila permitirá evitar más adelante los altos costos para su recuperación.
- Realizar un monitoreo de las propiedades del suelo al menos una vez al año, en diferentes eventos climáticos, mediante indicadores de calidad de repuesta rápida (propiedades físicas y actividades enzimáticas) como los seleccionados en el presente estudio.
- Incentivar la aplicación de prácticas de asociación y rotación de cultivos, dado que el policultivo analizado presentó mejores condiciones de calidad edáfica.
- Realizar estudios de otras propiedades edáficas, tales como nutrientes (carbono orgánico, nitrógeno total, nitratos y fosforo disponible), actividades enzimáticas y biomasa microbiana.

Agradecimientos

Primeramente damos gracias a Dios por permitirnos tener tan buena experiencia dentro la universidad. A la Universidad Central, por facilitar la realización de este proyecto en el Campo Experimental de Tecnologías Am-

bientales (CETA) y el acceso a los laboratorios. A la profesora Victoria Vallejo, por sus conocimientos, sus orientaciones, su persistencia y por brindarnos el apoyo escrito e informativo durante el desarrollo del proyecto. A nuestros papás, por brindarnos el apoyo emocional para sacar a delante este trabajo de grado.

Referencias

- Agostini, M., Monterubbianesi, M., Studert, G. y Maurette, S. (2014). Un método simple y práctico para la determinación de densidad aparente. *Revista UDCA. Actualidad y Divulgación Científica*, 32 (2), 171-176.
- Altieri, M.A. (1999). *Bases científicas para una agricultura sustentable*. La Habana: Editorial Nordan Comunidad.
- Álvarez, M. F., Osterrieth, M. L., Laborde, V. B. y Montti, L. F. (2008). Estabilidad, morfología y rugosidad de agregados de argiúdoles típicos sometidos a distintos usos: su rol como indicadores de calidad física en suelos de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Ciencia del Suelo*, 26 (2), 115-129.
- APHA. American Public Health Association. (2000). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 18th ed. American Water Works Association and Water Environmental Federation.
- Audesirk, T., Audesirk, G. y Byers, B. E. (2003). *Biología: la vida en la tierra*. USA: Pearson Educación, 107.
- Ávila, F. y Cruz A. (2008). Efecto de coberturas vegetales y época climática sobre la densidad de microorganismos totales y heterótrofos en suelos de la ecorregión cafetera colombiana (tesis de grado). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Ayoubi, S., Emami, N., Ghaffari, N., Honarjoo, N. y Sahrawat, K. (2014). Pasture degradation effects on soil quality indicators at different hillslope positions in a semiarid region of western Iran. *Environmental Earth Sciences*, 71 (1), 375-381.
- Beltrán, M. (2014). Estudio comparativo de poblaciones microbianas totales y solubilizadoras de fosfato en suelos de páramo cultivados con papa (*Solanum tuberosum*) en Ventaquemada-Boyacá. *Investigación, Innovación, Ingeniería*, 1 (2), 56-74.
- Bottinellia, N., Angers, D., Hallaire, V., Michot, D., Guillou, C., Cluzeau, D. y Menasseri-Aubry, S. (2017). Tillage and fertilization practices affect soil aggregate stability in a Humic Cambisol of Northwest France. *Soil and Tillage Research*, 170, 14-17.
- Cepeda, I. y Sánchez, L. (2014). Diagnóstico dendrológico con enfoque ambiental, sistémico y fitogeográfico basado en el principio ecosistémico, Campo Experimental de Tecnologías Ambientales (CETA), vereda Petaluma, municipio de Cachipay (tesis de pregrado). Universidad Central, Bogotá.
- Cruz, A. B., Barra, J. E., Castillo, R. d. y Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Revista Ecosistemas*, 13 (2), 90-97.
- Cubillos, A., Vallejo, V., Arbeli, Z., Terán, W., Dick, R., Molina, C. y Roldán, E. M. (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.
- Daza, M., Hernández, F. y Triana, F. (2014). Efecto del uso del suelo en la capacidad de almacenamiento hídrico en el Páramo

- de Sumapaz - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 67 (1), 7189-7200.
- Díaz, G., Hernández, T. y Cabello, R. (2004). La rotación de cultivos, un camino a la sostenibilidad de la producción arrocera. *Cultivos Tropicales*, 25 (3), 19-44.
- Doran, J., Coleman, D., Bezdicek, D. y Stewart, B. (1994). *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, WI: Soil Science Society of America.
- Estupiñán, L., Gómez, J., Barrantes, V. y Limas, L. (2009). Efecto de actividades agropecuarias en las características del suelo en el páramo El Granizo, (Cundinamarca - Colombia). *Revista UDCA. Actualidad y Divulgación Científica*, 12 (2), 79-89.
- Ferreras, L., Toresani, S., Bonel, B., Fernández, E., Bacigaluppo, S., Faggioli, V. y Beltrán, C. (2009). Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. *Ciencia del Suelo*, 27 (1), 103-114.
- Friedman, D., Hubbs, M., Tugel, A., Seybold, C. y Sucik, M. (2001). *Guidelines for soil quality assessment in conservation planning*. United States Department of Agriculture. Consultado en <https://bit.ly/2C6dYYy>.
- García, Y., Ramírez, W. y Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35 (2).
- Gawronska, A., Kulinska, D., Lenart, S. y Jaskowska, H. (1992). The effect of the maize monoculture on the biological properties of soil and on the yields of plants. *Polish Journal Soil Science*, 63 (10), 84-94.
- IGAC. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (1990). Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Bogotá: autor.
- Johnson, J. y Temple, K. (1964). Some variables affecting the measurement of "catalase activity" in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 28 (2), 207-209.
- Lobo, D. y Pulido, M. (2006). Métodos e índices para evaluar la estabilidad estructural de los suelos. *Venesuelos*, 14 (1), 22-37.
- Meza, E. y Geissert, D. (2003). Estructura, agregación y porosidad en suelos forestales y cultivados de origen volcánico del Cofre de Perote, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana*, 5 (2), 57-61.
- Noguera, M. y Vélez, J. (2011). Evaluación de algunas propiedades físicas del suelo en diferentes usos. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 28 (1), 40-52.
- Norma Oficial Mexicana-021. (2002). *Norma oficial mexicana NOR-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*. Mexico.
- Orozco, D. (2011). Propuesta de indicadores de calidad edafológicos para valorar la influencia de los sistemas productivos sobre algunas propiedades físicas y químicas en suelos oxisoles del piedemonte llanero colombiano (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Prager, M. y Castellanos, M. (1990). La biodiversidad: una estrategia a favor del control biológico. *Colombia Ciencia y Tecnología*, 8 (3).
- Ramírez, A., Restrepo, R. y Viña, G. (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulación y aplicación. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1 (3), 135-153.
- Ramírez, M. (2004). Indicadores de estado: factores biológicos que limitan la calidad agrícola de los suelos. En *Primer Taller Nacional sobre Indicadores de Calidad de Suelo*. Palmira: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

- Ramírez, M. E., Limas, E., Ortiz, P. y Díaz, A. R. (2011). Degradación de suelos por actividades antrópicas en el norte de Tamaulipas, México. *Papeles de Geografía*, 53-54, 77-88.
- Cardona, D. y Sadeghian, S. (2005). Caracterización de la fertilidad del suelo en monocultivos de café. *Colombia Forestal*, 9 (18), 87-97.
- Samuel, A., Domuta, C., Ciobanu, C. y Sandor, M. (2008). Field management effects on soil enzyme activities. *Romanian Agricultural Research*, 25, 61-68.
- Lozano, J., Armbrecht, I. y Montoya, J. (2015). Hongos formadores de micorrizas arbusculares y su efecto sobre la estructura de los suelos en fincas con manejos agroecológicos e intensivos. *Acta Agronómica*, 64 (4), 289-296.
- Navarrete, A., Vela, G., López, J. y Rodríguez, M. (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *ContactoS*, 80, 29-37.
- Vallejo et ál. (2012). Efecto del establecimiento de sistemas silvopastoriles sobre la comunidad microbiana edáfica (total y de bacterias oxidadoras de amonio) en la reserva natural El Hatico-Valle. *Scientiarum*, 128-132.
- Vallejo, E. (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal*, 16 (1), 83-99.
- Villazón, J., Martín, G., Rodríguez, Y. y Cobo, Y. (2015). Resistencia a la penetración en un Vertisol Crómico con diferentes usos, manejos y sitios de muestreo. *Pastos y Forrajes*, 38 (2), 162-169.
- Weiming, L., Luo, J., Zhuang, X., Shen, W., Zhang, Y., Li, S. y Huang, H. (2013). Efficient preparation of enantiopure l-tert-leucine through immobilized penicillin G acylase catalyzed kinetic resolution in aqueous medium. *Biochemical Engineering Journal*, 83, 116-120.
- Wildner, L. d. y Veiga, M. d. (2016). Erosión y pérdida de fertilidad del suelo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Consultado en <https://bit.ly/2KEqqT8>.
- Zhang, L., Zhijie, W., Chen, L. J., Jiang, Y. y Dongpo, L. (2009). Kinetics of catalase and dehydrogenase in main soils of northeast China under different soil moisture conditions. *Agricultural Journal*, 4 (2), 113-120.