

Manejo y aprovechamiento de recursos

Diversidad de colémbolos epiedáfcos en plantaciones forestales de *Acacia mangium* y sabanas en la Orinoquía colombiana

Epiedaphic springtail diversity in Acacia mangium plantations and savannas in the Colombian Orinoquía

Adriana Ramos-Díaz ^{a, *}, José G. Palacios-Vargas ^b y Olga Patricia Pinzón-Florián ^a

^a Laboratorio de Sanidad Forestal, Universidad Distrital "Francisco José de Caldas", Carrera 5 Este Núm. 15-82, Bogotá, Colombia

^b Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México

*Autor para correspondencia: adiramdi@gmail.com (A. Ramos-Díaz)

Recibido: 6 noviembre 2019; aceptado: 26 mayo 2020

Resumen

La forestación de sabanas, previamente dedicadas a la ganadería extensiva, con especies de rápido crecimiento es un fenómeno creciente en la Orinoquía Colombiana. Con el fin de estimar cambios en las comunidades de colémbolos por el establecimiento de *Acacia mangium* en las sabanas, se comparó la diversidad en plantaciones de 1, 3 y 5 años con la de sabanas del proyecto forestal en el municipio de Puerto Gaitán (Meta), en las temporadas seca y de lluvias. Las muestras fueron obtenidas mediante trampas de caída expuestas durante 9 días en cada época. Se estimó y comparó la riqueza y diversidad de colémbolos entre edades y sabanas en cada temporada. Adicionalmente, se explicó la composición en función de variables fisicoquímicas del suelo y variables relacionadas con la estructura de las plantaciones, mediante el uso de ordenación (RDA). La forestación de sabanas produjo cambios en la diversidad y los ensamblajes de colémbolos. Las diferencias entre plantaciones y sabanas fueron explicadas por cambios en temperatura y contenido de humedad del suelo, contenido de arcilla, carbono orgánico, compactación y altura de la plantación. Se concluye que estados tempranos de la forestación de sabanas con *A. mangium* favorecen la diversidad de colémbolos.

Palabras clave: Manejo forestal; Cambio de uso del suelo; Ensamblaje de comunidades

Abstract

The afforestation of savannas, previously dedicated to extensive cattle ranching, with fast-growing forest species is a growing phenomenon in the Colombian Orinoquía. In order to estimate changes in the springtail communities due to the establishment of *Acacia mangium* in the savannas, their diversity in plantations of 1, 3 and 5 years was compared with savannas in a forestry project located in the municipality of Puerto Gaitán (Meta), during the dry and rainy season. Samples were obtained using pitfall traps exposed for 9 days in each season. Springtails richness and diversity among different plantations ages and savannas was estimated and compared in each season. Additionally, the

composition was explained based on physicochemical variables of the soil and variables related to the structure of the plantations and management (RDA). Savanna afforestation produced changes in diversity and springtail assemblages. Differences among plantations and savannas were explained by changes in soil temperature and moisture, amount of clay, organic carbon, soil compaction and height of the plantation. It is concluded that early stages of the afforestation of savannas with *A. mangium* favors the diversity of springtails.

Keywords: Forest management; Land use change; Community assembly

Introducción

En los últimos 30 años, las sabanas de altillanura en la Orinoquía Colombiana han sufrido cambios en el uso del suelo, debido al acelerado desarrollo de la agricultura intensiva (incluidas plantaciones forestales). La Orinoquía es, en la actualidad, uno de los centros de desarrollo forestal con mayor proyección en el país debido a su extensión y localización geográfica privilegiada, con cerca de 6 millones de ha aptas para la forestación (CONIF et al., 1998; Ruiz, 2011). Las actividades de forestación se desarrollan con especies exóticas como eucaliptos (*Eucalyptus* spp.), pinos (*Pinus* spp.) y acacias (*Acacia mangium*; Nieto y Gasca, 2010), en áreas de sabanas previamente utilizadas para ganadería extensiva.

Las plantaciones forestales contribuyen a suplir la demanda de madera y fibra, disminuyendo parcialmente la presión sobre los bosques naturales por acción de la deforestación, favoreciendo la preservación de la biodiversidad local (Brockhoff et al., 2013); sin embargo, éstas deben obedecer los criterios e indicadores de un manejo forestal sostenible, para garantizar que los productos obtenidos provengan de unidades de manejo que brinden beneficios ambientales, como la conservación de la diversidad, la provisión de bienes y servicios ecosistémicos, así como beneficios socioeconómicos (FSC, 2018). De esta manera, el uso e identificación de bioindicadores es un mecanismo útil para evaluar el efecto del cambio de uso de suelo o la perturbación de un ecosistema sobre la integridad ecológica y además contribuir a responder los principios del manejo forestal sostenible mediante actividades de monitoreo (Cabrera, 2012; Socarrás, 2013).

Diferentes estudios sugieren que las plantaciones de *A. mangium* proporcionan mejores condiciones a las comunidades de organismos del suelo comparadas con las de otras especies forestales. Éstas proveen una mayor cantidad de materia orgánica rica en nutrientes y lignina (Adejuyigbe et al., 1999; Pellens y Garay, 1999; Tsukamoto y Sabang, 2005), lo cual influye en un aumento en la biomasa y densidad de la macrofauna cuando la edad de plantación es mayor (Cunha-Neto et al., 2012; Mboukou-Kimbatsa et al., 1998), y en la riqueza de la fauna del suelo (Sayad et al., 2012). En una zona tropical

en Nigeria, se encontró que plantaciones de *Leucaena*, *Senna* y principalmente *Acacia*, establecidas en un área degradada, incrementaron las poblaciones de colémbolos y ácaros debido a la modificación de la calidad de los recursos orgánicos con altos contenidos de lignina y de las condiciones microclimáticas (Adejuyigbe et al., 1999).

En Colombia se ha observado que el reemplazo de bosques naturales por plantaciones de pino afecta la diversidad, composición, dinámica y estructura trófica de carábidos y colémbolos, presentando una reducción en la función del ecosistema (Camero et al., 2005; León-Gamboa et al., 2010). Sin embargo, el efecto sobre la fauna del suelo, de establecer una cubierta forestal en áreas abiertas como las sabanas, ha sido menos estudiado y en el caso de los carábidos se ha observado el favorecimiento de depredadores generalistas y disminución de las especies propias de las sabanas (García-Suabita et al., 2019).

Los colémbolos han sido utilizados como indicadores del estado, calidad y fertilidad del suelo (Roy y Roy, 2006), debido a cambios observados en la riqueza y abundancia de sus poblaciones, lo cual está correlacionado con la alteración de factores químicos, físicos y biológicos en su entorno (Cassagne et al., 2003; Guillén et al., 2006; León-Gamboa et al., 2010).

Este estudio tuvo como objetivo estimar el efecto del cambio del uso del suelo de sabanas extensivas por plantaciones de rápido crecimiento sobre la fauna de colémbolos epiedáficos. Del mismo modo, dado que en la Orinoquía el régimen de precipitación es monomodal, se espera observar patrones marcados en función de la estacionalidad, particularmente limitante durante el periodo seco, debido a la mayor exposición del suelo a las fluctuaciones diarias y estacionales de humedad y temperatura. En contraste, se espera que las coberturas arbóreas en las cuales se amortiguan los cambios estacionales del clima, el efecto sea menos limitante.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en plantaciones de *A. mangium* localizadas en el corregimiento de Planas, Puerto Gaitán Meta, Colombia (4°7'30" - 4°11'30" N, 71°18'0" - 71°12'30" O). Comprende 2,000 ha de *A. mangium*

plantadas en áreas de sabana (dedicadas a ganadería extensiva previa a la plantación) y 1,000 ha de bosques de galería. Puerto Gaitán está localizado a 149 m snm y cuenta con una temperatura media anual de 26.8 °C, con temperaturas medias más elevadas entre enero y marzo (28 - 28.3 °C) y entre junio y agosto las medias más bajas (25.5 °C). La humedad relativa presenta valores máximos de mayo a noviembre (82-85%) y mínimos entre diciembre a abril (69-79%), con medias anuales de 79%. En la zona de estudio predomina un ambiente húmedo con una época seca muy marcada (Jiménez, 2009). La precipitación anual varía entre 2,000-2,700 mm con un régimen monomodal, la época de lluvias se registra de marzo a noviembre, con un pico de lluvias en el mes de junio (Herrera, 2009). Los suelos son principalmente Oxisoles (IGAC, 2004) que pertenecen a la unidad de suelos "Typic Haplustox" (LVGdc2.). La zona comprende un paisaje de lomerío fluvio-gravitacional con clima cálido húmedo a subhúmedo, un relieve con pendientes entre el 7-25%, suelos profundos a superficiales, texturas finas a moderadamente gruesas, bien a modernamente drenados, fuerte a extremadamente ácidos, fertilidad baja; toxicidad por aluminio y muy susceptibles a la erosión. La vegetación presenta características de una sabana con predominio de gramíneas, principalmente de *Trachipogon*, *Paspalum* y *Andropogon* (Jiménez, 2009). Por su parte, las plantaciones se encuentran en un paisaje de lomerío, con una clase textural franco arenosa a franco arcillosa (FA-FAr), considerada apta para la siembra de *A. mangium*. Algunas características, como el tipo de pendiente (óptimo 0-10%) y drenaje (bueno), presentan algunas restricciones para su establecimiento. Los suelos cuentan con una profundidad efectiva superficial (0.5 m) a moderadamente profunda (1.5 m), con un nivel freático cercano a la superficie del suelo y baja fertilidad (Herrera, 2009).

La preparación del suelo fue similar en las 3 edades de plantación, e incluyó preparación con cincel rígido a 70 cm, rastra semipesada, encalado, reposo por 2 meses, paso de rastra nuevamente y siembra. Se realizó una fertilización mecanizada (NPK) al momento de la plantación, luego una fertilización al primer año repartida en 2 dosis y posteriormente una fertilización una vez al año hasta los 5 a 7 años. A los 3 meses se realizó la primera poda de realce, luego a los 6 meses, al año, 3 años y finalmente se hizo raleo (Cooperación verde S.A., 2013).

El muestreo de los colémbolos se realizó en plantaciones de *A. mangium* de 1, 3 y 5 años y en áreas de sabana, en el periodo de lluvias de septiembre de 2014 y en el periodo seco de marzo de 2015. Se establecieron 3 lotes de cada una de las edades de plantación y 3 de sabana para un total de 12 lotes muestreados. El muestreo se realizó bajo el permiso de colecta otorgado mediante resolución ANLA

0738 de 2014. Los colémbolos se recolectaron empleando el protocolo estándar para captura y preservación de macrofauna y mesofauna del suelo (Moreira et al., 2012). En cada lote se utilizaron 9 trampas de caída, dispuestas en 3 transectos de 30 m siguiendo la línea de plantación y distanciadas entre sí de 10 m, para un total de 108 trampas. Los transectos se ubicaron a una distancia de 20 m entre sí y 50 m con relación al borde de la plantación. Las trampas consistieron en vasos plásticos de 500 ml enterrados a ras del suelo conteniendo 200 ml de propilenglicol al 40% como y protegidas por un techo plástico para evitar la pérdida de la muestra por la lluvia preservante (Knapp y Ruzicka, 2012; Sabu y Shiju, 2010; Spence y Niemelä, 1994; Wang et al., 2001). Las trampas estuvieron activas por 9 días en cada temporada.

Los colémbolos se cuantificaron y preservaron en viales con alcohol al 70% en el laboratorio de Sanidad Forestal de la Universidad Distrital "Francisco José de Caldas" (UDFJC). Se realizaron preparaciones permanentes con Euparal siguiendo la metodología estándar (Palacios-Vargas y Mejía-Recamier, 2007); para su determinación se emplearon textos especializados y claves taxonómicas para diferentes regiones de América (Ávila y Jaramillo, 2009; Christiansen et al., 2012; Bellinger et al., 2019; Díaz y González, 2003; Galindo y Pabon, 1985; Ospina, 2004; Ospina et al., 2009; Palacios-Vargas, 1990; Peñaranda, 2005). Los especímenes se depositaron en la Colección Entomológica Forestal (UDFJC) (N° de catálogo: Ls-2015-3000_1 a Ls-2015-3908_1; Ls-2015-5069_1 a Ls-2015-5384_1). Los datos fueron analizados a nivel de género.

Con el objeto de explicar cambios en la composición de colémbolos en función de las condiciones ambientales, en cada sitio de muestreo se midieron variables estructurales de las plantaciones y variables fisicoquímicas del suelo. En cada transecto de las trampas de caída se sobrepuso un cuadrante de 30 × 2 m. En cada cuadrante se seleccionaron al azar 12 árboles y se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) con una cinta diamétrica, y la altura (m) utilizando un hipsómetro Haglof vertex IV. En cada transecto se estimó el índice de área foliar (%) (LAI) utilizando un ceptómetro (Decagon's AccuPAR model LP-80 PAR/LAI) y se estimó la acumulación de hojarasca midiendo la profundidad (cm) con una regla métrica.

Las variables físicas del suelo se midieron en los mismos puntos en donde se instalaron las trampas de caída. Se determinó la humedad volumétrica Hv (%) con el equipo TDR (Time Domain Reflectometry), como un forma indirecta y no destructiva de medir el contenido de agua en el suelo (Flores y Alcalá, 2010); la temperatura (°C) con termómetros de suelo, la resistencia tangencial al corte (KPa) con un torcómetro Eijkelkamp y la resistencia

del suelo a la penetración - compactación (Newton) con un penetrómetro manual/analógico Eijkelkamp. Adicionalmente, se tomaron muestras de aproximadamente 1 kg de suelo, a 1 m de cada una de las trampas de caída para los análisis químicos en laboratorio, registrando las siguientes 14 variables: pH, mediante la suspensión suelo-agua (P:V 1:1) por valoración potenciométrica (NTC 5264:2018); carbono orgánico oxidable (CO%), a través del método de Walkley-Black por valoración colorimétrica (NTC 5403:2013); nitrógeno total (N%) mediante el método Kjeldahl por valoración volumétrica (Soil Survey Staff, 2014), bases intercambiables de Ca (meq/100 g), K (meq/100 g), Mg (meq/100 g) y Na (meq/100 g), usando el método de extracción con NH₄-acetato 1M pH 7 en el equipo de absorción atómica (NTC 5349:2016); la acidez intercambiable (AI, me/100 g) mediante la extracción con KCl 1M por valoración volumétrica (NTC:5263:2017); la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE, meq/100 g) mediante el método estimado por suma de bases y acidez intercambiable (IGAC, 2006); fósforo disponible (P, mg/kg) mediante el método de Bray II por valoración colorimétrica (IGAC, 2006). Las variables físicas comprendieron: estimación de contenido de humedad relativa (CH%) mediante la diferencia entre el peso húmedo y el peso seco (secado en estufa a una temperatura de 25 °C) de la muestra, dividido por el peso seco, expresado en porcentaje, y estimación de porcentaje de las fracciones de arcilla (Ar%), limo (L%) y arena (A%) mediante el método de Bouyoucos (NTC:6299:2018) (dispersión con Na-hexametafosfato por valoración densimétrica). Para los análisis se tomó en cuenta únicamente el valor de la proporción de arcilla, ya que las fracciones de limo y arena se correlacionan con este valor. Finalmente, la textura se obtuvo por la relación de los valores de las fracciones en el triángulo de clasificación textural USDA (Soil Science Division Staff, 2017).

Para estimar y comparar la diversidad alfa en las plantaciones y sabanas en los 2 periodos climáticos, se utilizó el análisis de rarefacción basado en cobertura de la muestra (Chao et al., 2014) utilizando 3 órdenes de diversidad (números de Hill $q = 0, 1, 2$). Los 3 están directamente relacionados con la riqueza de especies ($q = 0$ con mayor peso asignado a las especies raras) y los índices de Shannon ($q1$: exponencial de Shannon, dando importancia a las especies según su abundancia) y Simpson ($q2 =$ inverso de Simpson, asignando mayor peso a especies comunes). En este análisis, los valores de cada orden de diversidad son expresados como número de especies equivalentes, mismos que son directamente comparables (Jost, 2006, 2007). Contrario al método tradicional de cobertura basada en número de individuos, el método de rarefacción basado en cobertura permite

la comparación estadística del número equivalente de especies dentro de un rango de 95% de confianza (Chao y Jost 2012). Los análisis fueron implementados en la paquetería iNEXT (Hsieh et al., 2016) en R.

La diversidad beta se calculó a partir del índice de similitud cuantitativo de Bray-Curtis, con el fin de determinar el grado en el que 2 muestras son semejantes por las especies presentes entre ellas. Los análisis fueron implementados con la paquetería Vegan en R (Oksanen et al., 2019).

Por otra parte, se implementó el análisis de especies indicadoras el cual emplea la abundancia relativa (especificidad) y la frecuencia relativa (fidelidad) de cada especie en grupos previamente definidos para obtener un valor de indicación (IndVal) y su probabilidad dentro del grupo (De Cáceres et al., 2010; Dufrêne y Legendre, 1997). El análisis de especies indicadoras se lleva a cabo con la función `multipatt` con el paquete `indicspecies` en R (De Cáceres y Legendre, 2009), el cual devuelve la raíz cuadrada del valor de indicación (IndVal) original propuesto por Dufrêne y Legendre (1997). Así, a cada especie se asigna un valor de indicación, con un rango entre 0 y 1; por defecto, la salida muestra únicamente las especies con un valor de indicación significativo ($p < 0.05$).

Con el objeto de estimar posibles diferencias en la abundancia entre las coberturas y entre las 2 épocas de muestreo, se implementó un modelo de regresión lineal mixto generalizado (GLMM) con la distribución de Poisson con un ajuste logístico (Zuur et al., 2009). En el modelo se incluyeron la abundancia de colémbolos que fue comparada entre 4 coberturas (variables fijas) cada una medida en 2 épocas de muestreo. Una vez conocida la significancia del modelo, se realizó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey para identificar el mejor nivel de tratamiento. Los análisis fueron implementados en R versión 3.2.5, usando `lm4` (Bates et al., 2015).

Para estimar posibles diferencias de las variables ambientales y edáficas entre coberturas y época climática, se realizó un análisis de varianza no paramétrico (prueba de Kruskal-Wallis) y la prueba de rangos múltiples de Bonferroni, seguido de comparaciones múltiples utilizando la prueba de Mann-Whitney aplicando un ajuste de Bonferroni. Todas las pruebas estadísticas se realizaron con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$).

Con el objeto de explicar la composición de colémbolos epiedáficos en función de las variables ambientales y edáficas, el tipo de cobertura (plantaciones vs sabana) y la temporada climática, se utilizó un análisis de redundancia (RDA), que se ajusta como un modelo de regresión lineal multivariado de una comunidad de datos. Los géneros representados en la muestra con menos de 10 individuos

fueron omitidos del análisis y a las abundancias de los demás géneros se les aplicó la transformación Hellinger (Legendre y Gallagher, 2001). Previamente al ajuste del modelo se eliminaron las variables altamente correlacionadas: arena, limo, índice de área foliar, contenido de humedad del suelo (en el caso donde se usó Hv en el análisis), DAP y CICE. La multicolinealidad entre las variables restantes se evaluó con el factor de inflación de varianza VIF (por sus siglas en inglés) y se retuvieron las variables con $VIF < 10$ (Hair et al., 1995); la selección de variables del modelo final se realizó a través del método "Forward" (Hocking, 1976). El test de permutaciones (1,000) para RDA fue usado con el fin evaluar la significancia del modelo y las variables, mientras el test de significancia de los componentes del RDA sirvió para establecer el número de componentes usados (Borcard et al., 2018). De esta manera, se ajustó un primer modelo teniendo en cuenta la temporada climática y el tipo de cobertura con 6 variables ambientales y dado que la mayor parte de información de las propiedades químicas del suelo fue obtenida durante la época de lluvias, se ajustó un segundo modelo con las muestras de colémbolos colectadas en esta temporada y el tipo de cobertura, empleando en éste caso 19 variables ambientales implementados en el paquete (Vegan) del software Estadístico R versión 3.2.5. (R Studio Team, 2020).

Resultados

En las plantaciones de *A. mangium* y áreas de sabana, se recolectaron 12,442 colémbolos pertenecientes a 11 familias y 25 géneros (Apéndice). El orden Entomobryomorpha presentó 10 géneros en 4 familias, seguido por el orden Symphypleona con 10 géneros en 5 familias y el orden Poduromorpha con 5 géneros de 2 familias. El muestreo fue representativo del número de géneros de colémbolos esperado en cada época y cobertura. Se encontró que para la época húmeda el número estimado de géneros en una muestra de 970 individuos fue de 19 (IC: 5,013) en plantaciones de 5 años, mientras que en las plantaciones de 1 año, el número estimado de géneros fue de 18 (IC: 1,134); en la época seca el número estimado de géneros en una muestra de 923 individuos fue de 10 (IC: 3,26) en las sabanas, mientras que en las plantaciones de 1 año el número estimado de géneros fue de 17 (IC: 0.887). Por otra parte, la cobertura del muestreo en la época húmeda fue de 99.7% en las plantaciones de 5 años y 100% en las demás coberturas; mientras que en la época seca presentó valores entre el 99.4% en áreas de sabana y 99.9% en plantaciones de 1 año.

La abundancia de géneros de colémbolos en el estudio fueron explicadas (modelo GLMM, AIC: 662.6162,

df.resid: 8) por la cobertura (edad de las plantaciones y sabana) ($\chi^2 = 1718.486$; $p < 0.0001$), época de muestreo (seca y húmeda) ($\chi^2 = 23.481$; $p < 0.0001$) y la interacción entre cobertura: época ($\chi^2 = 754.109$; $p < 0.0001$). Por otra parte, se encontraron diferencias significativas entre la abundancia de los géneros de colémbolos entre las plantaciones de 5 años y 1 año ($Z = -15.22$; $p < 0.001$) y entre las sabanas con las plantaciones de 1 año ($Z = -9.098$; $p < 0.001$) y 3 años ($Z = -3.613$; $p < 0.01$).

En la tabla 1 se muestra la abundancia absoluta y relativa de las familias y géneros de colémbolos en todas las coberturas por época. En la época húmeda y en las plantaciones de 1 año, las familias Paronellidae (35%) y Sminthuridae (33%) fueron las más abundantes. En las plantaciones de 3 y 5 años y en las sabanas fueron los Sminthuridae (29%, 23% y 40%, respectivamente), Brachystomellidae (20%, 24% y 30%, respectivamente) y Neanuridae (15%, 25% y 12%, respectivamente). En cuanto a géneros, se observó que en las plantaciones de 1 y 3 años y sabanas, *Sphaeridia* fue el más abundante (25%, 26% y 34%, respectivamente) y en las plantaciones de 5 años *Brachystomella* (24%).

En la época seca y en las plantaciones de 1 año, las familias Sminthuridae (39%) y Entomobryidae (30%) fueron las más abundantes. Entomobryidae fue la más abundante en las sabanas (93%) y en las plantaciones de 5 (43%) y 3 años (39%). El género más abundante en plantaciones de 1 año fue *Sphaeridia* (26%), en las plantaciones de 3 y 5 años *Entomobrya* (29%) y (35%) y en las sabanas *Seira* (92%).

En el periodo húmedo, no se evidenció una diferencia significativa (intervalo de confianza (IC) del 95%) en la diversidad de géneros de colémbolos en términos de riqueza (q_0) entre sabanas y plantaciones (fig. 1A). Sin embargo, en el periodo seco, la riqueza en las sabanas fue significativamente inferior (IC 95%) en aproximadamente 6 géneros con relación a las plantaciones. No se observaron diferencias entre las edades de plantación.

La diversidad (q_1) observada en las sabanas en función de la abundancia relativa fue menor que en las plantaciones (fig. 1B). Esta diferencia fue significativa (IC 95%) durante la época seca en todas las coberturas. Así, en esta época las plantaciones de 1, 3 y 5 años fueron respectivamente 82%, 83% y 78% más diversas que las sabanas.

Por otra parte, la diversidad en las sabanas en la época seca correspondió al 22% de los géneros (5) recolectados en esta misma cobertura en la época húmeda (fig. 1B). En el periodo húmedo se observó que en las plantaciones de 5 años y en las sabanas, la diversidad fue menor respecto a las plantaciones de 1 (23% y 28%) y 3 años de edad (24% y 29%). Las plantaciones de 5 años fueron 7% más diversas que las sabanas (IC 95%).

La diversidad estimada del orden $q=2$ (mayor importancia a los géneros más comunes) observada en las sabanas fue menor (IC 95%) a la hallada en todas las edades de plantación y se acentúa durante la época seca (fig. 1C). La menor diversidad encontrada en las plantaciones de 5 años y en las sabanas, se debe al peso de los géneros dominantes (fig. 1C). Las plantaciones de 5 años presentaron una diversidad intermedia (5 géneros) entre las plantaciones de 1 y 3 años y las sabanas.

Los valores de similitud de géneros de las comunidades de colémbolos obtenidos con el índice de Bray - Curtis, (tabla 2) indican que en la época seca la mayor similitud

(59%) y se observó en plantaciones entre las edades de 3 y 5 años, mientras en las coberturas de sabana y plantaciones de 1, 3 y 5 años, la semejanza de géneros fue cerca de 36%, 10% y 4%, respectivamente. En la época húmeda, las plantaciones de 3 y 5 años presentaron una afinidad de 80%, mientras que las plantaciones de 1 año y 5 años fue la menor con 30%.

Doce de los 21 géneros más abundantes de Collembola pueden ser considerados indicadores de las coberturas estudiadas y la época climática (tabla 3). Destacan en las sabanas: *Brachystomella* en la época húmeda y *Seira* en la época seca por presentar valores de indicación altos. Así mismo, destacan los géneros encontrados en las plantaciones de 1 año: *Salina* en el periodo húmedo y *Denisiella* en el periodo seco, y en las plantaciones de 5 años en el periodo seco *Entomobrya*.

Los sitios evaluados presentaron diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) entre coberturas para algunas de las variables ambientales estudiadas en los 2 periodos climáticos (tablas 4, 5). Como era de esperarse, la altura de los árboles fue superior en las plantaciones de mayor edad, aunque debido a la alta variabilidad en la altura de los árboles en las plantaciones de 5 años, no se detectaron diferencias con respecto a las plantaciones de 3 años de edad. Por otra parte, el contenido de humedad en el suelo en las sabanas fue significativamente menor en el periodo seco respecto a las plantaciones de 1, 3 y 5 años en respuesta a la exposición solar directa del suelo a temperaturas mayores y al alto porcentaje de arena. En las sabanas, la temperatura del suelo presentó diferencias significativas entre los 2 periodos climáticos y entre las edades de plantación, exhibiendo una menor temperatura en la época húmeda. La resistencia tangencial al corte del suelo fue significativamente mayor en las plantaciones de 1 año con respecto al resto de coberturas en la época seca y mayor a la resistencia registrada en las sabanas en la época húmeda, lo cual está relacionado con la alta compactación del suelo en estas plantaciones. Así, la compactación del suelo presentó los valores más bajos en las plantaciones de 3 años *versus* las demás coberturas en el periodo húmedo, en contraste con el periodo seco, donde fue mayor que las plantaciones de 1 año y sabanas; esto se debe a que en las plantaciones de 3 años, los contenidos de arcillas son proporcionalmente mayores que en las demás coberturas, provocando en la sequía, su contracción. El pH registrado resultó fuertemente ácido (4.44 en plantaciones de 1 año a 5.32 en las sabanas). Los porcentajes significativamente más altos de carbono y nitrógeno orgánico se presentaron en las plantaciones de 1 año. Del mismo modo, la profundidad de la hojarasca fue significativamente menor en estas plantaciones en la época húmeda respecto a las plantaciones de 3 y 5 años, y mayor en la época seca.

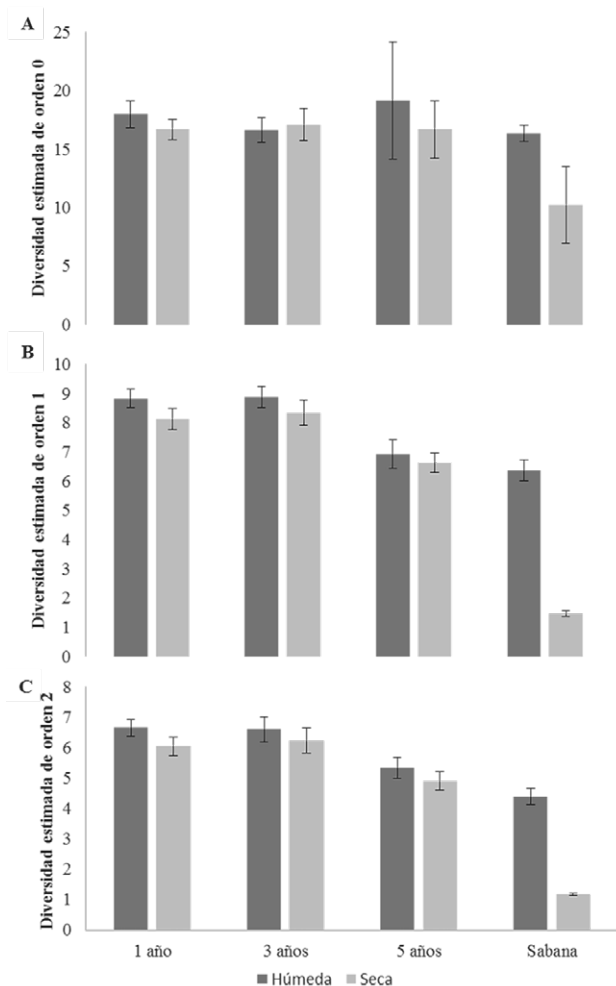


Figura 1. Número efectivo de géneros de colémbolos en plantaciones de *A. mangium* de 1, 3 y 5 años y áreas de sabana para la época seca y húmeda en la vereda Planas (Puerto Gaitán - Meta). A, Riqueza de especies (diversidad de orden $q = 0$); B, diversidad estimada de orden $q = 1$ y C, diversidad estimada de orden $q = 2$. Las barras de error son intervalos de confianza al (IC 95%).

Tabla 1

Abundancia absoluta y relativa entre paréntesis (calculada con el total de la edad de plantación y/o la época de recolección) de colémbolos al nivel de género, encontrados en plantaciones de *A. mangium* de 1, 3 y 5 años y en áreas de sabana en la vereda Planas (Puerto Gaitán-Meta-Colombia), recolectados en septiembre de 2014 (periodo húmedo (H)) y marzo 2015 (periodo seco (S)).

Taxa	1 año		3 años		5 años		Sabana		Total		Total
	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	
Entomobryomorpha											
<i>Cyphodidae</i>	2 (0.1)	2 (0.1)	11 (0.9)	6 (0.5)	5 (0.5)	6 (0.4)	0 (0)	0 (0)	18 (0.3)	14 (0.2)	32 (0.3)
<i>Cyphoderus</i>	2 (0.1)	2 (0.1)	11 (0.9)	6 (0.5)	5 (0.5)	6 (0.4)	0 (0)	0 (0)	18 (0.3)	14 (0.2)	32 (0.3)
<i>Entomobryidae</i>	314 (12.0)	665 (29.6)	232 (19.8)	444 (38.8)	135 (13.9)	636 (43.4)	225 (11.8)	855 (92.6)	906 (13.6)	2600 (45)	3506 (28.2)
<i>Dicranocentrus</i>	101 (3.9)	13 (0.6)	56 (4.8)	3 (0.3)	10 (1.0)	1 (0.1)	99 (5.2)	0 (0)	266 (3.9)	17 (0.3)	283 (2.3)
<i>Entomobrya</i>	53 (2.0)	56 (2.5)	101 (8.6)	330 (28.9)	96 (9.9)	519 (35.4)	15 (0.8)	2 (0.2)	265 (3.9)	907 (15.7)	1172 (9.4)
<i>Seira</i>	56 (2.2)	505 (22.4)	16 (1.4)	33 (2.9)	1 (0.1)	1 (0.1)	12 (0.6)	851 (92.2)	85 (1.3)	1390 (24.0)	1475 (11.9)
<i>Lepidocyrtus</i>	104 (3.9)	91 (4.0)	59 (5.1)	78 (6.8)	28 (2.9)	115 (7.8)	99 (5.2)	2 (0.2)	290 (4.4)	286 (4.9)	576 (4.6)
<i>Isotomidae</i>	30 (1.2)	1 (0.04)	2 (0.2)	8 (0.7)	4 (0.4)	4 (0.3)	34 (1.8)	1 (0.1)	70 (1.1)	14 (0.2)	84 (0.7)
<i>Folsomides</i>	24 (0.9)	1 (0.04)	2 (0.2)	8 (0.7)	4 (0.4)	4 (0.3)	28 (1.5)	1 (0.1)	58 (0.9)	14 (0.2)	72 (0.6)
<i>Isotoma</i>	6 (0.2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	6 (0.1)	0 (0)	6 (0.1)
<i>Proisotoma</i>	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	6 (0.3)	0 (0)	6 (0.1)	0 (0)	6 (0.1)
<i>Paronellidae</i>	907 (34.8)	66 (2.9)	108 (9.2)	82 (7.2)	47 (4.8)	102 (7.0)	29 (1.5)	1 (0.1)	1091 (16.4)	251 (4.3)	1342 (10.8)
<i>Salina</i>	384 (14.7)	22 (0.9)	68 (5.8)	52 (4.5)	38 (3.9)	99 (6.8)	23 (1.2)	1 (0.1)	513 (7.7)	174 (3.0)	687 (5.5)
<i>Trogolaphysa</i>	523 (20.1)	44 (1.9)	40 (3.4)	30 (2.6)	9 (0.9)	3 (0.2)	6 (0.3)	0 (0)	578 (8.7)	77 (1.3)	655 (5.3)
Poduromorpha											
<i>Brachystomellidae</i>	65 (2.5)	108 (4.8)	238 (20.4)	159 (13.9)	234 (24.1)	228 (15.6)	576 (30.1)	11 (1.2)	1113 (16.7)	506 (8.7)	1619 (13.0)
<i>Brachystomella</i>	65 (2.5)	108 (4.8)	238 (20.4)	159 (13.9)	234 (24.1)	228 (15.6)	574 (30.0)	11 (1.2)	1111 (16.7)	506 (8.7)	1617 (13.0)
<i>Rapoportella</i>	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (0.1)	0 (0)	2 (0.0)	0 (0)	2 (0.02)
<i>Neanuridae</i>	90 (3.5)	56 (2.5)	172 (14.7)	43 (3.8)	242 (24.9)	74 (5.0)	226 (11.8)	0 (0)	730 (11.0)	173 (3.0)	903 (7.3)
<i>Arlesia</i>	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	10 (0.7)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	10 (0.2)	10 (0.01)
<i>Furculanurida</i>	90 (3.5)	56 (2.5)	172 (14.7)	43 (3.8)	241 (24.9)	64 (4.3)	226 (11.8)	0 (0)	729 (10.9)	163 (2.8)	892 (7.2)
<i>Neotropiella</i>	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0)	0 (0)	1 (0.01)
Symphyleona											
<i>Bourletiellidae</i>	339 (13.0)	417 (18.5)	31 (2.7)	146 (12.8)	3 (0.3)	9 (0.6)	25 (1.3)	38 (4.1)	398 (6.0)	610 (10.5)	1008 (8.1)
<i>Deuterostomithurus</i>	337 (12.9)	365 (16.2)	31 (2.6)	145 (12.7)	3 (0.3)	9 (0.6)	25 (1.3)	38 (4.1)	396 (5.9)	557 (9.6)	953 (7.7)
<i>Rastrupes</i>	2 (0.1)	52 (2.3)	0 (0)	1 (0.1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (0.03)	53 (0.9)	55 (0.4)
<i>Collophoridae</i>	8 (0.3)	48 (2.1)	37 (3.2)	30 (2.6)	33 (3.4)	65 (4.4)	23 (1.2)	0 (0)	101 (1.5)	143 (2.5)	244 (2.0)
<i>Collophora</i>	8 (0.3)	48 (2.1)	37 (3.2)	30 (2.6)	33 (3.4)	65 (4.4)	23 (1.2)	0 (0)	101 (1.5)	143 (2.5)	244 (1.9)

Tabla 1
 Continuación

Taxa	1 año		3 años		5 años		Sabana		Total		Total
	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	
Dicyrtomidae	2 (0.1)	0 (0)	5 (0.4)	8 (0.7)	42 (4.3)	295 (20.1)	8 (0.4)	0 (0)	57 (0.9)	303 (5.2)	360 (2.9)
<i>Dicyrtomina</i>	0 (0)	0 (0)	2 (0.2)	7 (0.6)	42 (4.3)	295 (20.1)	0 (0)	0 (0)	44 (0.7)	302 (5.2)	346 (2.8)
<i>Ptenotrix</i>	2 (0.1)	0 (0)	3 (0.3)	1 (0.1)	0 (0)	0 (0)	8 (0.4)	0 (0)	13 (0.2)	1 (0.02)	14 (0.1)
Sminthuridae	2 (0.1)	4 (0.2)	0 (0)	0 (0)	1 (0.1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	4 (0.1)	3 (0.01)	7 (0.1)
<i>Sphyrotheca</i>	2 (0.1)	4 (0.2)	0 (0)	0 (0)	1 (0.1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (0.1)	4 (0.1)	7 (0.06)
Sminthuridae	848 (32.5)	883 (39.2)	333 (28.5)	218 (19.1)	224 (23.1)	47 (3.2)	767 (40.1)	17 (1.8)	2172 (32.6)	1165 (20.1)	3337 (26.8)
<i>Densitella</i>	126 (4.8)	271 (12.0)	6 (0.5)	15 (1.3)	0 (0)	0 (0)	49 (2.6)	1 (0.1)	181 (2.7)	287 (4.9)	468 (3.8)
<i>Sinnamarides</i>	70 (2.7)	18 (0.8)	20 (1.7)	0 (0)	2 (0.21)	1 (0.1)	68 (3.6)	0 (0)	160 (2.4)	19 (0.3)	179 (1.4)
<i>Sphaeridia</i>	652 (25.0)	582 (25.9)	307 (26.2)	203 (17.7)	222 (22.9)	46 (3.1)	650 (33.9)	16 (1.7)	1831 (27.5)	847 (14.7)	2678 (21.5)
<i>Sminthurides</i>	0 (0)	12 (0.5)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	12 (0.2)	12 (0.1)
Total	2,607	2,250	1,169	1,144	970	1,466	1,913	923	6,659	5,783	12,442

Tabla 2

Valores de similitud de géneros (método Bray-Curtis) entre las plantaciones forestales de *A. mangium* de 1, 3 y 5 años y las áreas de sabana en la vereda Planas - Puerto Gaitán, en época seca y húmeda.

	Sabana		1 año		3 años	
	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco
1 año	0.55	0.36	--	--		
3 años	0.63	0.10	0.44	0.45	--	--
5 años	0.56	0.04	0.30	0.24	0.80	0.59

Un primer análisis de redundancia RDA explicó la composición de colémbolos en función del periodo húmedo y seco, la cobertura vegetal y variables ambientales físicas del suelo. La composición de géneros de colémbolos en plantaciones de *A. mangium* de 1, 3 y 5 años y áreas de sabana fue mejor explicada mediante 5 variables (R^2 : 37% , R^2 ajustado: 35%, $F_{7,201} = 16.8, p < 0.001$), a saber: el tipo de cobertura ($F_{3,201} = 20.2, p < 0.001$), el periodo climático ($F_{1,201} = 36.98, p < 0.001$), la temperatura del suelo ($F_{1,201} = 16.08, p < 0.001$), el contenido de humedad del suelo ($F_{1,201} = 2.0, p = 0.03$) y la altura de la plantación ($F_{1,201} = 2.07, p = 0.05$) (fig. 2). El primer eje (RDA1) explicó 56% de la varianza restringida, describiendo un gradiente de temperatura, mientras que el segundo eje (RDA2) explicó 23%, donde la variable más importante es la altura de los árboles (tablas 4, 5).

El género *Seira* estuvo fuertemente correlacionado con la época seca y la alta temperatura del suelo (valor promedio 31.2 °C; tabla 4), mientras *Furculanurida* y *Brachystomella* lo estuvieron con la época húmeda, la mayor altura de los árboles y las plantaciones de 3 y 5 años. *Entomobrya*, *Dicyrtomina* y *Lepidocyrtus* también mostraron correlación con las plantaciones de 3 y 5 años y la altura de los árboles, pero en la época seca. Finalmente, *Sphaeridia* y *Dicranocentrus* se correlacionaron con la época húmeda y el contenido de humedad en el suelo (fig. 2).

Un segundo análisis de RDA explicó la composición de colémbolos únicamente en el periodo húmedo, incluyendo variables edáficas físicoquímicas. El modelo explicó 26% de la varianza (R^2 ajustado: 21%, $F_{6,99} = 5.73, p < 0.001$), evidenciando una relación significativa con la compactación del suelo ($F_{1,99} = 3.07, p = 0.004$), el contenido de carbono orgánico ($F_{1,99} = 3.11, p < 0.001$) y el porcentaje de arcilla ($F_{1,99} = 7.3, p < 0.001$), variables que mostraron una alta correlación con *Dicranocentrus*, *Entomobrya*, *Salina*, *Trogolaphysa*, *Brachystomella*, *Furculanurida*, *Dicyrtomina* y *Sinnamarides* (fig. 3). El primer eje (RDA1) explicó 49% de la varianza restringida encontrada siendo la variable representativa

Tabla 3

Géneros indicadores de Collembola encontrados en plantaciones de *A. mangium* y sabanas en los periodos húmedo y seco.

Cobertura	Periodo	Género	Especificidad	Fidelidad	Valor de indicación
<i>A. mangium</i> - 1 año	Húmedo	<i>Salina</i>	0.55	0.81	0.67**
		<i>Trogolaphysa</i>	0.80	0.37	0.54**
<i>A. mangium</i> - 1 año	Seco	<i>Denisiella</i>	0.57	0.89	0.71**
		<i>Rastriopes</i>	0.94	0.22	0.46**
<i>A. mangium</i> - 5 años	Seco	<i>Entomobrya</i>	0.45	0.96	0.66**
		<i>Dicyrtomina</i>	0.86	0.35	0.55**
Sabana	Húmedo	<i>Brachystomella</i>	0.37	0.92	0.58**
		<i>Sphaeridia</i>	0.26	0.96	0.50*
		<i>Dicranocentrus</i>	0.37	0.64	0.49**
		<i>Furculanurida</i>	0.27	0.84	0.47*
		<i>Sinnamarides</i>	0.40	0.44	0.42**
Sabana	Seco	<i>Seira</i>	0.60	1.00	0.78**

Significancia ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$.

la compactación del suelo (1.6 Newton), la cual presenta alta correlación con *Trogolaphysa*. El segundo eje (RDA2) explicó 25% de la varianza restringida siendo las variables representativas el contenido de carbono orgánico fuertemente correlacionado con *Sinnamarides* y el contenido de arcilla altamente correlacionado con *Dicranocentrus*.

Discusión

El establecimiento de plantaciones forestales implica un cambio de uso del suelo; sin embargo, su efecto en la biodiversidad no es claro, ya que por un lado contribuyen indirectamente a disminuir la presión sobre los bosques naturales en la medida que proporcionan una alternativa para la obtención de madera, y por otro, también pueden inducir cambios en la diversidad de artrópodos que desempeñan funciones importantes en el suelo (Brockerhoff et al., 2013; Camero et al., 2005; Mboukou-Kimbatsa et al., 1998; Pellens y Garay, 1999).

Los resultados de este trabajo muestran que en las áreas plantadas con *A. mangium* aumentó la diversidad de colémbolos, ya que presentaron mayor número y equidad de géneros en relación con las sabanas. En este sentido, el mayor recambio se presentó en las plantaciones de 5 años respecto a las sabanas, equivalente al 13% y 31% en el periodo húmedo y seco, respectivamente, debido a la presencia de los géneros *Cyphoderus*, *Dicyrtomina* y *Arlesia* en las plantaciones pero no en las sabanas. Así mismo, se observó un importante recambio de géneros entre sabanas y plantaciones de 1 año (12% y 29% en el periodo húmedo y seco, respectivamente), debido a la

presencia de *Cyphoderus*, *Rastriopes* y *Sphyrotheca* sólo en las plantaciones. Por otra parte, en el periodo seco no se encuentran géneros presentes en las sabanas en el periodo de lluvias como: *Dicranocentrus*, *Trogolaphysa*, *Furculanurida*, *Collophora*, *Ptenotrix*, *Sinnamarides* y *Sminthurides*.

Los ensamblajes de colémbolos, tanto en sabanas como en plantaciones, fueron altamente sensibles a las condiciones limitantes durante la época seca. La sabana, a su vez, fue la cobertura menos diversa y más impactada por el régimen climático, allí se observó 71% de la diversidad encontrada en las plantaciones de 3 años en el periodo húmedo y 17% de la encontrada en la misma edad en el periodo seco. En estas sabanas la temperatura del suelo fue de 2.2 °C (época húmeda) y 3.5 °C (época seca) mayor que en las plantaciones, y el contenido de humedad fue en promedio 2% menor a las plantaciones en la época seca. Palacios-Vargas y Castaño-Meneses (2003) observaron cómo el ensamblaje de las comunidades de colémbolos varía significativamente entre estaciones y tipos de bosque, dependiendo tanto de las especies de árboles como de la humedad.

Por otra parte, una disminución de la diversidad en el periodo seco puede relacionarse con una mayor variación de la humedad y la temperatura que puede ocurrir en las áreas con menor cobertura vegetal y sobre el suelo (sabanas, pastizales, cultivos agrícolas) debido a la baja oferta de nichos y microhábitats, así como el cambio en la distribución de las familias y géneros (Arbea y Blasco-Zumeta, 2001; Ávila y Jaramillo, 2009; Cunha-Neto et al., 2012; Gómez-Anaya et al., 2010; Palacios-Vargas y Mejía-Recamier, 2008).

Tabla 4

Valores promedio y desviación estándar de las variables físicas del suelo y datos de las plantaciones de *A. mangium* (1, 3 y 5 años) y áreas de sabana en Puerto Gaitán-Meta-Colombia, muestreados en septiembre de 2014 (periodo húmedo [H]) y marzo 2015 (periodo seco [S]).

	Sabana		1 año		3 años		5 años	
	H	S	H	S	H	S	H	S
Altura de árboles (m)	0.0 ± 0.0 c	0.0 ± 0.0 c	4.6 ± 1.1 a	4.6 ± 1.1 a	7.8 ± 1.7 b	7.7 ± 1.6 b	9.5 ± 2.8 b	9.6 ± 2.8 b
Contenido de humedad del suelo (%)	12.6 ± 2.8 a	11.6 ± 0.9 b	12.4 ± 4.3 a	13.5 ± 5.3 ab	11.3 ± 1.9 a	13.9 ± 2.2 a	10.4 ± 3.1 a	13.9 ± 1.1 a
Altura hojarasca (cm)	17.2 ± 5.6 c	17.8 ± 7.3 c	0.8 ± 0.9 a	5.6 ± 4.0 a	3.1 ± 0.8 b	4.5 ± 3.3 ab	3.5 ± 1.1 b	2.7 ± 1.6 b
Resistencia del suelo al corte tangencial (Kpa)	0.6 ± 0.1 b	0.8 ± 0.1 b	0.9 ± 0.4 a	1.2 ± 0.4 a	0.7 ± 0.2 ab	0.8 ± 0.2 b	0.7 ± 0.2 ab	0.9 ± 0.2 b
Compactación del suelo (Newton)	1.1 ± 0.1 a	5.4 ± 0.5 c	1.6 ± 0.7 a	4.8 ± 0.7 a	0.8 ± 0.1 b	6.3 ± 0.5 b	1.4 ± 0.7 a	5.2 ± 1.6 abc
Temperatura del suelo (°C)	25.3 ± 0.6 c	31.2 ± 0.5 d	28.8 ± 1.9 a	27.7 ± 1.4 a	27.6 ± 1.4 a	26.5 ± 0.3 b	26.1 ± 0.5 b	27.1 ± 0.7 a

Diferente letra indica diferencias significativas ($\alpha = 0.05$, Mann Whitney U-Test)

Tabla 5

Valores promedio y desviación estándar de las propiedades químicas y físicas del suelo en los primeros 5 cm y características de las plantaciones forestales de *A. mangium* de 1 año, 3 años y 5 años y áreas de sabana en la vereda Planas - Puerto Gaitán-Meta-Colombia, muestreado en septiembre de 2014 (periodo húmedo). Potencial de hidrógeno (pH), carbono orgánico (CO%), nitrógeno (N%), calcio (Ca meq / 100 g), potasio (K meq / 100 g), magnesio (Mg meq / 100 g), sodio (Na meq / 100 g), acidez intercambiable (AI meq / 100 g), capacidad de intercambio catiónico (CICE meq / 100 g), fósforo (P mg/kg), arcilla (Ar%), limo (L%), arena (A%), humedad volumétrica medida mediante la reflectometría de dominio de tiempo (TDR) determinada en campo (Hv%), diámetro a la altura del pecho (DAP cm), índice de área foliar (LAI%).

	Sabana		1 año		3 años		5 años	
	H	S	H	S	H	S	H	S
pH	5.32 ± 0.24 c	4.44 ± 0.31 a	4.49 ± 0.31 a	4.78 ± 0.31 a	4.78 ± 0.31 a	4.78 ± 0.31 a	4.78 ± 0.31 a	4.78 ± 0.31 a
CO%	0.60 ± 0.13 b	0.94 ± 0.37 a	0.61 ± 0.13 b	0.57 ± 0.11 b	0.57 ± 0.11 b	0.57 ± 0.11 b	0.57 ± 0.11 b	0.57 ± 0.11 b
N%	0.04 ± 0.01 b	0.07 ± 0.03 a	0.05 ± 0.01 b	0.04 ± 0.01 b	0.04 ± 0.01 b	0.04 ± 0.01 b	0.04 ± 0.01 b	0.04 ± 0.01 b
Ca meq / 100 g	0.10 ± 0.02 c	0.13 ± 0.02 a	0.13 ± 0.02 a	0.08 ± 0.03 b	0.08 ± 0.03 b	0.08 ± 0.03 b	0.08 ± 0.03 b	0.08 ± 0.03 b
K meq / 100 g	0.04 ± 0.02 ab	0.04 ± 0.02 ab	0.04 ± 0.02 ab	0.06 ± 0.01 a	0.06 ± 0.01 a	0.06 ± 0.01 a	0.06 ± 0.01 a	0.06 ± 0.01 a
Mg meq / 100 g	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.02	0.06 ± 0.02	0.06 ± 0.02	0.06 ± 0.02	0.06 ± 0.02
Na meq / 100 g	0.04 ± 0.02 ab	0.05 ± 0.05 a	0.03 ± 0.01 b	0.05 ± 0.01 b	0.05 ± 0.01 b	0.05 ± 0.01 b	0.05 ± 0.01 b	0.05 ± 0.01 b
AI meq / 100 g	0.58 ± 0.39 c	1.17 ± 0.33 a	0.92 ± 0.16 b	0.79 ± 0.26 bc	0.79 ± 0.26 bc	0.79 ± 0.26 bc	0.79 ± 0.26 bc	0.79 ± 0.26 bc
CICE meq / 100 g	0.82 ± 0.39 c	1.45 ± 0.35 a	1.18 ± 0.21 b	1.05 ± 0.28 bc	1.05 ± 0.28 bc	1.05 ± 0.28 bc	1.05 ± 0.28 bc	1.05 ± 0.28 bc
P mg/kg	3.22 ± 1.23	5.18 ± 5.21	5.15 ± 5.71	4.47 ± 2.56	4.47 ± 2.56	4.47 ± 2.56	4.47 ± 2.56	4.47 ± 2.56
Ar%	6.70 ± 1.64 c	11.19 ± 5.27 ab	11.33 ± 3.28 a	8.15 ± 2.3 bc	8.15 ± 2.3 bc	8.15 ± 2.3 bc	8.15 ± 2.3 bc	8.15 ± 2.3 bc
L%	15.04 ± 3.94 c	24.81 ± 8.00 a	16.67 ± 4.3 bc	6.74 ± 7.99 b	6.74 ± 7.99 b	6.74 ± 7.99 b	6.74 ± 7.99 b	6.74 ± 7.99 b
A%	78.26 ± 4.16 c	63.67 ± 11.71 a	72.00 ± 6.03 b	7.99 ± 3.14 a	7.99 ± 3.14 a	7.99 ± 3.14 a	7.99 ± 3.14 a	7.99 ± 3.14 a
Hv%	22.97 ± 6.46 b	14.31 ± 6.37 a	14.07 ± 3.49 a	15.79 ± 1.86 c	15.79 ± 1.86 c	15.79 ± 1.86 c	15.79 ± 1.86 c	15.79 ± 1.86 c
DAP cm	0.00 ± 0 d	3.26 ± 1.27 a	7.36 ± 1.81 b	10.22 ± 0.87 a	10.22 ± 0.87 a	10.22 ± 0.87 a	10.22 ± 0.87 a	10.22 ± 0.87 a
LAI%	0.00 ± 0 b	0.82 ± 0.45 a	1.17 ± 0.72 a	1.09 ± 0.87 a	1.09 ± 0.87 a	1.09 ± 0.87 a	1.09 ± 0.87 a	1.09 ± 0.87 a

Diferente letra indica diferencias significativas ($P < 0.05$, Mann Whitney U-Test)

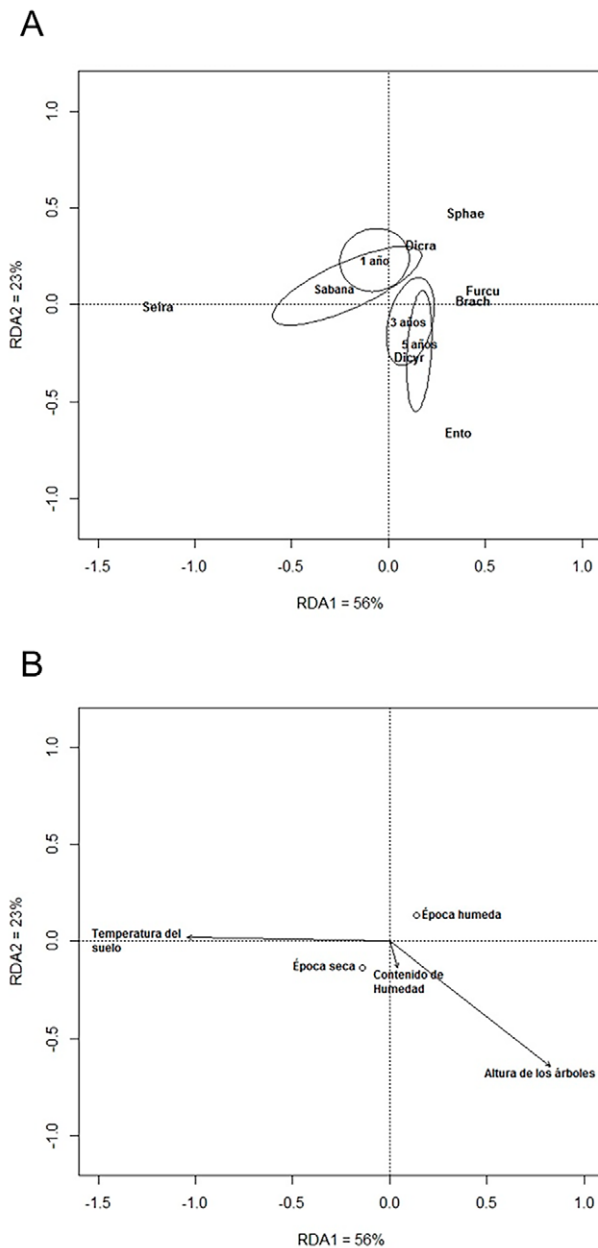


Figura 2. Análisis de redundancia (RDA) indicando la relación de 6 géneros de Collembola y 3 variables edáficas y dasométricas en época seca y húmeda en plantaciones de *A. mangium* de 1, 3 y 5 años y sabanas en la vereda Planas, municipio de Puerto Gaitán Meta. Ambas figuras corresponden a la misma ordenación: A, relación con el tipo de cobertura, las elipses representan un intervalo de confianza de 95% alrededor del centroide de cada una de las coberturas; B, relación con variables ambientales, los puntos representan variables categóricas y los vectores variables continuas. *Brachystomella* (Brach), *Dicranocentrus* (Dicra), *Dicyrtomina* (Dicyr), *Entomobrya* (Ento), *Furculanurida* (Furcu), *Seira* (Seira), *Sphaeridia* (Sphae).

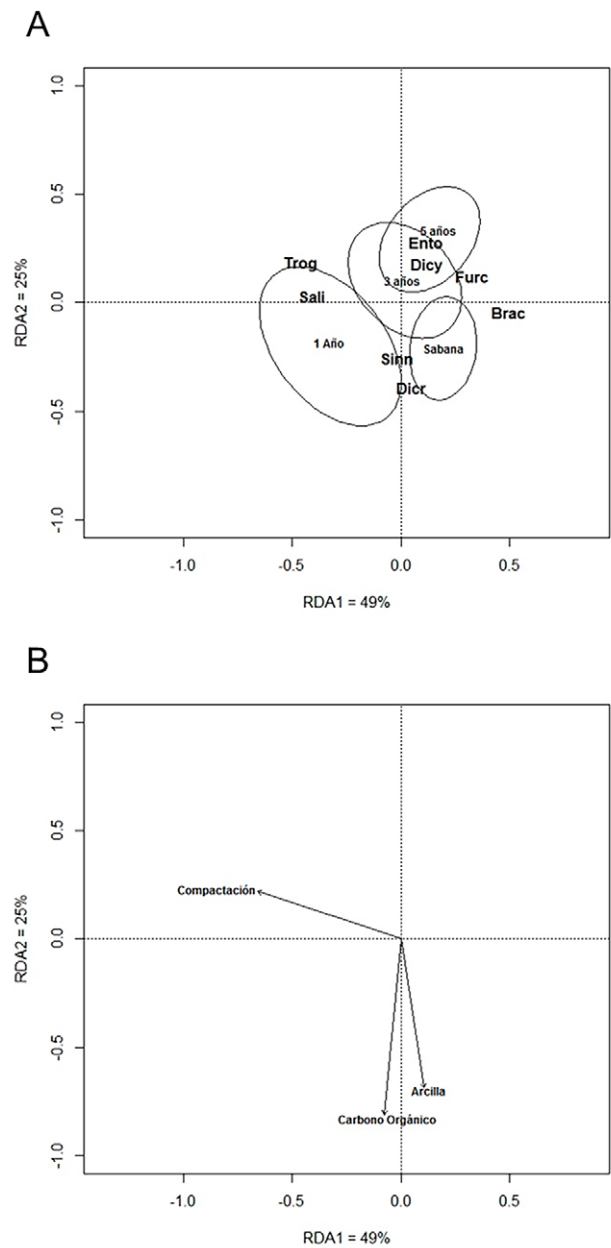


Figura 3. Modelo final del análisis de redundancia de 19 variables edáficas y ambientales y 19 géneros de Collembola en plantaciones de *A. mangium* de 1, 3 y 5 años y sabanas para el periodo húmedo en la vereda Planas, municipio de Puerto Gaitán Meta. Ambas figuras corresponden a la misma ordenación: A) relación con el tipo de cobertura, las elipses representan un intervalo de confianza de 95% alrededor del centroide de cada una de las coberturas; B) relación con variables ambientales, los puntos representan variables categóricas y los vectores variables continuas. *Brachystomella* (Brac), *Dicranocentrus* (Dicr), *Dicyrtomina* (Dicy), *Entomobrya* (Ento), *Furculanurida* (Furc), *Salina* (Sali), *Sinnamarides* (Sinn), *Trogolaphysa* (Trog). 6a, las elipses representan las coberturas; 6b, los puntos representan las variables edáficas y dasométricas.

Tanto en las plantaciones como en las sabanas, los colémbolos de los géneros *Seira* y *Lepidocyrtus* fueron más abundantes en la época seca. Esta misma tendencia fue encontrada en otras coberturas como bosques de pino, selva baja caducifolia y un cultivo temporal en México, donde el comportamiento de estos géneros se explica por la alta capacidad de desplazamiento y la disponibilidad para habitar otros ambientes como grietas, troncos en descomposición, hongos y follaje, que les permite resguardarse de los cambios del medio, así como la capacidad de trepar a la vegetación arbustiva (Palacios-Vargas y Castaño-Meneses, 2003; Palacios-Vargas y Mejía-Recamier, 2008).

Asimismo, la abundancia de géneros de colémbolos de las familias Brachystomellidae, Neanuridae y algunos Entomobryidae (*Dicranocentrus*), tienden a disminuir entre 46 y 80% en el periodo seco. Por otra parte, los colémbolos de las familias Isotomidae, Brachystomellidae, Neanuridae (*Furculanurida*), Sminthuridae (*Sphaeridia*, *Sinnamarides*), Entomobryidae (*Dicranocentrus*) y Dicyrtomidae (*Ptenotrix*), presentaron mayor abundancia durante la época de lluvias, fenómeno que también ha sido documentado en varios estudios (Arbea y Blasco-Zumeta, 2001; Gómez-Anaya et al., 2010) y se asocia probablemente a la mayor disponibilidad de alimento y a la mayor abundancia de cuerpos fructíferos de hongos que se desarrollan especialmente en esta época, y que es la principal fuente de su dieta (Gómez-Anaya et al., 2010; Hopkin, 1997).

Además del efecto del régimen climático, la abundancia de colémbolos también se relacionó con variables propias de las coberturas y las condiciones ambientales presentes en cada una de ellas. Así, *Seira* además de ser muy abundante en el periodo seco, también predominó en la cobertura de sabana, donde se registró una temperatura edáfica promedio de 31.2 °C, la más alta del estudio (tabla 4). Palacios-Vargas y Mejía-Recamier (2008) encontraron que *Seira* fue el género más abundante en el periodo seco y se relacionó con las zonas con menor cobertura vegetal. Sin embargo, también se reportó una especie de este género como dominante en el dosel de un bosque decíduo tropical en México (Palacios-Vargas et al., 1998). Su adaptabilidad está relacionada con las características morfológicas que le brindan protección frente a la desecación.

Dicranocentrus, *Sinnamarides* y *Sphaeridia* fueron más abundantes en las sabanas durante la época de lluvias, donde el contenido de humedad del suelo fue alto (Hv = 23%). *Dicranocentrus* y *Sinnamarides* presentaron una alta correlación con suelos con bajo contenido de arcilla (6.7%) y de carbono orgánico (0.6%). El bajo porcentaje de arcilla indica unos suelos más sueltos lo que influye en que la compactación sea baja y permita el desplazamiento

de estos organismos dentro de las cavidades del suelo. Por otra parte, los valores de CO reflejan la disponibilidad de compuestos orgánicos para la descomposición por parte de estos organismos quienes los asimilan y los transforman en productos más solubles (Martínez et al., 2008).

La abundancia de *Brachystomella* y *Furculanurida* además de estar directamente relacionada con el periodo de lluvias, también lo está con la variable desarrollo (altura) de las plantaciones de 3 y 5 años, ya que éstas permiten que dichos organismos puedan encontrar condiciones de temperatura y humedad óptimas para su establecimiento, y disponibilidad de gran cantidad de alimentos como hifas de hongos y esporas, diferentes nichos disponibles que les permiten protegerse de las variaciones climáticas que se puedan presentar durante el día (Hopkin, 1997).

Dicyrtomina y *Entomobrya* fueron abundantes en las plantaciones de 3 y 5 años y aunque se presentaron en los 2 periodos climáticos fueron significativamente más abundantes en la época seca, mientras *Salina* y *Trogolaphysa* fueron más abundantes en el periodo de lluvias y en plantaciones recién establecidas (1 año) con suelos más compactados (1.6N). *Salina* y *Trogolaphysa* como individuos epiedáficos se ven afectados por los cambios en el hábitat causados por la remoción de la materia orgánica, el microclima o la reducción de la cantidad y calidad de la hojarasca, pero no por la compactación del suelo (Eaton et al., 2004); contrariamente a lo que sucede en las poblaciones euedáficas, donde el efecto de la compactación sí es representativo —puesto que al aumentar la densidad aparente del suelo, se reduce su espacio poroso y afecta, inclusive, a aquellos individuos de tamaño más pequeño (Larsen et al., 2004).

La mayor diversidad de colémbolos en las plantaciones de *A. mangium* puede ser atribuida al incremento en el contenido de carbono orgánico, elemento esencial para la actividad biológica de los organismos heterótrofos del suelo (Aguilera, 2000; Martínez et al., 2008). En las plantaciones más jóvenes se observó un mayor porcentaje de CO (94%) y N (7%) en el suelo atribuibles a la fertilización de la plantación y a la labranza; sin embargo, estos valores disminuyeron gradualmente en las plantaciones de 3 y 5 años; esto podría ser explicado por la mineralización de la materia orgánica presente en las plantaciones recién establecidas (compuestos orgánicos y sintéticos). Las sabanas, por el contrario, suelen presentar baja fertilidad, particularmente en el periodo seco, lo cual explica parcialmente la baja diversidad encontrada en las sabanas de estudio en este periodo (Cunha-Neto et al., 2012; Mboukou-Kimbatsa et al., 1998; Tsukamoto y Sabang, 2005).

El cambio de uso del suelo, de sabanas dedicadas a ganadería extensiva a forestación con *A. mangium* en esta

región de la Orinoquía Colombiana, favoreció la diversidad de géneros y abundancia de colémbolos epiedáfcos, por lo menos durante los primeros 5 años posteriores al establecimiento de las plantaciones.

Debido a la alta presencia de estados juveniles, al dimorfismo sexual que presentan algunos géneros de Sminthuridae y al reducido número de claves y trabajos de taxonomía de colémbolos en Colombia y en particular en la Orinoquía, los resultados fueron presentados en función de la diversidad de géneros y no de especies; sin embargo el trabajo realizado es un aporte valioso para conocer la diversidad de colémbolos en esta área geográfica y su respuesta frente al replazo de las sabanas existentes por forestaciones de *Acacia*, las cuales para este grupo taxonómico han presentado un impacto positivo sobre el mantenimiento de la diversidad e incluso un posible aporte favorable en la dinámica del suelo.

Dada la importancia de apoyar futuros estudios que propendan por un manejo forestal sostenible, se sugiere realizar estudios a nivel específico, así como implementar el uso de rasgos funcionales que incluyan entre otros el tipo de aparato bucal, lo que permitirá predecir el tipo de alimentación, y recursos usados por los colémbolos, para establecer los patrones ecológicos de estos organismos (Raymond-Léonard et al., 2019; Rousseau et al., 2019). Por otra parte, se hace necesario el uso de diferentes métodos o alternativas para evaluar las comunidades de colémbolos en el perfil vertical considerando los ambientes hemiedáfcico y euedáfcico. Asimismo, se sugiere evaluar plantaciones cercanas a la edad de corte que permitan tener un conocimiento más amplio de la ecología del grupo respecto a las plantaciones de *A. mangium*. A manera de preservar o mejorar la diversidad de colémbolos a nivel del paisaje, es recomendable intercalar áreas de sabana

entre las plantaciones para mantener el intercambio de especies, así como establecer corredores biológicos que se conecten también con los relictos de bosques de galería típicos de las sabanas de la Orinoquía y que sean evaluados de acuerdo a las recomendaciones anteriores. El manejo silvicultural debe procurar conservar el mantillo o biomasa sobre los suelos de la plantación, así como los residuos de las podas y entresacas que se realicen, de tal forma que permitan mantener condiciones de humedad y temperatura favorables para la conservación de la diversidad de artrópodos edáfcos en especial, en los periodos de sequía.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada con recursos del proyecto “Diversidad de artrópodos de suelo en plantaciones forestales comerciales de la Orinoquía” (Contrato Colciencias- Universidad Distrital 415 de 2013); la Cooperación Verde S.A. facilitó el acceso a las plantaciones y prestó apoyo logístico para el desarrollo de esta investigación. El Laboratorio de Sanidad Forestal (UDFJC) facilitó el uso del espacio, equipos y respaldo logístico para la identificación de los especímenes. El Laboratorio de suelos (UDFJC) y Miguel Eugenio Cadena facilitaron el préstamo de equipo, espacio y asesoría para la evaluación y registro de las propiedades edáfcas. Jaime Pinzón y Walter García apoyaron el análisis de comunidades implementado en “R”. Daniel Castro, Jeffer Vega, Alejandra Beltrán, Claudia García, Camila Bautista ayudaron en el trabajo de campo; Karen Rodríguez, John Díaz y Jessica Ruiz colaboraron en el procesamiento de laboratorio. También agradecemos a Ángela Parrado, Laurent Rousseau y Alexander García la revisión del manuscrito.

Apéndice. Lista de órdenes, familias y géneros de Collembola recolectados en septiembre de 2014 y marzo de 2015 en plantaciones forestales de *A. mangium* y sabanas de Puerto Gaitán (Meta-Colombia).

Orden	Familia	Géneros
Entomobryomorpha	Isotomidae	<i>Folsomides</i>
		<i>Isotoma</i>
		<i>Proisotoma</i>
	Cyphoderidae	<i>Cyphoderus</i>
		Entomobryidae
	<i>Dicranocentrus</i>	
	<i>Lepidocyrtus</i>	
	<i>Seira</i>	
	<i>Salina</i>	
	Paronellidae	<i>Trogolaphysa</i>

**Apéndice
Continuación**

Orden	Familia	Géneros
Poduromorpha	Brachystomellidae	<i>Brachystomella</i>
		<i>Rapoportella</i>
		<i>Neotropiella</i>
	Neanuridae	<i>Arlesia</i>
		<i>Furculanurida</i>
Symphypleona	Bourletiellidae	<i>Rastriopes</i>
	Collophoridae	<i>Deuterostminthurus</i>
		<i>Collophora</i>
	Dicyrtomidae	<i>Dicyrtomina</i>
		<i>Ptenotrix</i>
	Sminthuridae	<i>Sphyrotheca</i>
	Sminthurididae	<i>Denisiella</i>
<i>Sinnamerides</i>		
	<i>Sminthurides</i>	
	<i>Sphaeridia</i>	

Referencias

- Adejuyigbe, C. O., Tian, G. y Adeoye, G. O. (1999). Soil microarthropod populations under natural and planted fallows in southwestern Nigeria. *Agroforestry Systems*, 47, 263–272. <https://doi.org/10.1023/a:1006236001299>
- Aguilera, S. M. (2000). Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. *Simposio Proyecto Ley Protección de Suelo*, 14, 77–85.
- Arbea, J. I. y Blasco-Zumeta, J. (2001). Ecología de los colémbolos (Hexapoda, Collembola) en Los Monegros (Zaragoza, España). *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa*, 28, 35–48.
- Ávila, D. y Jaramillo, Y. (2009). *Composición de la clase Collembola en un bosque Alto Andino de la vereda Noruega Alta, Sylvania, Cundinamarca, Colombia (Tesis)*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. y Walker, S. (2015) Fitting linear mixed effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67, 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Bellinger, P. F., Christiansen, K. A. y Janssens, F. (2019). *Checklist of the Collembola of the World*. Disponible en: <http://www.collembola.org>
- Borcard, D., Gillet, F. y Legendre, P. (2018). *Numerical ecology with R*. Cham: Springer.
- Brockerhoff, E. G., Jactel, H., Parrotta, J. A., Quine, C. P. y Sayer, J. (2008). Plantation forests and biodiversity: oxymoron or opportunity? *Biodiversity and Conservation*, 17, 925–951. <https://doi.org/10.1007/s10531-008-9380-x>
- Brockerhoff, E. G., Jactel, H., Parrotta, J. A. y Ferraz, S. F. (2013). Role of eucalypt and other planted forests in biodiversity conservation and the provision of biodiversity-related ecosystem services. *Forest Ecology and Management*, 301, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.09.018>
- Cabrera, G. (2012). La macrofauna edáfica como indicador biológico del estado de conservación/perturbación del suelo. Resultados obtenidos en Cuba. *Pastos y Forrajes*, 35, 349–364.
- Camero, R. E., Díaz, J. E., Salinas, A., Téllez, L. y Agudelo, D. (2005). Estudio de la artropofauna asociada a suelos de dos tipos de ecosistemas en la cuenca del Río Cauca - Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 10, 35–44.
- Cassagne, N., Gers, C. y Gauquelin, T. (2003). Relationships between Collembola, soil chemistry and humus types in forest stands (France). *Biology and Fertility of Soils*, 37, 355–361. <https://doi.org/10.1007/s00374-003-0610-9>
- Chao, A., Gotelli, N. J., Hsieh, T. C., Sander, E. L., Ma, K. H., Colwell, R. K. et al. (2014). Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: a framework for sampling and estimation in species diversity studies. *Ecological Monographs*, 84, 45–67. <https://doi.org/10.1890/13-0133.1>
- Chao, A. y Jost, L. (2012). Coverage-based rarefaction and extrapolation: standardizing samples by completeness rather than size. *Ecology*, 93, 2533–2547. <https://doi.org/10.1890/11-1952.1>
- Christiansen, K. A., Greenslade, P., Deharveng, L., Pomorski, R. J. y Janssens, F. (2012). Checklist of the Collembola: key to the families of Collembola. Recuperado el 01 de octubre, 2019 de: <http://www.collembola.org/key/collemb.htm>
- CONIF (Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal) Ministerio del Medio Ambiente y Organización Internacional de Maderas Tropicales. (1998). *Guía para*

- plantaciones forestales comerciales ORINOQUIA. Serie de documentación No.38. Bogotá: CONIF.
- Cooperación verde S.A. (2013). *Informe actividades en lotes de plantaciones de A. mangium y preparación de suelos*. Informe técnico. Bogotá: Cooperación verde S.A.
- Cunha-Neto, F. V., Correia, M. E. F., Pereira, G. H. A., Pereira, M. G. y Leles, P. S. S. (2012). Soil fauna as an indicator of soil quality in forest stands, pasture and secondary forest. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36, 1407–1417. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832012000500004>
- De Cáceres, M. y Legendre, P. (2009). Associations between species and groups of sites: indices and statistical inference. *Ecology*, 90, 3566–3574. <https://doi.org/10.1890/08-1823.1>
- De Cáceres, M., Legendre, P. y Moretti, M. (2010). Improving indicator species analysis by combining groups of sites. *Oikos*, 119, 1674–1684.
- Díaz, M. y González, V. (2003). Catálogo de Collembola de Cuba. *Solenodon*, 3, 1–30.
- Dufrêne, M. y Legendre, P. (1997). Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, 67, 345–366. <https://doi.org/10.2307/2963459>
- Eaton, R. J., Barbercheck, M., Buford, M. y Smith, W. (2004). Effects of organic matter removal, soil compaction, and vegetation control on Collembolan populations. *Pedobiologia*, 48, 121–128. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2003.10.001>
- Flores, L. y Alcalá, J. (2010). *Manual de procedimientos analíticos*. Laboratorio de Física de suelos. Ciudad de México: Instituto de Geología, UNAM.
- FSC (Forest Stewardship Council). (2018). FSC International Standard, FSC Principles and criteria for forest stewardship. Disponible: <https://ic.fsc.org/es/what-is-fsc>
- Galindo, D. y Pabon, L. (1985). *Estudio morfosistemático de Collembola asociado a la materia orgánica de suelos Mor (Aoo)*. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ciencias Básicas, SCIB, Bogotá, Colombia.
- García-Suabita, W., Pinzón, J., Spence, J. R. y Florián, O. P. (2019). Epiedaphic ground beetle (Carabidae) diversity in ecosystems transformed by plantations of *Eucalyptus pellita* in the Orinoco Region of Colombia. *Neotropical Entomology*, 48, 1014–1029. <https://doi.org/10.1007/s13744-019-00700-w>
- Gómez-Anaya, J. A., Palacios-Vargas, J. G. y Castaño-Meneses, G. (2010). Abundancia de colémbolos (Hexapoda: Collembola) y parámetros edáficos de una selva baja caducifolia. *Revista Colombiana de Entomología*, 36, 96–105.
- Guillén, C., Soto-Adames, F. y Springer, M. (2006). Diversidad y abundancia de colémbolos edáficos en un bosque primario, un bosque secundario y un cafetal en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 30, 7–17.
- Hair, J.F., Anderson, R.E., Tatham, R.L. y Black, W. C. (1995). *Multivariate data analysis, 4th Ed.: with readings*. New Jersey: Prentice Hall.
- Herrera, N. (2009). *Plan prospectivo agropecuario Puerto Gaitán, Meta, Colombia, Sur América 2020*. Puerto Gaitán, Meta, Colombia: Ed. Meta.
- Hocking, R. (1976). A biometrics invited paper. The analysis and selection of variables in linear regression. *Biometrics*, 32, 1–49. <https://doi.org/10.2307/2529336>
- Hopkin, S. (1997). *Biology of the springtails (Insecta: Collembola)*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Hsieh, T. C., Ma, K. H. y Chao, A. (2016). iNEXT: an R package for rarefaction and extrapolation of species diversity (Hill numbers). *Methods in Ecology and Evolution*, 7, 1451–1456. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.12613>
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). (2004). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras departamento de Meta*. Bogotá: IGAC.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. Bogotá: IGAC/ DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística).
- Jiménez, F. (2009). *Plan de establecimiento, manejo y cosecha forestal de plantaciones productoras comerciales en el predio La Palestina, corregimiento de Planas, municipio de Puerto Gaitán, departamento del Meta*. Bogotá: Cooperación Verde S.A.
- Jost, L. (2006). Entropy and diversity. *Oikos*, 113, 363–375. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0030-1299.14714.x>
- Jost, L. (2007). Partitioning diversity into independent alpha and beta components. *Ecology*, 88, 2427–2439. <https://doi.org/10.1890/06-1736.1>
- Knapp, M. y Ruzicka, J. (2012). The effect of pitfall trap construction and preservative on catch size, species richness and species composition of ground beetles (Coleoptera: Carabidae). *European Journal of Entomology*, 109, 419–426. <https://doi.org/10.14411/eje.2012.054>
- Larsen, T., Schjøning, P. y Axelsen, J. (2004). The impact of soil compaction on euedaphic Collembola. *Applied Soil Ecology*, 26, 27–281. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2003.12.006>
- Legendre, P. y Gallagher, E. D. (2001). Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecologia*, 129, 271–280. <https://doi.org/10.1007/s004420100716>
- León-Gamboa, A. L., Ramos, C. y García, M. (2010). Efecto de plantaciones de pino en la artropofauna del suelo de un bosque Altoandino. *Revista de Biología Tropical*, 58, 1031–1048. <https://doi.org/10.15517/rbt.v58i2.5261>
- Martínez, E., Fuentes, J. P. y Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 8, 68–96. <https://doi.org/10.4067/s0718-27912008000100006>
- Mboukou-Kimbatsa, I. M. C., Bernhard-Reversat, F. y Loumeto, J. J. (1998). Change in soil macrofauna and vegetation when fast-growing trees are planted on savanna soils. *Forest Ecology and Management*, 110, 1–12. [https://doi.org/10.1016/s0378-1127\(98\)00273-4](https://doi.org/10.1016/s0378-1127(98)00273-4)
- Moreira, F., Huising, E. J. y Bignell, D. E. (2012). *Manual de biología de suelos tropicales. Muestreo y caracterización de la biodiversidad bajo suelo*. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología.
- Nieto, V. y Gasca, G. (2010). *Experiencias y avances en el manejo de Eucalyptus pellita F. Muell en la Orinoquia Colombiana*. Bogotá D.C.: Corporación Nacional de

- Investigación y Fomento Forestal - CONIF/ Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural- MADR/ Refocosta S.A.S. NTC 5403. (2013). Calidad de suelo. Determinación del carbono orgánico. ICONTEC, 17/07/2013.
- NTC 5349. (2016). Calidad de suelo. Determinación de las bases cambiables: método del acetato amonio 1m, pH 7,0. ICONTEC, 29/09/2016.
- NTC 5263. (2017). Calidad del suelo. Determinación de la acidez, aluminio e hidrogeno intercambiables. ICONTEC, 21/06/2017.
- NTC 5264. (2018). Calidad del suelo. Determinación del pH. ICONTEC, 17/10/2018.
- NTC 6299. (2018). Calidad del suelo. Determinación de la textura por Bouyoucos. ICONTEC, 21/11/2018.
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlenn, D. et al. (2019). Vegan: community ecology package. R package version 2.5-6.
- Ospina, C. (2004). Colémbolos asociados a cultivos de maíz y algodón en el Valle del Cauca, Colombia. En *Resúmenes XXXI Congreso Socolen: Sistemática y Taxonomía*. Del 28-30 de julio, 2004. Bogotá, Colombia.
- Ospina, C., Rodríguez, J. y Peck, D. C. (2009). Clave para la identificación de géneros de Collembola en agroecosistemas de Colombia. *Revista Colombiana de Entomología*, 35, 57–61.
- Palacios-Vargas, J. (1990). *Diagnosis y clave para determinar las familias de los Collembola de la región Neotropical. Manuales y guías para el estudio de microartrópodos, I*. Ciudad de México: Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Palacios-Vargas, J. G., Castaño-Meneses, G. y Gómez, J. (1998). Collembola from the canopy of a Mexican tropical deciduous forest. *The Pan-Pacific Entomologist*, 74, 47–54.
- Palacios-Vargas, J. G. y Castaño-Meneses, G. (2003). Seasonality and community composition of springtails in Mexican forests. En Y. Basset, V. Novotny, S. E. Miller y R. L. Kitching (Eds.), *Arthropods of tropical forests: spatio-temporal dynamics and resource use in the canopy* (pp. 159–169). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Palacios-Vargas, J. G. y Mejía-Recamier, B. E. (2007). *Técnicas de colecta, montaje y preservación de microartrópodos edáficos*. México D.F.: Facultad de Ciencias, UNAM.
- Palacios-Vargas, J. G. y Mejía-Recamier, B. E. (2008). Diversidad, abundancia y variación estacional de los colémbolos de necrotampas. En E. G. Estrada-Vanegas (Eds.), *Fauna de suelo I. Micro, meso y macrofauna* (pp. 94–106). Texcoco: Colegio de Postgraduados.
- Pellens, R. y Garay, I. (1999). Edaphic macroarthropod communities in fast-growing plantations of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maid (Myrtaceae) and *Acacia mangium* Wild (Leguminosae) in Brazil. *European Journal of Soil Biology*, 35, 77–89. [https://doi.org/10.1016/s1164-5563\(99\)00209-5](https://doi.org/10.1016/s1164-5563(99)00209-5)
- Peñaranda, R. (2005). *Colémbolos (Hexapoda: Collembola) de Colombia (Tesis de maestría)*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Raymond-Léonard, L. J., Gravel, D. y Handa, I. T. (2019). A novel set of traits to describe Collembola mouthparts: taking a bite out of the broad chewing mandible classification. *Soil Biology and Biochemistry*, 138, 107608. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107608>
- Rousseau, L., Venier, L., Aubin, I., Gendreau-Berthiaume, B., Moretti, M., Salmon, S. et al. (2019). Woody biomass removal in harvested boreal forest leads to a partial functional homogenization of soil mesofaunal communities relative to unharvested forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 133, 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.02.021>
- Roy, S. y Roy, M. (2006). Spatial distribution and seasonal abundance of soil mites and collembola in grassland and *Leucaena* plantation in a semi-arid region. *Tropical Ecology*, 47, 57–62.
- Ruiz, P. (2011). Llanos Orientales: foco de desarrollo forestal. *Revista M y M*, 72, 14–20.
- RStudio Team (2020). *RStudio: integrated development for R*. RStudio, PBC. Boston, MA. Disponible en: <http://www.rstudio.com/>
- Sabu, T. K. y Shiju, R. T. (2010). Efficacy of pitfall trapping, Winkler and Berlese extraction methods for measuring ground-dwelling arthropods in moist deciduous forests in the Western Ghats. *Journal of Insect Science*, 10, 98. <https://doi.org/10.1673/031.010.9801>
- Sayad, E., Hosseini, S., Hosseini, V. y Salehe-Shooshtari, M. (2012). Soil macrofauna in relation to soil and leaf litter properties in tree plantations. *Journal of Forest Science*, 58, 170–180. <https://doi.org/10.17221/58/2011-jfs>
- Socarrás, A. (2013). Mesofauna edáfica: indicador biológico de la calidad del suelo. *Pastos y Forrajes*, 36, 5–13.
- Soil Science Division Staff. (2017). *Soil survey manual*. En C. Ditzler, K. Scheffe y H. C. Monger (Eds.), USDA Handbook 18. Washington, D.C.: Government Printing Office.
- Soil Survey Staff. (2014). *Kellogg soil survey laboratory methods manual*. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5.0. R. Burt and Soil Survey Staff U.S. (Ed.), Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Spence, J. R. y Niemelä, J. K. (1994). Sampling carabid assemblages with pitfall traps: the madness and the method. *The Canadian Entomologist*, 126, 881–894. <https://doi.org/10.4039/ent126881-3>
- Tsukamoto, J. y Sabang, J. (2005). Soil macro-fauna in an *Acacia mangium* plantation in comparison to that in a primary mixed dipterocarp forest in the lowlands of Sarawak, Malaysia. *Pedobiologia*, 49, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2004.08.007>
- Wang, C., Strazanac, J. y Butler, L. (2001). A comparison of pitfall traps with bait traps for studying leaf litter ant communities. *Journal of Economic Entomology*, 94, 761–765. <https://doi.org/10.1603/0022-0493-94.3.761>
- Zuur, A., Ieno, E. N., Walker, N., Saveliev, A. A. y Smith, G. M. (2009). *Mixed effects models and extensions in ecology with R*. New York: Springer. https://doi.org/10.1111/j.1541-0420.2009.01315_4.x