

Relación entre macroinvertebrados y propiedades del suelo bajo diferentes arreglos agroforestales en la Amazonia-Andina, Caquetá, Colombia

Relationship between macroinvertebrates and soil properties under different agroforestry arrangements in the Colombia Andean Amazon.

Ervin Humprey Durán Bautista^{1,2}, Leonardo Rodríguez Suárez¹, Juan Carlos Suárez Salazar^{1*}

¹Universidad de la Amazonia, Maestría en Agroforestería, Florencia - Caquetá, Colombia. ²Universidad del Valle, Programa de doctorado Ciencias-Biología, Cali - Valle del Cauca, Colombia. Autor para correspondencia: juansuarez1@gmail.com

Recibido: 25.08.2017 Aceptado: 01.10.2018

Resumen

La abundancia y la diversidad de macroinvertebrados están estrechamente relacionadas, entre otras características, con el contenido de nutrientes del suelo. Con el fin de analizar esta relación bajo arreglos agroforestales de la Amazonia-Andina colombiana (Caquetá) se utilizó un diseño de parcelas completamente al azar con tres repeticiones siendo el tratamiento los arreglos agroforestales: AB = Abarco (*Cariniana pyriformis* Miers); CH = Caucho (*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg.); PA = Paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber); y HU = Huito (*Genipa Americana* L.). En cada arreglo se revisaron monolitos de 25 x 25 x 30 cm de profundidad siguiendo la norma ISO 23611-5 para cuantificar la macrofauna y se tomaron muestras de suelo para la caracterización físico-química. La relación entre propiedades edáficas y la macrofauna en los diferentes arreglos agroforestales fue determinada mediante un análisis de Co-inercia. La mayor abundancia de macrofauna se encontró en el arreglo AB (945 ± 382 individuos/m²) y la mínima en CH (487 ± 80 individuos/m²). La riqueza total fue de 13 taxones, siendo el arreglo PA el de mayor riqueza (6.6 ± 0.8) y el arreglo AB el de menor riqueza (4.8 ± 0.8). Se observó una correlación significativa (análisis de Co-inercia: $RV = 0.13$, $P < 0.05$, test de Monte Carlo), lo que comprobó la respuesta de la macrofauna a las propiedades del suelo. Específicamente se encontró un efecto negativo del aluminio sobre la abundancia de Coleópteros, así como algunas relaciones positivas entre carbono orgánico y la abundancia de lombrices, y el fósforo con la abundancia de termitas.

Palabras clave: Análisis de Co-inercia; invertebrados del suelo; sistemas agroforestales.

Abstract

The abundance and diversity of macroinvertebrates are closely related, among other features, with the nutrient content of the soil. In order to analyse this relationship under agroforestry arrangements of the Colombian Andean Amazon (Caquetá), a completely random plot design with three repetitions was used, being the treatment of the agroforestry arrangements: AB = Abarco (*Cariniana pyriformis* Miers); CH = Caucho (*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg.); PA = Paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber); y HU = Huito (*Genipa Americana* L.). In each arrangement monoliths of 25 x 25 x 30 cm of depth according ISO 23611-5 to quantify the macrofauna and soil samples for physical-chemical characterization were taken. The relationship among edaphic properties and the macrofauna in the different agroforestry arrangements was determined by a Co-inertia analysis. The highest abundance of macrofauna was found in the AB arrangement (945 ± 382 individuals/m²) and the minimum 487 ± 80 (individuals /m²). The total richness was 13 taxa, being the PA arrangement the one with the highest richness (6.6 ± 0.8) and the AB arrangement with the lowest richness (4.8 ± 0.8). A significant correlation (Co-inertia analysis: $RV = 0.13$, $P < 0.05$, Monte Carlo test) was observed, this proved the response of the macrofauna to the properties of the soil. Specifically, a negative effect of aluminium on the abundance of Coleoptera was found, as well as some positive relationships between organic carbon and the abundance of earthworms and phosphorus with the abundance of termites.

Key words: Co-inertia analysis; soil invertebrates; agroforestry systems

Introducción

La macrofauna del suelo representa una parte importante de la biodiversidad de los ecosistemas y agroecosistemas e influye en la naturaleza y el funcionamiento de los suelos (Lavelle, et al., 2006). Estos macroinvertebrados desempeñan un papel importante modificando la fertilidad mediante el aumento de la macroporosidad, la humificación y la mineralización de la materia orgánica; procesos que ayudan a mejorar la estructura del suelo, control de la erosión, intercambio gaseoso, infiltración, retención de agua, propiedades hidráulicas, propiedades químicas y nutricionales del suelo (Lavelle et al., 2006; Brussaard, Ruiters & Brown, 2007). Por tanto, la pérdida de diversidad de macrofauna edáfica como consecuencia de la deforestación y la conversión de los sistemas naturales para la agricultura intensiva puede afectar los procesos ecológicos y la sostenibilidad del agroecosistema a largo tiempo (Wall et al., 2012).

En la Amazonia colombiana la ganadería es la actividad predominante en términos de superficie de la tierra y la principal motivación de la deforestación, para el periodo 2012-14 se encontró una pérdida de 358,000 ha de bosque, equivalente a 179,000 ha por año, lo que es debido a la intervención antrópica de esa área de bosques (Murcia, Gualdrón & Londoño, 2016). Frente a este panorama se han venido promoviendo los arreglos agroforestales como sistemas productivos sostenibles por su cobertura vegetal continua, diversificación de la producción y ciclaje de nutrientes (Monroe, Gama-Rodrigues, Gama-Rodrigues & Marques, 2016). No obstante, existe una alta diversidad de arreglos en el marco genérico de los cultivos agroforestales. Por lo anterior, en este estudio se evaluó el efecto de diferentes arreglos agroforestales en la Amazonia colombiana sobre la densidad y la diversidad de la comunidad de macroinvertebrados utilizando como indicadores los efectos en las propiedades del suelo.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio fue desarrollado en el Centro de Investigaciones Macagual Cesar Augusto Estrada González, situado en el occidente de la Amazonia colombiana (1°37'N y 75°36'W) en una región húmeda con una precipitación promedio anual de 3793 mm, un régimen de lluvias monomodal con máxima precipitación entre abril y septiembre), brillo solar de 1707 horas por año, temperatura promedio de 25.5 °C y humedad relativa de 84.3%. Las muestras de suelo y macrofauna edáfica fueron recolectadas en cuatro arreglos agroforestales distribuidas aleatoriamente en el centro de investigaciones, con características propias en su distribución espacial y complejidad. Los arreglos fueron identificadas con base en la especie dominante en el estrato superior,

así: abarco (AB) *Cariniana pyriformis* Miers, caucho (CH) *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg., Paricá (PA) *Schizolobium amazonicum* y Huito (HU) *Genipa americana* L. (Tabla 1).

Tabla 1. Descripción de arreglos agroforestales identificados en el Centro de Investigaciones Macagual Cesar Augusto Estrada González, Caquetá, Colombia.

Código de sitio (arreglo)	Descripción
Abarco (AB)	Arreglo agroforestal compuesto en su estrato superior por la especie maderable abarco (<i>Cariniana pyriformis</i>) asociada con el frutal amazónico arazá (<i>Eugenia stipitata</i>) y la especie arbustiva flemingia (<i>Flemingia macrophylla</i>), que en ocasiones se incorpora como abono verde.
Caucho (CH)	Arreglo agroforestal compuesto en su estrato superior por la especie caucho natural (<i>Hevea brasiliensis</i>) asociada con el frutal amazónico copoazú (<i>Theobroma grandiflorum</i>).
Paricá (PA)	Arreglo agroforestal multipropósito compuesto en su estrato superior por las especies paricá (<i>Schizolobium amazonicum</i> Huber) y caucho (<i>Hevea brasiliensis</i>), ambas asociadas con frutales amazónicos de copoazú (<i>Theobroma grandiflorum</i>).
Huito (HU)	Arreglo agroforestal compuesto en su estrato superior por huito (<i>Genipa americana</i> L.) y chontaduro (<i>Bactris gasipaes</i>), asociados con los frutales amazónicos copoazú (<i>Theobroma grandiflorum</i>) y arazá (<i>Eugenia stipitata</i>), además de la arbustiva flemingia (<i>Flemingia macrophylla</i>) que en ocasiones se incorpora como abono verde.

Muestreo del suelo y macrofauna edáfica

Cada arreglo agroforestal consistió en un área de 20,000 m², en los cuales se seleccionaron cuatro lotes de 2500 m² cada uno, a una distancia entre ellos de 30 m, elegidos por características similares de: grado de pendiente, grado de erosión y tipo de vegetación.

Para el análisis fisicoquímico, en cada lote se tomaron muestras compuestas por triplicado a una profundidad de 30 cm sobre el nivel del suelo. En los mismos puntos de muestreo se cuantificó la macrofauna siguiendo la norma ISO 23611-5 (ISO, 2011) para lo cual en un bloque de 25 x 25 x 30 cm se separaron en forma manual los especímenes de macrofauna y hojarasca los que fueron fijados en alcohol para su identificación posterior. En el laboratorio de Biología de la Universidad de

la Amazonia los macroinvertebrados fueron separados de acuerdo a su morfología y clasificados en 13 grandes grupos. El material biológico fue depositado en el Museo de Historia Natural de la Universidad de la Amazonia.

Diseño y análisis estadístico

Para evaluar la relación entre comunidades de macroinvertebrados y propiedades del suelo se utilizaron tres parcelas distribuidas en diferentes arreglos agroforestales con tres repeticiones distribuidas al azar en cada parcela. Los datos de densidad y riqueza de macroinvertebrados fueron sometidos a un análisis de varianza y comparación de medias utilizando la prueba LSD de Fisher ($P < 0.05$). Los taxones (Blattodea, Dermaptera, Homoptera, Orthoptera, Raphidioptera) que presentaron baja densidad en los arreglos agroforestales fueron agrupados en la categoría 'Otros'. Sin embargo, fueron tenidos en cuenta en el cálculo de la riqueza específica.

Para cada matriz de datos $i =$ Comunidad de macroinvertebrados e $ii =$ Propiedades edáficas se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) para determinar similitud entre arreglos agroforestales y explorar la relación entre variables de un mismo conjunto de datos. Previo al ACP de macrofauna, los datos fueron transformados por $\text{Log}_{10}(x+1)$ para reducir el efecto de grupos dominantes. La separación de

realizaron en el software R 3.4.0 (R Core Team, 2016) mediante el paquete estadístico Ade4.

Resultados

Macrofauna edáfica

Fueron recolectados 1727 individuos, siendo los grupos más abundantes Oligochaeta con 990 y Hymenoptera con 189, que representan respectivamente 52.3% y 10.9% del total de individuos. La densidad máxima se presentó en el arreglo AB (945 ± 382 individuos/m²) y la mínima en el arreglo CH (487 ± 80 individuos/m²) aunque no presentaron diferencias significativas entre ellos (Tabla 2). La riqueza estimada fue de 13 grupos taxonómicos, clasificados en 11 órdenes, 1 clase y 1 subclase. El arreglo PA presentó la mayor riqueza con 6.6 ± 0.8 taxones, en promedio, por cada monolito. El arreglo AB con 4.8 ± 0.8 taxones presentó la menor riqueza (Tabla 2), aunque la diferencia entre ambos igualmente no fue significativa. En resumen, no se observó un efecto definido del arreglo agroforestal sobre la densidad y riqueza de macroinvertebrados (Tabla 2).

El ACP con los datos de la comunidad de macrofauna explicó 46.7% de la variabilidad total de los datos con los dos primeros ejes. El eje 1 explicó el 29.6%, representando un gradiente de abundancia

Tabla 2. Abundancia de macroinvertebrados presentes en diferentes arreglos agroforestales de la Amazonia colombiana.

Grupo	Abarco	Caucho	Paricá	Huito	p-valor
	Media±E.E.	Media±E.E.	Media±E.E.	Media±E.E.	
Araneae	12.8±7.47	24.89±9.66	28.8±8.53	9.6±3.54	0.224 ^{ns}
Coleoptera	20.8±5.36	10.67±3.77	16±6.75	62.4±30.68	0.120 ^{ns}
Diplopoda	102.4±40.56	10.67±4.62	57.6±17.72	60.8±28.2	0.153 ^{ns}
Hemiptera	1.6±1.6b	—	36.8±17.54a	11.2±6.7ab	0.039*
Hymenoptera	46.4±22.43	71.11±25.73	59.2±19.53	132.8±47.23	0.215 ^{ns}
Isopoda	68.8±28.02	37.33±21.99	24±12.68	19.2±9.78	0.271 ^{ns}
Isoptera	19.2±9.48	103.11±62.55	4.8±3.41	3.2±3.2	0.074 ^{ns}
Oligochaeta	617.6±295.26	199.11±58.98	388.8±95.05	398.4±139.04	0.443 ^{ns}
Otros	56±35.88	30.22±11.76	33.6±15.72	32±13.49	0.819 ^{ns}
Densidad Total	945.6±382.08	487.11±80.49	649.6±122.8	729.6±167.13	0.560 ^{ns}
Riqueza	4.8±0.8	5.56±0.84	6.6±0.69	5.6±0.64	0.394 ^{ns}

Medias con letras iguales en las filas no difieren entre sí mediante la prueba LSD Fisher con una probabilidad ≤ 0.05 . ^{ns} no significativo, * significativo al 5% de probabilidad. E.E.: error estándar.

los arreglos agroforestales se hizo con un test de Monte Carlo. Se realizó un análisis de Co-inercia para probar covariaciones entre matrices de datos (Dray, Dufour & Chessel, 2007); la significancia de los valores del Co-inercia se evaluó con un test de Monte Carlo. Los análisis multivariados se

de los diferentes macroinvertebrados ubicados en lado izquierdo del círculo de correlación (Figura 1). El eje 2 explicó el 17.1% y separó los sitios con mayor abundancia de Araneae e insectos sociales (Isoptera e Hymenoptera) de sitios con mayores densidades de Diplopoda (Figura 1). Las diferencias en las comunidades de macroinvertebrados según

el arreglo agroforestal no resultan significativas (test de Monte Carlo) (Figura 1).

Propiedades del suelo

Los dos primeros ejes del ACP de las propiedades del suelo explicaron el 77% de la variabilidad total de los datos. El eje 1 explicó el 63.8%, separando aquellos arreglos agroforestales como AB y HU que presentaron los niveles más altos de fósforo, pH, calcio y magnesio, de los arreglos CH y PA que presentaron mayores niveles de arena y aluminio (Figura 2). El eje 2 explicó el 13.2% y separó los

sitios que presentaron mayor carbono orgánico (CO) de aquellos con mayor contenido arcilla (Arc) (Figura 2). En general, en el plano factorial se encontró un agrupamiento de algunos arreglos agroforestales como AB y HU por presentar altos contenidos de bases intercambiables ($P < 0.05$, Figura 2). Por la ubicación espacial de los arreglos, se presentaron diferencias texturales separando los arreglos AB y HU de CH y PA; no obstante, cuando se exploran datos a nivel de parcela por cada arreglo agroforestal, no se encontraron diferencias significativas ($P > 0.05$).

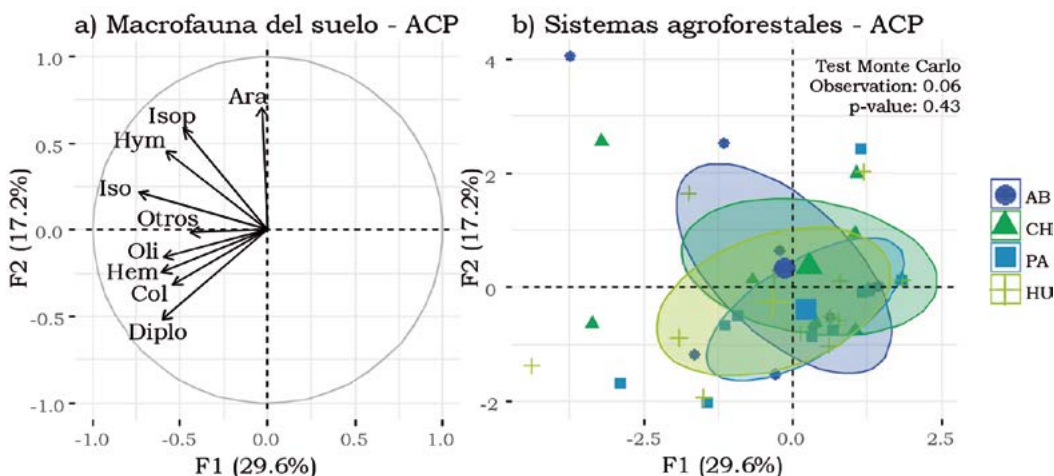


Figura 1. Proyección en el plano factorial F1/F2 de un análisis de componentes principales (ACP) de variables (macroinvertebrados) y de los puntos de muestreo agrupados según el tipo de arreglo agroforestal. (a) macroinvertebrados, círculo de correlación. Ara: Araneae, Col: Coleoptera, Oli: Oligochaeta, Hem: Hemiptera, Hym: Hymenoptera, Iso: Isopoda, Isop: Isoptera, Diplo: Diplopoda y Otros. b) Ordenación de los arreglos agroforestales incluidas en la muestra del plano factorial de un PCA. AB= Abarco, CH= Caucho, PA= Paricá y HU= Huito.

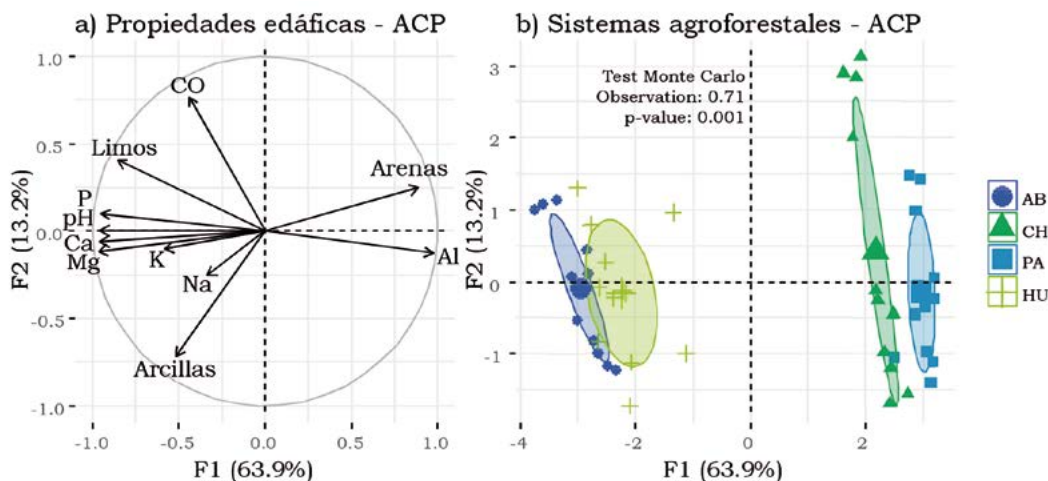


Figura 2. Proyección en el plano factorial F1/F2 de un análisis de componentes principales (ACP) de variables (propiedades del suelo) y de los puntos de muestreo agrupados según el tipo de arreglo agroforestal. (a) Propiedades del suelo, círculo de correlación. Al: aluminio, pH, CO: carbono orgánico, Ca: calcio, Mg: magnesio, K: potasio, Na: sodio y P: fósforo. (b) ordenación de los arreglos agroforestales incluidas en la muestra del plano factorial de un ACP. AB= Abarco, CH= Caucho, PA= Paricá y HU= Huito.

Análisis de Co-inercia

La relación entre comunidades de macroinvertebrados y propiedades del suelo bajo los diferentes arreglos agroforestales estudiados, utilizando el análisis de Co-inercia, mostró un coeficiente de correlación significativo (RV: 0.13, $P < 0.05$ -Figura 3). Los coleópteros presentaron una asociación

tróficas y de microclima similares entre ellos, las cuales se obtienen al desarrollar prácticas comunes como la inclusión de árboles de sombra, el mantenimiento de la cobertura y la ausencia de prácticas como labranza y quema, que favorecen la abundancia y diversidad de la macrofauna (Pauli, Barrios, Conacher, y Oberthür, 2011). En este sentido, Lavelle et al. (2016) demostraron que los

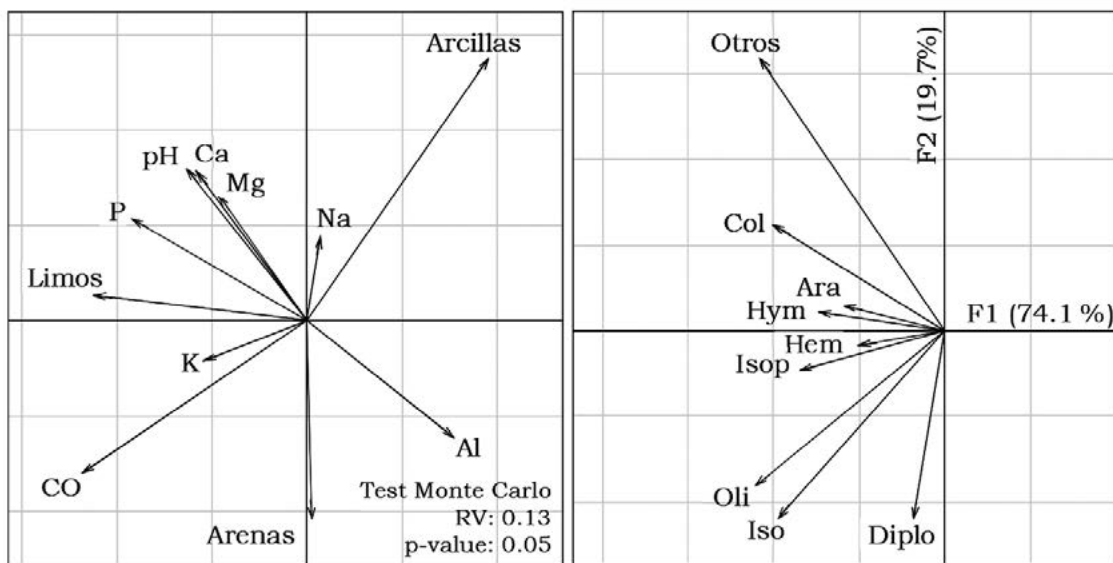


Figura 3. Proyección en el plano factorial F1/F2 de un análisis de Co-inercia de variables propiedades edáficas y variables macrofauna.

Ara: Araneae, Col: Coleoptera, Oli: Oligochaeta, Hem: Hemiptera, Hym: Hymenoptera, Iso: Isopoda, Iso: Isoptera, Dipl: Diplopoda y Otros; Al: aluminio, pH, CO: carbono orgánico, Ca: calcio, Mg: magnesio, K: potasio, Na: sodio y P: fósforo.

ción positiva con Ca, Mg, P y pH, pero negativa con Al a lo largo del eje 1; los taxones Araneae, Hymenoptera, Hemiptera e Isoptera se asociaron positivamente con el K en el lado izquierdo del eje 1. El eje 2 relacionó los diplopodos con el contenido de arena y también a las lombrices e isópodos con el carbono orgánico.

Discusión

La densidad de la macrofauna edáfica en los arreglos agroforestales estudiados presentó valores más bajos que los reportados para los bosques amazónicos (5301 individuos/m²), pero superiores a los de pasturas degradadas (21.3 individuos/m²) (Marichal et al., 2014), lo que demuestra que los efectos negativos de la intensificación del uso de la tierra sobre las comunidades de macroinvertebrados en el suelo pueden ser reducidos por prácticas agroforestales.

La riqueza de la comunidad de macrofauna no presentó diferencias entre los arreglos agroforestales, posiblemente por las condiciones

arreglos agroforestales en paisajes deforestados de la Amazonia son una alternativa que permite obtener una producción sostenible y mantener la biodiversidad y servicios ecosistémicos del suelo; asimismo, Marichal et al. (2014) encontraron que estos arreglos pueden favorecer la densidad de la macrofauna en paisajes amazónicos, la cual disminuye a lo largo de un gradiente de deforestación y la intensificación del uso del suelo.

Los resultados del análisis Co-inercia confirmaron la hipótesis que los grupos de macrofauna son afectados por las propiedades del suelo, pero estos, a su vez, también pueden influir en estas propiedades. Esta relación ha sido estudiada por investigadores como Velásquez, et al. (2012); Vasconcellos, Segat, Bonfim, Baretta y Cardoso (2013); Marichal et al. (2014); y Oliveira, Gama-Rodrigues, Gama-Rodrigues y Sales (2018).

Según Vasconcellos et al. (2013) la relación negativa del Al con la abundancia de Coleópteros puede ser empleada como indicador de la

macrofauna, debido al efecto de este elemento sobre los nutrientes y la calidad del suelo; Geissen y Brümmer (1999) concluyeron que un mayor suministro de nutrientes y una disminución del contenido de Al presente en suelos forestales, conducen a una mayor actividad biológica relacionada con la alta descomposición de la materia orgánica.

Los nutrientes Ca, Mg y P, así como sitios con menor nivel de acidez (pH) estuvieron relacionados con la alta presencia de coleópteros. Al respecto, Auclerc et al. (2012) encontraron que la aplicación de cal en el suelo favorece la abundancia de Coleópteros, principalmente la familia Curculionidae, como resultado de los cambios en las concentraciones de Ca, Mg y pH. Li, Ji, Schaffer y Brune (2006) encontraron un aumento significativo de P en el suelo como resultado de la solubilización y la hidrólisis enzimática del P orgánico por la actividad de los coleópteros.

La relación entre Isópodos y carbono orgánico se explica por la actividad de estos organismos en el proceso de descomposición de la materia orgánica, ya que fraccionan la hojarasca (Marques, Silva, Silva, Moreira y Pinto, 2014), estimulan y consumen hongos y bacterias (Frasson, Rosado, Elias y Harter-Marques, 2016), procesos que son fundamentales para el ciclaje de nutrientes.

La distribución de carbono orgánico influye de manera positiva en la presencia y abundancia de lombrices (Kuntz et al., 2013); por su parte, la forma y los mecanismos como estos macroorganismos influyen sobre las concentraciones de este compuesto se explican por la asignación del carbono en microagregados (250 - 253 μm) recién formados en el horizonte orgánico (Knowles, Ross y Görres, 2016) y su participación activa en la descomposición de la materia orgánica (Filser et al., 2016).

Moutinho, Nepstad & Davidson (2003) al evaluar la influencia de las colonias de hormigas cortadoras sobre las propiedades del suelo en la Amazonia, encontraron que los desechos orgánicos de *Atta* sp. (Linnaeus, 1758) incrementaron significativamente la concentración de K, Ca y Mg. Sanabria, Dubs, Lavelle, Fonte y Barot (2016) encontraron que el N total en el suelo se relacionó positivamente con *Crematogaster longispina* (Emery, 1890), lo que es debido al aumento de la concentración de C y minerales por la presencia de hormigas.

Rousseau, Deheuvels, Rodrigues y Somarriba (2012) encontraron que las arañas del género *Pardosa* (Koch, 1847) están asociadas con suelos de buena fertilidad, alto contenido de materia orgánica y macronutrientes. De Bruyn

& Conacher (1990) y Mujinya, Ranst, Verdoodt, Baert y Ngongo (2010) encontraron mayores concentraciones de nutrientes, en especial K, y mayor capacidad de intercambio catiónico, debido a la concentración y posterior descomposición de la materia orgánica en montículos de termitas. Estos macroorganismos poseen un tracto digestivo con diferentes procesos químicos y biológicos que pueden alterar la carga de iones (Sarcinelli et al., 2009) y favorecer la acumulación de K en forma de carbonato de potasio (Brune y Kühl, 1996).

Conclusiones

Las propiedades del suelo bajo los arreglos agroforestales estudiados afectaron la diversidad de macroinvertebrados y son potenciales reguladores de la abundancia de estos organismos en el suelo. En el estudio, los arreglos agroforestales evaluados no afectaron la densidad de individuos/ m^2 en el suelo.

Referencias

- Auclerc, A., Nahmani, J., Aran, D., Baldy, V., Callot, H., Gers, C., Lorio, E., Lapied, E., Lassauce, A., Pasquet, A., Spelda, J., Rossi, J. P. and Guérol, F. (2012). Changes in soil macroinvertebrate communities following liming of acidified forested catchments in the Vosges Mountains (North-eastern France). *Ecol Eng*, 42, 260-269. <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.02.024>
- Brune, A. and Kühl, M. (1996). pH profiles of the extremely alkaline hindguts of soil-feeding termites Isoptera: Termitidae determined with microelectrodes. *J Insect Physiol*, 42(11-12), 1121-1127. <https://doi.org/10.1016/S0022-19109600036-4>
- Brussaard, L., De Ruiter, P. C. and Brown, G. G. (2007). Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agric Ecosyst Environ*, 121(3), 233-244. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.013>
- De Bruyn, L. and Conacher, A. J. (1990). The role of termites and ants in soil modification-a review. *Austr. Aust J Soil Res*, 28(1), 55-93. <https://doi.org/10.1071/SR9900055>
- Dray, S., Dufour, A. B. and Chessel, D. (2007). The ade4 package-II: Two-table and K-table methods. *R News*, 7(2), 47-52. <https://pbil.univ-lyon1.fr/ade4/article/rnews2/rnews2.pdf>
- Filser, J., Faber, J. H., Tiunov, A. V., Brussaard, L., Frouz, J., De Deyn, G.,... Jiménez, J. J. (2016). Soil fauna: key to new carbon models. *Soil*, 2, 565-582. <https://doi.org/10.5194/soil-2-565-2016>
- Frasson, J. M. de F., Rosado, J. L. O., Elias, S. G. and Harter-Marques, B. (2016). Litter decomposition of two pioneer tree species and associated soil fauna in areas reclaimed after surface coal mining in southern Brazil. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 40, 1-14. <http://dx.doi.org/10.1590/18069657rbcs20150444>
- Geissen, V. and Brümmer, G. W. (1999). Decomposition rates and feeding activities of soil fauna in deci-

- duous forest soils in relation to soil chemical parameters following liming and fertilization. *Biol Fertil Soils*, 29(4), 335-342. <https://doi.org/10.1007/s003740050562>
- ISO 23611-5. (2011). Soil quality-Sampling of soil invertebrates-Part 5: Sampling and extraction of soil macro-invertebrates. <https://www.iso.org/standard/50777.html>
- Knowles, M. E., Ross, D. S. and Görres, J. H. (2016). Effect of the endogeic earthworm *Aporrectodea tuberculata* on aggregation and carbon redistribution in uninvaded forest soil columns. *Soil Biol Biochem*, 100, 192-200. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.06.016>
- Kuntz, M., Berner, A., Gattinger, A., Scholberg, J. M., Mäder, P. and Pfiffner, L. (2013). Influence of reduced tillage on earthworm and microbial communities under organic arable farming. *Pedobiologia*, 56(4-6), 251-260. <http://doi.org/10.1016/j.pedobi.2013.08.005>
- Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F.,... Rossi, J. P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. *Eur J Soil Biol*, 42(1), S3-S15. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.10.002>
- Lavelle, P., Dolédec, S., De Sartre, X. A., Decaëns, T., Gond, V., Grimaldi, M.,... Velásquez, J. (2016). Unsustainable landscapes of deforested Amazonia: An analysis of the relationships among landscapes and the social, economic and environmental profiles of farms at different ages following deforestation. *Global Environ Change*, 40, 137-155. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.04.009>
- Li, X. Z., Ji, R., Schaffer, A. & Brune, A. (2006). Mobilization of soil phosphorus during passage through the gut of larvae of *Pachnoda ephippiata* (Coleoptera: Scarabaeidae). *Plant Soil*, 288(1-2), 263-270. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9113-4>
- Marichal, R., Grimaldi, M., Feijoo, A., Oszwald, J., Praxedes, C., Cobo, D. H. R.,... Lavelle, P. (2014). Soil macroinvertebrate communities and ecosystem services in deforested landscapes of Amazonia. *Appl Soil Ecol*, 83, 177-185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.05.006>
- Marques, D., da Silva, A., da Silva, L., Moreira, E. and Pinto, G. (2014). Macrofauna edáfica em diferentes coberturas vegetais. *Biosci J*, 30(5), 1588-1597. <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/22926>
- Monroe, P. H. M., Gama-Rodrigues, E. F., Gama-Rodrigues, A. C. and Marques, J. R. (2016). Soil carbon stocks and origin under different cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. *Agric Ecosyst Environ*, 221(1), 99-108. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.022>
- Moutinho, P., Nepstad, D. C. and Davidson, E. A. (2003). Influence of leaf-cutting ant nests on secondary forest growth and soil properties in Amazonia. *Ecology*, 84(5), 1265-1276. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2003\)084\[1265:IOLANO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2003)084[1265:IOLANO]2.0.CO;2)
- Mujinya, B. B., Van Ranst, E., Verdoodt, A., Baert, G. and Ngongo, L. M. (2010). Termite bioturbation effects on electro-chemical properties of Ferral soils in the Upper Katanga D.R. Congo. *Geoderma*, 158(3-4), 233-241. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.04.033>
- Murcia, G. U., Gualdrón, A. and Londoño M. (2016). Monitoreo de los bosques y otras coberturas de la Amazonia Colombiana a escala 1:100.000. Cambios multitemporales en el periodo 2012 al 2014 y coberturas del año 2014. Bogotá, Colombia: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas.
- Oliveira, P. H., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F. and Sales, M. V. (2018). Litter and soil-related variation in functional group abundances in cacao agroforests using structural equation modeling. *Ecol Indic*, 84, 254-262. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.030>
- Pauli, N., Barrios, E., Conacher, A. J. and Oberthür, T. (2011). Soil macrofauna in agricultural landscapes dominated by the Quesungual Slash-and-Mulch Agroforestry System, western Honduras. *Appl Soil Ecol*, 47(2), 119-132. <http://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.11.005>
- R Core Team. (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Rousseau, G. X., Deheuvels, O., Rodrigues, A. I. and Somarriba, E. (2012). Indicating soil quality in cacao-based agroforestry systems and old-growth forests: the potential of soil macrofauna assemblage. *Ecol Indic*, 23, 535-543. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.05.008>
- Sanabria, C., Dubs, F., Lavelle, P., Fonte, S. J. & Barot, S. (2016). Influence of regions, land uses and soil properties on termite and ant communities in agricultural landscapes of the Colombian Llanos. *Eur J Soil Biol*, 74, 81-92. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2016.03.008>
- Sarcinelli, T. S., Schaefer, C. E. G., de Souza Lynch, L., Arato, H. D., Viana, J.H.M., de Albuquerque Filho M. R. and Gonçalves, T. T. (2009). Chemical, physical and micromorphological properties of termite mounds and adjacent soils along a toposequence in Zona da Mata, Minas Gerais State, Brazil. *Catena*, 76(2), 107-113. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.10.001>
- Vasconcellos, R. L., Segat, J. C., Bonfim, J. A., Baretta, D. and Cardoso, E. J. (2013). 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. <http://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2013.07.001>
- Velásquez, E., Fonte, S. J., Barot, S., Grimaldi, M., Desjardins, T. and Lavelle, P. (2012). Soil macrofauna-mediated impacts of plant species composition on soil functioning in Amazonian pastures. *Appl Soil Ecol*, 56:43-50. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.01.008>
- Wall, D. H., Bardgett, R. D., Behan-Pelletier, V., Herrick, J. E., Jones, T. H., Ritz, K.,... Van Der Putten, W. H. (2012). Soil ecology and ecosystem services. Oxford University Press.