

Artículo científico

Indicadores edáficos después de la conversión de un pastizal a sistemas agroecológicos

Edaphic indicators after the conversion of a grassland area into agroecological systems

Guillermina Hernández-Vigoa[†], Griselda de la Caridad Cabrera-Dávila, Irma Izquierdo-Brito, Ana América Socarrás-Rivero, Luis Hernández-Martínez y Jorge Alberto Sánchez-Rendón

Instituto de Ecología y Sistemática; Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

Carretera de Varona 11835, Calabazar, Boyeros, La Habana 19, CP 11900, Cuba

Autor para correspondencia: grisell17@ecologia.cu

Resumen

El estudio tuvo como objetivo evaluar la conversión de un pastizal a un área de forraje y otra de policultivo con la aplicación de métodos agroecológicos, mediante diferentes variables biológicas, físicas y químicas del suelo, en una finca con integración ganadería-agricultura en la localidad de Cangrejeras –provincia Artemisa, Cuba–. Se estudió la macrofauna y la mesofauna total; los grupos funcionales de epigeos, anécicos y endógeos de la macrofauna; los oribátidos, uropodinos y gamasinos de la mesofauna; la fitomasa subterránea; el contenido de carbono hidrosoluble; la biomasa microbiana; la actividad de las enzimas deshidrogenasa y fosfatasa ácida; el carbono orgánico total; el porcentaje de agregados estables y la densidad aparente del suelo. La relación entre las variables y su contribución a la conversión del pastizal fueron exploradas por el análisis de componentes principales. De las 16 variables evaluadas, solo nueve (macrofauna de epigeos y endógeos, mesofauna de oribátidos y uropodinos, carbono orgánico total y carbono hidrosoluble, enzima fosfatasa ácida, porcentaje de agregados y densidad aparente del suelo) fueron recomendadas para el análisis integral de la calidad del suelo y del impacto del cambio de uso de la tierra. El análisis integrado de todas las variables, de acuerdo a sus correlaciones y al ordenamiento de los sistemas, mostró que la conversión de pastizal a forraje resultó una práctica agroecológica favorable para la conservación de la calidad y el uso sostenible del suelo; mientras que la siembra de cultivos y su rotación (policultivo) afectaron la calidad.

Palabras clave: conservación de suelos, fauna del suelo, sistemas de explotación.

Abstract

The objective of the study was to evaluate the conversion of a grassland area into a forage and a polycrop area with the application of agroecological methods, through different soil biological, physical and chemical variables, in a farm with animal husbandry-agriculture integration in the Cangrejeras locality –Artemisa province, Cuba–. The total macrofauna and mesofauna; functional groups of epigeal, anecic and endogeal species of the macrofauna; oribatids, uropodines and gamasines of the mesofauna; underground phytomass; hydrosoluble carbon content; microbial biomass; activity of the dehydrogenase and acid phosphatase enzymes; total organic carbon; percentage of stable aggregates and apparent soil density, were studied. The relation among the variables and their contribution to the grassland conversion were explored by the principal component analysis. From the 16 evaluated variables, only nine (epigeal and endogeal macrofauna, oribatid and uropodine mesofauna, total organic carbon and hydrosoluble carbon, acid phosphatase enzyme, percentage of aggregates and apparent soil density) were recommended for the integral analysis of soil quality and of the impact of the land use change. The integrated analysis of all the variables, according to their correlations and the system arrangement, showed that the conversion from grassland to forage was a favorable agroecological practice for the conservation of soil quality and sustainable soil use; while crop sowing and rotation (polycropping) affected quality.

Keywords: exploitation systems, soil conservation, soil fauna

Introducción

Para evaluar el estado de salud y la capacidad productiva de un suelo se utilizan variables biológicas, físicas y químicas, reconocidas como indicadores de su calidad (Bastida *et al.*, 2008). Entre las variables biológicas, la biodiversidad edáfica desempeña un papel significativo en la regulación de los servicios importantes de los ecosistemas y en

la complejidad de la cadena alimentaria en el suelo, por lo que el uso de los organismos es esencial para monitorear sus funciones y condiciones (De Vries *et al.*, 2013).

En Cuba, el empleo de indicadores edáficos se ha dirigido fundamentalmente a conocer el efecto de las perturbaciones causadas por los diferentes

usos y manejos del suelo, que incluyen la agricultura orgánica y la rehabilitación de los suelos degradados o contaminados (Alguacil *et al.*, 2012; Socarrás-Rivero e Izquierdo-Brito, 2014). Sin embargo, se conoce que resulta difícil la selección de estos indicadores y su aplicación, debido a la diversidad natural y a la elevada heterogeneidad espacio-temporal de las propiedades del suelo; así como a la multitud y complejidad de los procesos edáficos, especialmente los biológicos (Bastida *et al.*, 2008). En Cuba, la mayor parte de los resultados han mostrado una gran variabilidad, ocasionada por la estacionalidad, el tipo de suelo y el uso de la tierra.

Basado en estos resultados, se identificó la necesidad de un análisis integral de las variables investigadas para la búsqueda de generalizaciones (o patrones) con el empleo de los indicadores edáficos. Para tal análisis, se seleccionaron algunos resultados del proyecto «Evaluación de métodos agroecológicos mediante el uso de bioindicadores del estado de conservación del suelo», que se realizó para determinar el impacto producido por la conversión de un pastizal a sistemas agroecológicos (Izquierdo-Brito *et al.*, 2004). Este estudio tuvo como objetivo evaluar la transformación de un pastizal a un área de forraje y otra de policultivo con la aplicación de métodos agroecológicos, mediante diferentes variables biológicas, físicas y químicas del suelo; así como sugerir las variables más relevantes para indicar la calidad del suelo y el impacto del manejo de la tierra.

Materiales y Métodos

Localidad de estudio. La investigación se realizó en una finca agroecológica ubicada en la localidad de Cangrejas (23° 02' O, 82° 31' N), provincia Artemisa, Cuba. El clima de la región es subtropical húmedo, con temperatura media anual de 24,6 °C y precipitación total anual de 1 300 mm, mayormente distribuida de mayo a octubre. El suelo en estas áreas se corresponde con el tipo genético Ferralítico Rojo, según los criterios expuestos en la última clasificación de los suelos de Cuba (Hernández-Jiménez *et al.*, 2015).

Áreas evaluadas. Los sitios experimentales partieron de un pastizal cultivado por más de 20 años, en el cual un área fue convertida a forraje y otra a policultivo, de 1 000 y 500 m², respectivamente. Un sitio remanente de 1 000 m² fue conservado como pastizal (control). El análisis más detallado del diseño experimental fue descrito por Izquierdo-Brito *et al.* (2003).

Al pastizal (P), referido como control, no se le aplicaron enmiendas orgánicas, y su carga animal fue baja (por debajo de 2,0 UGM ha⁻¹). En la comunidad vegetal predominaron *Megathyrsus maximus* Jacq., *Cynodon nlemfuensis* Vanderhyst y *Teramnus uncinatus* (L.) Sw. y el rendimiento en esta área fue de 11 t ha⁻¹ de materia seca (MS).

El área de forraje (F) se sembró con *Saccharum officinarum* L., *Pennisetum* sp. y *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. Este sistema estuvo destinado a la práctica del silvopastoreo con una carga animal semejante a la del pastizal, y también se aplicó corte con el fin de suministrar forraje al ganado. El rendimiento agrícola obtenido fue de 16,5 t ha⁻¹ de MS. Tanto para el pastizal como para el forraje, los rendimientos alcanzados respondieron a lo planificado para la alimentación del ganado en la finca.

En el policultivo (C), se combinaron cultivos de ciclo corto con cultivos de ciclo largo en una relación 30:70. Entre los cultivos de ciclo corto se incluyeron: yuca (*Manihot esculenta* Crantz.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), calabaza (*Cucurbita pepo* L.), tomate (*Solanum lycopersicum* L.), fruta bomba (*Carica papaya* L.) y espinaca (*Spinacia oleracea* L.); y entre los de ciclo largo: plátano (*Musa paradisiaca* L.), toronja (*Citrus paradisi* Macf.), naranja agria (*Citrus aurantium* L.) y chirimoya (*Annona reticulata* L.). Los cultivos de ciclo corto se sometieron a un sistema de rotación en el que se asociaron tomate-frijol, fruta bomba-yuca, frijol-yuca, espinaca-tomate y calabaza-frijol. Los rendimientos de los principales cultivos fueron (t ha⁻¹ de frutos): *P. vulgaris*: 1,2; *C. pepo*: 16,9; *S. lycopersicum*: 11,4; *M. paradisiaca*: 141,7; *C. paradisi*: 24,5; *C. aurantium*: 4,3; *A. reticulata*: 1,8; los cuales estuvieron dentro de los planes de producción de alimentos concebidos.

En las áreas de forraje y policultivo se aplicó, antes de la siembra, abono orgánico (compost, humus de lombriz y restos de cosechas) a razón de 4,0-5,6 t ha⁻¹, respectivamente. Después de ocho años de establecidos los sistemas, se procedió a evaluar los indicadores físicos, químicos y biológicos de la calidad del suelo durante un año, en los períodos de lluvia y seca.

Variables biológicas. La macrofauna del suelo (invertebrados mayores de 2 mm de diámetro) fue muestreada según la metodología del programa internacional «Biología y fertilidad del suelo tropical» o TSBF (Anderson e Ingram, 1993), que consistió en la revisión *in situ* de cuatro monolitos

de suelo de 25 x 25 x 30 cm por cada sistema evaluado. Para muestrear la mesofauna (invertebrados entre 0,2 y 2,0 mm de diámetro) se tomaron en cada área cinco muestras de suelo, utilizando un cilindro de 5 cm de diámetro y 10 cm de profundidad. En el laboratorio la mesofauna edáfica se extrajo con embudos Tullgren, sin fuente de calor durante siete días. La identificación de la macrofauna y de la mesofauna se realizó hasta el nivel de familia, con la ayuda de diferentes especialistas, la revisión de trabajos taxonómicos y la consulta de la colección entomológica ubicada en el Instituto de Ecología y Sistemática –La Habana, Cuba.

Desde un punto de vista funcional, la macrofauna se separó en: organismos epigeos, entre los que se incluyen aquellos invertebrados que viven en la superficie y la hojarasca del suelo con hábito trófico principalmente detritívoro, como los milpiés, los caracoles, las cochinillas, entre otros; organismos anécicos, que viven de forma parcial en el suelo y están constituidos netamente por termitas y hormigas; y organismos endógeos, de residencia permanente en el suelo y compuestos por lombrices de tierra y algunos escarabajos (Lavelle, 1997). Para la mesofauna, se tuvieron en cuenta solo los oribátidos y uropodinos, como grupos detritívoros, y los gamasinos, como organismos depredadores, todos susceptibles a la calidad de la materia orgánica y a la humedad y, por tanto, indicadores de la fertilidad y la estabilidad del medio edáfico (Socarrás-Rivero, 1999).

En el caso de la macrofauna se estimaron valores de biomasa sobre la base del peso húmedo en la solución conservante (formol 4 % + alcohol 80 %). Se escogió la biomasa debido a que evidencia directamente la función de la macrofauna en la transformación de las propiedades físicas del suelo (Barbault, 1992). Para la mesofauna se calcularon los valores de densidad (ind.m^{-2}), a partir del número de individuos. Tanto la biomasa como la densidad fueron calculadas para la fauna total y para los diferentes grupos funcionales.

La estimación de la fitomasa subterránea en el pastizal se realizó extrayendo al azar tres muestras de suelo de 0-10 cm de profundidad en cada área, con un cilindro de 5 cm de diámetro. Posteriormente el material se secó en estufa a 105 °C, para la determinación de la fitomasa subterránea total por gravimetría.

El resto de las variables biológicas y las físico-químicas se evaluaron al azar en cinco muestras de suelo, compuestas de seis submuestras de 0-10 cm de profundidad en cada área, con un cilindro

de 150 cm^3 ; el procedimiento completo fue descrito por Izquierdo-Brito *et al.* (2003; 2004). De igual manera, se determinó la actividad de las enzimas deshidrogenasa y fosfatasa, el carbono hidrosoluble y el carbono de la biomasa microbiana, por las metodologías descritas por Izquierdo-Brito *et al.* (2003).

Variables físico-químicas. El carbono orgánico total, el porcentaje de la estabilidad de agregados y la densidad aparente se determinaron por las metodologías descritas en el TSBF (Anderson e Ingram, 1993).

Análisis de los datos. Las relaciones que se establecieron entre las variables biológicas, físicas y químicas del suelo y su contribución al ensayo, como resultado de la transformación del pastizal a sistemas agroecológicos (forraje y policultivo), se exploraron por medio de un análisis de componentes principales (ACP) realizado por el programa PAST versión 3.11 (Hammer, 2015). Las variables empleadas fueron: macrofauna edáfica total (MAC); organismos epigeos (EPI), endógeos (END) y anécicos (ANEC) de la macrofauna; mesofauna edáfica total (MES); organismos oribátidos (ORIB), uropodinos (URO) y gamasinos (GAM) pertenecientes a la mesofauna; fitomasa subterránea (FS); carbono orgánico total (COT); carbono soluble en agua (CS); carbono de la biomasa microbiana (CBIO); actividades de las enzimas fosfatasa (AF) y deshidrogenasa (AD); densidad aparente (DA) y estabilidad de agregados (EA). El ACP se realizó a partir de una matriz de correlación, y el significado de las variables se precisó por el círculo de correlación interno propuesto por Fariñas (1996). Este se definió por los valores de r (coeficiente de correlación) para el tamaño de la muestra [(combinación de parcelas x estaciones) ($n = 24$) menos 2 ($n - 2$) (grados de libertad)]. De esta manera, todo vector que salió fuera del círculo interno presentó correlación significativa ($p < 0,05$). El ACP sirvió, además, para determinar cómo se interrelacionaron y agruparon los sitios estudiados en función de la respuesta de las variables edáficas. Para ello, se construyó el gráfico dual o biplot.

Resultados y Discusión

Variables biológicas, físicas y químicas. La mayoría de las variables edáficas estudiadas (10) mostraron valores superiores en las áreas de pastizal y forraje, tanto en los períodos de seca como de lluvia (tabla 1). La macrofauna total y la endógea siguieron este patrón, aunque la total no lo mantuvo en la temporada de mayores precipitaciones,

Tabla 1. Valores medios ($\pm$ DE) para las variables edáficas en las áreas de pastizal (P), forraje (F) y policultivo (C).

Variable edáfica	Seca			Lluvia		
	P	F	C	P	F	C
Macrofauna total (gm ⁻²)	23,9 (23,0)	36,2 (21,6)	6,8 (5,1)	33,2 (11,0)	66,9 (16,5)	62,8 (53,6)
Macrofauna epígea (gm ⁻²)	2,5 (2,1)	26,3 (22,9)	3,1 (4,3)	4,5 (6,8)	49,8 (21,5)	54,4 (45,6)
Macrofauna anécica (gm ⁻²)	0,58 (0,7)	0,49 (0,3)	0,49 (0,2)	0,83 (0,5)	0,49 (0,2)	1,77 (1,0)
Macrofauna endógea (gm ⁻²)	20,8 (20,9)	9,4 (1,7)	3,2 (3,5)	27,9 (17,3)	16,6 (5,0)	6,6 (7,8)
Mesofauna total (ind.m ⁻²)	82 449 (4 293,7)	100 563 (3 576,6)	59 322 (1 295,9)	111 980 (8 272,2)	140 993 (10 314,5)	52 427 (2 338,6)
Mesofauna-oribátidos (ind.m ⁻²)	22 896 (798,4)	31 896 (1 648,7)	7 747 (361,7)	41 229 (4 850,2)	49 882 (3 073,9)	8 144 (906,4)
Mesofauna-uropodinos (ind.m ⁻²)	2 545,4 (401,9)	5 090,1 (269,9)	1 527,0 (33,85)	12 725 (551,3)	15 270 (759,5)	5 090,1 (358,2)
Mesofauna-gamasinos (ind.m ⁻²)	18 833 (1 812,9)	23 991 (917,2)	15 042 (628,8)	29 522 (3 053,0)	37 666 (1 982,1)	14 252 (768,4)
Fitomasa subterránea (gm ⁻²)	1 962,2 (52,7)	1 078,1 (9,9)	277,3 (3,8)	1 298,2 (12,3)	749,3 (13,8)	156,0 (4,6)
Carbono orgánico total (g kg ⁻¹)	26,1 (0,02)	21,1 (0,02)	20,1 (0,03)	27,6 (0,01)	20,1 (0,01)	21,2 (0,02)
Carbono soluble en agua (µg g ⁻¹)	246 (3,6)	164 (2,4)	135 (2,3)	284 (3,2)	206 (5,6)	151 (2,5)
Biomasa microbiana (µg g ⁻¹)	546 (12,0)	466 (13,9)	438 (22,5)	690 (17,2)	488 (9,6)	464 (6,2)
Enzima deshidrogenasa (µg INTF g ⁻¹)	79 (0,1)	26 (0,7)	22 (1,7)	45 (0,8)	32 (1,0)	16 (1,2)
Enzima fosfatasa ácida (µmol PNP g ⁻¹ h ⁻¹)	3,0 (0,01)	2,70 (0,01)	1,75 (0,02)	2,00 (0,01)	1,57 (0,02)	1,33 (0,03)
Estabilidad de agregados (%)	86,1 (1,9)	80,5 (1,3)	82,3 (1,8)	87,6 (1,6)	86,6 (0,8)	67,6 (2,4)
Densidad aparente (mg m ⁻³)	1,26 (0,01)	1,33 (0,04)	1,37 (0,02)	1,28 (0,01)	1,3 (0,01)	1,36 (0,05)

P-pastizal, F- forraje, C-policultivo

pues sus valores más altos se manifestaron en el forraje y en el policultivo y no en el pastizal. La macrofauna endógea estuvo representada por las lombrices de tierra, que presentaron comúnmente una biomasa alta en los ecosistemas de pastizales, lo que coincide con lo hallado por Lavelle (1997), Bartz *et al.* (2013) y Chávez-Suárez *et al.* (2016). Dentro de la macrofauna, los organismos epígeos y anécicos se favorecieron con el manejo del forraje y del policultivo, sobre todo durante la lluvia. Ambos grupos funcionales tienen principalmente función detritívora y, por tanto, pudieron estar beneficiados por la entrada y calidad de la hojarasca de leucaena y

de los diferentes cultivos en estos sistemas (Cabre-ra-Dávila *et al.*, 2007).

En el caso de la mesofauna, se evidenció que las prácticas agrícolas que caracterizaron las áreas de pastizal y forraje contribuyeron positivamente en la abundancia total y en la de los diferentes microartrópodos edáficos que la componen, durante las dos épocas del año (tabla 1). Tal resultado demuestra la influencia de la mayor estabilidad en el manejo, de la densidad de raíces y del aporte directo de deyecciones por el ganado en estas áreas, que sirvieron de estimulación en el establecimiento de la mesofauna (Sánchez-de-Prager *et al.*, 2015; Socarrás-Rivero e Izquierdo-Brito, 2016).

En cuanto a la fitomasa subterránea, esta fue superior durante el período de seca en los tres sitios estudiados, principalmente en el pastizal; mientras que los menores valores se obtuvieron durante el período de lluvia (tabla 1). El patrón de distribución de la fitomasa subterránea, inverso al aéreo en relación con la estacionalidad, ha sido frecuentemente encontrado en ecosistemas de pastizales, y explica las estrategias de asignación de recursos de la planta, que concentra o traslada sus reservas a los órganos subterráneos (raíces y rizomas) durante el período de senescencia hasta la primavera o inicio de las lluvias, cuando ocurre el rebrote de los componentes aéreos (Hernández y Sánchez, 2012).

Este comportamiento de distribución de la biomasa de las raíces se ha comprobado en múltiples investigaciones que involucran plantas de regiones templadas y tropicales (Tomlinson *et al.*, 2012), y se plantea que la distribución de más biomasa a las raíces se debe fundamentalmente a mecanismos de ajustes morfológicos que incrementan la capacidad de absorción de agua y de nutrientes, en asociación probablemente con las micorrizas (Sánchez *et al.*, 2011; Herrera-Peraza *et al.*, 2016). Hernández y Sánchez (2012), en un estudio sobre la dinámica de la humedad del suelo y la fitomasa de raíces finas (< 1,0 mm), en siete ecosistemas con diferentes condiciones de suelo y tipo de vegetación en la Reserva de la Biosfera Sierra del Rosario –Cuba–, encontraron que la fitomasa subterránea cambió con las estaciones climáticas y que los valores más altos se hallaron en el bosque micrófilo, donde la humedad del suelo fue menor.

Las concentraciones de carbono orgánico total y carbono soluble en agua fueron superiores en el área de pastizal en relación con las de forraje y policultivo, en ambos períodos estacionales (tabla 1). Este resultado fue asociado a una mayor entrada de exudados radicales y una menor tasa de mineralización de la materia orgánica en el área de pastizal, en comparación con las de forraje y policultivo, que no fueron compensadas por la permanencia de restos orgánicos provenientes del manejo agroecológico ni por la adición de compost (Izquierdo-Brito *et al.*, 2003).

También, la biomasa microbiana y la actividad de la enzima fosfatasa ácida fueron superiores en el pastizal comparado con las áreas de forraje y policultivo, en las dos épocas; no obstante, la actividad de la fosfatasa en esta última área en la época de lluvia no varió considerablemente respecto a la del área de forraje. De igual manera, la actividad de la enzima deshidrogenasa, una oxidoreductasa

que solo está presente en las células vivas (Dick, 2011), fue superior en el área de pastizal en ambas estaciones y en el forraje en la estación de lluvia (tabla 1). Según Bardgett (2005), la actividad biológica y bioquímica puede afectarse por las propiedades físicas del suelo, particularmente por la estabilidad estructural.

De hecho, la mejor estabilidad estructural se encontró en las áreas de pastizal y de forraje en el período de lluvia, con respecto al área de policultivo, lo cual puede relacionarse con el incremento de la fracción de carbono soluble en agua (Izquierdo-Brito *et al.*, 2003). Las raíces y la descomposición de residuos del cultivo son una parte importante para la formación de macroagregados, un proceso dinámico que puede ser modificado por cualquier cambio en la fuente de materia orgánica lábil (Gupta-Vadakattu *et al.*, 2006).

Por último, la densidad aparente fue otra variable que repercutió en la actividad biológica (Izquierdo-Brito *et al.*, 2003), ya que los valores más bajos y óptimos, que manifiestan una mejor calidad del suelo, se obtuvieron en las áreas de pastizal y forraje en lluvia y seca, en comparación con el policultivo donde se hallaron los valores más altos, indicadores de compactación (tabla 1).

Análisis integrado de las variables. El análisis de componentes principales de las variables biológicas, físicas y químicas permitió conocer las correlaciones que se establecieron entre estas y su contribución, según el impacto producido por la conversión del área de pastizal a forraje y policultivo y la estacionalidad. En general todas las variables, excepto los gamasinos de la mesofauna (GAM), desempeñaron un papel significativo ($p < 0,05$) en el estudio, de acuerdo al círculo de correlación interno propuesto por Fariñas (1996), que en el primer plano bidimensional explicaron entre las dos primeras componentes más del 55 % de la variación total de los datos (fig. 1).

Se observó un manojo de vectores que estuvieron correlacionados entre sí y negativamente con el eje 1, representados por las variables: MAC, EPI, END, MES, ORI y URO, COT, CS, CBIO EA, FS, AF y AD. A este grupo de vectores se opusieron las variables DA y ANE, que estuvieron correlacionadas positivamente con el primer eje; mientras que MAC y EPI estuvieron correlacionadas positivamente con el eje 2. El comportamiento de las dos últimas variables fue independiente del de las variables URO, CS, COT, ORI, EA, MES y END (fig. 1).

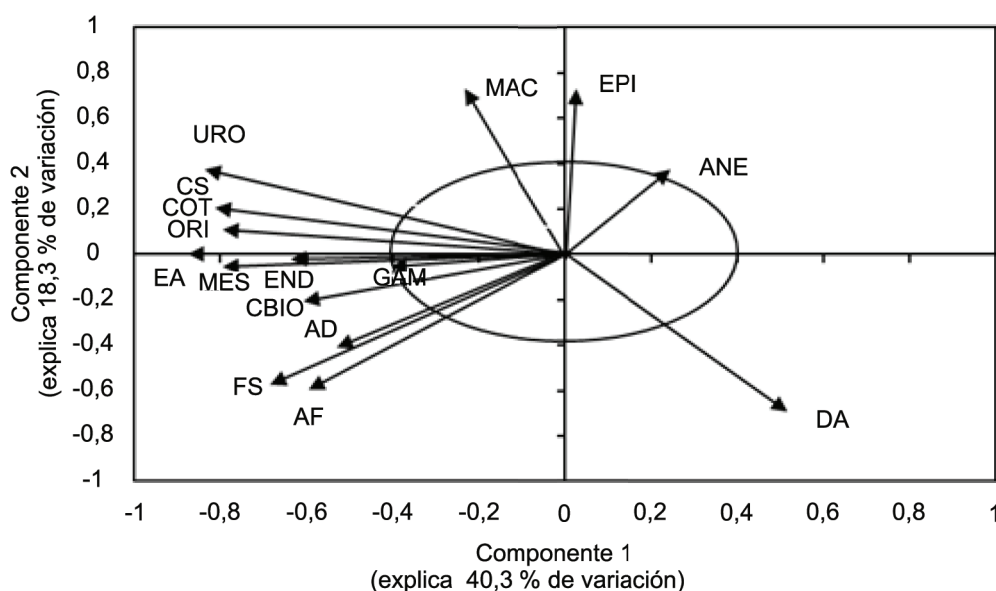


Figura. 1. Disposición de las variables en el primer plano bidimensional. Simbología: MAC (macrofauna edáfica), EPI (epígeos), ANE (anécicos), END (endógeos), MES (mesofauna del suelo), ORI (oribátidos), URO (uropodinos), GAM (gamasinos), COT (carbono orgánico total), CS (carbono soluble en agua), CBIO (carbono de la biomasa microbiana), EA (estabilidad de agregados), DA (densidad aparente), FS (fitomasa subterránea total), AF (actividad fosfatasa) y AD (actividad deshidrogenasa). El vector correspondiente a cada variable indica la dirección en que estas aumentan, y el círculo de correlación señala el valor a partir del cual son significativas.

Los grupos de la macrofauna definidos funcionalmente por EPI y ANE son organismos que se alimentan de la hojarasca, por lo que se relacionan con la posibilidad de explotación de fuentes superficiales de alimentos y actúan en el procesamiento o transformación inicial de la materia orgánica (Lavelle, 1997). Por su parte END, constituidos por las lombrices de tierra, se involucran más con las condiciones físicas del suelo, aspecto que ha sido corroborado por su correlación positiva con la mayoría de las variables estudiadas (fig. 1). De ahí que la oposición vectorial de la densidad aparente y la macrofauna total encontrada en este estudio estuvo más relacionada con la presencia de organismos END que de EPI y ANE, debido a los cambios que produce fundamentalmente la fauna endógena en la estructura física del suelo. Diversos autores, como Vasconcellos *et al.* (2013), Gutiérrez y Cardona (2014) y Souza *et al.* (2016), enumeran los efectos de las comunidades de lombrices de tierra sobre la porosidad, la infiltración de agua y la agregación del suelo; al mismo tiempo, se conoce que estas estimulan considerablemente la biomasa microbiana y la actividad biológica, en especial la actividad fosfatasa del suelo.

Por otra parte, es conocida la influencia que ejerce la FS en el desarrollo y en la actividad de la biota edáfica, como ocurre en el caso de algunos grupos que componen la mesofauna del suelo, los cuales encuentran en los exudados radicales una fuente de alimento y energía, así como de refugio ante condiciones de perturbación (Siddiky *et al.*, 2012; Genoy *et al.*, 2013). La presencia de determinados grupos de la mesofauna, como los ORI y URO asociados a los mayores contenidos de materia orgánica en el suelo, fundamentalmente al carbono orgánico total y carbono soluble en agua, demuestra la importancia de su función en la descomposición y el reciclaje de los nutrientes (Bedano, 2012; Peredo *et al.*, 2012). Además, el pH, el carbono orgánico, el nitrógeno total y otros nutrientes pueden influir en las comunidades de la mesofauna y la macrofauna del suelo (Moreira *et al.*, 2012; Schon *et al.* 2012).

El carbono orgánico del suelo, liberado por las raíces, promueve la actividad y el establecimiento de una comunidad microbiana más densa en la vecindad de las raíces (Picone, 2002). Además, puede producir incrementos de esta y de la actividad enzimática en la rizosfera, como ocurrió en este

estudio con la biomasa microbiana y la actividad de las enzimas analizadas, especialmente de la deshidrogenasa en el pastizal (tabla 1).

Las propiedades biológicas se reconocen como indicadores muy sensibles. Especialmente la actividad enzimática ha sido utilizada como indicador potencial de la calidad del suelo en un contexto amplio, debido a la relación con su actividad biológica, facilidad de medición y respuesta rápida a los cambios en el manejo (Dick, 2011).

La formación de agregados estables requiere de la acción de diversos factores físicos, químicos y biológicos. Como ya se mencionó, la actividad y las deyecciones de organismos de la macrofauna, especialmente las lombrices y los milpiés, pueden ser un factor importante en la formación de estos complejos órgano-minerales. También las raíces finas y los microorganismos, que producen una amplia gama de polisacáridos aglutinantes, pueden enlazar las partículas del suelo con las hifas fúngicas y, literalmente, sostener las fracciones minerales a la materia orgánica del suelo (Bardgett, 2005). Todo ello explica las correlaciones entre las variables URO, CS, COT, ORI, EA, MES, END, CBIO, AD, AF y FS (fig. 1).

La variable densidad aparente, que favoreció significativamente a la segunda componente, se correlacionó de forma negativa con las variables antes mencionadas. Los incrementos de DA se relacionan generalmente con el incremento de la compactación del suelo, que ocasiona la disminución de poros y el intercambio gaseoso, los que a su vez dificultan la retención y disponibilidad de agua y el desarrollo radical (Kulli Honauer, 2002). De ello se deriva su relación con la estructura del suelo y, por tanto, constituye un indicador físico significativo para conocer el impacto de un uso o cambio de uso sobre su calidad.

Dentro de los indicadores analizados, el carbono orgánico total, como atributo fundamental del suelo, es influido fuertemente por el manejo. Es un indicador muy importante en la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, debido a que afecta las propiedades o indicadores de la calidad del suelo que más influyen en su rendimiento sostenido (Martínez *et al.*, 2008).

Para el análisis dual con los individuos o censos por sitios y en función de conocer la influencia del uso del suelo y la estacionalidad, se seleccionaron las variables EPI, ANE, END, ORI, URO, FS, CS, AF, EA y DA. Dicha selección estuvo basada en la correlación establecida entre las variables, los ejes y los métodos agroecológicos empleados.

Las combinaciones o tratamientos referidos al tipo de manejo del suelo y periodo estacional definieron cuatro agrupamientos determinados por el análisis del 1 al 24 (fig. 2). En el primer grupo (área de policultivo), con dos subgrupos: periodo seco (C-S) y periodo lluvioso (C-LL), el primer subgrupo estuvo relativamente cercano a la posición donde se obtuvieron los valores máximos de densidad aparente (fig. 2), como fue señalado antes.

Los incrementos de DA se asocian al incremento de la compactación del suelo, que afecta las propiedades fundamentales de este y sus funciones. En los suelos tropicales, los procesos de transformación de sus propiedades, por el cambio de uso de la tierra y su subsiguiente explotación, conllevan su degradación, la ruptura de agregados y la pérdida de su estructura (Hernández *et al.*, 2009).

En el segundo subgrupo los tratamientos tendieron a ocupar regiones del espacio próximas a donde aumentó la población de anécicos (fig. 2), definida por algunas especies de hormigas, que se consideran invasoras y muy adaptables a condiciones de estrés y perturbación en el medio edáfico (Cabrera-Dávila, 2012; Cabrera-Dávila *et al.*, 2017). Estos individuos que se congregan en áreas perturbadas, donde se han producido alteraciones en el suelo rizosférico vinculadas al manejo con alternancia de cultivos, se alejan o contraponen en el sentido en que se alcanzan los máximos valores de fitomasa subterránea y actividad de la enzima fosfatasa, zona en la que se situó el segundo grupo de individuos procedentes del área de pasto en el periodo seco (fig. 2).

En el área de pasto durante el periodo seco se alcanzó un mayor desarrollo de FS y AF, así como una mayor biomasa microbiana y actividad de la enzima. El incremento de la densidad de raíces y la actividad microbiana benefician la presencia de los organismos endógenos, en particular de las lombrices, que también fueron superiores en este sistema (tabla 1). En concordancia, el mayor aporte de túriculos de lombrices se halló en el área de pasto, con valores de 379 g m⁻², en comparación con los registrados en el forraje y en el policultivo (249,6 y 176,4 g m⁻², respectivamente), y coincide con lo reportado por Izquierdo-Brito *et al.* (2004).

El tercer grupo se orientó en el sentido en que aumentaron las variables END, ORI, URO, CS y EA, constituido por las combinaciones de las áreas de forraje (FLL) y de pasto (PLL) en el periodo lluvioso (fig. 2). Ello demostró que estos usos se favorecen por la mayor y más homogénea cobertura

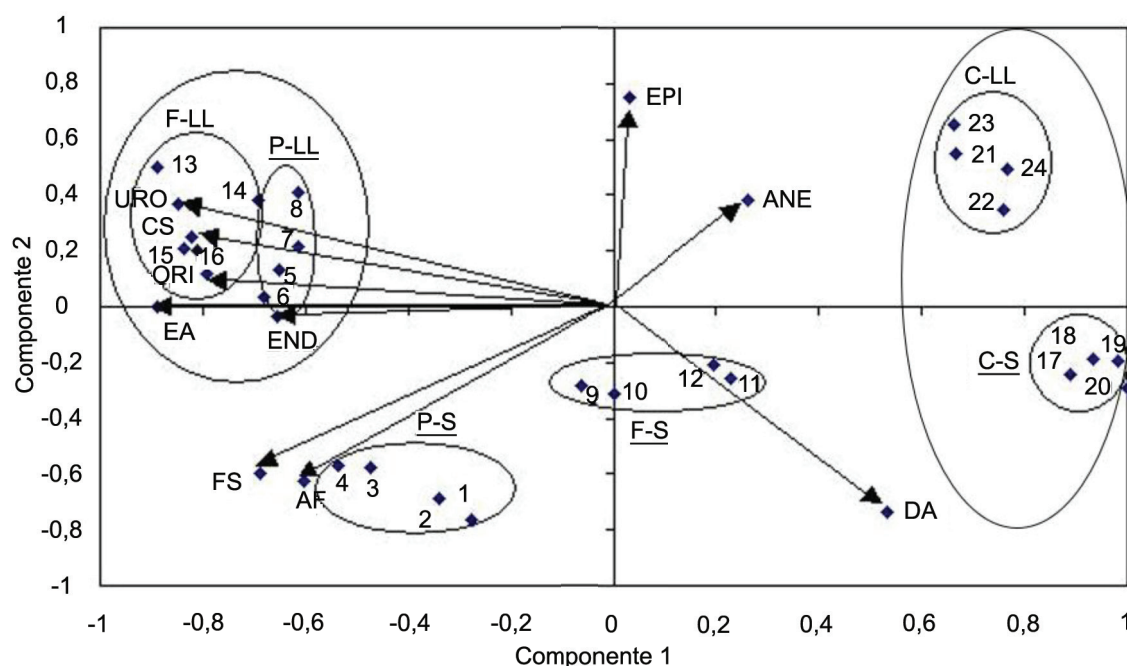


Figura 2. Gráfico dual de los sitios y las variables en el primer plano de ordenamiento. El vector correspondiente a cada variable indica la dirección en que estas aumentan. Los números corresponden a las réplicas de los tratamientos (1-4: pasto período seco (P-S), 5-8: pasto período lluvioso (P-LL), 9-12: forraje período seco (F-S), 13-16: forraje período lluvioso (F-LL), 17-20: policultivo período seco (C-S), 21-24: policultivo período lluvioso (C-LL). Los grupos denominados como C-S y C-LL, P-S, F-LL y P-LL, y F-S representaron las agrupaciones, según la distancia geométrica de los tratamientos en el espacio bidimensional. El significado de las variables aparece en la figura 1.

vegetal, por las condiciones de mayor humedad y acumulación de excreta animal y por el aporte promedio anual de hojarasca en las áreas de pastizal y forraje (84,3 y 112,3 g m⁻²), superior en comparación con 76,5 g m⁻² en el policultivo (Izquierdo-Brito *et al.*, 2004). Como se ha señalado, especialmente en el periodo lluvioso estos sistemas poseen las mejores condiciones físicas y químicas; por ejemplo, las fuentes orgánicas y lábiles de carbono (tabla 1) para el desarrollo microbiano, que también constituyen la fuente principal de alimento para la biota edáfica, lo que contribuye a diversificar e incrementar las comunidades de la fauna edáfica y, por consiguiente, a mejorar y conservar la fertilidad del suelo.

El cuarto grupo se distinguió porque reunió las variables procedentes del área de forraje en el período seco (F-S) que se sitúan cerca del centroide, en relación con el ordenamiento de todas las variables en el espacio bidimensional (fig. 2). La posición de este grupo puede responder a los valores intermedios alcanzados por las variables estudiadas, lo que estuvo determinado por la estacionalidad y consecuente menor humedad del suelo, así como

por las condiciones amortiguadoras de cobertura en este sistema. Tal resultado también evidencia la influencia de la estacionalidad sobre algunas variables, descritas antes, en las cuales se pudo observar respuestas diferentes para un mismo uso (tabla 1, fig. 2).

En general, las variables estudiadas permitieron una interpretación integrada de la calidad del suelo, a partir de sus valores, correlaciones e interrelaciones, así como del agrupamiento que estas generaron para los sistemas comparados. En función de los métodos agroecológicos aplicados y de la estacionalidad, se obtuvieron mayores aportes de materia orgánica (raíces y hojarasca), contenido de carbono orgánico total y fracciones de carbono hidrosoluble, biomasa microbiana y actividad enzimática; así como un incremento de las comunidades de la fauna edáfica en las áreas de pastizal y forraje, lo que permitió el mantenimiento de la estructura del suelo (mejor en el área de forraje que en el pastizal). Sin embargo, la cobertura vegetal (más escasa e irregular en el área de policultivo), las diferencias en las características de los sistemas radicales de los cultivos, así como las perturbaciones

causadas por la siembra y rotación de estos propiciaron la compactación del suelo y la menor estabilidad estructural, redujeron la biomasa microbiana y la actividad enzimática, y favorecieron la presencia de grupos de la fauna invasores, oportunistas e indicadores de infertilidad.

Conclusiones

Se demostró que la utilización de métodos agroecológicos en un sistema integrado agricultura-ganadería, tales como la plantación de especies forrajeras, la rotación y asociación de cultivos y la adición de residuos orgánicos, causa cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Resultó favorable la siembra de plantas perennes forrajeras, debido a que en general mantienen la calidad de este debido a la estabilidad en la cobertura vegetal y a la asociación de gramíneas y leguminosas; mientras que el intenso laboreo generado por la siembra y la rotación de policultivos la reduce.

Aunque todas las variables evaluadas pueden funcionar como bioindicadores de la calidad del suelo, se sugieren en particular para este análisis las variables biológicas de la macrofauna epigea y endógena, los grupos oribátidos y uropodinos de la mesofauna, el carbono hidrosoluble y la actividad enzimática fosfatasa, así como las variables físicas de estabilidad de agregados y densidad aparente y química de carbono orgánico total, teniendo en cuenta que son indicadores altamente susceptibles y los de más rápida respuesta, a muy corto plazo, ante los efectos producidos en el suelo debido al cambio e intensidad del uso de la tierra.

Referencias bibliográficas

- Alguacil, María M.; Torrecillas, Emma; Hernández, Guillermina & Roldán, A. Changes in the diversity of soil arbuscular mycorrhizal fungi after cultivation for biofuel production in a Guantánamo (Cuba) tropical system. *PLoS ONE*. 7 (4):e34887. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22536339>. [06/01/2018], 2012.
- Anderson, J. M. & Ingram, J. S. I., Eds. *Tropical soil biology and fertility. A handbook of methods*. 2nd ed. Wallingford, United Kingdom: CAB International, 1993.
- Barbault, R. *Écologie des peuplements. Structure, dynamique et evolution*. París: Masson, 1992.
- Bardgett, R. D. *The biology of soil. A community and ecosystem approach*. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press, 2005.
- Bartz, Marie L. C.; Pasini, A. & Brown, G. G. Earthworms as soil quality indicators in Brazilian no-tillage systems. *Appl. Soil Ecol.* 69:39-48, 2013.
- Bastida, F.; Zsolnay, A.; Hernández, T. & García, C. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma*. 147 (3-4):159-171, 2008.
- Bedano, J. C. La importancia de la mesofauna y macrofauna edáfica y su uso en la evaluación de la calidad del suelo. *Memorias del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 2da. Reunión de Suelos de la región Andina*. San Luis, Argentina: Asociación Argentina de Ciencias del Suelo. p. 5, 2012.
- Cabrera-Dávila, Grisela. La macrofauna edáfica como indicador biológico del estado de conservación/perturbación del suelo. Resultados obtenidos en Cuba. *Pastos y Forrajes*. 35 (4):349-364, 2012.
- Cabrera-Dávila, Grisela; Martínez, María de los A. & Rodríguez, C. La macrofauna del suelo en sistemas agroecológicos en Cuba. *Brenesia*. 67:45-57, 2007.
- Cabrera-Dávila, Grisela; Socarrás-Rivero, Ana A.; Hernández-Vigo, Guillermina; Ponce-de-León-Lima, D.; Menéndez-Rivero, Yojana I. & Sánchez-Rondón, J. A. Evaluación de la macrofauna como indicador del estado de salud en siete sistemas de uso de la tierra en Cuba. *Pastos y Forrajes*. 40 (2):118-126, 2017.
- Chávez-Suárez, Licet; Labrada-Hernández, Yakelin & Álvarez-Fonseca, A. Macrofauna del suelo en ecosistemas ganaderos de montaña en Guisa, Granma, Cuba. *Pastos y Forrajes*. 39 (3):111-115, 2016.
- De Vries, F. T.; Thébault, E.; Liiri, M.; Birkhofer, K.; Tsiafouli, M. A.; Bjørnlund, L. et al. Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 110 (35):14296-14301, 2013.
- Dick, R. P. *A brief history of enzymology research*. Madison, USA: Soil Science Society of America, 2011.
- Fariñas, M. R. *Análisis de la vegetación y sus relaciones con el ambiente mediante métodos de ordenamiento*. Mérida, Venezuela: Centro de Investigación Ecológicas de Los Andes Tropicales, 1996.
- Genoy, Yina M.; Castillo, J. A. & Bacca, T. Ácaros oribátidos presentes en seis sistemas de uso del suelo en Obonuco, Pasto (Nariño). *Bol. Cient. Mus. Hist. Nat. Univ. Caldas*. 17 (2):60-68, 2013.
- Gupta-Vadakattu, V. S. R.; Kasper, M. L.; Jankovic-Karasoulos, T. & Elliott, E. T. Macroaggregate environment influences the composition and activity of associated microbiota communities. *18th World Congress of Soil Science*. Philadelphia, USA: International Union of Soil Sciences, 2006.
- Gutiérrez, Martha C. & Cardona, Claudia M. Caracterización ecológica de las lombrices (*Pontoscolex corethrurus*) como bioindicadoras de suelos compactados bajo condiciones de alta humedad del suelo con diferentes coberturas vegetales (Zipacón, Cundinamarca). *Rev. Cient., Universidad Distrital Francisco José de Caldas*. 2 (19):41-55, 2014.
- Hammer, Ø. *PAST Paleontological statistics*. Version 3.11. Reference manual Oslo: Natural History Museum University, 2015.

- Hernández, A.; Morales, M.; Morell, F.; Borges, Y.; Bojórquez, J. I.; Ascanio, M. O. *et al.* Changes in soil properties by agricultural activity in tropical ecosystems. *Abstracts International Conference Soil Geography*. Huatulco, México: New Horizons. p. 57, 2009.
- Hernández-Jiménez, A.; Pérez-Jiménez, J. M.; Bosch-Infante, D. & Castro-Speck, N. *Clasificación de los suelos de Cuba*. Mayabeque, Cuba: Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Instituto de Suelos, Ediciones INCA, 2015.
- Hernández, L. & Sánchez, J. A. Dinámica de la humedad del suelo y la fitomasa de raíces en ecosistemas de la Sierra del Rosario, Cuba. *Pastos y Forrajes*. 35:79-98, 2012.
- Herrera-Peraza, R. A.; Torres-Arias, Y. & Furrázola, E. Estructura de las comunidades de hongos micorrizógenos arbusculares en algunos ecosistemas naturales o afectados por la minería en Moa, Cuba. *Acta Bot. Cub.* 215:162-195, 2016.
- Izquierdo-Brito, Irma; Caravaca, F.; Alguacil, María M.; Hernández, Guillermina & Roldán, A. Changes in physical and biological soil quality indicators in a tropical crop system (Havana, Cuba) in response to different agroecological management practices. *Environ. Manage.* 32 (5):639-645, 2003.
- Izquierdo-Brito, Irma; Socarrás, Ana A.; Rodríguez, M.; Martínez, M. A.; Cabrera-Dávila, Grisela & Herrero, G. Evaluación de métodos agroecológicos mediante el uso de bioindicadores del estado de conservación del suelo. Informe final de proyecto. La Habana: Instituto de Ecología y Sistemática, 2004.
- Kulli Honauer, Beatrice. *Analysis of flow patterns. The influence of soil compaction and soil structure on the infiltration pathways of dye tracer solutions and the quantitative evaluation of flow patterns*. Thesis for the Doctor of Natural Sciences Zürich: Swiss Federal Institute of Technology, 2002.
- Lavelle, P. Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function. *Adv. Ecol. Res.* 24:93-132, 1997.
- Martínez, E.; Fuentes-Espoz, J. P. & Acevedo-Hinojosa, E. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *R.C. Suelo Nutr. Veg.* 8 (1):68-96, 2008.
- Moreira, Fátima M. S.; Jeroen Huising, E. & Bignell, D. E., Eds. *Manual de biología de suelos tropicales. Muestreo y caracterización de la biodiversidad bajo suelo*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012.
- Peredo, S. F.; Barrera, Claudia P.; Parada, Esperanza & Vega, Marcela. Taxocenotic and biocenotic analysis over time of edaphic mesofauna in organic *Vaccinium* sp. plantations southern central Chile. *Agrociencia*. 46 (2):163-173, 2012.
- Picone, C. Managing mycorrhizae for sustainable agriculture in the tropics. In: J. H. Vandermeer, ed. *Tropical agroecosystems*. Boca Raton, USA: CRC Press. p. 95-132, 2002.
- Sánchez, J. A.; Muñoz, Bárbara C.; Montejó, Laura; Lescaille, Martha & Herrera-Peraza, R. A. Tamaño y nutrientes de semillas en 32 especies arbóreas de un bosque tropical siempreverde de Cuba y su relación con el establecimiento de las plántulas. *Revista del Jardín Botánico Nacional*. 32-33:181-204, 2011.
- Sánchez-de-Prager, Marina; Sierra-Monroy, Alexandra & Peñaranda-Parada, Martha R. Poblaciones de ácaros, colémbolos y otra mesofauna en un Inceptisol bajo diferentes manejos. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*. 68 (1):7411-7422, 2015.
- Schon, N. L.; Mackay, A. D. & Minor, M. A. Vulnerability of soil invertebrate communities to the influences of livestock in three grasslands. *Appl. Soil Ecol.* 53:98-107, 2012.
- Siddiky, R. K.; Kohler, J.; Cosme, M. & Rillig, M. C. Soil biota effects on soil structure: Interactions between arbuscular mycorrhizal fungal mycelium and collembolan. *Soil Biol. Biochem.* 50:33-39, 2012.
- Socarrás-Rivero, Ana A. *Mesofauna edáfica en suelos antropizados*. Tesis en opción al título académico de Master en Ecología y Sistemática Aplicada, Mención Ecología. La Habana, 1999.
- Socarrás-Rivero, Ana A. & Izquierdo-Brito, Irma. Evaluación de sistemas agroecológicos mediante indicadores biológicos de la calidad del suelo: mesofauna edáfica. *Pastos y Forrajes*. 37 (1):47-54, 2014.
- Socarrás-Rivero, Ana A. & Izquierdo-Brito, Irma. Variación de los componentes de la mesofauna edáfica en una finca con manejo agroecológico. *Pastos y Forrajes*. 39 (1):41-48, 2016.
- Souza, Sheila T. de; Cassol, P. C.; Baretta, D.; Bartz, Marie L. C.; Klauberger Filho, O.; Mafra, Á. L. *et al.* Abundance and diversity of soil macrofauna in native forest, eucalyptus plantations, perennial pasture, integrated crop-livestock, and no-tillage cropping. *Rev. Bras. Cienc. Solo*. 40:e0150248, 2016.
- Tomlinson, K. W.; Sterck, F. J.; Bongers, F.; Silva, Dulce A. da; Barbosa, E. R. M.; Ward, D. *et al.* Biomass partitioning and root morphology of savanna trees across a water gradient. *J. Ecol.* 100 (5):1113-1121, 2012.
- Vasconcellos, R. L. F.; Segat, Julia C.; Bonfima, Joice A.; Baretta, D. & Cardoso, Elke J. B. N. Soil macrofauna as an indicator of soil quality in an undisturbed riparian forest and recovering sites of different ages. *Eur. J. Soil Biol.* 58:105-112, 2013.