

Sostenibilidad del manejo del suelo en procesos productivos de transición agroecológica

Mónica León-Duran^{1,*} , Álvaro Acevedo-Osorio²

(1) Departamento de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, 11001 Bogotá, Colombia.

(2) Departamento de Desarrollo Rural y Agroalimentario, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, 11001 Bogotá, Colombia.

* Autor de correspondencia: M. León [moleond@unal.edu.co]

> Recibido el 27 de julio de 2020- Aceptado el 20 de mayo de 2021

Como citar: León-Duran, M.V., Acevedo-Osorio, Á. 2021. Sostenibilidad del manejo del suelo en procesos productivos de transición agroecológica. *Ecosistemas* 30(2): 2061. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2061>

Sostenibilidad del manejo del suelo en procesos productivos de transición agroecológica

Resumen: La agricultura industrial en gran escala promueve una explotación intensiva del suelo que puede comprometer su sostenibilidad en el tiempo. Como respuesta, la Agroecología propone una serie de prácticas que devuelven al suelo su capacidad productiva. Esta investigación empleó un marco de análisis sobre sostenibilidad, para identificar indicadores que relacionen el estado y manejo del suelo con las dimensiones física, química y biológica. Fueron seleccionados nueve indicadores de sostenibilidad aplicados a veintitrés fincas con distintas trayectorias en el proceso de transición agroecológica localizadas en Subachoque, Cundinamarca, Colombia. Los sistemas productivos con cinco o más años en transición obtuvieron los valores máximos para ocho de los indicadores evaluados. Se evidencia cómo la agroecología genera cambios en la sostenibilidad del manejo del suelo, asegurando características edáficas apropiadas para mantener su capacidad productiva a través del tiempo.

Palabras clave: agricultura sostenible; agroecología; funciones del suelo; indicadores de sostenibilidad; marco de análisis; sistema de finca

Sustainably soil management in agroecological transition processes

Abstract: Large-scale industrial agriculture promotes soil intensive exploitation that can compromise its sustainability over time. In response, Agroecology proposes practices that return the soil to its productive capacity. This research used an analysis framework on sustainability, to identify indicators that relate the state and management of the soil with the physical, chemical and biological dimensions. Nine sustainability indicators applied to twenty-three farms with different trajectories in the agroecological transition process located in Subachoque, Cundinamarca, Colombia were selected. Production systems with five or more years in transition gained the maximum values for eight of the evaluated indicators. It is evident how agroecology generates changes in the sustainability of soil management, ensuring appropriate soil characteristics to maintain its productive capacity over time.

Keywords: agroecology; analysis framework; farm system; soil functions; sustainable agriculture; sustainability indicators

Introducción

La agricultura de tipo industrial de la revolución verde ha generado serias repercusiones en la fertilidad de los suelos agrícolas del mundo haciéndolos sumamente vulnerables al deterioro y generando impactos negativos sobre el ambiente y la sociedad (Pérez 2005). Es evidente que, después de muchos años de revolución verde, la estructura y composición del suelo ha sido afectada por el laboreo intensivo, la cosecha permanente de monocultivos, el uso de maquinaria agrícola moderna y el alto uso de insumos externos (Etchevers et al. 2015).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – (FAO 2015) determinó que los principales problemas asociados a la degradación del suelo por uso y manejo son la agricultura mecanizada, el sobrepastoreo y la expansión urbana. En Colombia esta situación se ve agravada si se considera que buena parte del área agropecuaria se ubica en las cadenas

montañosas de los Andes donde se cultiva en pendientes entre 40 y 70% que hace inapropiada la aplicación de tecnologías que fueron diseñadas para zonas planas. El departamento de Cundinamarca, con un área considerable sobre la cordillera oriental, muestra que el 80.3% de sus tierras se encuentran degradadas fundamentalmente por explotación ganadera y agricultura intensiva con monocultivos de papa (*Solanum tuberosum*), arveja (*Pisum sativum*), zanahoria (*Daucus carota*), y otros. Se ha determinado que las causas indirectas de la degradación del suelo están vinculadas con su manejo inadecuado, aspectos que se citan en la Política para la Gestión Sostenible del Suelo: “Los suelos son ignorados y desconocidos, existe una debilidad en la educación para su uso y manejo sostenible, hay una planeación y desarrollo sin que este recurso y sus características sean tenidas en cuenta, hay una desarticulación institucional y falta de desarrollo normativo, no hay un seguimiento a su salud y calidad, existe un desconocimiento de alternativas para su recuperación, restau-

ración y rehabilitación y de tecnologías apropiadas de uso y manejo sostenible" (IDEAM y UDCA 2015).

El manejo inadecuado de los suelos se contradice con la afirmación cada vez más reconocida de que éstos constituyen la base para el desarrollo sostenible de la agricultura, las funciones esenciales de los ecosistemas y la soberanía alimentaria de una población en constante crecimiento (Gliessman 2002). La degradación del suelo representa una amenaza integral progresiva resultante de la interacción entre factores sociales, económicos y de gobernanza (FAO 2015). En este sentido, evaluar la sostenibilidad del manejo del suelo constituye un mecanismo de análisis que permite establecer tendencias y determinar si los actuales sistemas de uso y manejo mejoran, conservan o degradan este recurso (Vallejo 2013). Así mismo, resulta esencial analizar el manejo de los suelos, de tal forma que se construyan e implementen estrategias para reorientar la producción agropecuaria hacia nuevas tecnologías fundamentadas en el mantenimiento de la sostenibilidad de este subsistema (FAO 2015).

El manejo sostenible del suelo se define como aquel que garantiza la conservación de sus características físicas, químicas y biológicas en el tiempo, sin provocar su degradación, lo cual garantiza su fertilidad, resiliencia, estabilidad y productividad prolongadas (Laishram et al. 2012; SEMARNAT 2015). Dada la relevancia de la sostenibilidad del suelo para la producción agropecuaria, comprender el sistema de manejo de este recurso, y sus implicaciones, es de vital importancia para asegurar sus funciones esenciales para la sociedad (Bai et al. 2018); sin embargo, han sido pocos los esfuerzos por evaluar el impacto del manejo del suelo sobre su estado de sostenibilidad (Perales et al. 2009).

La presente investigación surge del interés por analizar los efectos del manejo del suelo sobre su sostenibilidad a partir del análisis

de sus propiedades físicas, químicas y biológicas en fincas en proceso de transición agroecológica localizadas en Subachoque, Cundinamarca, Colombia. Se parte del supuesto de que los sistemas de producción con mayor número de años en el proceso de transición agroecológica tienen un mejor estado de sostenibilidad del suelo en comparación con aquellos con procesos de transición más recientes.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en 23 fincas vinculadas a la Asociación Red Agroecológica Campesina (ARAC) de Subachoque, Cundinamarca (Fig. 1). El municipio de Subachoque se localiza en la región alto-andina colombiana a 2800 msnm, con un promedio anual para temperatura entre 10°C y 17°C, humedad relativa entre 69% y 85%, evapotranspiración de 900 a 1100 mm, precipitación de 800 a 900 mm y una zona de vida según Holdridge (1987) clasificada como Bosque Húmedo Montano (Municipio de Subachoque 2019).

La ARAC es una organización de base que reúne a pequeños agricultores interesados en producir y comercializar productos agroecológicos, especialmente papa (*Solanum tuberosum*), maíz (*Zea mays*), hortalizas (cebolla (*Allium cepa*), arveja (*Pisum sativum*), remolacha (*Beta vulgaris*), zanahoria (*Daucus carota*), lechuga (*Lactuca sativa*) y frutas (manzano (*Malus domestica*), ciruelo (*Prunus domestica*), pera (*Pyrus communis*), durazno (*Prunus pérsica*), curuba (*Passiflora tripartita*), papayuela (*Vasconcellea pubescens*)) (Municipio de Subachoque 2019).

De acuerdo con el estudio de suelos del departamento de Cundinamarca, el municipio de Subachoque presenta en gran parte de su área suelos clasificados según la clave para la taxonomía de suelos del USDA como Andisoles (IGAC 2000). Es ampliamente re-

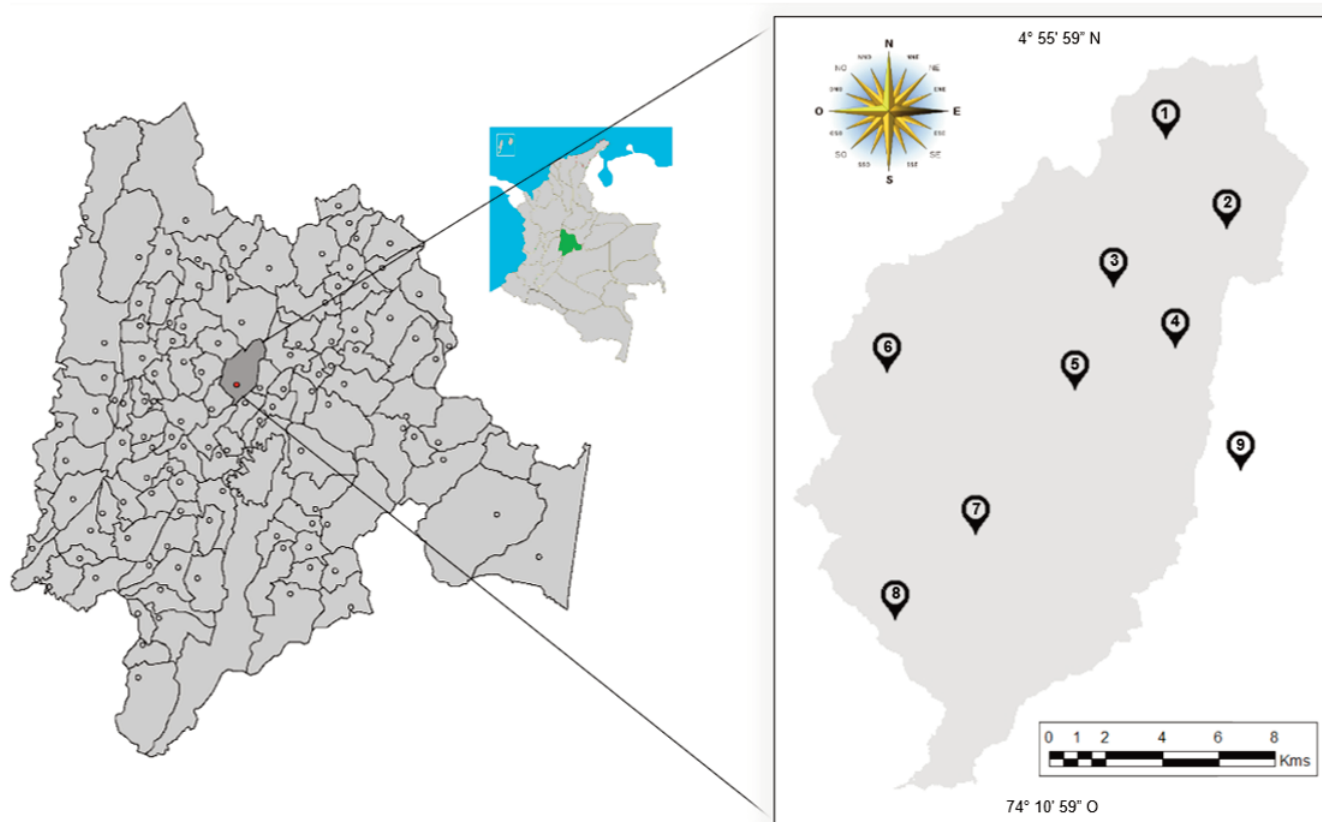


Figura 1. Ubicación de los sistemas de finca estudiados en el municipio de Subachoque, Cundinamarca. Elaborado por Wikimedia Commons – Imagen que representa la ubicación en el mapa de la ciudad y municipio de Subachoque en el departamento de Cundinamarca, Colombia (2007); Editado por Mónica León, a partir de digitalización sobre mapa físico de "Incendio del Municipio de Subachoque" (ArcGIS), información cartográfica de la CAR – Cundinamarca (6 de julio de 2017).

Figure 1. Location of the farm systems studied in the municipality of Subachoque, Cundinamarca. Elaborated by Wikimedia Commons - Image representing the location on the map of the city and municipality of Subachoque in the department of Cundinamarca, Colombia (2007); Edited by Mónica León, from digitalization on physical map of "Incendio del Municipio de Subachoque" (ArcGIS), cartographic information from CAR - Cundinamarca (July 6, 2017).

conocido que los suelos derivados de cenizas volcánicas exhiben propiedades muy específicas, tales como alta retención de fósforo y alto contenido de carbono orgánico, lo que en conjunto con minerales de corto rango (alofano e imogolita) le confieren una baja densidad aparente, alta capacidad de almacenamiento y conducción de fluidos, alta resistencia y resiliencia del sistema poroso y alta estabilidad de agregados (Dec et al. 2015).

Las 23 fincas de la ARAC fueron agrupadas de acuerdo con el número de años en su proceso de transición agroecológica, así: grupo 1 (≥ 9 años – 5 fincas), grupo 2 (5 - 8 años – 11 fincas) y grupo 3 (1 - 4 años – 7 fincas).

La investigación empleó un enfoque interpretativo (Ricoy 2006); se desarrolló a partir de una selección de indicadores identificados en un marco de análisis construido a partir de información bibliográfica que permitió la pre-selección de una serie de indicadores que fueron organizados en una matriz por categorías (manejo y estado) y propiedades (físicas, químicas y biológicas). Los indicadores pre-seleccionados fueron evaluados por 10 expertos en suelos de acuerdo con la siguiente escala de valoración: 1 (nada adecuado), 2 (poco adecuado), 3 (medianamente adecuado), 4 (adecuado) y 5 (muy adecuado) y con el objetivo de la investigación, dando como resultado la selección de 9 indicadores (Tabla 1).

Los nueve indicadores seleccionados, son representativos tanto de las categorías de estado y manejo como de las dimensiones física, química y biológica del suelo (Tabla 2). Para los indicadores: índice estructural del suelo, densidad aparente, carbono orgánico, pH, capacidad de intercambio catiónico y actividad microbiana se realizó un muestreo de suelos y para prácticas de conservación de suelos, cobertura temporal del suelo y rotación de cultivos se aplicaron entrevistas semiestructuradas.

El análisis de datos fue realizado utilizando datos promedios de los indicadores y referentes teóricos para su interpretación (Tabla 3).

La identificación de los indicadores con mayor aporte al estado de sostenibilidad del suelo se realizó a partir de: i) Análisis de Componentes Principales, para organizar los datos en variables dimensionales, tratando de explicar la variación en sus componentes (Fuente 2011), ii) Análisis Clúster, para agrupar los indicadores en grupos homogéneos (Dussán et al. 2006) y iii) Análisis de correspondencia, para determinar la contribución de la única variable cualitativa (rotación de cultivos) al estado de sostenibilidad del suelo (Vivanco 1999). El programa estadístico utilizado para realizar los análisis fue R studio versión 3.6.1. (RStudio Team 2019).

Resultados

Evaluación de indicadores

Los datos obtenidos en la evaluación de indicadores expresan condiciones favorables de los suelos para la producción agrícola (Tabla 4).

Indicadores físicos

Las pendientes de las fincas analizadas varían entre el 1% y 28%, es decir pendientes suaves a moderadas propias del altiplano cundiboyacense. El 38% de los 26 lotes evaluados cuentan con pendientes superiores al 5%, pendiente desde la cual se hace necesario implementar prácticas de conservación para prevenir la erosión. El 54% de los lotes evaluados implementan barreras vivas como práctica de conservación de suelos, de los cuales el 93% de ellos lo realizan con cultivos densos.

Tabla 1. Porcentaje obtenido para los indicadores pre-seleccionados de acuerdo con la valoración dada por los expertos. La escala de valoración empleada fue: 1: Nada adecuado; 2: Poco adecuado; 3: Medianamente adecuado; 4: Adecuado y 5: Muy adecuado.

Table 1. Percentage obtained for the pre-selected indicators according to the assessment given by the experts. The rating scale used was: 1: Not adequate; 2: Inadequate; 3: Moderately adequate; 4: Adequate and 5: Very suitable.

Propiedad	Categoría	Nombre del indicador	Escala de valoración (%)				
			1	2	3	4	5
Física	Manejo	Prácticas de conservación del suelo	0.0	0.0	20.0	10.0	70.0
		Factor de estrés del suelo referido a labranza	0.0	0.0	30.0	50.0	20.0
		Labranza	0.0	0.0	20.0	30.0	50.0
		Intensidad del consumo de fertilizantes	0.0	11.1	11.1	44.4	33.3
		Cobertura temporal del suelo	0.0	0.0	11.1	22.2	66.7
		Rotación de cultivos	0.0	0.0	10.0	30.0	60.0
		índice de concentración de cultivos	0.0	0.0	10.0	50.0	40.0
		Problema de ataque de plagas	0.0	10.0	50.0	20.0	20.0
		Problema de enfermedades de cultivos	0.0	20.0	40.0	30.0	10.0
Química	Estado	Densidad aparente	0.0	0.0	0.0	33.3	55.6
		Estabilidad de los agregados	0.0	0.0	0.0	44.4	55.6
		Índice estructural del suelo (Si)	0.0	0.0	10.0	20.0	70.0
		Profundidad efectiva	0.0	0.0	10.0	50.0	50.0
		Control de erosión	0.0	0.0	10.0	30.0	60.0
		Capacidad de retención de agua del suelo	0.0	11.1	11.1	22.2	55.6
Biológica	Estado	Carbono orgánico	0.0	0.0	10.0	30.0	60.0
		pH	0.0	0.0	10.0	60.0	30.0
		Capacidad de intercambio de cationes	0.0	0.0	10.0	30.0	60.0
		Salinidad	0.0	0.0	30.0	50.0	20.0
		Fertilidad del suelo	0.0	0.0	20.0	30.0	50.0
		Actividad microbiana del suelo	0.0	0.0	0.0	33.3	66.7
		Proporción de la superficie cubierta por bosques	0.0	10.0	30.0	40.0	20.0
Biodiversidad en macrofauna	0.0	0.0	0.0	50.0	50.0		

Tabla 2. Métodos para la evaluación de indicadores. Tipo de arreglo de cultivo: limpio, especies de ciclo corto con frecuente remoción del suelo; denso, especies semipermanentes y permanentes con baja remoción del suelo. Actividad microbiana: i) determinar temperatura (20°C) y humedad (52%) de la muestra; ii) establecer masa de la muestra (40gr); iii) adicionar 2 ml de glucosa al 8% como sustrato y iv) medir CO₂ cada tres horas (3 mediciones).

Table 2. Methods for evaluating indicators. Type of cultivation arrangement: clean, short cycle species with frequent removal of the soil; dense, semi-permanent and permanent species with low soil removal. Microbial activity: i) determine temperature (20°C) and humidity (52%) of the sample; ii) establish the mass of the sample (40gr); iii) add 2 ml of 8% glucose as substrate and iv) measure CO₂ every three hours (3 measurements).

Propiedad	Categoría	Nombre del Indicador	Método de evaluación
Física	Manejo	Prácticas de conservación de suelo (%)	Determinar la pendiente del terreno, el tipo de arreglo de cultivo (limpio y/o denso) y la distancia entre obras de conservación y a partir de esta información determinar el grado porcentual en el que se acerca al cumplimiento del criterio de protección adecuada del suelo (FHIA-UE 2004). Índice de cobertura del suelo (Sánchez 2009): $COBESUEL = \frac{1}{365 \times SUP} \sum_i [DC_i + (365 - DC_i) \times CTE] \times X_i$
		Cobertura temporal del suelo	SUP: Superficie total de la explotación (ha) DC: Número de días por año que cada cultivo i recubre el suelo agrario (días) CTE: Coeficiente de cobertura del suelo tras la finalización del ciclo de cultivo (siembra directa: CTE= 0.50; mínimo laboreo: CTE= 0.35; agricultura tradicional: CTE= 0) Xi: Superficie asignada al cultivo i (ha).
Química	Estado	Rotación de cultivos	Entrevista semiestructurada y observaciones directas en campo sobre el manejo de los cultivos de acuerdo a la siguiente escala de valoración (Sarandón et al. 2008): 4: Rotación planificada en el tiempo, con criterios técnicos. Incorpora leguminosas o abonos verdes. Incluye barbecho. Deja descansar un mes el lote. 3: Rotación aleatoria, no planificada bajo criterios técnicos. No deja descansar el suelo durante periodos semestrales o anuales. 2: Rota cada dos o tres años. Periodos largos con la misma especie (3 a 4 ciclos). 1: No realiza rotaciones - cultivo secuencial de la misma especie.
		Índice estructural del suelo (%)	Índice estructural de Pieri: MO (%) / (arcilla + limo) % X 100 (Pieri 1995).
Biológica	Estado	Densidad aparente (g/cm ³)	Cilindro (USDA 1999).
		Carbono orgánico (%)	Walkley-Black (IGAC 2006).
		pH	Suspensión suelo:agua - relación peso:volúmen 1:1 (IGAC 2006).
		Capacidad de intercambio catiónico (meq/100g)	Extracción con acetato de amonio 1M pH 7 (IGAC 2006).
		Actividad microbiana Respiración inducida por sustrato (ppm)**	La medida de las emisiones de CO ₂ por el suelo se realizó por medio de sensores infrarrojo. Equipo utilizado: Termohigrometro Extech instruments. Metodología modificada a partir de Paolini (2017).

Tabla 3. Referentes teóricos para la interpretación de los indicadores. Los rangos para el indicador de actividad microbiana se determinaron a partir de los valores obtenidos en esta investigación. Datos de FHIA-UE (2004); Pieri (1995); Abi-Saab (2012); Sánchez (2009).

Table 3. Theoretical references for the interpretation of the indicators. The ranges to indicator microbial activity were determined from the values obtained in this investigation. Data from FHIA-UE (2004); Pieri (1995); Abi-Saab (2012); Sánchez (2009).

Indicador	Valor mínimo	Interpretación	Valor máximo	Interpretación
Prácticas de conservación de suelo (%)	0	Nada ideal	100	Ideal
Índice estructural del suelo (%)	<5	Suelos degradados	>9	Suelos estructuralmente estables
Densidad aparente (g/cm ³)	0.30	A menor densidad aparente, mayor porosidad y aireación; buen drenaje y penetración de raíces	0.90	Misma interpretación
Carbono orgánico (%)	≥9	Bajo	30	Alto
pH	<4.5	Extremadamente ácido	>8.5	Extremadamente alcalino
Capacidad de intercambio catiónico (meq/100g)	<5	Muy bajo	>20	Muy alto
Cobertura temporal del suelo	0.00-0.14	Menor protección del suelo frente a la erosión	0.30 – 0.50	Mayor protección del suelo frente a la erosión
Rotación de cultivos	4	Muy adecuado	1	Nada adecuado
Actividad microbiana (ppm)*	>1500	Baja actividad microbiana	>2000	Alta actividad microbiana

Tabla 4. Evaluación de indicadores ARAC. PCS: Prácticas de Conservación de Suelos; Si: índice estructural del suelo; Da: Densidad aparente; COS: Carbono Orgánico del Suelo; pH; CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico; CTS: Cobertura Temporal del Suelo; RC: Rotación de Cultivos; AM: Actividad Microbiana. Lotes grupo uno (azul), grupo dos (rojo) y grupo tres (verde).

Table 4. Evaluation of ARAC indicators. PCS: Soil Conservation Practices; Si: structural index of the soil; Da: Bulk density; COS: Organic Soil Carbon; pH; CIC: Cation Exchange Capacity; CTS: Temporary Land Cover; RC: Crop Rotation; AM: Microbial Activity. Batches group one (blue), group two (red) and group three (green).

Código de la finca	Indicadores físicos			Indicadores químicos			Indicadores biológicos		
	PCS %	Si%	Dag/cm ³	COS%	pH	CICmeq/100g	CTS	RC	AMppm
F01-L01	100.00	59.91	0.52	15.50	6.77	57.60	0.07	3.00	2227.33
F01-L02	100.00	65.16	0.43	16.10	6.97	63.70	0.21	3.00	2258.67
F02-L01	100.00	42.52	0.60	11.00	5.62	46.10	0.02	4.00	1884.00
F03-L01	0.00	56.52	0.70	8.72	5.50	39.30	0.14	3.00	1355.00
F04-L01	100.00	32.10	0.61	12.40	6.13	49.00	0.33	4.00	1235.33
F05-L01	100.00	62.18	0.51	13.20	5.59	54.50	0.06	3.00	1906.33
F06-L01	100.00	77.25	0.46	16.40	6.63	64.40	0.35	3.00	1165.33
F06-L02	100.00	75.93	0.50	17.00	6.49	66.30	0.29	3.00	1615.00
F07-L01	100.00	89.00	0.71	12.70	6.11	43.50	0.09	4.00	1367.67
F08-L01	100.00	64.53	0.57	13.70	5.70	60.50	0.42	3.00	1922.67
F09-L01	0.00	17.87	0.87	7.11	6.15	34.90	0.18	3.00	2156.00
F10-L01	100.00	26.45	0.63	8.07	6.83	46.50	0.37	3.00	1608.00
F11-L01	100.00	51.54	0.71	8.55	6.23	40.90	0.15	4.00	2209.33
F12-L01	0.00	62.08	0.64	13.90	5.80	56.00	0.33	3.00	1480.00
F13-L01	100.00	49.31	0.67	13.90	5.60	56.70	0.39	3.00	1345.33
F14-L01	100.00	27.68	0.50	12.30	6.01	49.40	0.08	3.00	1683.67
F15-L01	100.00	61.41	0.60	10.90	5.21	42.40	0.11	4.00	2018.67
F16-L01	100.00	75.62	0.48	14.30	5.63	52.50	0.33	3.00	2122.33
F16-L02	100.00	63.78	0.70	12.80	5.62	43.60	0.30	1.00	1491.00
F17-L01	0.00	73.69	0.57	16.50	5.72	63.20	0.35	3.00	1870.00
F18-L01	100.00	29.58	0.64	8.34	6.71	43.60	0.01	4.00	1875.67
F19-L01	100.00	61.57	0.51	14.50	5.83	52.70	0.20	3.00	1977.00
F20-L01	0.00	19.36	0.85	4.56	6.02	23.30	0.07	4.00	1547.00
F21-L01	100.00	60.30	0.45	14.90	5.82	59.90	0.13	3.00	2115.67
F22-L01	0.00	103.63	0.50	22.00	4.89	69.90	0.26	2.00	1239.67
F23-L01	100.00	36.57	0.44	9.46	5.20	40.90	0.16	3.00	1606.00
Media	76.92	55.60	0.59	12.65	5.95	50.82	0.21	3.15	1741.64

Las prácticas de conservación de suelos que se desarrollan independientemente de la pendiente son: labranza mínima, rotación de cultivos, asociación de cultivos e incorporación de abonos orgánicos y para el caso específico de las fincas que tienen una pendiente superior al 5% se ejecutan prácticas como la construcción de terrazas y la elaboración de camas a partir de curvas a nivel. El 77% de los lotes evaluados desarrollan prácticas de conservación de suelos de acuerdo a las características topográficas del terreno.

En relación con el índice estructural del suelo, todas las fincas evaluadas obtuvieron valores altos para este indicador (>9%). Los índices encontrados fueron desde 17.87% para la finca F09-L01 hasta 103.63% para la finca F22-L01, datos que evidencian la relación con los contenidos de carbono orgánico en el suelo. El valor obtenido para F09-L01 puede atribuirse a la falta de prácticas de conservación que eviten la pérdida de nutrientes y erosión del suelo y para el caso de la finca F22-L01, la descomposición de residuos de una cosecha de papa, la incorporación constante de abonos orgánicos y el clima pudieron haber sido los principales factores responsables del valor obtenido para este indicador.

Los datos para densidad aparente variaron entre 0.43 g/cm³ y 0.87 g/cm³, valores propios de suelos clasificados taxonómicamente como Andisoles. De manera general se resalta la importancia del uso y manejo del suelo como los factores de mayor incidencia sobre la densidad aparente. El 96% de los lotes se dedican a la producción de policultivos a partir de la aplicación de una serie de prácticas de conservación de suelos, donde se destaca

por su incidencia en este indicador la labranza mínima y la incorporación de abonos orgánicos.

Indicadores químicos

El carbono orgánico es uno de los indicadores más determinantes en la sostenibilidad del manejo del suelo. Al respecto se pudo evidenciar que los datos obtenidos para este indicador variaron entre 4.56% y 22.00% (Tabla 4).

La precipitación y temperatura son las características climáticas de mayor influencia en el control de la dinámica del carbono, por lo tanto, es posible indicar que las bajas temperaturas (13°C) y elevados porcentajes de humedad (41% - 97%) presentes en la zona contribuyeron a la acumulación de carbono. Adicional a esto, todas las fincas cuentan con texturas con porcentajes de arcilla entre 11.0% y 35.5%, lo que indica una mayor retención de carbono orgánico a partir de mecanismos de tipo físico, químico y bioquímico.

El 46% de los lotes cuentan con un pH ácido (5.6 - 6.0) y el 15% muy ácido (4.6 - 5.5); datos relacionados con el porcentaje de lotes con saturación de bases baja (50%) (Fig. 2) y con el número de lotes con problemas asociados a la toxicidad por aluminio (F23-L01: 1.15 meq/100g; F22-L01: 4.72 meq/100g y F15-L01: 1.57 meq/100g).

Los resultados obtenidos para la CIC pueden estar apoyados por la relación existente entre el pH y este indicador, es decir que, a un mayor pH, mayor CIC (Tabla 4). Todas las fincas evaluadas presentaron valores de CIC clasificados como altos (>20

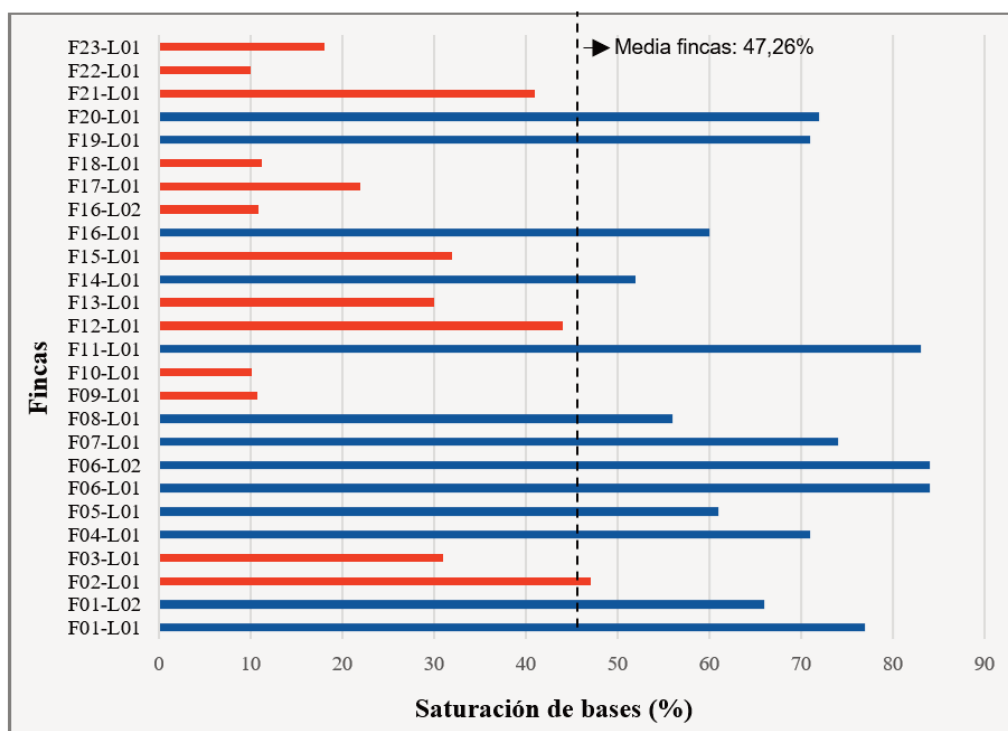


Figura 2. Porcentaje de saturación de bases por finca. El color rojo representa aquellos lotes con saturación de bases baja (>50%) y el azul, aquellos con saturación de bases deseable (<50%) (Ortiz et al. 2004).

Figure 2. Base saturation percentage per farm. Red represents those batches with low base saturation (> 50%) and blue represents those with desirable base saturation (<50%) (Ortiz et al. 2004).

meq/100g), datos que pueden ser respaldados por la diversidad de prácticas de conservación desarrolladas y por el uso y manejo del suelo.

Los valores de CIC alcanzados están relacionados con los contenidos de carbono orgánico en el suelo, por esta razón la finca F20-L01 con la menor CIC (23.3 meq/100g) presentó los niveles más bajos de carbono orgánico (4.45%), por el contrario, la finca F22-L01 con la mayor CIC (69.9 meq/100g) obtuvo los mayores contenidos de carbono orgánico (22.00%), lo que indica que el carbono orgánico contribuye al incremento de la CIC, en tanto, existe una correlación entre estas dos variables (Fig. 3).

Indicadores biológicos

Los suelos presentaron un nivel medio de protección frente a la erosión vinculado al indicador cobertura temporal del suelo. El mayor número de fincas están asociadas a niveles bajos de cobertura temporal del suelo, es decir, que 10 de los 26 lotes se encuentran en un rango bajo, 7 en medio y 9 en alto (Tabla 4), datos que podrían ser apoyados por el número de días que el material vegetal recubre el suelo que oscila entre 166 y 228 respecto a los 360 días del año.

El indicador rotación de cultivos con un promedio de 3.18 obtuvo un valor adecuado, en otras palabras, son fincas que realizan una rotación aleatoria, no planificada bajo criterios técnicos y el periodo de descanso del suelo va desde periodos semestrales a anuales. El 65% de los lotes se caracterizaron por realizar rotación de cultivos de manera planificada con incorporación de abonos verdes, por el contrario, el 8% de los lotes no realizan rotación de cultivos.

El 69% de los lotes evaluados se basan en el criterio de rotación: raíz, hoja y flor que tiene como objetivo reducir el daño por plagas y enfermedades y mejorar la nutrición vegetal y la dinámica del suelo. Otro de los criterios en los que se basan los agricultores es la rentabilidad de sus sistemas productivos, es decir, la rotación la realizan con base a la demanda del mercado y a la disponibilidad de plántulas. El promedio con relación al periodo de descanso del suelo es de 28 días, dato relacionado con la falta de tiempo por

parte del agricultor y mano de obra necesaria para las labores de producción agroecológica, es el caso de la finca F02-L01, F17-L01, F07-L01, F11-L01 y F04-L01.

Para el indicador respiración microbiana, el 42% de los lotes evaluados presentaron un valor medio (1500 – 2000 ppm), dato atribuido fundamentalmente al carbono orgánico e intensidad de la labranza, lo que podría indicar que los altos contenidos de carbono orgánico presentes en los suelos y la implementación de la labranza mínima juegan un papel determinante en la actividad microbiana, ya que intervienen en las propiedades biológicas, actuando básicamente como fuente energética para los organismos heterótrofos del suelo.

Sostenibilidad del manejo del suelo en función del tiempo de transición

Una mirada al conjunto de indicadores para cada tipología de fincas permite caracterizar de manera precisa el comportamiento

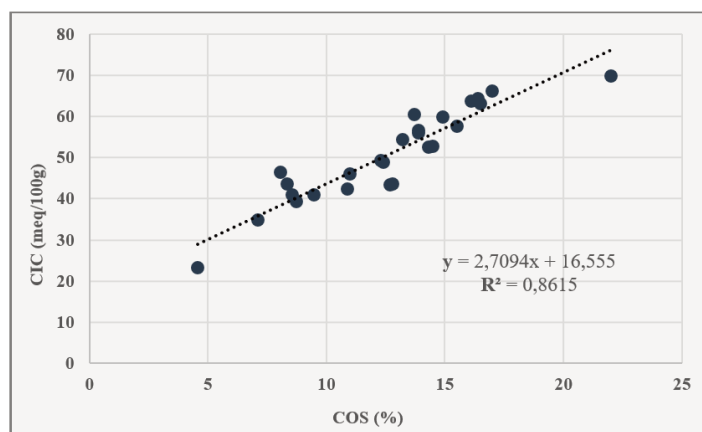


Figura 3. Relación entre la CIC (meq/100g) y COS (%) por finca

Figure 3. Relationship between the CIC (meq/100g) and COS (%) per farm.

de los mismos de acuerdo al tiempo de avance de la transición agroecológica (Fig. 4).

Dos indicadores químicos y dos biológicos mostraron los máximos valores en el grupo uno con el mayor número de años en el proceso de transición agroecológica (≥ 9 años) (Fig. 4). En particular este grupo se caracterizó por la implementación de nueve prácticas de conservación de suelos, entre las que se destacan la construcción de terrazas e implementación de barreras vivas en terrenos con pendiente superior al 5%. El valor alcanzado para arcillas más limos (22%) evidenció el menor promedio obtenido para índice estructural, no obstante, los altos contenidos de carbono orgánico en el suelo fue otro de los factores que incidió en este indicador y en los valores bajos de densidad aparente. La producción constante de abono orgánico en la finca F01-L01, L02 y, por ende, la incorporación continua y abundante al suelo favoreció los porcentajes de carbono orgánico, dato que pudo haber incidido junto con el pH (neutro), la labranza mínima y la humedad (50% - 60%) en el indicador actividad microbiana. La rotación de cultivos desarrollada por las fincas pertenecientes a este grupo se enfocó en una rotación planificada con incorporación de abonos verdes y en último lugar, fue posible evidenciar la baja protección de este subsistema frente a la erosión en relación con el indicador cobertura temporal del suelo.

El grupo dos con cinco a ocho años en el proceso de transición agroecológica obtuvo las condiciones más favorables para los tres indicadores físicos (Fig. 4), datos que fueron apoyados por la cantidad y diversidad de prácticas de conservación desarrolladas (11) y por los altos contenidos de carbono orgánico en el suelo. Al igual que para el grupo uno, los valores alcanzados para carbono orgánico estuvieron relacionados con la incorporación constante de material orgánico en el suelo en la finca F06-L01, L02. En tanto, seis de los trece lotes pertenecientes a este grupo presentaron saturación de bases baja (<50%) y sumado a esto, uno de los lotes tuvo problemas asociados a la toxicidad por aluminio, lo que deja en evidencia los datos conseguidos para pH. El indicador rotación de cultivos alcanzó el mayor porcentaje de lotes para el rango muy adecuado (23%) y adicional a esto, presentó la mayor cantidad de especies vegetales empleadas para esta práctica (22).

Las fincas pertenecientes al grupo tres se caracterizaron por presentar problemas asociados a la degradación del suelo por erosión, en tanto, fue el grupo con el menor número de lotes sin la implementación de prácticas de conservación (7). No obstante, obtuvo por promedio el mayor contenido de carbono orgánico en el suelo, valor atribuido principalmente al dato alcanzado por la finca F22-L01 ubicada en zona de páramo con altas cantidades de material vegetal en descomposición. Así mismo, fue el grupo con la mayor cantidad de lotes con saturación de bases baja (<50%), es decir, cinco de los siete lotes pertenecientes a este grupo y adicional a esto, dos de sus lotes presentaron problemas asociados a toxicidad por aluminio. Adicional a esto, el número de especies empleadas para la rotación de cultivos fue menor respecto al grupo uno y dos (16) y finalmente se determinó que este grupo presentó una media protección del suelo frente a la erosión.

Representatividad de los indicadores en la sostenibilidad del manejo del suelo

Las 8 variables cuantitativas empleadas en el análisis estadístico de componentes principales son resumidas en 4 componentes o nuevas variables que explican el 86.4% de la varianza total explicada por el comportamiento de los datos.

De acuerdo con el porcentaje de varianza para cada uno de los componentes es posible indicar que los indicadores pertenecientes al componente 1 y 2 presentaron la mayor variabilidad y, por lo tanto, el mayor aporte de información explicativa de las diferencias. De esta manera, se identificó que el carbono orgánico del suelo y la capacidad de intercambio catiónico son los indicadores de mayor contribución al estado de sostenibilidad del subsistema suelo para el caso estudiado (Fig. 5).

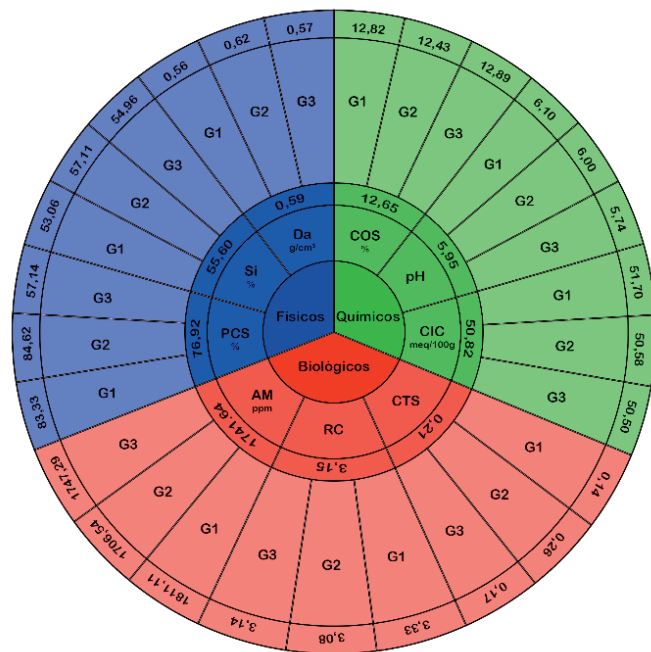


Figura 4. Valor medio para los nueve indicadores evaluados por grupos y por el total de las fincas. PCS: Prácticas de Conservación de Suelos; Si: índice estructural del suelo; Da: Densidad aparente; COS: Carbono Orgánico del Suelo; pH; CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico; CTS: Cobertura Temporal del Suelo; RC: Rotación de Cultivos; AM: Actividad Microbiana.

Figure 4. Average value for the nine indicators evaluated by groups and by the total of the farms. PCS: Soil Conservation Practices; Si: structural index of the soil; Da: Bulk density; COS: Organic Soil Carbon; pH; CIC: Cation Exchange Capacity; CTS: Temporary Land Cover; RC: Crop Rotation; AM: Microbial Activity.

En cuanto al análisis de correspondencia, se logró determinar que la variable rotación de cultivos (cualitativa) presentó la menor contribución al estado de sostenibilidad del subsistema suelo en comparación con los cuatro componentes principales (Tabla 5).

Discusión

El suelo es un subsistema estratégico del ecosistema, que cumple con diversas funciones esenciales para la humanidad (Pereira et al. 2018; Kihara et al. 2020); por tanto, es necesario comprender las relaciones entre las características de los suelos, las funciones que cumplen y el impacto de las intervenciones humanas, ya que esto permitirá reducir los efectos negativos con miras a una agricultura más sostenible y productiva (Vogel et al. 2017).

El estado del suelo coincide con el compromiso e interés por parte de los agricultores de la ARAC en aprender e investigar sobre

Tabla 5. Contribución de los componentes principales y de la variable rotación de cultivos al estado de sostenibilidad del manejo del suelo, ARAC, Subachoque - Cundinamarca.

Table 5. Contribution of the main components and the variable crop rotation to the state of soil management sustainability, ARAC, Subachoque - Cundinamarca.

Variable	Contribución
Componente 1 (cpc 1)	61.82353
Componente 2 (cpc 2)	63.10316
Componente 3 (cpc 3)	24.07374
Componente 4 (cpc 4)	29.20665
Rotación de cultivos (Da 1.RC)	9.213481

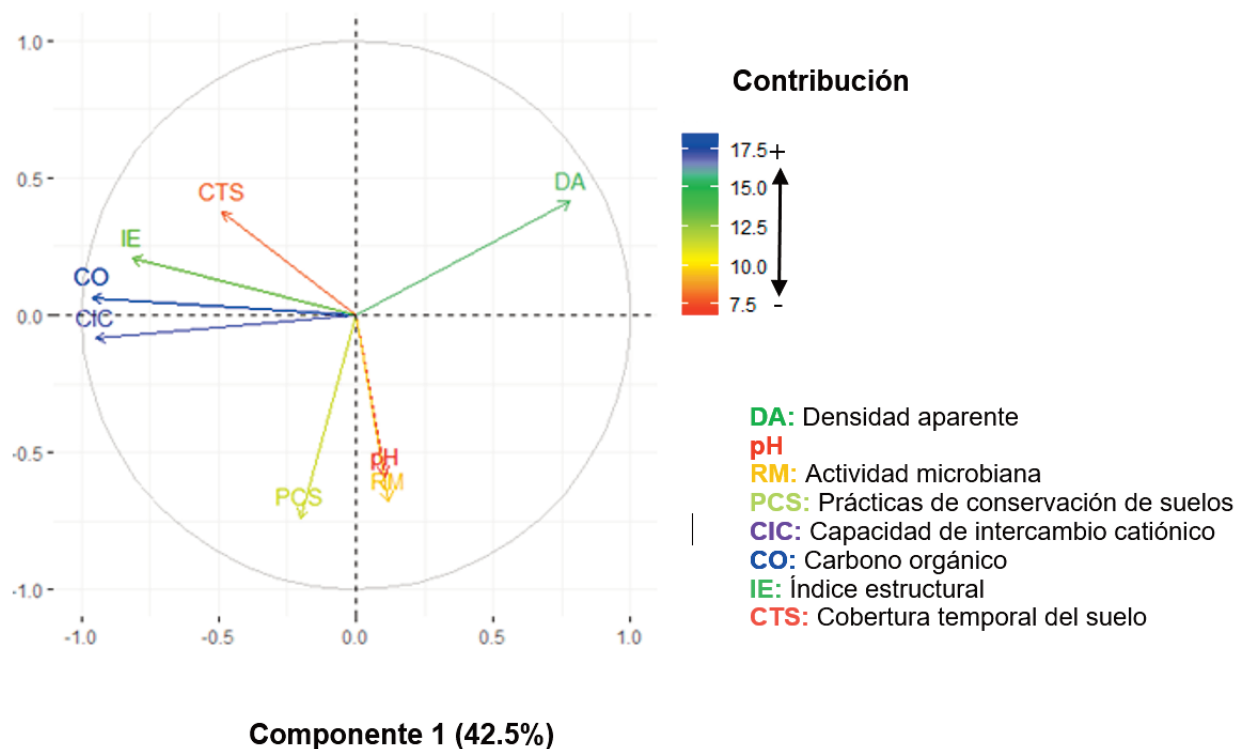


Figura 5. Conformación de componentes principales en el análisis multivariado de indicadores del estado de sostenibilidad del suelo, ARAC, Subachoque – Cundinamarca.

Figure 5. Conformation of main components in the multivariate analysis of indicators of the state of soil sustainability, ARAC, Subachoque - Cundinamarca.

la implementación de prácticas de manejo agroecológico como labranza mínima, asociación y rotación de cultivos, diversificación funcional, abonos orgánicos y barreras vivas. Sánchez de Prager et al. (2012), así como Teixeira et al. (2021), han reportado que prácticas como la conservación y uso de la materia orgánica, labranza mínima o cero, biodiversidad e incorporación de abonos verdes inducen procesos bioquímicos, físicos y biológicos que favorecen la sostenibilidad del suelo (Hernández et al. 2011).

Los resultados obtenidos para el grupo uno y dos estuvieron apoyados por la integración de las propiedades edáficas, su relación y participación activa en la producción y estabilidad de los agroecosistemas. En este sentido, Larios et al. (2014) refieren que las propiedades del suelo están directamente relacionadas, por lo tanto, a medida que un componente es mejorado en el suelo, otro se manifiesta de manera favorable.

Los sistemas agrícolas vinculados al menor tiempo de transición (<5 años) estuvieron asociados a los valores menos favorables para la sostenibilidad del suelo. Sin embargo, es importante considerar que tanto beneficios como tiempo requerido para alcanzar el equilibrio del agroecosistema a partir de un manejo agroecológico es variado, debido a que depende de una serie de factores ambientales y de propiedades inherentes al suelo (Moreira y Castro 2016). Adicional a esto, es necesario tener en cuenta que el suelo en esta región altoandina se ha caracterizado por la formación de materiales amorfos y por la acumulación de carbono orgánico, procesos pedogenéticos que le confieren condiciones de alta fertilidad (Sánchez y Rubiano 2015).

Es posible señalar que las fincas con implementación de prácticas de conservación de suelos según condiciones topográficas del terreno se han caracterizado por reducir la pérdida de agua y aumentar la infiltración mediante la protección de la capa arable (JICA 2016; Ranaivoson et al. 2017). En tanto, una estructura estable del suelo en el tiempo representa un incremento en el diámetro medio de los agregados (Guimarães et al. 2011) y, por consiguiente, una redistribución del sistema poroso con efectos positivos sobre la capacidad de retención de agua, el hábitat microbiano y la protección física de la materia orgánica (Vallejo 2013). Los valores alcanzados para densidad aparente están relacionados

con la presencia en esta región de materiales tobáceos y orgánicos (IGAC 2004) que favorecen condiciones de aireación, drenaje y porosidad y, por ende, la dinámica del suelo (Jojoa y Insuasty 2014).

Los altos contenidos de carbono orgánico en el suelo son característicos de los Andisoles, debido a que la materia orgánica en estos suelos se estabiliza por minerales con ordenación de corto alcance (alofana e imogolita), caracterizados por una elevada superficie específica con carga variable, susceptible de adsorber moléculas orgánicas y/o por la formación de complejos Al-humus o Al(Fe)-alófana (Rodríguez et al. 2004). Así mismo, el desarrollo de prácticas de conservación como labranza mínima e incorporación de abonos orgánicos aplicadas en el total de los lotes, contribuyó en gran medida a la acumulación de carbono orgánico en el suelo coincidiendo con un estudio similar en Brasil (Guimarães et al. 2011). Este incremento, a su vez, tiene una serie de repercusiones en la dinámica química del suelo; así, el 20% de la capacidad de intercambio catiónico del carbono orgánico procede de grupos funcionales fuertemente ionizados como carboxilos y fenólicos, ya que son las principales fuentes de cargas negativas que representan entre el 25% y 90% de la capacidad de intercambio catiónico de horizontes superficiales de suelos bien drenados (Martínez et al. 2008); mientras que la condición ácida de la mayoría de los suelos pudo estar relacionada con la presencia en esta región de vidrio volcánico amorfo rico en aluminio y a los elevados contenidos de materia orgánica que en su proceso de descomposición tienden a acidificar el suelo (Salamanca y Sadeghian 2005).

En relación con los indicadores biológicos, la cobertura temporal del suelo obtuvo una media protección frente a la erosión, debido a que el 72.73% de las fincas incorporan abonos verdes, lo que indica una mayor área cubierta del suelo. No obstante, el 78% de las fincas aplican la práctica de retirar todo el material vegetal al momento de cosechar, seguido por la preparación del terreno para una nueva siembra. En tanto, con un nivel adecuado las fincas realizan una rotación de cultivos aleatoria, no planificada bajo criterios técnicos y el tiempo de descanso del suelo va desde periodos semestrales a anuales y por último, los valores de respiración microbiana estuvieron directamente relacionados con las condiciones físicas del suelo y el aporte de materia orgánica (Forjan y Manso 2016);

sin embargo, es importante tener en cuenta que es un indicador estacionalmente variable, ya que está controlado por factores ambientales como la temperatura, humedad y concentración de oxígeno y factores de uso y manejo del suelo como el pH, contenido de carbono orgánico e intensidad de la labranza (Monsalve et al. 2017).

En relación con la incidencia de los indicadores en la sostenibilidad del manejo del suelo es posible indicar que la capacidad de intercambio catiónico del suelo presenta una relación directa con los contenidos de carbono orgánico, dada su elevada superficie específica y su composición química (Bueno y Fernández 2019), por ende, la capacidad de intercambio catiónico suele ser más alta en suelos con mayor contenido de carbono (Luiz et al. 2018).

Varios índices para evaluar la sostenibilidad del suelo han sido generados recientemente (Laishram et al. 2012; Velásquez et al. 2007; Erkossa et al. 2007). En general, estos índices se enfocan en pronosticar la calidad del suelo como subsistema (MADS 2016; Velásquez et al. 2007) y tienen en común su carácter multicriterio además de que, a largo plazo, son evidentes los cambios en la mayor parte de los indicadores que los integran, lo que coincide con lo registrado en el presente estudio.

Navarrete et al. (2011), así como Vogel et al. (2017) aseguran que la evaluación de los suelos debe orientarse al reconocimiento de los atributos que los conducen a cumplir sus funciones. A este respecto, se destaca el hecho de que no es posible llegar a un acuerdo sobre un único índice que se pueda aplicar de modo genérico para evaluar la sostenibilidad del suelo, si se tiene en cuenta que ésta es una condición propia de una localidad o región (Acevedo y Angarita 2013), por lo tanto los indicadores que se usen para su valoración debería ser elegidos de acuerdo a las condiciones locales propias, teniendo en cuenta que su selección sea representativa de las dimensiones física, química y biológica que integran la vida del suelo. Este artículo defiende la idea de que el uso sostenible del suelo está relacionado a las cualidades físicas, químicas y biológicas del suelo que se pueden mejorar paulatinamente con el avance de un proceso de transición agroecológica y que, en su conjunto, determinan un estado de calidad integral que asegure sus condiciones de fertilidad y productividad a través del tiempo.

Más allá de cuál índice usar, tanto el manejo del suelo, como su evaluación bajo un enfoque sostenible, deben concebirse como actividades permanentes en el tiempo, de tal manera que se logren beneficios a largo plazo y se reduzca paulatinamente su vulnerabilidad al desgaste (Ayerdirs 2017). En este sentido, el manejo sostenible del suelo genera un impacto positivo a la sociedad si se toma en cuenta que existe una estrecha relación entre la calidad del suelo y la seguridad alimentaria (Zanella et al. 2015); así mismo, constituye respuesta a los efectos adversos del cambio climático global (Zhang et al. 2017).

Conclusiones

La construcción de un marco de análisis permite la selección de indicadores para las dimensiones física, química y biológica del subsistema suelo, lo que posibilita una evaluación integral de sostenibilidad de su manejo.

Los sistemas agrícolas con el mayor número de años (≥ 5 años) en el proceso de transición presentaron condiciones favorables para ocho de los nueve indicadores evaluados, por lo tanto, es posible indicar que la conversión hacia la agroecología, impulsa cambios positivos en el estado de sostenibilidad del manejo del suelo asegurando características físicas, químicas y biológicas adecuadas para garantizar su fertilidad a través del tiempo, esto debido fundamentalmente al compromiso e interés por parte de los agricultores en aprender e investigar sobre la implementación de prácticas de manejo agroecológico como labranza mínima, rotación y asociación de cultivos, diversificación funcional, abonos orgánicos y barreras vivas.

Las dimensiones físicas, químicas y biológicas evaluadas presentaron en general condiciones favorables para el suelo como

consecuencia de la formación de materiales amorfos y acumulación de carbono orgánico, procesos pedogenéticos propios de los Andes y por un manejo apropiado siguiendo los principios de la agroecología.

Los indicadores de mayor contribución al estado de sostenibilidad del uso del suelo fueron carbono orgánico y capacidad de intercambio catiónico, lo que evidencia una fuerte interrelación de estas variables en relación con los demás indicadores contemplados en esta evaluación.

Contribución de los autores

Mónica León: Conceptualización, Análisis formal, Adquisición de fondos, Investigación, Metodología, Administración de proyectos, Recursos, Validación, Visualización, Redacción - borrador original, Redacción - revisión y edición. Álvaro Acevedo: Conceptualización, Análisis formal, Metodología, Administración de proyectos, Supervisión, Validación, Redacción - revisión y edición.

Agradecimientos

A la Asociación Red Agroecológica Campesina de Subachoque, Cundinamarca por permitir el desarrollo de la presente investigación. Al Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional de Colombia (IBUN), sede Bogotá por la asesoría y préstamo de sus instalaciones.

Financiación

Este trabajo fue financiado por la Universidad Nacional de Colombia, en el marco de la "Convocatoria para el apoyo a la financiación de proyectos de tesis para fortalecer y consolidar los programas de doctorado y maestría de la Facultad de Ciencias Agrarias, sede Bogotá - 2018, Modalidad 2".

Referencias

- Abi-Saab, R. 2012. *Evaluación de la calidad del suelo, en el sistema productivo orgánico la Estancia, Madrid, Cundinamarca, 2012. Utilizando indicadores de calidad de los suelos*. Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.
- Acevedo, Á y Angarita, A. 2013. Metodología para la evaluación de Sostenibilidad, a partir de indicadores Locales para el diseño y desarrollo de Programas agroecológicos – MESILPA. UNIMINUTO, Bogotá, Colombia.
- Ayerdis, W. 2017. Manejo Sostenible del Recurso Suelo en el Municipio El Rosario-Carazo. Una Propuesta de Política. *Revista Electrónica de Investigación en Ciencias Económicas Abriendo Camino al Conocimiento* 5(10): 54-84.
- Bai, Z., Caspari, T., Ruiperez, M., Batjes, N., Mader, P., Bunemann, E., et al. 2018. Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China. *Agriculture and Environment* 265(1): 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.028>
- Bueno, R., Fernández, J. 2019. La capacidad de intercambio catiónico del suelo: una bóveda de nutrición clave en la producción de alimentos. *Ámbito investigativo* 4(1): 8-12.
- Dec, D., Ivelic, S., Zúñiga, F., Balocchi, O., López, I., Horn, R., et al. 2015. Parámetros de capacidad e intensidad del sistema poroso para evaluar la calidad física de un Andisol bajo pastoreo. *Ciencia del suelo* 43(2): 77-87. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2015.v43n2-09>
- Dussán, C., Duque, H., González, J. 2006. Caracterización tecnológica de caficultores de economía campesina de los principales municipios cafeteros de Colombia. *Cenicafé* 57(3):167-186. <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1397>
- Erkossa, T., Itanna, F., Stahr, K. 2007. Indexing soil quality: a new paradigm in soil science research. *Australian Journal of Soil Research* 45: 129-137. <https://doi.org/10.1071/SR06064>
- Etchevers, J., Saynes, V., Steelers, M. 2015. Manejo sustentable del suelo para la producción agrícola. En Etchevers, J., Saynes, V., Steelers, M. (eds.), *Ciencia, Tecnología e Innovación*, pp. 63-79. Terra latinoamericana Especial Programa Mexicano del Carbono, Texcoco, México.

- FAO 2015. *Boletín del año internacional de los suelos América Latina y el Caribe*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Santiago de Chile, Chile.
- Forjan, H., Manso, L. 2016. *Rotaciones y secuencias de cultivos en la región mixta cerealera del centro-sur bonaerense*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina.
- Fuente. 2011. *Análisis de componentes principales*. Universidad Autónoma de Madrid, España.
- Fundación Hondureña de Investigación Agrícola – Unión Europea (FHIA-UE) 2004. *Guía sobre prácticas de conservación de suelos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Cortés, Honduras.
- Gliessman, S. 2002. *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. Eric Engles, Turrialba, Costa Rica.
- Guimarães, R., Ball, C., Tormena, C. 2011. Improvements in the visual evaluation of soil structure. *Soil Use and Management* 27: 395-403. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00354>
- Hernández, R., Morros, M., Bravo, C., Lozano, Z., Herrera, P., Ojeda, A., et al. 2011. La integración del conocimiento local y científico en el manejo sostenible de suelos en agroecosistemas de sabanas. *Interciencia* 36(2): 104-112.
- Holdridge, L. 1987. *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- IDEAM y UDCA 2015. *Síntesis del estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia - 2015*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. Bogotá, Colombia.
- IGAC 2000. *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, Colombia.
- IGAC 2004. *Guía de muestreo*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, Colombia.
- IGAC 2006. *Métodos analíticos de laboratorio de suelos*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, Colombia.
- JICA 2016. *Manual del protagonista – Prácticas de conservación de suelos y aguas*. Agencia Japonesa de Cooperación Internacional e Instituto Nacional Tecnológico, Managua, Nicaragua.
- Jojoa, A., Insuasty, X. 2014. *Evaluación inicial de propiedades físicas del suelo en el arreglo agroforestal aliso (Alnus jorullensis H.B.K.) – papa (Solanum tuberosum L.)*. Tesis de pregrado, Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia. Este recurso no es citable.
- Kihara, J., Bolo, P., Kinyua, M., Nyawira, S., Sommer, R. 2020. Soil health and ecosystem services: Lessons from sub-Saharan Africa (SSA). *Geoderma* 370: 114342. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114342>
- Laishram, J., Saxena, K.G., Maikhuri, R.K., Rao, K.S. 2012. Soil quality and soil health: A review. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences* 38 (1): 19-37.
- Larios, R., Salmerón, F., García, L. 2014. Fertilidad del suelo con prácticas agroecológicas y manejo convencional en el cultivo de café. *La Calera* 14 (23): 67-75. <https://doi.org/10.5377/calera.v14i23.2660>
- Luiz, F., Ramos, C., Cayó, Gontijo, I. 2018. Propiedades de la fertilidad de un suelo cañero bajo diferentes tipos de gestión orgánica y convencional. *La Habana* 39 (4): 13-20.
- MADS 2016. *Política para la gestión sostenible del suelo*. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Martínez, E., Fuentes, J., Acevedo, E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* 8 (1): 68-96. <https://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Monsalve, O., Gutiérrez, J., Cardona, W. 2017. Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas orgánicas al suelo. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 11 (1): 200-209. <https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.5663>
- Moreira, D., Castro, C. 2016. *Prácticas agroecológicas en la producción de hortalizas y vegetales*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Costa Rica.
- Municipio de Subachoque 2019. *Documento diagnóstico: revisión y ajuste esquema de ordenamiento territorial municipio de Subachoque, Cundinamarca (02)*, Municipio de Subachoque y CIDETER Ltda., Bogotá, Colombia.
- Navarrete, A., Vela, G., López, J., Rodríguez, M. 2011. Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *ContactoS* 80(1): 29-37.
- Ortiz, M., Zapata, R., Sadeghian, S., Franco, H. 2004. Aluminio Intercambiable En Suelos Con Propiedades Ándicas Y Su Relación Con La Toxicidad. *Cenicafé* 55(2): 101-110.
- Paolini, J. 2017. Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *Terra Latinoamericana* 36(1): 13-22. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.257>
- Pengue, W. 2005. *Agricultura industrial y transnacionalización en América Latina: La transgénesis de un continente*. Grupo de Ecología del Paisaje y Medio Ambiente, Buenos Aires, Argentina.
- Perales, A., Loli, O., Alegre, J., Camarena, F. 2009. Indicadores de sustentabilidad del manejo de suelos en la producción de arveja (*Pisum sativum* L.). *Ecología Aplicada* 8 (2): 47-52.
- Pereira, P., Bogunovic, I., Muñoz, M., Brevik, E. 2018. Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Current Opinion in Environmental Science and Health* 5: 7-13. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.003>.
- Pieri, C. 1995. Long-term management experiments in semi-arid Francophone Africa. En: Lal, R., Stewart, B. (eds.), *Experimental basis for sustainability and environmental quality*, pp. 225-266. Lewis Publishers, Boca Raton, FL., EEUU.
- Ranaivoson, L., Naudin, K., Ripoché, A., Affholder, F., Rabeharisoa, L., Corbeels, M. 2017. Agro-ecological functions of crop residues under conservation agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 37: 26.
- Ricoy, L. 2006. Contribución sobre los paradigmas de investigación. *Revista Centro de Educación* 1(31): 11-22. <https://doi.org/10.5902/198464441486>
- Rodríguez, A., Arbelo, C., Notario, J., Mora, J., Guerra, J., Armas, C. 2004. Contenido y formas de carbono orgánico en andosoles forestales: aproximación a su dinámica. *Edafología* 11(1): 67-102.
- RStudio Team 2019. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA, EE.UU. Disponible en: <http://www.rstudio.com/>
- Salamanca, J., Sadeghian, K. 2005. La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 56(4): 381-397.
- Sánchez, G. 2009. *Análisis de la sostenibilidad agraria mediante indicadores sintéticos: aplicación empírica para sistemas agrarios de Castilla y León*. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Sánchez de Prager, M., Naranjo, R., Sanclemente, O. 2012. El suelo, su metabolismo, ciclaje de nutrientes y prácticas agroecológicas. *Agroecología* 7(1): 19-34.
- Sánchez, J., Rubiano, Y. 2015. Procesos específicos de formación en Andisoles, Alfisoles y Ultisoles en Colombia. *Revista EIA* 12(2): 85-97. <https://doi.org/10.14508/reia.2015.11.E2.85-97>
- Sarandón, S., Zuluaga, M., Cieza, R., Gómez, C., Janjetic, L., Negrete, E. 2008. Evaluación de la sustentabilidad de sistemas agrícolas de fincas en Misiones, Argentina, mediante el uso de indicadores. *Agroecología* 1(1): 19-28.
- SEMARNAT 2015. *Suelos, bases para su manejo y conservación*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable, Tlalpan, México.
- Texeira, H., Bianchi, F., Cardoso, I., Tiftonell, P., Peña, M. 2021. Impact of agroecological management on plant diversity and soil-based ecosystem services in pasture and coffee systems in the Atlantic forest of Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 305: 107171. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107171>
- USDA 1999. *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Traducción de: Área de Cartografía de Suelos y Evaluación de Tierras*. Departamento de Agricultura, Servicio de Investigación Agrícola, Servicio de Conservación de Recursos Naturales e Instituto de Calidad de Suelos, Washington, DC. Estados Unidos.
- Vallejo, V. 2013. Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de los suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia forestal* 16(1): 83-99. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a06>
- Vivanco, M. 1999. *Análisis estadístico multivariable: teoría y práctica*. Editorial Universitaria. Santiago de Chile, Chile. 234 p.
- Velásquez, E., Lavelle, P., Andrade, M. 2007. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology & Biochemistry* 39: 3066–3080. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.06.013>
- Vogel, H., Bartke, S., Daedlow, K., Helming, K., Kögel, I., Lang, B., et al. 2017. Sustainable soil management requires a systemic approach. *SOIL Discuss.* <https://doi.org/10.5194/soil-2017-26>

- Zanella, M., Rahmanian, M., Perch, L., Callenius, C., Rubio, J., Vuningoma, F., et al. 2015. Discussion: Food security and sustainable food systems: The role of soil. *International Soil and Water Conservation Research* 3: 154–159. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.06.001>
- Zhang, L., Wang, G., Zheng, Q., Liu, Y., Yu, D., Shi, X., et al. 2017. Quantifying the impacts of agricultural management and climate change on soil organic carbon changes in the uplands of Eastern China. *Soil and Tillage Research* 174: 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.06.005>