

VALORACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL MEDIANTE INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO, EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CAFÉ EN COLOMBIA.

Fernando Farfán-Valencia*; Édgar Hincapié-Gómez*

RESUMEN

FARFÁN V., F.; HINCAPIÉ G., E. Valoración de la sostenibilidad ambiental mediante indicadores de calidad del suelo, en sistemas de producción de café en Colombia. Cenicafé 62 (1):100-118.2011.

En los departamentos de Santander, Cauca y Caldas, se valoró la sostenibilidad ambiental, por medio de indicadores de calidad del suelo, en sistemas de producción de café. En Santander se evaluaron café con sombrío de guamo + carbonero, con y sin fertilización, y café con sombrío de guayacán + nogal, con y sin fertilización, y un testigo o barbecho; en Cauca se evaluó una finca de producción de café orgánico y tres de café convencional, y en Caldas un sistema de producción de café orgánico, dos de café convencional, con y sin aplicación de fertilizantes químicos, y un testigo. El Índice General de Sostenibilidad Ambiental (IGSA) estuvo compuesto por siete variables físicas, trece químicas y tres biológicas. La metodología permitió concluir que en Santander los sistemas de producción de café con sombrío de guamo + carbonero, con y sin fertilización, y café con sombrío de guayacán + nogal, con y sin fertilización, se ubican en la categoría de sostenibles, con valores de IGSA de 0,65; 0,59; 0,62 y 0,51, respectivamente, y el testigo se ubicó en la categoría de medianamente sostenible (0,37). En Cauca, los sistemas de producción de café orgánico y los convencionales se clasifican en la categoría de sostenibles, con valores de IGSA de 0,52; 0,52; 0,56 y 0,57, respectivamente. En Caldas, los sistemas de producción de café orgánico, convencionales y el testigo, se clasifican en la categoría de sostenibles, con IGSA de 0,63; 0,60; 0,62 y 0,58, respectivamente.

Palabras clave: Índice General de Sostenibilidad Ambiental, cafetal con sombrío, sistema convencional, producción orgánica.

ABSTRACT

In the departments of Santander, Cauca and Caldas, environmental sustainability was assessed by means of indicators of soil quality in coffee production systems. In Santander, coffee with guamo + carbonero shade with and without fertilization, and coffee with guayacán + walnut shade with and without fertilization, and a witness or fallow were evaluated. In Cauca, one organic coffee producer farm and three conventional coffee producer farms were evaluated. In Caldas, one organic coffee production system, two conventional coffee production systems with and without application of chemical fertilizers, and a witness were evaluated. The General Index of Environmental Sustainability (GIES) was made up by seven physical variables, thirteen chemical and three biological. The methodology allowed concluding that in Santander the coffee production systems with guamo + carbonero shade with and without fertilization, and coffee with guayacán + walnut shade with and without fertilization are placed in the category of sustainable, with GIES values of 0.65, 0.59, 0.62 and 0.51, respectively, and the witness was placed in the category of moderately sustainable (0.37). In Cauca, the organic coffee and conventional production systems are classified in the category of sustainable, with GIES values of 0.52, 0.52, 0.56 and 0.57, respectively. In Caldas, the organic and conventional coffee production systems, as well as the witness are classified in the category of sustainable, with GIES values of 0.63, 0.60, 0.62 and 0.58, respectively.

Keywords: General Index of Environmental Sustainability, coffee plantation under shade, conventional system, organic production.

* Investigador Científico I. Fitotecnia y Suelos, respectivamente. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

Los principales objetivos en la caficultura son lograr una producción de calidad y estable, poco dependiente de insumos externos, bajos costos de producción y a la vez conservar los recursos naturales, como suelo, agua y la biodiversidad (12). Un sistema diversificado, con un suelo rico en materia orgánica y biológicamente activo, se considera un sistema no degradado y productivo. En otras palabras, un agroecosistema de café rico en biodiversidad, la cual a partir de una serie de sinergismos subsidia la fertilidad edáfica, la fitoprotección y la productividad del sistema, se dice ser sostenible o saludable (19).

El concepto sostenibilidad es de gran relevancia y utilidad, pero debe ser cuantitativo, objetivo y confiable. El primer paso para su valoración es la definición de los objetivos de la medición; el paso siguiente es un diagnóstico del recurso, para evaluar potencialidades y restricciones del recurso disponible, e identificar los procesos predominantes de degradación (11); la evaluación de cambios en los indicadores del suelo y su productividad es el paso siguiente. Si la productividad modifica el indicador de una manera drástica y severa, el paso a seguir es el cambio en el uso de la tierra, su manejo o administración del sistema. Para medir cuantitativamente el uso sostenible del recurso suelo es preciso: (i) Identificar indicadores de sostenibilidad; (ii) Establecer relaciones cuantitativas entre los indicadores; (iii) Definir los límites críticos de los indicadores; (iv) Establecer índices de sostenibilidad; y (v) Desarrollar métodos estandarizados para determinar indicadores de suelo (17). La calidad del suelo ha sido definida como “La capacidad funcional de un tipo de suelo, para sustentar la productividad animal o vegetal, mantener o mejorar la calidad del agua y el aire y sostener el asentamiento y salud humanas con límites ecosistémicos naturales o determinados por su manejo” (10, 30, 35), para un uso

específico, como es el caso de la caficultura colombiana.

Se han desarrollado Índices Aproximados de la Sostenibilidad, como el planteado por Rodríguez y Jiménez (28) el cual clasifica la sostenibilidad de las fincas en alta, media y baja. Amacher y O’Neill (3), desarrollaron un “Índice Aditivo” de calidad del suelo que integra propiedades químicas y físicas del suelo, el cual indica el estado o calidad por aumento o disminución del índice. Karlen y Andrews (16), proponen la construcción de un índice, el cual integra variables físicas, químicas y biológicas del suelo, y permite la evaluación de la calidad. A través del desarrollo y aplicación de indicadores de la calidad del suelo se ha podido valorar el impacto causado por sistemas pastoriles en suelos provenientes de suelos sin cultivar (6); cambios en el uso del suelo provenientes de pastos al ser cultivados con especies arbóreas (14); y valoración de suelos sometidos a diferentes prácticas de cultivo y de manejo (9). Murage *et al.* (21), mediante indicadores de calidad del suelo y percepción de los agricultores, evaluaron suelos productivos y de baja productividad, al relacionar la productividad del suelo con baja compactación, buena humedad, color, presencia de arvenses e invertebrados.

Uno de los desafíos es saber cuándo un agroecosistema es saludable, o en que estado de salud se encuentra después de iniciado el cultivo; aunque se han desarrollado indicadores para alcanzar esta determinación, generalmente éstos consisten en observaciones o mediciones que se realizan a nivel de finca, para saber si el suelo es fértil y conservado, o si las plantas están sanas, vigorosas y productivas. En otras palabras, los indicadores sirven para tomarle el pulso al agroecosistema (2). Hasta el momento, se habla de la importancia de la sostenibilidad ambiental,

en términos de la calidad del suelo y las posibles recomendaciones para lograrlo, pero no se han identificado los indicadores con los cuales se pueda evaluar, con un respaldo estadístico en su construcción. El objetivo del estudio fue plantear una aproximación metodológica para construir indicadores que permitan valorar la calidad del suelo, y a partir de éstos evaluar las sostenibilidad ambiental de sistemas de producción de café.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio. La investigación se llevó a cabo en fincas cafeteras localizadas en la Mesa de los Santos (Santander), en Piendamó (Cauca) y en Chinchiná (Caldas). En la Tabla 1 se presenta la ubicación geográfica y las características climáticas de la zona de estudio.

Finca El Roble. En esta finca se seleccionaron cinco lotes de terreno y tres sistemas de producción, así: dos lotes de terreno sembrados con café y sombrío de *Inga edulis* (guamo santafereño) y *Albizia carbonaria* (carbonero); en uno de ellos se aplicó fertilización orgánica como mezcla de pollinzas, gallinazas y pulpa de café, en dosis de 4,5 kg/planta por año, mientras que el otro no se fertilizó. Igualmente, se tenían dos lotes con el sistema café con sombrío de *Tabebuia rosea* (guayacán rosado) y *Cordia alliodora* (nogal cafetero), con y sin fertilización orgánica, y un lote de terreno que permaneció en barbecho¹ por más de 10 años. En todos los sistemas de producción la densidad de siembra del cafetal fue de 4.500 plantas/ha y la del sombrío de 78 plantas/ha. El cultivo se ha manejado con prácticas orgánicas durante un período de 7 años o más.

Fincas Jardín de Oriente, Vista Hermosa, La Margarita y La Verónica. La evaluación se hizo en toda la finca. La primera de ellas se ha manejado con prácticas orgánicas por más de 7 años y el sistema de producción del café es bajo sombrío de *I. densiflora* (guamo macheto) y plátano; en las otras tres fincas seleccionadas la producción de café fue convencional, es decir, con empleo de productos de síntesis química y sistemas de producción a libre exposición solar. En todos los casos la densidad de siembra del café fue de 5.000 plantas/ha.

Estación Central Naranjal. En la Estación Central Naranjal de Cenicafé, se seleccionaron cuatro lotes de terreno y cuatro sistemas de producción, así: un lote de terreno sembrado con café y con manejo orgánico por más de 7 años; otro lote con café y manejo convencional (aplicación de insumos químicos), un lote con café sin algún tipo de manejo y un lote de terreno que ha permanecido en barbecho por más de 10 años. En todos los casos, la densidad de siembra del cafetal fue de 10.000 plantas/ha y a libre exposición solar.

Variables evaluadas. Para construir los indicadores de sostenibilidad se evaluaron las propiedades químicas: pH, CIC, conductividad eléctrica, contenidos de N, materia orgánica, carbono orgánico, relación C:N, contenidos de Ca, Mg, K, P, Al, Fe, Mn, Zn, Cu, Na, S, B; las propiedades físicas: Densidades real y aparente, porosidad total, conductividad hidráulica saturada, humedad a capacidad de campo, estabilidad de agregados, resistencia a la penetración, retención de humedad a 30, 100 y 1.500 MPa, contenidos de arenas, limos y arcillas; y las propiedades biológicas: cobertura de arvenses, dominancia

¹ Barbecho: Superficie o terreno que ha dejado de cultivarse por más de 3 años (sinónimo de rastrojo).

Tabla 1. Características de clima y ubicación de las áreas seleccionadas

Depto	Fincas	Localización geográfica		Altitud (m)	Temp. (°C)	PPT (mm.año ⁻¹)	HR (%)	Días con lluvia	Brillo solar (h.año ⁻¹)
		LN	LW						
Santander	El Roble	6° 52'	73° 3'	1.646	19,2	1.083	85,6	160	2.016
	Jardín de Oriente	2° 45'	76° 35'	1.671	19,3	2.154	79,9	217	1.566
Cauca	Vista Hermosa	2° 45'	76° 35'	1.671	19,3	2.154	79,9	217	1.566
	La Margarita	2° 45'	76° 35'	1.671	19,3	2.154	79,9	217	1.566
	La Verónica	2° 45'	76° 35'	1.671	19,3	2.154	79,9	217	1.566
Caldas	E. C. Naranjal	4° 58'	75° 39'	1.381	21,4	3.137	68,0	259	1.642

Temp.: Temperatura; PPT: Precipitación; HR: Humedad Relativa; E.C.: Estación Central

de arvenses, población de lombrices y de macroinvertebrados.

Análisis de la información y construcción del indicador

Análisis estadístico. Se realizó análisis descriptivo para las variables evaluadas por localidad, análisis de correlación simple entre las variables, análisis de componentes principales (CP) para selección del conjunto mínimo de variables (CMV) por localidad y total, y análisis de componentes principales con las variables del CMV para selección de coeficientes del índice o ponderación del grupo de variables.

Estandarización de datos. Se transformaron los registros originalmente calculados de cada variable a datos en una escala de 0 a 1. La estandarización se aplicó a las variables del CMV. Para este propósito, al valor del indicador o variable y en cada localidad se asignó un “grado de pertenencia entre 0 y 1”, de acuerdo a las fórmulas o funciones de pertenencia <1>, <2> y <3>. Las funciones son el producto de los procedimientos aplicados.

$$\mu = 0,1 + \left(\left(\frac{V_0 - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \right) * 0,9 \right); V_0 < L_{inf} \quad <1>$$

$$\mu = 1,1 - \left(0,1 + \left(\left(\frac{V_0 - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \right) * 0,9 \right) \right); V_0 > L_{sup} \quad <2>$$

$$\mu = \left(L_{inf} \leq V_0 \leq L_{sup} \right) \quad <3>$$

Donde:

μ = Grado de pertenencia (valor que toma la variable entre 0 y 1)

V_0 = Valor calculado de la variable

V_{min} = Valor mínimo asignado a la variable

V_{max} = Valor máximo asignado a la variable

<1> Función a aplicar cuando la variable tiene una relación directa con la calidad del suelo

<2> Función a aplicar cuando la variable tiene una relación inversa con la calidad del suelo

<3> Función a aplicar cuando la variable está dentro de los rangos óptimos o adecuados para el cultivo

Comparación de los sistemas de producción.

La comparación se realizó mediante la construcción de Diagramas en Red, los cuales son instrumentos indicadores para la evaluación comparativa, análisis y planificación de agrosistemas o fincas destinadas a la producción y desarrollo sostenible; en resumen, el redegrama, es la representación gráfica del sistema de producción estudiado con los valores transformados de las variables físicas, químicas y biológicas.

Valoración cuantitativa o de calidad. Se siguieron los siguientes pasos:

Índice descriptivo. Con el CMV, sus valores estandarizados y ponderados por grupos de variables se construyó el Índice General de Sostenibilidad Ambiental (IGSA).

Aplicación del indicador. A cada sistema de producción por localidad se le aplicó el

índice para realizar las calificaciones de la sostenibilidad ambiental entre sistemas de producción, por cada sitio de estudio. Con la información obtenida se construyó el “Biograma de la Sostenibilidad Ambiental”.

Construcción del Biograma de la Sostenibilidad.

La información obtenida de la aplicación del IGSA se dividió en cuartiles para clasificar los sistemas de producción, de acuerdo a su calificación o puntaje total obtenido, en: <0,25 de baja sostenibilidad; 0,25<0,50 medianamente sostenible; 0,50<0,75 sostenible y >0,75 altamente sostenible.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Construcción del indicador

Selección inicial de variables. De acuerdo al criterio de expertos, para el análisis se preseleccionaron las variables físicas, químicas y biológicas presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Variables físicas, químicas y biológicas preseleccionadas para el análisis.

Variables físicas	Variables químicas		Variables biológicas
Contenido de arena	Nitrógeno	Boro	Arvenses agresivas
Estabilidad de agregados	Magnesio	pH	Arvenses nobles
Contenido de arcilla	Manganeso	Azufre	Materia orgánica
Densidad real	Fósforo	Conductividad eléctrica	Población de lombrices
Retención humedad (30kPa)	Calcio	Cobre	Macroinvertebrados
Ret. humedad (100 kPa)	Cinc	CIC	Cobertura de arvenses
Ret. humedad (1.500 kPa)	Potasio	Hierro	
Densidad aparente	Sodio	Aluminio	
Resistencia a la penetración			
Humedad del suelo			
Conductividad hidráulica			

Análisis estadístico

Pruebas de normalidad. De acuerdo con la prueba de Kolmogorov-Smirnov al 1,0%, todas las variables seleccionadas, tanto por departamento como en general, tuvieron una distribución normal.

Análisis de componentes principales (ACP). El ACP mostró que las 11 variables físicas, en los dos primeros componentes explican el 75,0% de la variabilidad total (Tabla 3).

Para las 16 variables químicas, las tres primeras componentes explican el 80,8% de la variación total (Tabla 4).

Para las seis variables biológicas, las tres primeras componentes explican el 80,3% de la variación total (Tabla 5).

Selección del Conjunto Mínimo de Variables. El criterio aplicado para la selección del CMV fue retener sólo aquellas que por su mayor peso hubiesen quedado ubicadas en

Tabla 3. Peso de las variables físicas en las dos primeras componentes.

Variables	Factor 1	Factor 2	Componente
Are	0,05600	-0,95267	2
EstAgr	-0,17930	0,88477	2
Arc	-0,28506	0,88377	2
DenRea	-0,55949	0,62577	2
ReHu30	0,87172	-0,28663	1
ReHu100	0,73321	-0,52590	1
ReHu1500	0,85207	0,13788	1
DenApa	-0,74793	0,41599	1
ResPen	0,66060	-0,26051	1
HumSue	0,73337	-0,42758	1
ConHid	-0,77000	-0,10746	1

Are: Contenido de arena; EstAgr: Estabilidad de agregados; Arc: Contenido de arcilla; DenRea: Densidad real; ReHu30: Retención humedad (30kPa); ReHu100: Ret. humedad (100 kPa); ReHu1500: Ret. Humedad (1.500 kPa); DenApa: Densidad aparente; ResPen: Resistencia a la penetración; HumSue: Humedad del suelo; ConHid: Conductividad hidráulica

Tabla 4. Peso de las variables químicas en las tres primeras componentes.

Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Componente
N	-0,07369	0,93101	0,10332	2
Mg	0,95746	-0,18402	0,06592	1
Mn	0,95860	0,03359	0,09708	1
P	0,95586	-0,06293	0,08934	1
Ca	0,95117	-0,19192	0,05917	1
Zn	0,94659	-0,10183	0,05701	1
K	0,91540	-0,25442	0,06900	1
Na	0,90626	-0,10721	0,02859	1
B	0,84072	0,07096	0,25717	1
PH	0,83285	-0,01877	-0,32865	1
S	0,78082	-0,21246	-0,01245	1
Con Ele	0,56386	-0,55934	0,16526	1
Cu	0,49192	0,41981	0,28437	1
CIC	-0,14567	0,89698	-0,13446	2
Fe	0,26408	-0,07961	0,77229	3
Al	-0,58631	0,07271	0,61846	3

Con Ele: Conductividad eléctrica

Tabla 5. Peso de las variables en las tres primeras componentes

VARIABLES	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Componente
ArvAgr	-0,93115	0,04680	0,18698	1
ArvNob	0,89639	-0,12285	-0,09265	1
MO	0,57561	0,52399	0,30893	1
PobLom	0,10059	0,89358	-0,02564	2
MacInv	-0,31271	0,73964	-0,06297	2
CobArv	-0,14895	-0,04835	0,95026	3

ArvAgr: Arvenses Agresivas; ArvNob: Arvenses Nobles; MO: Materia Orgánica; PobLom: Población de Lombrices; MacInv: Macroinvertebrados; Cob Arv: Cobertura de Arvenses

el componente 1; así el CMV de variables físicas estuvo compuesto por la Retención de humedad a 300, 100 y 1.500 MPa, la densidad aparente, la resistencia a la penetración, la humedad del suelo y la conductividad hidráulica. El CMV químicas lo conformaron el Mg, Mn, P, Ca, Zn, K, Na, B, pH, S, Conductividad eléctrica y Cu. Adicionalmente y aunque su ubicación fue en el componente dos, se incluyó el N, dada su importancia como indicador de la calidad del suelo. Las variables cobertura de las arvenses nobles y agresivas y contenido de materia orgánica, conformaron el CMV biológicas.

Ponderación de los grupos de variables.

El ACP mostró que las cuatro primeras componentes contribuyen con el 81,1% de la inercia total; por lo tanto, se tomaron las comunalidades hasta estas cuatro componentes. Las comunalidades sirvieron para definir los pesos propios de cada indicador dentro del CMV y, por ende, del grupo de variables (físicas químicas y biológicas), en la construcción del Índice General de Sostenibilidad Ambiental (IGSA). La Tabla 6 muestra las comunalidades hasta la cuarta componente principal y los pesos que se deducen para conformar el IGSA.

Índice descriptivo. El Índice General para valorar la Sostenibilidad Ambiental (IGSA)

de sistemas de producción con café en tres localidades de la zona cafetera Colombiana, quedó construido así:

$$IGSA = \left(\left(\frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n} \right) * 0,28 \right) + \left(\left(\frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n} \right) * 0,58 \right) + \left(\left(\frac{\sum_{i=1}^n B_i}{n} \right) * 0,14 \right)$$

Donde:

IGSA = Índice General de Sostenibilidad Ambiental

F_i = Variables físicas

Q_i = Variables químicas

B_i = Variables biológicas

n = Número de variables físicas, químicas o biológicas

El IGSA construido para valorar la sostenibilidad ambiental de sistemas de producción de café, es concordante con los índices para valorar sistemas de producción a partir de indicadores de la calidad del suelo que integran variables físicas, químicas y biológicas, planteados por Rodríguez y Jiménez (28), Amacher y O’Neill (3) y Karlen y Andrews (16).

Tabla 6. Comunalidades hasta la cuarta componente para los grupos de variables evaluadas.

Variables	Comunalidad*	Peso de la variable	Coficiente para el grupo de variables
Físicas	ReHu30	0,895461	0,28
	ReHu100	0,859848	
	ReHu1500	0,769085	
	DenApa	0,829387	
	ResPen	0,603329	
	HumSue	0,696425	
	ConHid	0,510505	
Químicas	N	0,891865	0,58
	Mg	0,971135	
	Mn	0,937853	
	P	0,928641	
	Ca	0,967354	
	Zn	0,907471	
	K	0,915127	
	Na	0,839789	
	B	0,774888	
	pH	0,765277	
	S	0,758989	
	ConEle	0,647980	
	Cu	0,565015	
Biológicas	ArvAgr	0,897409	0,14
	ArvNob	0,841687	
	MO	0,881516	

*La Comunalidad total (Común) estimada fue de 18,656

Comparación retrospectiva de los sistemas de producción con café

Aplicación de redegramas de la sostenibilidad. En todos los redegramas la interpretación numérica es la siguiente:

Departamento de Santander (Finca El Roble).

En la Figura 1 se presenta el comportamiento de las variables evaluadas en los sistemas de producción y los porcentajes de las áreas ocupadas por los centroides (AC), área verde, del área total de la Figura 1.

Variables			
Físicas	Químicas		Biológicas
1. Retención de humedad a 300 MPa	8. Nitrógeno (N)	15. Sodio (Na)	21. Arvenses agresivas
2. Retención de humedad a 1000 MPa	9. Magnesio (Mg)	16. Boro (B)	22. Arvenses nobles
3. Retención de humedad a 1.500 MPa	10. Manganeso (Mn)	17. pH	23. Materia orgánica (MO)
4. Densidad aparente	11. Fósforo (P)	18. Azúfre (S)	
5. Resistencia a la penetración	12. Calcio (Ca)	19. Conduct. Eléctrica	
6. Humedad del suelo	13. Cinc (Zn)	20. Cobre (Cu)	
7. Conductividad hidráulica	14. Potasio (K)		

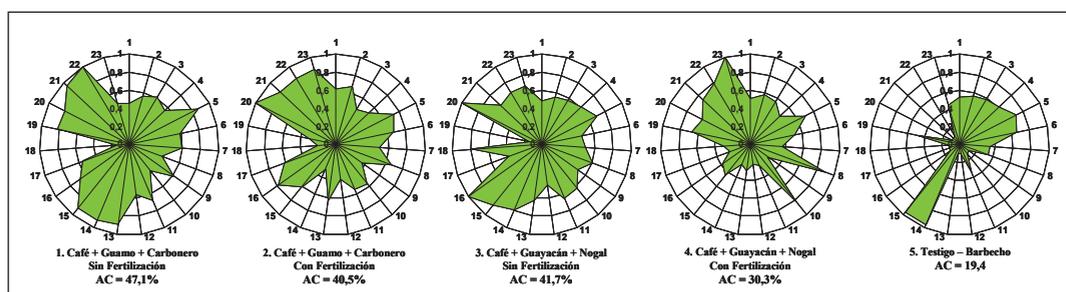


Figura 1. Redegramas con las variables físicas, químicas y biológicas, para cuatro sistemas de producción de café y un testigo (barbecho), en el departamento de Santander.

De los redegramas se pudo inferir que la retención de humedad a 30 kPa estuvo cercana a su límite inferior en los sistemas de producción café + *I. edulis* + *A. carbonaria* sin fertilizar y en los dos sistemas de producción de café con sombríos de *T. rosea* y *C. alliodora*. Solo el sistema café + *I. edulis* + *A. carbonaria* con fertilización presenta la retención de humedad a 1.500 kPa, cercano a su límite inferior. A excepción del primer sistema analizado (café + *I. edulis* + *A. carbonaria* sin fertilizar), la conductividad hidráulica fue muy lenta o cercana a los valores mínimos registrados para la localidad, lo cual se relaciona directamente con la resistencia a la penetración. La condición de no tener valores cercanos a cero en los redegramas denota que las variables físicas no

comprometen la estabilidad o sostenibilidad ambiental de los sistemas estudiados.

En el sistema café + *T. rosea* + *C. alliodora* sin fertilizar, fueron críticos la conductividad eléctrica, el Mg y el Ca, y en el mismo sistema pero con fertilización orgánica, fueron el Mg, Mn, P, Ca, K, pH, los que presentaron contenidos muy superiores a los recomendados para el cultivo del café y en menor proporción Zn, Na, B y S. Las fuentes para la fertilización orgánica de los sistemas que incluyen este tratamiento son una mezcla de 4,5 a 5,0 kg.año⁻¹ por planta de gallinaza, cascarilla de arroz, estiércol vacuno y pulpa de café, la cual puede estar causando los incrementos en los niveles de nutrientes antes descritos. No fueron evidentes

relaciones inversas o negativas entre las variables químicas analizadas.

La reducción en el centroide o área sombreada en el redegrama, es indicativo de la baja estabilidad ambiental del testigo (barbecho), la cual fue determinada por el Mg, Mn, Ca, Zn, B, pH, S y Cu; por el contrario, estos elementos se encontraron en niveles inferiores a los contenidos mínimos recomendados para el café. En sistemas de manejo alternativos de suelos y sistemas convencionales, con cultivos autosostenibles como testigos, Valarini *et al.* (33), obtuvieron en este último mejorías en las propiedades físicas y químicas del suelo.

La mayoría de las variables biológicas estuvieron dentro de los rangos óptimos para el café, haciendo una gran contribución a la sostenibilidad ambiental de los agrosistemas, no obstante, se pudo inferir que los contenidos de materia orgánica correlacionaron inversamente con el porcentaje de cobertura de las arvenses agresivas y positivamente con el de las arvenses nobles. Zagal y Córdova (36) determinaron que la materia orgánica del suelo es la más sensible al manejo agronómico, ubicándose como una de las variables biológicas apropiadas para determinar los cambios tempranos en su calidad.

Los porcentajes de las áreas ocupadas por los centroides (AC) en los redegramas, fueron de 47,1% y 40,5% para los sistemas de producción café + *I. edulis* + *A. carbonaria* sin y con fertilización; en los sistemas de producción de café + *T. rosea* + *C. alliodora* sin y con fertilización fueron de 41,7% y 30,3%, y el control o barbecho de 19,4%. De lo anterior puede deducirse que desde el punto de vista ambiental, en esta localidad, en esta unidad de análisis y bajo las condiciones climáticas y épocas de muestreo y solamente para este estudio, es más benéfico cultivar los suelos en sistemas agroforestales con o sin intervención (aplicación de fertilizantes orgánicos), que mantener suelos en barbechos; resultados similares a los obtenidos por Canu y Zucca (6), Gulser (14) y Diack y Stott (9).

Departamento del Cauca (Fincas orgánica y convencional). En la Figura 2 se presenta el comportamiento de las variables evaluadas en los sistemas de producción y los porcentajes de las áreas ocupadas por los centroides (AC), área amarilla, del área total de la Figura 2.

Para el sistema de siembra de café bajo sombrío, los valores de conductividad hidráulica estimados indican que es la única variable que se encuentra debajo de los límites mínimos establecidos para ésta, lo cual contribuye

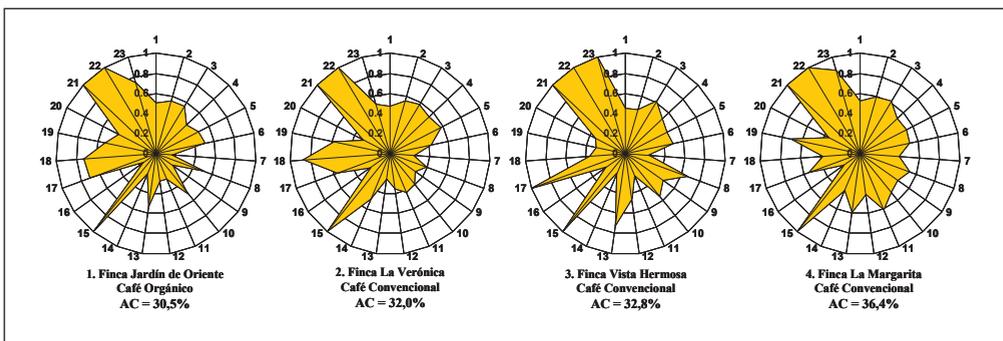


Figura 2. Redegramas con las variables físicas, químicas y biológicas, para una finca de producción de café orgánico y tres de café convencional, departamento del Cauca.

significativamente a la estabilidad ambiental de los sistemas de producción. Aoki y Sereno (4) observaron que la velocidad final del proceso de infiltración se comporta como un indicador de calidad de suelo para detectar diferencias significativas en las propiedades del horizonte superficial, en condiciones de bosque nativo y en un agroecosistema manejado con labranza convencional.

Sin embargo, variables como la retención de humedad a 30 y 100 kPa, sugieren que están muy cerca a los límites inferiores de retención de humedad establecidos; variables que en su conjunto están contribuyendo marcadamente a la reducción de la sostenibilidad ambiental de los agrosistemas evaluados. Solamente en la Finca La Margarita (producción de café convencional), a excepción de la conductividad hidráulica, todas las variables físicas del suelo analizadas se encuentran cercanas a los rangos óptimos establecidos para esta localidad. Lister *et al.* (18), Paz y Sánchez (24) y Glover *et al.* (13), observaron como variables diferenciadoras de la calidad del suelo, la densidad aparente, la macroporosidad, la conductividad hidráulica, el contenido de materia orgánica, la capacidad de retención de humedad, la estabilidad de agregados, la biomasa microbiana y la abundancia de lombrices.

Las variables químicas de mayor valor o peso en la sostenibilidad ambiental de los sistemas de producción evaluados en el departamento del Cauca (contribución a la reducción del área sombreada en la Figura 2) fueron Mg, K y B en el sistema de producción de café orgánico (finca Jardín de Oriente), debido a que sus niveles se encontraron por debajo de los límites inferiores establecidos para el cultivo del café. En el sistema de producción de café convencional (finca La Violeta), los niveles de Zn y B, se encontraron por debajo del límite inferior. En la finca Vista Hermosa (producción de

café convencional), fueron determinantes el P, K y B, el primero se encuentra por debajo del rango inferior para el cultivo y los otros dos por encima de estos límites. El B fue la variable química que se presentó por debajo de los niveles mínimos establecidos para café, en la finca La Margarita.

Las variables Mg, P, Ca, K y en todos los sistemas de producción evaluados están por debajo del límite inferior adecuado para el cultivo del café o se encuentran muy cercanos a este valor, lo cual por sus valores estandarizados estimados, entre 0,15 y 0,25, están contribuyendo marcadamente a la sostenibilidad ambiental de los agrosistemas valorados. Las variables biológicas evaluadas no comprometen notoriamente la estabilidad ambiental de los sistemas de producción de café, convencional u orgánicos; siendo notable la contribución de “la dominancia de arvenses nobles” a esta estabilidad; Torres *et al.* (31) indican que la conservación de sistemas de producción, en cuanto a pérdidas de suelo, es debida a las coberturas de arvenses, mas que a cambios en las propiedades químicas y físicas.

En los redegramas, los porcentajes de las áreas ocupadas por los centroides (AC) fueron de 30,5% para el sistema de producción de café orgánico, y de 32,0%, 32,8% y 36,4% en los sistemas de producción de café convencional, en las fincas La Verónica, Vista Hermosa y La Margarita, respectivamente. Debido a la similitud en las áreas ocupadas por los centroides de los redegramas se puede presumir que los sistemas de producción de café donde se hacen prácticas y aplicaciones de productos de síntesis química, son ambientalmente sostenibles como aquellos sistemas de producción donde no se hace ningún uso de ellos, siempre que estas prácticas sean las técnicamente recomendadas. En sistemas de producción sin el empleo de productos químicos de

síntesis al compararse con sistemas donde se hace uso de ellos, no se han encontrado diferencias en la fertilidad, pH, N, materia orgánica, Ca, Cu, Zn, Mn y Fe; pero sí hay diferencias en las poblaciones de actinomicetos y lombrices, densidad aparente y resistencia a la penetración, a favor de los sistemas de producción orgánico (5, 12, 20).

Departamento de Caldas (Estación Central Naranjal). En la Figura 3 se presenta el comportamiento de las variables evaluadas en los sistemas de producción y los porcentajes de las áreas ocupadas por los centroides (AC), área azul, del área total de la Figura.

Los valores calculados de conductividad hidráulica indican que ésta es la única variable, y específicamente para los sistemas de siembra de café orgánico y convencional junto con el barbecho, que se encuentra debajo de los límites mínimos establecidos para esta variable. No obstante, variables como la densidad aparente y la retención de humedad a 1.500 kPa, en los sistemas de producción convencional, sugieren que están muy cerca a los límites inferiores; variables que en su conjunto están contribuyendo marcadamente a la reducción de la sostenibilidad ambiental de los agrosistemas evaluados.

Las variables biológicas evaluadas no comprometen notoriamente la estabilidad ambiental de los sistemas de producción de café estudiados. En estudios realizados por Porras (26), en sistemas de producción orgánica y convencional de café, y su impacto en la calidad de suelos, observó que la biomasa microbiana y carbono orgánico mostraron correlación con suelos bajo bosques, la población de lombrices tuvo correlación con suelos bajo producciones orgánicas, y la densidad aparente y el contenido de K mostraron correlaciones con los suelos bajo producciones convencionales. Alcántara y Ferreira (1) evaluaron la materia orgánica del suelo, densidad aparente, porosidad total y la estabilidad de agregados, obteniendo que estas variables se relacionan directamente con el contenido de la materia orgánica. Han *et al.* (15) observaron que la aplicación de fertilizantes inorgánicos afecta la dinámica del carbón y retrasa la tasas de descomposición de la materia orgánica. George (12) determinó que las variables biológicas se asocian positivamente con suelos cultivados con café orgánico, y que variables como densidad aparente, resistencia a la penetración, contenidos de P, K, Cu, Zn y Mn están asociadas negativamente con bosques, pero que a su vez están positivamente asociadas a cultivos

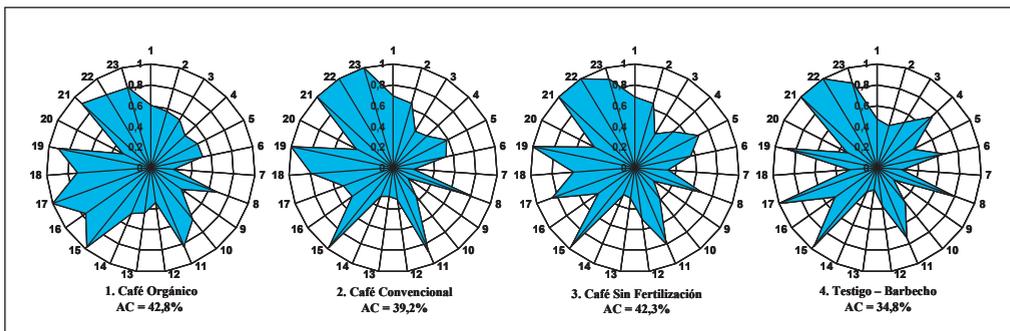


Figura 3. Redegrana con las variables físicas, químicas y biológicas para cuatro sistemas de producción de café y un testigo (barbecho), en el departamento de Caldas.

convencionales. Resultados similares son reportados por Matoso *et al.* (19) y Carvalho *et al.* (8), en diversos sistemas de producción.

En los redegramas los porcentajes de las áreas ocupadas por los centroides fueron de 42,8% para el sistema de producción de café orgánico, 39,2% para el sistema de producción de café convencional con aplicación de fertilizante químico, de 42,3% para el sistema de producción de café sin aplicación de algún tipo de fertilizante y de 34,8% para el control o barbecho. De estos resultados se puede inferir que los sistemas de producción de café donde se hacen prácticas y aplicaciones de productos de síntesis química, son tan ambientalmente sostenibles como aquellos sistemas de producción donde no se hace ningún uso de ellos, y que desde el punto de vista ambiental, son mas sostenibles los sistemas de producción de café, con aplicación de fertilizantes orgánicos o sin fertilización ninguna, que mantener áreas en barbechos.

Índice general de sostenibilidad ambiental (IGSA) en los sistemas de producción

Departamento de Santander. Los índices parciales del grupo de variables físicas para los sistemas de producción de café + *I. edulis* + *A. carbonaria*, sin y con fertilización, fueron de 0,17 y 0,16; para los sistemas de producción de café + *T. rosea* + *C. alliodora* el índice fue de 0,15 y en el barbecho o testigo de 0,16. Los índices parciales del grupo de variables químicas para los sistemas de producción de café + *I. edulis* + *A. carbonaria*, sin y con fertilización, fueron de 0,37 y 0,31, para los sistemas de producción de café + *T. rosea* + *C. alliodora* de 0,38 y 0,25, y en el barbecho o testigo de 0,18. Los índices parciales del grupo de variables biológicas para los sistemas de producción de café + *I. edulis* + *A. carbonaria*, sin y con fertilización, fueron de 0,11 y 0,12;

para los sistemas de producción de café + *T. rosea* + *C. alliodora* éstos fueron de 0,09 y 0,12 y en el barbecho o testigo de 0,03.

En la la Figura 4, se presenta la valoración de la sostenibilidad ambiental mediante indicadores de calidad del suelo, en una escala de 0 a 1, de los agrosistemas estudiados.

De acuerdo al índice de sostenibilidad ambiental construido con los conjuntos de variables físicas, química y biológicas del suelo, los sistemas de producción café con sombrío de *I. edulis* + *A. carbonaria*, con y sin fertilización, y café con sombrío de *T. rosea* + *C. alliodora*, con y sin fertilización, se ubican en la categoría de sostenibles, con valores de IGSA de 0,65; 0,59; 0,62 y 0,51, respectivamente, no obstante son calificaciones muy cercanas a las de la categoría de medianamente sostenibles y, por lo tanto, deberán implementarse las prácticas agronómicas necesarias para incrementar el grado de sostenibilidad ambiental de todos los sistemas. El barbecho o testigo se ubica en la categoría de medianamente sostenibles con un valor de IGSA de 0,37.

Desde el punto de vista de su valoración, los sistema agroforestales contribuyen más al mejoramiento y mantenimiento de la calidad de los suelos, y éstos a su vez contribuyen a la sostenibilidad ambiental de los sistemas que se dejan en barbechos; Navas *et al.* (22) estudiaron la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de nutrientes, la retención y velocidad de infiltración del agua, el pH y contenido de carbono, como indicadores de la recuperación de suelos abandonados, después de haber sido plantados con especies forestales, obteniendo que estas variables son indicadores de la recuperación de la calidad de los suelos degradados, y Obando *et al.* (23) mediante un Índice Acumulativo de nueve variables de Calidad

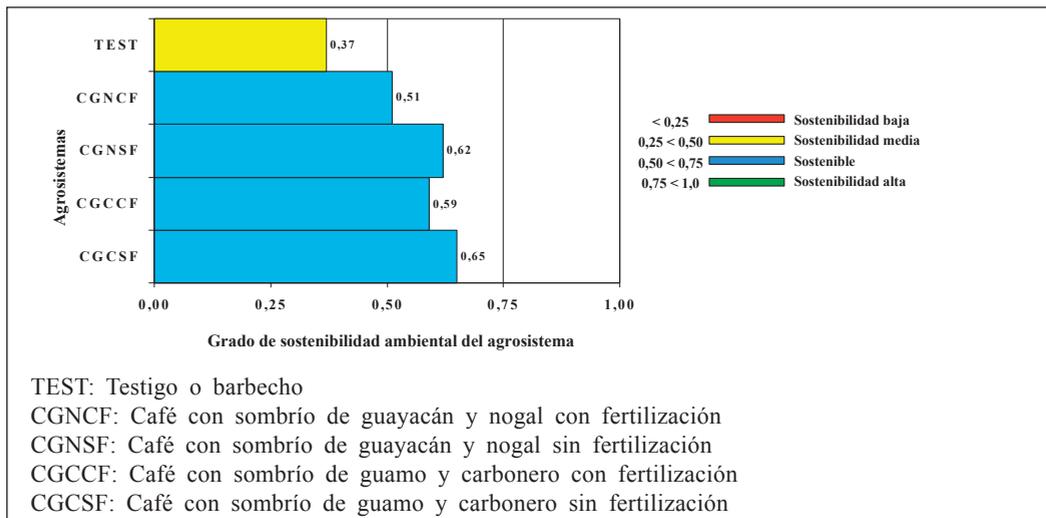


Figura 4. Escala de valoración de la sostenibilidad ambiental en los agrosistemas evaluados en el departamento de Santander.

del suelo (IAC), encontraron diferencias significativas de IAC al comparar sistemas agroforestales con cultivos a libre exposición de *Rubus glaucus*.

Departamento del Cauca. Los índices parciales del grupo de variables físicas para los sistemas de producción de café orgánico y convencional, en las fincas La Violeta y Vista Hermosa, fueron de 0,13, y de 0,15 en el sistema de producción de café convencional en la finca La Margarita. Los índices parciales del grupo de variables químicas para el sistema de producción de café orgánico fueron de 0,27 y para los convencionales en las fincas La Violeta, Vista Hermosa y La Margarita, de 0,27; 0,29 y 0,30, respectivamente. Los índices parciales del grupo de variables biológicas para el sistema de producción de café orgánico fue de 0,13 y para los convencionales en las fincas La Violeta, Vista Hermosa y La Margarita, de 0,12; 0,14 y 0,13, respectivamente.

En la Figura 5 se presenta la valoración de la sostenibilidad ambiental mediante

indicadores de calidad del suelo, en una escala de 0 a 1, de los agrosistemas estudiados.

De acuerdo al índice de sostenibilidad ambiental construido con los conjuntos de variables físicas, químicas y biológicas del suelo, los sistemas de producción de café orgánico (finca Jardín de Oriente) y convencionales (fincas La Violeta, Vista Hermosa y La Margarita) se clasifican en la categoría de sostenibles, con valores de pertenencia de 0,52; 0,52; 0,56 y 0,57, respectivamente. No obstante, éstas son calificaciones muy cercanas a las de la categoría de medianamente sostenibles y, por lo tanto, deberán implementarse las prácticas agronómicas necesarias para incrementar el grado de sostenibilidad ambiental de los sistemas.

En las fincas convencionales y en las orgánicas fue evidente un alto grado de tecnificación caracterizado por la adopción de prácticas recomendadas para el cultivo del café, lo cual permitió inferir que de aplicarse adecuada y oportunamente estas prácticas,

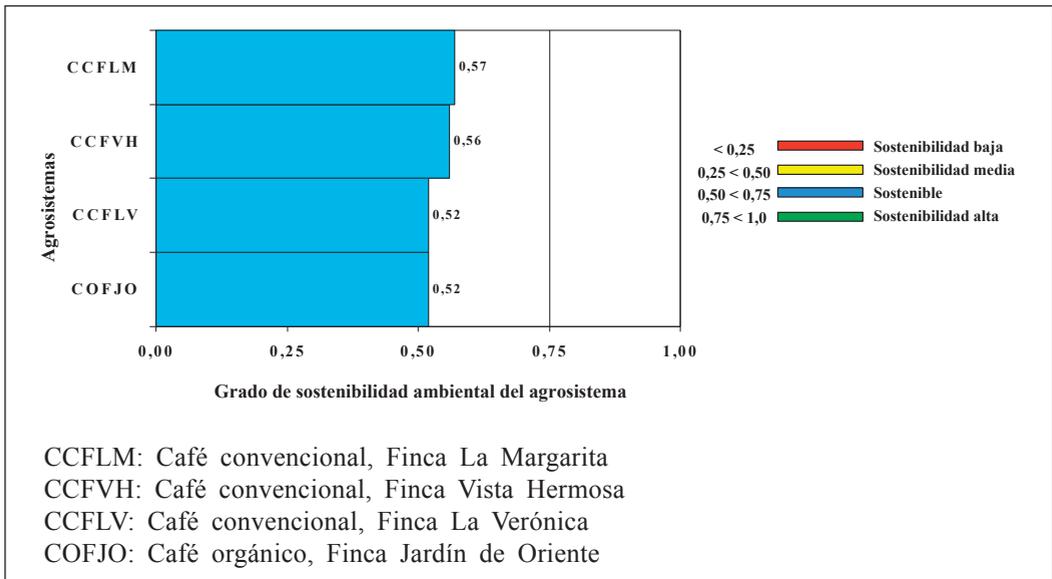


Figura 5. Escala de valoración de la sostenibilidad ambiental en los agrosistemas evaluados en el departamento del Cauca.

tanto los sistemas de producción convencional como los orgánicos, son ambientalmente sostenibles. No obstante, George (12) indica que las fincas bajo el manejo orgánico pueden sostener mayor producción biológica y mantener las funciones básicas del ecosistema que las fincas bajo el manejo convencional y a pleno sol. Con escalas de valoración de la calidad del suelo, entre 0 y 1, al integrar variables físicas, químicas y biológicas, en un solo índice y relacionándolo con la productividad, Glover *et al.* (13) y Perie y Munson (25), asignaron un valor de 0,92 a los sistemas orgánicos y de 0,78 a los convencionales, siendo los primeros suelos significativamente de calidad superior.

Departamento de Caldas. Los índices parciales del grupo de variables físicas para los sistemas de producción de café orgánico, café convencional fertilizado químicamente y el barbecho (testigo), fueron de 0,14, y para

el sistema de producción de café convencional sin fertilización éste fue de 0,15. Los índices parciales del grupo de variables químicas para el sistema de producción de café orgánico fueron de 0,37, para el sistema convencional y fertilizado químicamente de 0,32, para el convencional sin fertilización el valor fue de 0,33, y en el testigo y barbecho de 0,31. Los índices parciales del grupo de variables biológicas para el sistema de producción de café orgánico fueron de 0,12, para los convencionales con y sin fertilización química de 0,14 y 0,13, respectivamente, y para el testigo o barbecho de 0,13.

En la Figura 6 se presenta la valoración de la sostenibilidad ambiental mediante indicadores de calidad del suelo, en una escala de 0 a 1, de los agrosistemas estudiados.

De acuerdo al índice de sostenibilidad ambiental construido con los conjuntos de

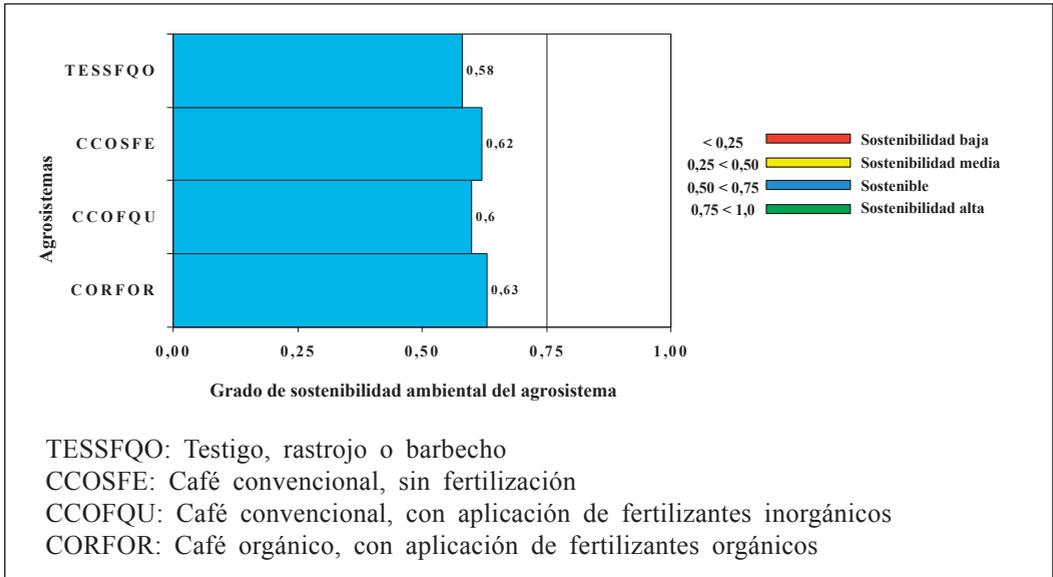


Figura 6. Escala de valoración de la sostenibilidad ambiental en los agrosistemas evaluados en el departamento de Caldas

variables físicas, químicas y biológicas del suelo, los sistemas de producción de café orgánico y convencionales, con y sin aplicación de fertilizantes químicos, se clasifican en la categoría de sostenibles, con valores de pertenencia de 0,63; 0,60; 0,62, respectivamente, y un testigo o barbecho calificado como sostenible con un IGSA de 0,58. No obstante, son calificaciones muy cercanas a las de la categoría de medianamente sostenibles, por lo que deberán implementarse las prácticas agronómicas necesarias para incrementar el grado de sostenibilidad ambiental de los sistemas.

Se puede concluir que en sistemas de café tecnificados, de aplicarse las prácticas frecuente y oportunamente, los sistemas de producción convencional son tan sostenibles como los orgánicos. Resultados contrastantes fueron obtenidos por Serrano *et al.* (29), en fincas bananeras convencionales y orgánicas,

por Twist y Coltman (32) en cultivos de café similares, por Glover *et al.* (13) en cultivos de *Malus domestica* (albaricoque), este último con Índice de Calidad del Suelo (SQ) de 0,92 para orgánicos. En cultivos de manzana orgánicos, convencionales e integrados, Reganold *et al.* (27) obtuvieron indicadores generales de calidad del suelo de 0,88; 0,78 y 0,92 respectivamente; y Cantú *et al.* (7), en suelos con ganadería intensiva, obtuvieron un Índice General de Calidad del Suelo de 0,47.

Zobeck *et al.* (37), en cultivos de maíz en rotación con *Hordeum distichon* (Cebada), encontraron valores para los conjuntos de variables físicas de 0,54, para las variables químicas de 0,63, y para las variables biológicas de 0,47, y un Índice de Calidad del Suelo de 0,65. En un sistema maíz en rotación con soya (*Glycine max*), Diack y Stott (9), obtuvieron índices parciales para los grupos

de variables físicas, químicas y biológicas de 0,31; 0,14 y 0,041 respectivamente y un Índice General Integrado de calidad del suelo de 0,49. Wander *et al.* (35), en cultivos de maíz y soya, reportan subindicadores físicos, químicos y biológicos de calidad del suelo (ISQI) de 0,9; 0,47 y 0,20, respectivamente, y un índice general promedio de calidad del suelo de 0,33. Velázquez *et al.* (34) evaluaron la calidad del suelo de diversos sistemas de producción, incluyendo café, a través de un índice general de calidad del suelo (GISQ), con valores de 1,00; 0,80; 0,78 y 0,77 para plantaciones, los barbechos, los pastos y el café, respectivamente. Indican que los GISQ permiten la evaluación de la calidad del suelo y facilitan la identificación de áreas problemáticas; además, facilitan la supervisión del cambio en el tiempo y pueden direccionar la puesta en práctica de las tecnologías de restauración del suelo.

Puede concluirse que:

- Ésta es una aproximación metodológica para construir indicadores que sirvan para valorar la calidad del suelo en sistemas de producción de café.
- Mediante un índice general se propuso una metodología para valorar la sostenibilidad ambiental de sistemas de producción de café, a partir de indicadores de calidad del suelo.
- Para los estudios de calidad de suelos se seleccionaron las variables, que de acuerdo al Análisis de Componentes Principales (ACP), fueron más sensibles al cambio de uso del suelo. Las variables físicas fueron retención de humedad a 30, 100 y 1.500 kPa, densidad aparente, resistencia a la penetración, humedad del suelo y conductividad hidráulica; las variables químicas fueron N, Mg, Mn, P, Ca, Zn,

K, Na, B, pH, S, conductividad eléctrica, y Cu; y las biológicas fueron dominancia de arvenses agresivas y nobles y materia orgánica del suelo.

- La sostenibilidad ambiental valorada por medio del Índice General de Sostenibilidad Ambiental (IGSA) permitió identificar por departamento:

En Santander, los sistemas de producción de café con sombrío de guamo + carbonero con y sin fertilización, y café con sombrío de guayacan + nogal con y sin fertilización se ubican en la categoría de sostenibles, con valores de IGSA de 0,65; 0,59; 0,62 y 0,51 respectivamente; y el barbecho o testigo se ubica en la categoría de medianamente sostenibles con un valor de IGSA de 0,37.

En Cauca, el sistema de producción de café orgánico (finca Jardín de Oriente) y los convencionales (fincas La Violeta, Vista Hermosa y La Margarita) se clasifican en la categoría de sostenibles, con valores de pertenencia de 0,52; 0,52; 0,56 y 0,57, respectivamente.

En Caldas, los sistemas de producción de café orgánico y convencionales (con y sin aplicación de fertilizantes químicos), se clasifican en la categoría de sostenibles, con valores de pertenencia de 0,63; 0,60; 0,62, respectivamente, y un testigo o barbecho calificado también como sostenible con un IGSA de 0,58.

LITERATURA CITADA

1. ALCANTARA, E. N.; FERREIRA, M. M. 2001. Efeitos de metodos de controle de plantas daninhas na cultura do cafeiro (*Coffea arabica* L.) sobre a qualidade fisica do solo. Revista Brasileira de Ciencia do Solo. Vicosa, Brazil 24(4):711-721.

2. ALTIERI M. A.; NICHOLLS C. I. 2007. Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: Teoría, estrategias y evaluación. *Revista Ecosistemas* 1:1-10.
3. AMACHER., M. C.; O'NEILL., K. P. 2003. Soil vital signs: a New index for assessing forest soil health. p.37. [Poster]. USDA Forest Health Monitoring Program.
4. AOKI., A. M.; SERENO., R. 2006. Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias. *Revista Agriscientia* 23(1):23-31.
5. AROMOLO., R.; FRANCAVIGLIA., R. 2006. Effects on soil quality of mineral and organic fertilization. *Geophysical Research Abstracts* 8:1.
6. CANU., A.; ZUCCA., C. 2006. Change in soil properties as indicators of soil quality in an agropastoral area of Sardinia. *Geophysical Research Abstracts* 8:1-2.
7. CANTÚ., M. P.; BECKER., A.; BEDANO., J. C.; SCHIAVO., H. F. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 25(2):173-178.
8. CARVALHO., R.; GOEDERT., W. J.; ARMANDO., M. S. 2004. Physical features of soil quality under an agroforestry system. *Pesquisa Agropecuária Brasileira (Brasília)* 39(11):1153-1155.
9. DIACK., M.; STOTT., D. E. Development of a Soil Quality Index for the chalmers silty clay loam from the Midwest USA. In: STOTT., D. E. STEINHARDT [Eds]. *The global farm. Selected paper from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting Held, May 24-29, 1999 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, 2001.* p. 550-555.
10. DORAN, J. W.; ZEISS M. R. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* 15:3-11.
11. GALLOPIN., G. C. FODEPAL, SANTIAGO DE CHILE (CHILE). 2006. Indicadores de desarrollo sostenible: Aspectos conceptuales y metodológicos. *Santiago de Chile (Chile)*, 36 p.
12. GEORGE, A. 2006. Estudio comparativo de indicadores de calidad de suelo en fincas de café orgánico y convencional en Turrialba, Costa Rica. *Turrialba (Costa Rica)*, CATIE, 118 p.
13. GLOVER., J. D.; REGANOLD., J. P.; ANDREWS., P. K. 2000. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington state. *Source Agriculture, Ecosystems and Environment* 80(1-2):29-43.
14. GULSER., C. A. 2004. Comparison of some physical and chemical soil quality indicators influenced by different crops species. *Pakistan Journal of Biological Sciences (Turkey)* 7(6):905-911.
15. HAN., X.; WANG., S.; VENEMAN P., L. M.; XING., B. 2006. Change of Organic Carbon Content and Its Fractions in Black Soil under Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Recycled Organic Manure. *Soil Science and Plant Analysis* 37:1127-1137.
16. KARLEN., D. L.; ANDREWS., S. S. 2000. The soil quality concept: a tool for evaluating sustainability. *Source DIAS Report, Plant Production. Danmarks Jordbrugs Forskning, Tjele, Denmark* 38:15-26.
17. LAL., R. 1994. *Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics.* Washington, D.C. (USA). Ohio State University; U.S. Agency for International Development; Soil Management Support Services. Technical Monograph n° 21. 78 p. (Serie: SMSS, 1994).
18. LISTER., T. W.; BURGER., J. A.; PATTERSON., S. C. 2004. Role of Vegetation in Mitigating Soil Quality Impacted by Forest Harvesting. *Soil Science Society of America Journal* 68:263-271.
19. MATOSO C., M.; SILVA S., R. H.; DE FREITAS., G. B.; PRIETO M., H. E.; JARAMILLO B., C.; SILVANALAGESG., S. 2007. Análise comparativa das características da serrapilheira e Do solo em cafezais (*coffea arabica* L.) Cultivados em sistema Agroflorestal e em monocultura, na zona da mata mg1. *Revista Árvore, (Viçosa-MG)* 31(5):805-812.
20. MOTTA, A., C. V.; REEVES, D. W.; TOUCHTON, J. T. 2002. Tillage intensity effects on chemical indicators of soil quality in two coastal plain soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 33(5):913-932.
21. MURAGE., E. W.; KARANJA., N. K.; SMITHSON., P. C.; WOOMER., P. L. 2000. Diagnostic indicators of soil quality in productive and non-productive smallholders' fields of Kenya's Central Highlands. *Source Agriculture, Ecosystems and Environment* 79 (1):1-8. 33.

22. NAVAS., A.; MACHIN., J.; BEGUERIA., S.; LÓPEZ V., M.; GASPAR., L. 2008. Soil properties and physiographic factors controlling the natural vegetation re-growth in a disturbed catchment of the Central Spanish Pyrenees. *Agroforestry Systems* 72:173-185.
23. OBANDO M., F. H.; MONTES, J. M.; ZULUAGA A., M. A. 2004. Desarrollo de indicadores de calidad inherente y dinámica de Andisoles en el departamento de Caldas. *En: TALLER Nacional sobre Indicadores de Calidad del Suelo*, 1. Palmira (Colombia), Octubre 20-22, Palmira (Colombia), CIAT, 2004. 16 p.
24. PAZ., I. E.; SÁNCHEZ DE P., M. 2007. Relación entre dos sistemas de sombrero de café y algunas propiedades físicas del suelo en la meseta de Popayán. *Revista Unicauca*, Facultad de Ciencias Agropecuarias 5(2):39-43.
25. PERIE., C.; MUNSON., A. D. 2000. Ten-Year Responses of Soil Quality and Conifer Growth to Silvicultural Treatments. *Soil Science Society of America Journal* 64:1815-1826.
26. PORRAS V., C. M. 2006. Efecto de los sistemas agroforestales de café orgánico y convencional sobre las características de suelos en el Corredor Biológico Turrialba-Jiménez, Costa Rica. *Turrialba (Costa Rica)*, CATIE, 150 p.
27. REGANOLD., J. P.; GLOVER., J. D.; ANDREWS., P. K.; HINMAN., H. H. 2001. Sustainability of three apple production systems. *Nature* 410(19):926-930.
28. RODRÍGUEZ B., F.; JIMÉNEZ C., R. 2007. La aplicación de indicadores en el recurso suelo para evaluar la sostenibilidad de la microrregión Platanar-La Vieja, cuenca del río San Carlos, Costa Rica. *Tecnología en Marcha* 20(3):12-34.
29. SERRANO., E.; SANDOVAL., J.; POCASANGRE., L.; ROSALES., K.; DELGADO., E. The importance of physical-chemical indicators in the soil quality for the Sustainable production of banana in Costa Rica. XVII Reuniao Internacional da Associacao a Cooperacao nas Pesquisas sobre Banana no Caribe e na América Tropical. 15 a 20 de outubro de 2006. Joinville, Santa Catarina (Brasil). p. 207-221 (Resúmenes).
30. SOJKA., R. E.; UPCHURCH., D. R. 1999. Reservations Regarding the Soil Quality Concept. *Soil Science Society of America Journal* 63(5):1039-1054.
31. TORRES., D.; FLORENTINO., A.; LÓPEZ., M. 2006. Indicadores e índices de calidad del suelo en un Ultisol bajo diferentes prácticas de manejo Conservacionista en Guárico, Venezuela, *Bioagro* 18(2):83-91.
32. TWIST, T.K.; COLTMAN, W.F. 1966. Organic matter and healthy coffee with reference to coffee berry disease and quality. *Kenya Coffee (Kenya)* 31(366):261-267.
33. VALARINI., P. J.; SHIRAIISHI F, R. T.; TOKESHI., H.; MORSOLETTTO., R. V. 2006. Desenvolvimento de método e indicadores de avaliação do impacto ambiental das práticas de manejo em sistemas de produção intensivos. *Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente*, 24 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento; 36).
34. VELASQUEZ., E.; LAVELLE., P.; ANDRADE., M. 2007. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology and Biochemistry*. Oxford, UK 39(12):3066-3080.
35. WANDER, M. M.; WALTER, G. L.; NISSEN, T. M.; BOLLERO, G. A.; ANDREWS, S. S.; DEBORAH A. CAVANAUGH-GRANT, D. A. 2002. Soil Quality: Science and Process. *Agronomy Journal* 94(1):23-32.
36. ZAGAL., E.; CÓRDOVA., C. 2005. Indicadores de calidad de la materia orgánica del suelo en un andisol cultivado. *Agricultura Técnica (Chile)* 65(1):186-197..
37. ZOBECK, T. M.; HALVORSON, A. D.; WIENHOLD, B.; ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; KARLEN, D. L. 2008. Comparison of two soil quality indexes to evaluate cropping systems in northern Colorado. *Journal of Soil and Water Conservation* 63(5):329-338.