

# Selección de indicadores de calidad edáfica en diferentes sistemas productivos del municipio de Cachipay (Fase 2)

## Selection of soil quality indicators in different productive systems of the municipality of Cachipay (Phase 2)

Angélica Paola Mendoza Hernández<sup>1</sup>, María Fernanda Bautista Murcia<sup>2</sup>  
y Victoria Eugenia Vallejo Quintero<sup>3</sup>

### Resumen

Las prácticas de manejo agropecuario pueden modificar negativamente las propiedades del suelo y tener graves consecuencias sobre su funcionalidad y sostenibilidad. El presente estudio evaluó el efecto sobre la calidad edáfica generado por distintos manejos en cinco sistemas agropecuarios productivos (policultivo, café, pastizal, guatila y bosque de guadua) del Campo Experimental de Tecnologías Ambientales de la Universidad Central ubicado en el municipio de Cachipay, Cundinamarca. Se seleccionaron dos áreas independientes representativas para cada sistema, se definieron dos cuadrantes en cada área y de estos se tomaron dos muestras compuestas para un total de 20 muestras de suelo. Para evaluar el efecto del manejo agropecuario sobre la calidad edáfica se analizaron diferentes propiedades físicas, químicas y microbiológicas. El policultivo y el café presentaron mayores contenidos de carbono orgánico

y humedad, valores de pH cercanos a la neutralidad y baja densidad aparente. El pastizal mostró mayores valores en el índice de estabilidad estructural, el diámetro ponderado medio y el diámetro geométrico medio. Como un conjunto mínimo de datos para evaluar la calidad edáfica, es posible incluir las variables: bacterias solubilizadoras de fosfato, pH, diámetro geométrico medio e índice de estabilidad estructural.

**Palabras clave:** calidad del suelo, degradación del suelo, sistemas

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Ambiental, integrante del Grupo de Investigación Agua y Desarrollo Sostenible. Correo electrónico: amendozah@ucentral.edu.co.

<sup>2</sup> Estudiante de Ingeniería Ambiental, integrante del Grupo de Investigación Agua y Desarrollo Sostenible. Correo electrónico: mbautistam1@ucentral.edu.co.

<sup>3</sup> Profesora asociada del Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad Central. Correo electrónico: evallejoq@ucentral.edu.co.

agropecuarios productivos, actinomicetos, bacterias solubilizadoras de fosfato, sostenibilidad agrícola.

### Abstract

Agricultural management practices can negatively modify soil properties and cause serious effects in its functionality and sustainability. This study evaluated the effect on soil quality generated by different management techniques in six agricultural production systems (APS) (polyculture, coffee, pasture, guatila and guadua forest) of Campo Experimental de Tecnologías Ambientales - Universidad Central located in the municipality of Cachipay, Cundinamarca. Two independent areas that represented each system were selected, two quadrants were established within each area, and from

these two composite samples were taken for a total of 20 soil samples. To evaluate the effect of agricultural management on edaphic quality, different physical, chemical, and microbiological properties were analyzed. Polyculture and coffee showed higher contents of organic carbon and humidity, pH values close to neutrality and low bulk density. Pasture registered higher values in stability index, weighted mean diameter and geometric mean diameter. As a minimum set of data to evaluate soil quality it is possible to include the variables: phosphate solubilizing bacteria, pH, geometric mean diameter, and stability index.

**Keywords:** soil quality, soil degradation, agricultural systems, actinomycetes, phosphate solubilizing bacteria, sustainable agriculture.

## 1. Introducción

El suelo es primordial para la vida al ser materia prima de múltiples actividades que satisfacen las necesidades alimentarias y económicas de los seres humanos (García, Ramírez y Sánchez, 2012). Tradicionalmente, la agricultura se ha asociado con prácticas insostenibles como sistemas de labranza convencional, quema de residuos de cosecha, monocultivo, uso indiscriminado de agroquímicos, sobrepastoreo y deforestación, que han generado una degradación y pérdida de la calidad de los suelos (FAO, 2008). En Colombia, a lo anterior se suman los conflictos por sobreutilización y subutilización del suelo y la expansión de actividades ganaderas en suelos con vocación agrícola, que también han contribuido al detrimento de la calidad edáfica (IGAC,

2019). Se estima que un cuarto de toda Colombia (agricultores, ganaderos y empresarios del sector) debe reorientar sus prácticas en torno a un mejor manejo del suelo.

La calidad del suelo se define, según Doran y Parkin (1994), como “la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sustentar la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat”. Esta calidad puede ser alterada positiva o negativamente según el uso y manejo del suelo. Por lo tanto, es indispensable contar con herramientas que permitan conocer y valorar el efecto de distintos sistemas agropecuarios productivos (SAP) sobre la calidad edáfica mediante el uso de indicadores de calidad del suelo.

Los indicadores de calidad del suelo son propiedades físicas, químicas y/o microbiológicas fáciles de medir, objetivas, sensibles a los cambios que sufre el suelo (degradación y recuperación) y preferiblemente aplicables a un rango de ecosistemas y condiciones (Raiesi y Kabiri, 2016; Vallejo, 2012). Sin embargo, no todos los indicadores cumplen con estos criterios y no pueden ser implementados en cualquier ecosistema (natural o antrópico) en los mismos tipos de suelo y condiciones ambientales (García et ál., 2012; Vallejo, 2013). Aunque estos indicadores constituyen una herramienta útil para la toma de decisiones enfocada a garantizar la sostenibilidad y productividad del suelo y los SAP que en este se desarrollan, su evaluación y selección debe hacerse según las condiciones y restricciones de cada tipo de suelo y SAP (Muscolo, Settineri y Attinà, 2015). Para esto es preciso seleccionar un conjunto mínimo de datos (CMD) que permita comprender los procesos implementados en el suelo, evaluar condiciones o tendencias, comparar transversalmente sitios o situaciones, valorar metas y objetivos, y brindar información preventiva temprana (Bogado, 2013). De esta forma, se pueden tomar acciones correctivas según el manejo dado en los SAP para prevenir o mitigar procesos de degradación progresiva de los suelos (MinAmbiente, 2016).

Algunos autores han evidenciado que los indicadores microbianos son de mayor utilidad y aplicabilidad en comparación con los indicadores físico-químicos a la hora de evaluar la calidad edáfica, ya que presentan mayor sensibilidad a cambios en el uso y manejo del suelo (Balsler, Kinzig y Fires, 2002; Malchair et ál., 2010). La mayoría de los procesos que determinan la calidad del suelo son realizadas por microorganismos, por ello se considera que cualquier factor que inhibe su densidad

o actividad podría tener graves consecuencias en la fertilidad del suelo y su calidad (Vallejo, 2013).

Los procesos ecosistémicos son llevados a cabo por dos grupos de microorganismos: a) los generalistas, que se encargan de funciones amplias o redundantes (degradación de la materia orgánica, humificación y formación de la estructura edáfica) y b) los especializados (nitrificantes, desnitrificantes, fijadores de nitrógeno y solubilizadores de fosfato), que ejecutan procesos restringidos y específicos en el ecosistema. De esta forma, si la alteración como consecuencia del manejo agropecuario genera un impacto en la densidad y/o la actividad de los microorganismos del primer grupo, otros microorganismos cumplirían la misma función. En tal caso, una alteración de la biodiversidad probablemente no tendría un impacto sobre los procesos del suelo y el funcionamiento ecosistémico (Garbisu et ál., 2007). Por el contrario, si esto ocurre en los grupos especializados que llevan a cabo funciones restringidas, estrechas o exclusivas, tendría repercusiones negativas en el suelo y el ecosistema (Nielsen y Windig, 2002). Por ello, uno de los métodos más utilizados para evaluar la calidad del suelo es la medición de grupos funcionales como las bacterias solubilizadoras de fosfato (BSF), reconocidas promotoras de crecimiento vegetal cuya afectación podría perturbar la disponibilidad de nutrientes en el suelo y generar así un detrimento de la productividad agrícola y la calidad ambiental (Beltrán-Pineda, 2014; Cisneros y Sánchez, 2015).

La investigación realizada por Hernández y Parra (2017) en la misma zona de estudio mostró que las propiedades con mayor sensibilidad al uso agropecuario fueron la estabilidad de agregados, el diámetro geométrico medio (DGM), el diámetro ponderado medio

(DPM) y la actividad enzimática de la catalasa. A partir de esto se concluyó que la mejor calidad edáfica se presentó en el policultivo debido al aporte de materia orgánica (MO) y nutrientes de las asociaciones de cultivo que lo conforman. Por el contrario, el pastizal (PA) mostró un detrimento en su calidad que podría atribuirse al manejo convencional que ha recibido durante varios años, el cual generó compactación y disminución en la estabilidad de los agregados y deterioró la densidad microbiana de heterótrofos totales.

El presente estudio dio continuidad a la investigación de Hernández y Parra (2017) en los SAP del Campo Experimental de Tecnologías Ambientales (CETA) de la Universidad Central ubicado en el municipio de Cachipay, Cundinamarca. No obstante, se desarrolló en una época de muestreo diferente y además de los indicadores utilizados por estos investigadores, se seleccionaron dos grupos funcionales microbianos de gran importancia en la calidad edáfica: las BSF y los actinomicetos. El objetivo fue evaluar el efecto generado por los manejos de los SAP más representativos sobre la calidad del suelo del CETA mediante el uso de indicadores físicos, químicos y microbiológicos para establecer un CMD que permitiera evaluar la calidad de los suelos en investigaciones futuras.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Descripción del área de estudio

El suelo recolectado fue tomado en el CETA, que se encuentra ubicado en el municipio de Cachipay, vereda Petaluma. La finca tiene un área de 9,61 ha distribuidas

en territorios artificializados, agrícolas, bosques-áreas seminaturales y superficies acuíferas. Los cuerpos de agua representan la mayor parte de la extensión, por lo que la vocación de este terreno es predominantemente agropecuaria (80%) (Cepeda y Sánchez, 2014). El régimen de lluvias que se presenta en el municipio de Cachipay es bimodal, con dos periodos secos entre los meses de enero y julio y dos periodos de alta precipitación entre abril y octubre. El uso actual del suelo es de ganadería extensiva con pasto kikuyo y en algunos sectores se explotan cultivos como papa, mora, flores, café y frutas (Concejo Municipal de Cachipay, 2000).

### 2.2 Descripción y muestreo del suelo

En septiembre de 2016 se realizó un evento de muestreo en el que se seleccionaron dos áreas independientes para cada SAP —policultivo (PO), café (C), pastizal (PA), guatila (G) y bosque de guadua (BG)— cuyos usos de suelo se indican en la tabla 1. Dentro de cada área se establecieron dos cuadrantes (2,5 m x 2,5 m) en los que se tomaron muestras aleatorias constituidas de 20 submuestras utilizando barrenos metálicos. Después, sobre un plástico se mezclaron las submuestras para homogeneizarlas y de allí se seleccionó una muestra compuesta de 1 kg. Finalmente, cada muestra compuesta fue almacenada en bolsas de plástico. Una parte fue tamizada (2 mm) para remover partículas grandes y materiales como hojas, tallos y raíces, y luego fue almacenada a temperatura ambiente (análisis físico-químicos); las otras se almacenaron a una temperatura de 4 °C (análisis microbiológicos) para su correspondiente análisis en el laboratorio de la Universidad Central.

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

SAP	Características principales	Prácticas realizadas al suelo
Policultivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Edad de establecimiento: 4 años.</li> <li>• Extensión del sistema productivo: 1,3 ha.</li> <li>• Constituido por cultivos de plátano, flores (anturios), yuca y maíz sembrados entre filas y zanjas para brindar sombra al cultivo de anturios mediante el plátano y el maíz.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manejo orgánico.</li> <li>• Nivel de mecanización bajo.</li> <li>• Labranza manual con ayuda de azadón y pica en momento de siembra y cosecha.</li> <li>• Fertilización orgánica cada tres meses con cereza de café y hierbas derivadas de los diferentes sistemas productivos existentes.</li> </ul>
Café	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Edad de establecimiento: 3 años.</li> <li>• Extensión del sistema productivo: 0,6 ha.</li> <li>• Especie de café: arábica.</li> <li>• Prácticas poscosecha: recolección manual, despulpación semimecánica, lavado, secado al sol y recolección de café cada dos años.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manejo orgánico.</li> <li>• Nivel de mecanización bajo.</li> <li>• Labranza manual con ayuda de azadón y pica en momento de siembra y cosecha.</li> <li>• Fertilización orgánica cada seis meses con cereza de café y hierbas derivadas de los diferentes sistemas productivos existentes.</li> <li>• Aplicación del insecticida Lorsban cada dos años para manejo de plagas y enfermedades.</li> </ul>
Pastizal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Edad de establecimiento: 7-10 años.</li> <li>• Extensión del sistema productivo: 2,0 ha.</li> <li>• Tiempo de descanso: 14 meses.</li> <li>• Pastoreo de animales bovinos (aprox. 10 vacas/ha).</li> <li>• Tipo de pastos predominantes: <i>Pennisetum clandestinum</i> (kikuyo) y <i>Cynodon dactylon</i> (grama).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manejo convencional.</li> <li>• Nivel de mecanización medio-alto.</li> <li>• Uso de glifosato y ronda aplicada cada tres meses para el control y eliminación de hierbas y arbustos.</li> <li>• Labranza mecánica con azadón, pica y tractor.</li> <li>• Fertilización química nitrogenada con urea y Triple 15.</li> </ul>
Guatila	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Edad de establecimiento: 3 años.</li> <li>• Extensión del sistema ganadero: 0,1 ha.</li> <li>• Especie de guatila: <i>Sechium edule</i>.</li> <li>• Dispuesto en enredadera de 1 metro.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nivel de mecanización bajo.</li> <li>• Labranza manual con ayuda de azadón y pica en momento de siembra y cosecha.</li> <li>• Aplicación del insecticida Lorsban cada año para manejo de plagas y enfermedades.</li> <li>• Fertilización orgánica con gallinazo cada ocho meses.</li> </ul>
Bosque de guadua	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Edad de establecimiento: 20 años.</li> <li>• Extensión del sistema: 2 ha aprox.</li> <li>• Especies: guadua cuadrada, triangular y tensegrity, <i>Guadua spp.</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anteriormente se usaba para ganado.</li> <li>• Actualmente es un terreno sin intervención humana alguna.</li> </ul>

Fuente: adaptada de Hernández y Parra (2017).

## 2.3 Métodos de estudio

La tabla 2 presenta los métodos físico-químicos y microbiológicos empleados para el estudio.

Tabla 2. Métodos de estudio

Análisis	Propiedad	Método
Análisis físicos	Distribución de agregados y estabilidad estructural (tamices: 0,25; 0,5; 1; 2 y 4 mm)*	Lobo y Pulido (2011)
	Humedad	Peso seco; IGAC (1990)
	Densidad real	Picnómetro; Norma Oficial Mexicana-021 (2002)
	Densidad aparente	Valencia (2004)
	Porosidad	
	Textura	Kit LaMotte
	Color	Tabla de Munsell
Análisis químicos	pH	Método 9045c; EPA (1995)
	Carbono orgánico	Yanine (2010)
Análisis microbiológicos	Abundancia de actinomicetos	Goodfellow y Williams (1983)
	Densidad de solubilizadores de fósforo	Nautiyal (1999)

\* A partir de esta propiedad se calculó el IE, el DPM y el DGM.

Fuente: adaptada de Hernández y Parra (2017).

## 2.4 Análisis estadístico

Se confirmó la distribución normal de los datos por medio de la prueba Shapiro-Wilk. Para evaluar el impacto de los diferentes sistemas productivos sobre las propiedades físico-químicas y microbiológicas del suelo, se utilizó el análisis de varianza (Anova) y la prueba *post hoc* de Tukey con una significancia del 5%. Además, se realizó un análisis de correlaciones de Pearson para determinar las relaciones entre las diferentes variables. Todos estos análisis se hicieron mediante el programa IBM SPSS Statistics 24. Finalmente, se llevó a cabo un análisis multivariado en el programa PAST para determinar los indicadores que presentaron mayor sensibilidad al manejo de cada SAP.

## 3. Resultados y discusión

Los SAP evaluados mostraron diferencias significativas (Anova,  $p \leq 0,05$ ) en la mayoría de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas con excepción de la densidad real, la porosidad y la resistencia a la penetración (tabla 3).

### 3.1 Propiedades físicas

#### 3.1.1 Color y textura

Todos los SAP analizados presentaron la misma clase textural franco arenosa, que hace referencia a suelos de textura moderadamente gruesa. Estos suelos se caracterizan por ser fáciles de labrar, absorber y conducir

**Tabla 3.** Propiedades físico-químicas de los sistemas agropecuarios productivos

SAP		IE	DPM (mm)	DGM (mm)	H (%)	Porosidad (%)	DA ( $\frac{g}{cm^3}$ )	RP (Mpa)	Clase textural	pH	CO (%)
Policultivo	X	2,27±	1,78±	0,31±	32,81±	51,04±	0,74±	1,14±	Franco arenosa	6,01±	7,13±
	DS	0,39	0,18	0,16	4,22	16,61	0,05	0,09		0,50	0,92
Café	X	2,19±	1,99±	0,48±	29,32±	53,95±	0,76±	1,24±	Franco arenosa	5,59±	6,59±
	DS	0,45	0,28	0,21	5,38	11,28	0,08	0,14		0,12	0,99
Pastizal	X	1,58±	2,43±	0,80±	24,42±	49,22±	0,83±	1,13±	Franco arenosa	4,66±	2,64±
	DS	0,53	0,4	0,30	3,14	15,31	0,01	0,05		0,18	0,52
Guatila	X	1,80±	2,07±	0,52±	31,14±	44,56±	0,82±	1,31±	Franco arenosa	5,58±	3,30±
	DS	0,32	0,25	0,20	1,12	7,75	0,06	0,15		0,36	0,46
Bosque de guadua	X	1,01±	2,35±	0,63±	31,04±	51,70±	0,78±	1,16±	Franco arenosa	5,50±	2,49±
	DS	0,13	0,08	0,10	1,43	13,40	0,08	0,09		0,22	0,54

IE: índice de estabilidad; EA: estabilidad de agregados; DPM: diámetro ponderado medio; DGM: diámetro geométrico medio; H: humedad; DA: densidad aparente; RP: resistencia a la penetración; CO: carbono orgánico; X: promedio; DS: desviación estándar (n=4).

Fuente: elaboración propia.

rápidamente el agua y ser menos susceptibles a la erosión en comparación con suelos de texturas medias o finas (IGAC, 2000). También tienden a ser secos y de baja-mediana fertilidad natural debido a su menor retención de agua y nutrientes.

Los sistemas de PO, C y BG presentaron predominancia de los colores negro (10 YR 2/1), café oscuro (10YR 3/3), café muy oscuro (10 YR 2/2) y café oliva oscuro (2,5 YR 3/4). El color café oscuro evidenciado en el PO y el C podría asociarse con los altos porcentajes de carbono orgánico (CO) encontrados en dichos SAP (tabla 1). Generalmente, los colores negro, pardo o café en el suelo son consecuencia de la acumulación de MO procedente de la muerte y descomposición de materiales vegetales y organismos vivos (hojas, raíces, microorganismos y macroorganismos) en los horizontes superiores. También tiene relación con los ácidos húmicos presentes. En

el caso del PO y el C, la MO se deriva de la fertilización orgánica con cereza de café y los residuos del material orgánico proveniente de los diferentes SAP.

En la G y el PA se presentó el color gris oscuro, como el café/gris muy oscuro (10 YR 3/2), que se puede asociar a posibles depósitos de carbonato de calcio, afloración de sales o remoción de hierro. Estos procesos permiten almacenar grandes cantidades de minerales como cuarzo, arcillas silicatadas, yeso, caolinita y feldespatos, los cuales presentan dicho color. Además, algunas zonas de Cundinamarca se encuentran bajo la influencia de cenizas volcánicas y los procesos de andolización son altamente influyentes en la formación de sus suelos. Mediante la transformación de los materiales piroclásticos, estos procesos generan productos alofánicos que establecen uniones estables con compuestos húmicos y producen así una

melanización superficial, es decir, una coloración oscura. El Concejo Municipal de Cachipay Cundinamarca (2000) reportó que los colores predominantes en el municipio de Cachipay son el negro y el pardo grisáceo oscuro debido principalmente a altos contenidos de CO. Así se evidenció en los sistemas de G (3,3%) y PA (2,64%), que, pese a tener los menores porcentajes de CO, alcanzaron a ser clasificados como de “alto contenido” en los suelos de Cundinamarca (IGAC, 2000).

### 3.1.2 Densidad aparente

Esta propiedad mostró diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre los SAP evaluados y fue mayor en el PA, la G, el C y el BG en comparación con el PO ( $p \leq 0,05$ ) (figura 1).

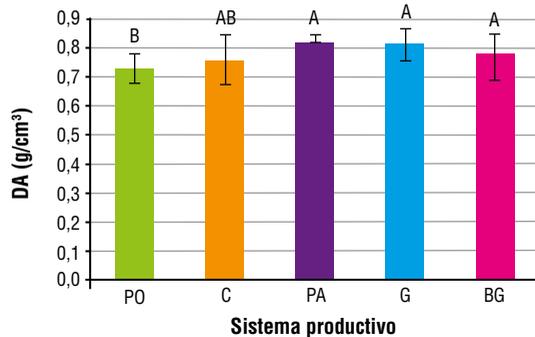


Figura 1. Densidad aparente de los sistemas productivos.

Fuente: elaboración propia.

El comportamiento de la densidad aparente (DA) entre los SAP evaluados coincide con los datos reportados por Hernández y Parra (2017). Los autores atribuyeron los menores valores de DA a un mayor ingreso de material orgánico, que contribuye a una mayor biomasa superficial y subterránea y, por lo tanto, a valores superiores de CO. Esto permitió evidenciar una mejor estabilidad de los agregados relacionada con una mayor densidad y actividad microbiana para mantener en buen estado físico el suelo.

Se evidenciaron bajos valores de DA en el PO y el C, lo cual podría estar relacionado con el menor uso de herramientas y equipos para el laboreo del suelo. Esto se traduce en un menor número de pasadas sobre cada hectárea, una menor presión sobre el suelo y, por tanto, una menor compactación. Por otro lado, los valores de DA podrían asociarse con mayores contenidos de CO en dichos SAP, lo que se evidenció a través de la correlación negativa entre la DA y el CO (Pearson,  $r = -0,609$ ,  $p \leq 0,05$ ).

Agbede y Afolabi (2014) también han reportado que a medida que aumenta el contenido de MO y el espacio poroso, disminuye la DA (Agbede y Afolabi, 2014). Esto puede estar asociado con los ingresos de material vegetal, el cual es más ligero que el material mineral y propicia una mejor estabilidad de los agregados. La estabilidad permite el crecimiento de microorganismos encargados de la mineralización de la MO, favorece las condiciones de humedad y facilita el flujo del aire, factores que contribuyen a una mayor resistencia a la degradación física y disminuye la DA. En contraste, se evidenciaron mayores valores de DA en el PA, lo cual se puede asociar al menor contenido de CO y menor densidad de actinomicetos. Los resultados evidencian que incluso después de tener 14 meses de descanso, el sistema aún muestra compactación.

### 3.1.3 Índice de estabilidad

Esta propiedad registró diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ), siendo mayor en el PA en comparación con el PO, el C, la G y el BG (Tukey  $p \leq 0,05$ ; 0,009, 0,011, 0,015 y 0,027, respectivamente) (figura 2).

Diferentes autores indican que el contenido de MO, el tipo de humus y los óxidos de hierro y aluminio pueden favorecer la estabilidad estructural del suelo. Además, estos óxidos

generan enlaces fuertes entre la arcilla y la MO, lo cual tiende a aumentar la resistencia y la estabilidad de los agregados (Vera y López, 1995).

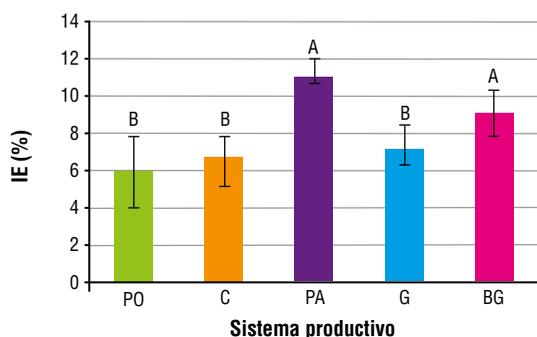


Figura 2. Índice de estabilidad de agregados de los sistemas productivos.  
Fuente: elaboración propia.

Los resultados del índice de estabilidad (IE) en los sistemas estudiados difieren de los hallazgos de Hernández y Parra (2017). Los autores asociaron los mayores valores de IE en el PO (1,93%) y el C (1,83%) con la actividad biológica posiblemente generada por la estimulación de microorganismos que participan en los procesos de formación y estabilidad de agregados (p. e., hongos totales y hongos arbusculares micorrícicos), los cuales secretan glomalina y favorecen la unión y formación de agregados muy estables. Por el contrario, los menores valores se relacionaron con la labranza convencional y el pastoreo semiintensivo realizado anteriormente, actividades que generan pérdida de algunas propiedades (entre ellas la MO) y rompimiento de los agregados.

En el presente estudio, los menores niveles de IE se presentaron en el PO y el C. Esto podría indicar que dicha variable no solo depende del contenido de CO, sino también de la calidad de la MO que se incorpora al suelo. Por su parte, el PA presentó los mayores valores de IE, debido posiblemente a una recuperación de esta propiedad como consecuencia

del descanso. No obstante, esto no fue evidente para el caso de la DA y la resistencia a la penetración (RP).

En general, todos los sistemas presentaron un IE bajo debido tal vez a la clase textural de los suelos, específicamente al alto contenido de arena, ya que los suelos excesivamente arenosos poseen baja agregación. Por tal razón, la estabilidad del suelo tiende a ser menor en zonas con mayor contenido de arena. El bajo IE encontrado en el PO, el C y la G podrían relacionarse con el laboreo tradicional bajo el que se encuentran estos sistemas, que puede reducir el tamaño de los agregados del suelo y disminuir así su capacidad de infiltración y contenido de CO (Moreno, González y Egidio, 2015).

### 3.1.4 Diámetro ponderado medio y diámetro geométrico medio

Estas propiedades presentaron diferencias significativas (Anova  $p \leq 0,05$ ; 0,018 y 0,038) entre los SAP evaluados. El diámetro ponderado medio (DPM) fue significativamente mayor en el PA y el BG en comparación con el PO (Tukey  $p \leq 0,05$ ; 0,022 y 0,047, respectivamente) (figura 3). En el caso del diámetro geométrico medio (DGM), se observaron diferencias significativas entre el PO y el PA (Tukey  $p \leq 0,05$ ; 0,023).

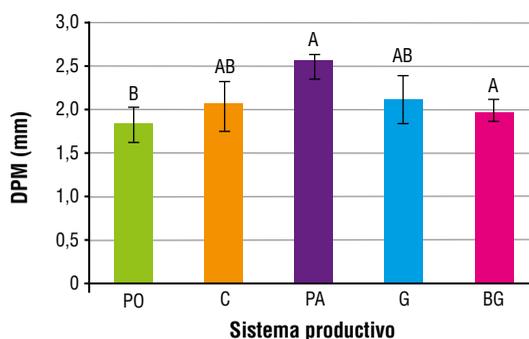


Figura 3. Diámetro ponderado medio de los sistemas productivos.

Fuente: elaboración propia.

Algunos autores indican que los valores de DPM y DGM se pueden relacionar con la formación de complejos arcillo-húmicos, es decir, el contenido en arcilla, calcio y MO del suelo. Los menores valores de estas variables pueden ser causados por la erosión y pérdidas de MO provocadas por los diferentes manejos que se pueden implementar en los SAP, reduciendo en gran medida los agregados e impidiendo que se generen los materiales necesarios para la unión de las partículas entre sí (Gabioud, Wilson y Sasal, 2011; Safar, González y Capelli, 2011).

En esta variable, los resultados de todos los SAP, excepto el PA, coincidieron con los hallazgos de Hernández y Parra (2017), quienes evidenciaron mayores valores de DGM y DPM en los sistemas de G (0,46 mm y 1,99 mm, respectivamente) y PO (0,39 mm y 2,10 mm, respectivamente). Según los autores, los valores DGM y DPM reportados indican un menor tamaño de los agregados del suelo debido posiblemente a la fragmentación mecánica que se genera por efecto del laboreo.

En el presente estudio los valores DPM y DGM de todos los sistemas estuvieron por debajo de 2,47 mm y 0,83 mm, respectivamente. Los mayores valores se presentaron en el PA, lo cual se puede asociar, como el IE, al descanso en el que se encontraba dicho sistema. Esto ha influenciado positivamente la proporción de macro- y microagregados presentes en el suelo y, por tanto, las variables DPM y DGM.

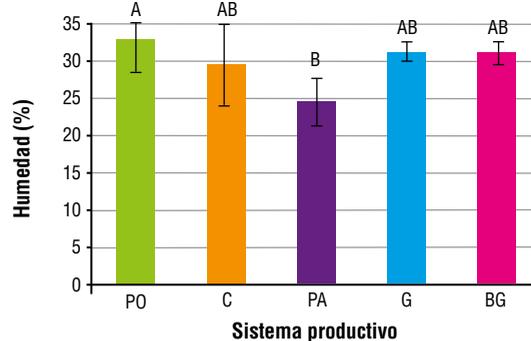
### 3.1.5 Humedad

Esta propiedad reflejó diferencias significativas (Anova  $p \leq 0,05$ ; 0,034) entre los SAP evaluados, siendo significativamente mayor en el PO (Tukey  $\leq 0,05$ ; 0,026) (figura 4).

Algunos autores atribuyen los altos porcentajes de humedad en un sistema a la cantidad de árboles y cobertura vegetal. Asimismo,

ciertas prácticas aportan a esta propiedad como, por ejemplo, la labranza cero. Esta se realiza mediante siembra directa sobre el rastrojo, es decir, sin remover la cobertura del suelo, lo cual reduce el escurrimiento superficial y contribuye al almacenamiento del agua. Además, los residuos vegetales de la superficie disminuyen la temperatura y, por ende, reducen las pérdidas por evapotranspiración (Demuner-Molina et ál., 2014).

Figura 4. Humedad de los sistemas productivos.



Fuente: elaboración propia.

Estos datos coinciden con los resultados obtenidos por Hernández y Parra (2017), presentándose valores similares de humedad en los SAP analizados en el primer EM, así como en el comportamiento entre SAP, siendo mayor en el PO, el C y la G y menor en el PA. Los autores indican que las diferencias entre los contenidos de humedad pueden estar relacionadas con el tipo de cobertura vegetal y fertilización orgánica realizada en los SAP.

Finalmente, en el presente estudio se observaron diferencias significativas en los porcentajes de humedad, siendo mayores en PO, G, BG y C (32,81%, 31,14%, 31,04% y 29,32%, respectivamente), esto se puede atribuir al efecto de la cobertura vegetal. Por otro lado, el SAP de PA obtuvo un porcentaje de humedad menor, esto se puede deber al

pastoreo rotacional semi-intensivo y al manejo convencional realizado anteriormente. Estas actividades probablemente generaron alta DA y bajo CO, variables que influyen en el porcentaje de humedad del suelo.

## 3.2 Propiedades químicas

### 3.2.1 Carbono orgánico

Esta propiedad mostró diferencias significativas (Anova  $p \leq 0,05$ ; 0,000) entre los SAP evaluados. Los valores de CO fueron significativamente mayores en el PO y el C en comparación con la G, el BG y el PA (Tukey  $p \leq 0,05$ ; 0,000) (figura 5).

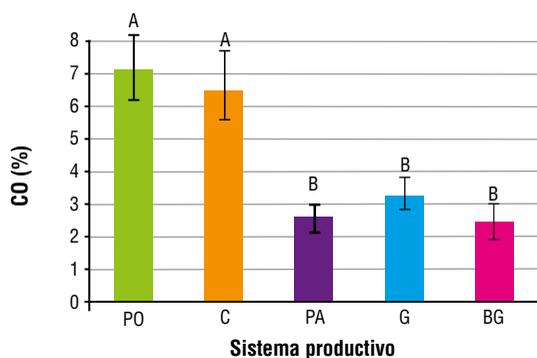


Figura 5. Contenido de carbono orgánico total de los sistemas productivos.

Fuente: elaboración propia.

Algunos autores indican que los mayores porcentajes de CO se presentan en sistemas bajo sombra, ya que esta protección contribuye a la conservación de la MO proveniente de los restos vegetales que se transforman por descomposición en CO (Bastidas y Tepud, 2014; Alvarado, Andrade y Segura, 2013; Vallejo et ál., 2011).

Los resultados de CO del presente estudio difieren de los obtenidos por Hernández y Parra (2017), quienes encontraron valores menores en los sistemas PO, C y G. Esto puede deberse a que las muestras de cada estudio se

tomaron en diferentes épocas, pues las precipitaciones y la temperatura influyen en la descomposición y la cantidad de CO que se almacena en el suelo (Alvarado et ál., 2013). Por el contrario, el único SAP que evidenció disminución en el contenido de CO fue el PA, lo cual se puede asociar al manejo convencional y el nivel de mecanización (medio-alto) que se realizaba anteriormente en este sistema.

El mayor porcentaje de CO se encontró en el PO (7,13%), probablemente por ser un sistema bajo fertilización orgánica con cereza de café y labranza manual, lo que brinda al suelo un ingreso continuo de MO. Por el contrario, los valores más bajos se evidenciaron en el BG (2,49%) y el PA (2,64%), ya que se utilizaban anteriormente para ganadería extensiva y pastoreo semiintensivo, prácticas que disminuyen la capacidad de captura y almacenamiento de CO en los agregados. Actualmente estos dos sistemas se encuentran en descanso, lo cual ha permitido una recuperación del CO, clasificado como medio-alto en el estudio de suelos de Cundinamarca del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2000). Se puede afirmar que la cantidad de CO, además de las condiciones ambientales locales, también depende del manejo del suelo, pues algunas prácticas generan detrimento del CO con el tiempo y otras favorecen su incremento.

Finalmente, se evidenció una diferencia significativa en el contenido de CO entre el PO, el C y la G a pesar de que estos tres sistemas se encuentran bajo manejo orgánico y los mismos niveles de mecanización. El mayor contenido de CO se presentó en el PO, debido posiblemente a que este sistema cuenta con varios cultivos (anturios, yuca, maíz y plátano) que mantienen siempre una cobertura vegetal en los horizontes superficiales del suelo. Por el contrario, el C y la G presentaron bajo contenido de CO porque son cultivos de una sola

especie; los monocultivos tienen menor ingreso de MO dada su poca diversidad de plantas.

### 3.2.2 pH

Esta propiedad indicó diferencias significativas (Anova  $p \leq 0,05$ ; 0,000) entre los SAP evaluados. El PA registró un pH significativamente menor en comparación con el PO, el C, la G y el BG (Tukey  $p \leq 0,05$ ; 0,000, 0,005, 0,006 y 0,012, respectivamente) (figura 6).

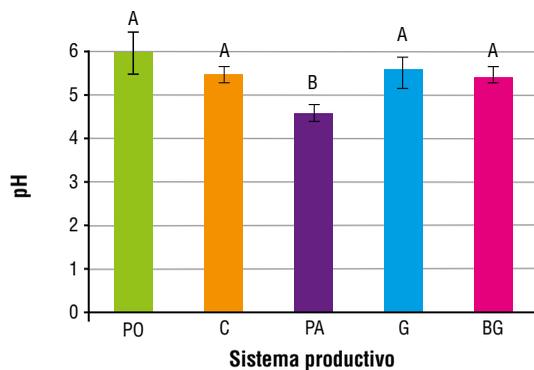


Figura 6. Valores de pH de los sistemas productivos. Fuente: elaboración propia.

Los valores de pH usualmente se asocian con el CO producido por restos vegetales como ramas, tallos y hojas, que se transforman en nutrientes solubles mediante dos procesos: a) descomposición, en la que los ácidos orgánicos modifican el pH, y b) humificación, en la que el humus, por su alto grado de polimerización en suelos de color oscuro, provoca una adecuada saturación de bases y un buen contenido de nitrógeno, lo que genera un pH ácido (Bastidas y Tepud, 2014).

Los sistemas evaluados presentaron un pH entre 4,66 y 6,01, y se clasificaron como suelos moderadamente ácidos. Los mayores valores de pH se evidenciaron en el PO y el C, posiblemente por el manejo orgánico que reciben. La fertilización orgánica mejora la distribución y disponibilidad de nutrientes mediante

la incorporación de MO, lo cual disminuye la acidez del suelo y propicia su neutralización. Por otro lado, el PA presentó el menor valor de pH, lo que se puede atribuir al pastoreo y el manejo convencional dados anteriormente. El uso de fertilizantes nitrogenados con urea reduce el pH del suelo, ya que la urea se hidroliza al entrar en contacto con el agua pasando de amida a carbonato amónico y luego de forma amoniacal a nítrica. Este proceso libera  $H^+$ , que tiene un efecto acidificante sobre el suelo (Chauveau, 2010; Ginés y Mariscal, 2002).

### 3.3 Propiedades microbiológicas

Los valores de actinomicetos y BSF mostraron diferencias significativas (Anova  $p \leq 0,05$ ; 0,000 y 0,000) en los sistemas evaluados. La densidad de actinomicetos fue significativamente menor en el PA en comparación con el PO, el C, la G y el BG (Tukey  $p \leq 0,05$ ; 0,001, 0,000, 0,009 y 0,000, respectivamente) (figura 7). Por otro lado, la densidad de BSF fue significativamente mayor en el C en comparación con el PO, el PA, la G y el BG (Tukey  $p \leq 0,05$ ; 0,000) (figura 8).

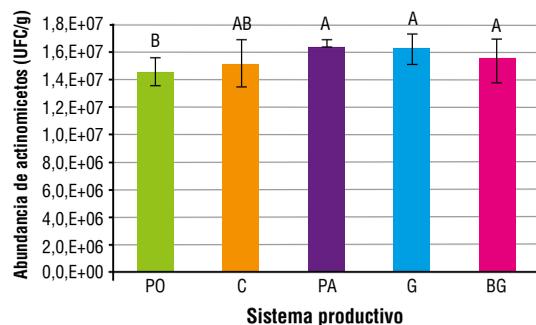


Figura 7. Densidad de actinomicetos de los sistemas productivos. Fuente: elaboración propia.

En el presente estudio, el PO, el C y el BG presentaron las mayores densidades de actinomicetos, lo cual se atribuye a unas mejores condiciones de pH y humedad dadas

las correlaciones positivas encontradas entre los actinomicetos vs. el pH y la humedad (Pearson,  $r=0,572$  y  $0,752$ , respectivamente,  $p\leq 0,05$ ). Esto también se atribuye a mayores contenidos de CO en el PO y el C, y la diversidad vegetal en el BG. Lo anterior podría tener un impacto positivo en la calidad del suelo, pues en la degradación de MO estos microorganismos funcionan como promotores de crecimiento vegetal, controladores de patógenos del suelo mediante la síntesis de quitinasas, solubilizadores de fosfatos, y productores de sideróforos, ácido indolacético y giberelinas. En contraste, el PA mostró una menor densidad de actinomicetos asociada con mayor DA, bajo contenido de CO y menor humedad. En relación con los requerimientos de oxígeno, los actinomicetos son generalmente aerobios y crecen en buena proporción en suelos bien drenados con textura franca y adecuadas condiciones físicas (Loredo-Osti et ál., 2004). Por ello, la compactación que persiste en el PA puede haber sido determinante para su densidad. El efecto de diversos factores abióticos sobre los microorganismos en el suelo depende en gran manera del manejo implementado en los SAP.

Por su parte, la abundancia de BSF se debe a la cantidad de fósforo y al manejo dado al sistema; por lo general, las BSF son consecuencia de prácticas agrícolas basadas en insumos orgánicos y/o químicos (Cisneros y Sánchez, 2015). En el presente estudio, la mayor densidad de BSF se evidenció en el C, tal vez porque su manejo incluye fertilización orgánica con cereza de café y hierbas derivadas de los sistemas aledaños. Estos componentes brindan buenas reservas de fósforo a los suelos agrícolas y propician el ingreso continuo de CO al sistema, lo que contribuye positivamente a la densidad de BSF (González et ál., 2013).

Se identificó una correlación positiva entre las BSF y el CO (Pearson,  $r=0,568$ ,  $p\leq 0,05$ ). Asimismo, se evidenció una menor densidad de estos microorganismos en el PO en comparación con el C, a pesar de que ambos se encuentran bajo el mismo tipo de fertilización. Esta diferencia se puede atribuir a la aplicación del insecticida Lorsban® en el C, que contiene compuestos organofosforados, es decir, enlaces de carbono y fósforo.

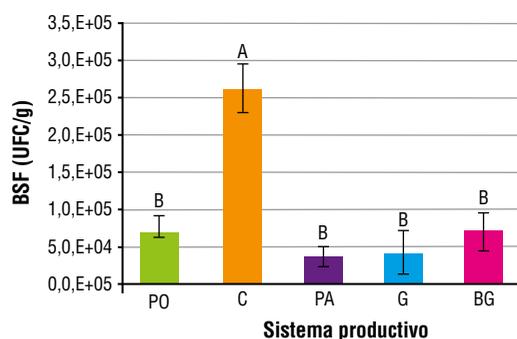


Figura 8. Densidad de solubilizadores de fosfato en los sistemas productivos.

Fuente: elaboración propia.

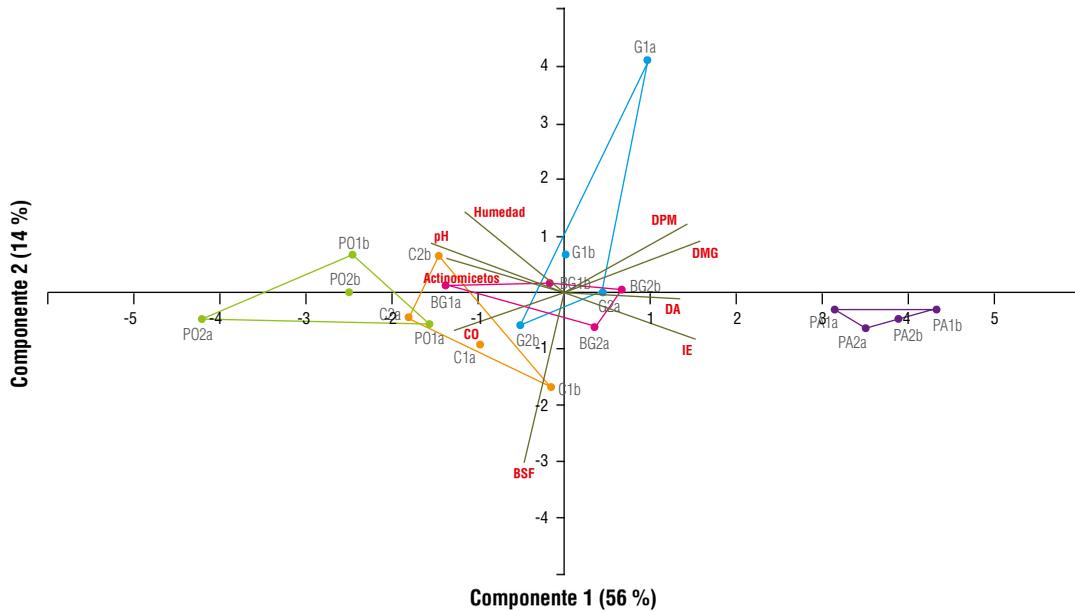
Por último, el PA mostró la menor densidad de BSF debido quizás a la fertilización química nitrogenada con urea realizada anteriormente. Las adiciones de nitrógeno pueden liberar fósforo y disminuir el pH, variables que reducen la densidad de las BSF (Xiao et ál., 2016). También puede asociarse al descanso en el que se encontraba el sistema al momento del estudio, ya que, según Llumiquinga (2009), un suelo que no está expuesto a ninguna labor, usualmente presenta baja densidad de estos microorganismos, puesto que el fósforo, a pesar de ser un elemento vital para el desarrollo vegetal, se encuentra en cantidades deficientes en el suelo (Beltrán, 2013), por lo que es necesario introducirlo a los sistemas mediante fertilización (Restrepo et ál., 2014). Finalmente, al igual que los actinomicetos, la densidad de BSF puede ser

afectada por las condiciones físico-químicas del sistema como el porcentaje de arena y arcilla, el pH y el CO (Torres et ál., 2012).

### 3.4 Análisis multivariado

El análisis de componentes principales (ACP) indicó el efecto del manejo del suelo sobre las propiedades físico-químicas y microbiológicas. Las diferencias presentadas se pueden explicar en un 70%, 56% para el componente 1 y 14% para el componente 2 (figura 9). Este efecto fue evidente en el diagrama de ordenación, que muestra una clara separación entre los diferentes usos del suelo (PO, C, PA, G y BG). Se puede observar una mayor diferencia entre el PA y el resto de sistemas en la mayoría de las propiedades evaluadas como consecuencia a las diferencias en el manejo agrícola.

Según los resultados obtenidos, las variables que más contribuyeron a la separación de los agrupamientos observados en orden de importancia fueron: BSE, pH, DGM, IE y humedad. Así pues, las variables que demostraron ser más sensibles al cambio en el uso del suelo fueron las físicas y las microbiológicas, debido principalmente a su capacidad para responder a periodos cortos de tiempo. Esto concuerda con los hallazgos de Ferreras et ál. (2009) y Vallejo (2013), quienes determinaron que los parámetros microbiológicos y físicos reaccionan de manera más rápida y son más sensibles a los cambios producidos por el manejo agropecuario y, por tanto, podrían constituir una señal temprana útil para estimar la calidad edáfica.



**Figura 9.** Análisis de componentes principales de las variables físicas, químicas y microbiológicas evaluadas (n = 5).  
Fuente: elaboración propia.

## 4. Conclusiones

En general, el PO y el C presentaron mayores contenidos de CO y humedad, valores de pH cercanos a la neutralidad y baja DA. Estas propiedades se pueden atribuir al manejo orgánico, que suele incrementar la cantidad de nutrientes disponibles y disminuir la acidez del suelo debido al continuo ingreso de MO y el bajo nivel de mecanización. No obstante, el comportamiento en la densidad de actinomicetos y BSF fue diferente entre estos dos SAP. El C registró mayor abundancia de ambos grupos funcionales causada por la aplicación de insumos químicos externos como el insecticida Lorsban® y la fertilización orgánica, que cambian el contenido de fósforo en el sistema e influyen así en la densidad de estos microorganismos.

Por su parte, el PA evidenció altos valores de IE, DPM y DGM posiblemente asociados a un aumento en su capacidad de resistencia. Sin embargo, su DA no mostró mejoría, lo que influyó negativamente en las cantidades de CO, humedad y densidad de actinomicetos y BSF de este sistema. Las respuestas de los indicadores en este último sistema fueron distintas en comparación con la primera fase del proyecto, lo que podría deberse a la recuperación como consecuencia del descanso en el que se encontraba al momento del estudio.

Los indicadores químicos presentaron alta sensibilidad al manejo dado en cada SAP. Los mayores valores de CO y pH se obtuvieron en el PO por la fertilización orgánica y la labranza manual de este sistema. Por el contrario, el BG y el PA registraron los menores valores debido a la ganadería extensiva y el pastoreo semiintensivo, respectivamente.

Se seleccionaron como indicadores de mayor confiabilidad aquellos de mayor sensibilidad según el análisis multivariado, en el que se

estableció como criterio de selección un rango de variabilidad de 0,358 hacia arriba para los *loadings* arrojados por el programa con el fin de elegir las variables que mostraron cambios relevantes positivos y negativos frente al manejo del suelo, las cuales fueron BSE, pH, DGM, IE y humedad.

## Agradecimientos

Al Departamento de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas en la Universidad Central, por facilitar la realización de este estudio en el Campo Experimental de Tecnologías Ambientales (CETA), y a nuestra directora Victoria Vallejo, quien orientó de principio a fin el desarrollo de este proyecto.

## Referencias

- Agbede, T. y Afolabi, L. (2014). Soil fertility improvement potentials of Mexican sunflower (*Tithonia diversifolia*) and Siam weed (*Chromolaena odorata*) using okra as test crop. *Archives of Applied Science Research*, 6(2), 42-47.
- Alvarado, J., Andrade, H. y Segura, M. (2013). Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café en el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. *Colombia Forestal*, 16(1), 21-31.
- Balser, T., Kinzig, A. y Fires, M. (2002). Linking soil microbial communities and ecosystem functioning. En D. Tilman, A. Kinzig y S. Pacala (eds.), *The functional consequences of biodiversity. Empirical progress and theoretical extensions (MPB-33)* (pp. 265-293). New Jersey: Princeton University Press.

- Bastidas, Y. y Tepud, O. (2014). *Evaluación de algunas propiedades físicas y químicas del suelo en sistemas tipificados de café (Coffea arabica L.) en el municipio de la Unión-Nariño* (tesis de pregrado). Universidad de Nariño, San Juan de Pasto.
- Beltrán-Pineda, M. (2013). Estudio comparativo de poblaciones microbianas totales y solubilizadoras de fosfato en suelos de páramo cultivados con papa (*Solanum tuberosum*) en Ventaquemada-Boyacá. *I3+*, 1(2), 56-75.
- Beltrán-Pineda, M. (2014). La solubilización de fosfatos como estrategia microbiana para promover el crecimiento vegetal. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 15(1), 101-113.
- Bogado, K. (2013). *Calidad del suelo en diferentes sistemas de manejo utilizando algunos indicadores biológicos* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo.
- 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.
- Chauveau, M. (2010). *Efecto del cambio de manejo en la recuperación del suelo y pradera en sitios de la precordillera andina de la Araucanía según su estado, condición y tendencia* (tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- Cisneros, C. y Sánchez, M. (2015). Solubilización de fosfatos por hongos asociados a un Andisol de tres agroecosistemas cafeteros de la región andina colombiana. *Ingenium*, 9(25), 37-46.
- Concejo Municipal de Cachipay Cundinamarca. (2000). Acuerdo 015 de 2000: Por medio del cual se adopta el Esquema de Ordenamiento Territorial Municipal de Cachipay, se definen los usos del suelo para las diferentes zonas de los sectores rural y urbano, se establecen las reglamentaciones urbanísticas correspondientes y se plantean los planes complementarios para el futuro desarrollo territorial del municipio. Consultado en <http://bit.ly/2lWukAj>.
- Córdoba, C., Naranjo, J. y Cuartas, C. (2010). Productividad vegetal y animal bajo sistemas de pastoreo tradicional y sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi) en el Caribe seco colombiano, Panamá. En Fundación Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria, *VI Congreso Latinoamericano Agroforestería para la Reducción Pecuaría Sostenible*. 28-30 de septiembre. Ciudad de Panamá. Consultado en <http://bit.ly/2krOzFB>.
- Demuner-Molina, G., Cadena-Zapata, M., Campos-Magaña, S., Zermeño-González, A. y Sánchez-Pérez, F. (2014). Efecto de labranza y mejoradores de suelo en humedad y desarrollo radicular. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(2), 34-56.
- Doran, J. y Parkin, T. (1994). Defining and assessing soil quality. En J. Doran, D. Coleman, D. Bezdicek y B. Stewart (Eds.), *Defining soil quality for sustainable environment* (pp. 3-21). Madison: Soil Science Society of America.
- 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.
- Gabioud, E., Wilson, M. y Sasal, M. (2011). Análisis de la estabilidad de agregados por

- el método de le bissonnais en tres órdenes de suelos. *Ciencia del Suelo*, 29(2), 129-139.
- Garbisu, C., Becerril, J., Epelde, L. y Alkorta, E. (2007). Bioindicadores de la calidad del suelo: herramienta de la eficacia de un proceso fitorremediador. *Ecosistemas*, 16(2), 44-49.
- García, Y., Ramírez, W. y Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 20-46.
- Ginés, I. y Mariscal, I. (2002). *Incidencia de los fertilizantes sobre el pH del suelo* (artículo de discusión). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- González, A., Rivera, M. y García, C. (2013). Uso de fertilizantes orgánicos para la mejora de propiedades químicas y microbiológicas del suelo y del crecimiento del cítrico cintrange troyer. *Universidad y Ciencia*, 29(2), 123-139.
- Goodfellow, M. y Williams, S. (1983). Ecology of actinomycetes. *Annual Review of Microbiology*, 37, 189-216.
- Hernández, M. y Parra, D. (2017). *Evaluación del impacto de prácticas de manejo agrícola y pecuario sobre la calidad edáfica en el campo experimental CETA: Fase 1 (Cachipay, Cundinamarca)* (tesis de pregrado). Universidad Central, Bogotá.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1990). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. Bogotá: IGAC.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2000). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca*. Bogotá: IGAC.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2019). La mitad de Cundinamarca presenta conflicto de uso de suelos. Bogotá. Consultado en <http://bit.ly/2IS5UI1>.
- Llumiquire, A. (2009). *Evaluación del impacto ambiental de tecnologías para producción de papa con alternativas al uso de plaguicidas peligrosos en el Cantón Píllaro - Provincia de Tungurahua* (tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ambato.
- Lobo, D. y Pulido, M. (2006). Métodos e índices para evaluar la estabilidad estructural de los suelos *Venesuelas*, 14, 22-37.
- Loredo-Osti, O, López-Reyes, C. y Espinosa-Victoria, D. (2004). Bacterias promotoras del crecimiento vegetal asociadas con gramínea: una revisión. *Terra Latinoamericana*, 22(2), 225-239.
- Malchair, S., De Boeck, H., Lemmens, C., Ceulemans, R., Merckx, R., Nijs, I. y Carnol, M. (2010). Diversity-function relationship of ammonia-oxidizing bacteria in soils among functional groups of grassland species under climate warming. *Applied Soil Ecology*, 44(1), 15-23.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. (2016). Política para la gestión sostenible del suelo. Bogotá. Consultado en <http://bit.ly/2lyufT8>.
- Moreno, C., González, M. y Egidio, J. (2015). Influencia del manejo sobre la calidad del suelo. *Ecuador es Calidad*, 2(1), 33-40.
- Muscolo, A., Settineri, G. y Attinà, E. (2015). Early warning indicators of changes in soil ecosystem functioning. *Ecological Indicators*, 48, 542-549.
- Nautiyal, C. (1999). An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. *FEMS Microbiology Letters*, 170(1), 265-270.
- Nielsen, M. y Winding, A. (2002). Microorganism as indicators of soil health. Technical Report 388. Roskilde: National Environmental Research Institute, Denmark.

- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2008, julio 2). Aumenta la degradación del suelo. Sala de Prensa. Consultado en <http://bit.ly/2k22uCa>.
- Raiesi, F. y Kabiri, V. (2016). Identification of soil quality indicators for assessing the effect of different tillage practices through a soil quality index in a semi-arid environment. *Ecological Indicators*, 71, 198–207.
- Restrepo-Franco, G., Marulanda-Moreno, S., Fe-Pérez, Y., Díaz-de la Osa, A., Lucía-Baldini, V. y Hernández-Rodríguez, A. (2014). Bacterias solubilizadoras de fosfato y sus potencialidades de uso en la promoción del crecimiento de cultivos de importancia económica. *Revista CENIC*, 46(1), 63–76.
- Safar, S., González, H. y Capelli, N. (2011). Efecto de los arados rotativos sobre algunas propiedades físicas de un suelo franco arcilloso. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 6(1), 32–44.
- Torres, D., López, M., Contreras, J., Henríquez, M., Acevedo, I. y Agurto, C. (2012). Uso de la tierra del piedemonte del estado Lara, Venezuela y su efecto sobre propiedades físicas, químicas y bacterias rizosféricas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(7), 1375–1388.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2004). SW-846 Test Method 9045D: Soil and waste pH. Consultado en <http://bit.ly/2lA4hP2>.
- Vallejo, V. (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* (tesis doctoral). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Vallejo, 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), 83–99.
- Vallejo, V., Gómez, M., Cubillos, A. y Roldán, F. (2011). Effect of land use on the density of nitrifying and denitrifying bacteria in the Colombian Coffee Region. *Agronomía Colombiana*, 29(3), 455–463.
- Vera, M. y López, R. (1995). Estabilidad estructural de suelos en zonas de selva nublada de los Andes de Mérida, Venezuela. *Venesuelos*, 3(1), 37–45.
- Yanine, H. (2010). *Evaluación de la diversidad de bacterias degradadoras de hidrocarburos aisladas de suelos de las cuencas de los ríos Otún y la Vieja* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Zheng, B., Hao, X., Ding, K., Zhou, G., Chen, Q., Zhang, J. y Zhu, Y. (2017). Long-term nitrogen fertilization decreased the abundance of inorganic phosphate solubilizing bacteria in an alkaline soil. *Scientific Reports*, 7, 42284.