MACROFAUNA EDÁFICA CON ÉNFASIS EN ISOPTERA EN TRES COBERTURAS DE SUELO EN LA ORINOQUÍA COLOMBIANA

Paola Andrea Valderrama Ardila

Código: 20181010031

Ingeniería Forestal

Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá D.C

2024

Macrofauna edáfica con énfasis en Isoptera en tres coberturas de suelo en la Orinoquía colombiana

Paola Andrea Valderrama Ardila

Código: 20181010031

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniera Forestal bajo la modalidad de investigación – innovación

Directora interna

Rocio del Pilar Cortés Ballen, Ph.D.

Directora externa

Beatriz H. Ramírez, Ph. D.

Ingeniería Forestal

Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá D.C

2024

Agradecimientos

Quiero agradecer principalmente a mi madre y a mi hermana, mujeres a quien admiro profundamente y quienes han sido mi mayor apoyo y motivación durante toda mi vida, gracias por estar siempre, esto es para ustedes.

Agradezco a la Profesora Patricia Pinzón, por su increíble labor como docente y por introducirme en este fascinante mundo de los insectos, infinitas gracias por su confianza, sus consejos y su acompañamiento durante todo este proceso.

Gracias a la Doctora Beatriz Ramírez, por la confianza depositada para la elaboración de esta tesis y su acompañamiento en la misma, gracias a la Asociación de Becarios del Casanare y a Frontera Energy Corp., por permitir la financiación de este proyecto como parte de sus compromisos ambientales del Bloque Corcel Noreste (LAM 4488).

Gracias a mis amigas Alejandra Romero, María Fernanda Garzón y María José Molina por su apoyo durante el trabajo en campo y sobre todo, por poder contar con tan maravillosa amistad y por confiar en mí cuando muchas veces dude de mí misma.

Gracias a la señora Libia y a Don Jorge quienes amablemente nos recibieron en su hogar y nos brindaron una atención inigualable, gracias a don José Joaquín Mahecha, al señor Carlos Roa y a don Albeiro Páez, quienes nos permitieron realizar los muestreos en sus predios.

A las demás personas que me apoyaron y me acompañaron en esta travesía por esta investigación y durante todo mi proceso académico, Gracias Totales.

Índice

RESUMEN **9**

ABSTRACT **10**

INTRODUCCIÓN **12**

OBJETIVOS **13**

Objetivo General 13

Objetivos Específicos 13

JUSTIFICACIÓN **13**

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN **15**

MARCO TEÓRICO **15**

METODOLOGÍA **20**

Área de estudio 20

Muestreo de macrofauna 21

Determinación taxonómica 23

Análisis de datos 24

RESULTADOS **26**

Macrofauna 26

Isoptera en el área de muestreo 36

DISCUSIÓN DE RESULTADOS **41**

Diversidad de órdenes de la macrofauna, diversidad funcional y densidad de termitas 42

CORRELACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO CON LAS DENSIDAD Y DIVERSIDAD DE MACROFAUNA Y TERMITAS 46

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 47

REFERENCIAS 49

ANEXOS 60

ANEXO 1. GRUPOS FUNCIONALES POR ORDEN 60

ANEXO 2. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELO POR MONOLITO 61

Lista de Figuras

Figura 1. Mapa de ubicación veredas Flor Amarillo y El Fical en Villanueva, Casanare. 21

Figura 2. Área de muestreo. (a) Bosque de Galería; (b) Cultivos de plátano; (c) Pastos. 21

Figura 3. Proceso de fase de campo. (a). Establecimiento de transecto; (b) extracción de monolito: (c) extracción de la macrofauna de los suelos; (d) Muestras de suelos. 23

Figura 4. Proceso en fase de laboratorio. (a) Alistamiento de materiales; (b) Separación de muestras; (c) Clasificación de muestras por morfotipo. 24

Figura 5. Grupos taxonómicos más abundantes por coberturas. (a) Orden Blattodea; (b) Orden Hymenoptera; (c) Orden Coleoptera; (d) Phylum Annelida. 27

Figura 6. Abundancia absoluta de ordenes por cobertura. 28

Figura 7. Curvas de acumulación, representatividad del muestreo por número de monolitos. ... 29

Figura 8. Abundancia absoluta de la macrofauna de acuerdo al grupo funcional y la cobertura. 29

Figura 9. Densidad/m2 de los órdenes de macrofauna más representativos. 30

Figura 10. Diversidad de la macrofauna en las tres coberturas muestreadas. (a) Riqueza de órdenes q=0; (b) Diversidad de especies raras q=1; (c) Diversidad de especies comunes q=2. 31

Figura 11. Ordenaciones de la macrofauna no restringidas para la cobertura de cultivos de plátano (azul) y pastos (verde) y una agrupación más amplia para bosques de galería (naranja) (a) El gráfico NMDS muestra el casco convexo para cada cobertura; (b) Variables correlacionadas significativamente pH; (c) El gráfico PCA que muestra el casco convexo para cada cobertura; (d) Las variables correlacionadas significativamente Arenas, Magnesio y pH. 33

Figura 12. Abundancia absoluta de grupos de ingenieros del suelo. 35

Figura 13. Número de morfoespecies de ingenieros del suelo por cobertura. 35

Figura 14. Disjunctitermes insularis (a): Vista lateral; (b): Válvula entérica abierta; (c): Mandíbula en vista dorsal. Fotografía: P.Pinzón..... 37

Figura 15. Especies del género Anoplotermes. (a). A. parvus; (b) A. banksi; (c) A. meridianus.Izq:Vista lateral; derecha superior: válvula entérica abierta; derecha inferior: mandíbulas en vista dorsal Fotografías: P. Pinzón. 37

Figura 16. Vista dorsal de soldado de Heterotermes tenuis. Fotografía: P.Pinzón..... 38

Figura 17. Curvas de acumulación para Isoptera. Representatividad del muestreo por número de individuos. 39

Figura 18. Abundancia absoluta de Isoptera de acuerdo al grupo funcional y la cobertura. 39

Figura 19. Densidad/m^2 de las especies de termitas más representativos..... 40

Figura 20. Número efectivo de especies de termitas en las tres coberturas muestreadas (a) Riqueza de órdenes q=0; (b) Diversidad de especies raras q=1; (c) Diversidad de especies comunes q=2..... 41

Lista de Tablas

Tabla 1. Abundancia absoluta (AA) y relativa (%) de macrofauna de acuerdo al tipo de cobertura. 26

Tabla 2. Órdenes indicadores bajo criterios de especificidad y fidelidad por cobertura. 31

Tabla 3. Valores de correlación (*p < 0,05) con los dos primeros ejes de ordenación NMDS y PCA. 33

Tabla 4. Abundancia absoluta (AA) y relativa (%) del orden Isoptera. 36

Resumen

La diversidad de la macrofauna del suelo es afectada por el cambio del uso del suelo provocando consecuencias a los diferentes servicios ecosistémicos que proveen, entre los que se encuentra la regulación hidrológica. Esta investigación tuvo como objetivo estimar y comparar la diversidad de órdenes de macrofauna y especies de termitas en tres coberturas contrastantes: bosques de galería, pastos limpios y cultivos de plátano (*Musa paradisiaca* L.), en el municipio de Villanueva, Casanare. Para la recolección de la macrofauna se tuvo en cuenta la metodología TSBF modificada, propuesta por Anderson e Ingram, (1993). Adicionalmente, se extrajeron muestras de suelo para caracterizar las propiedades fisicoquímicas. La macrofauna observada y las propiedades del suelo se correlacionaron por medio de un Análisis de Componentes Principales y de escalado de distancia no métrica (Non-Metric Distance Scalling-NMSD). Se obtuvieron 2.554 individuos en 499 muestras (4 filos, 6 clases, 20 órdenes y 169 morfotipos) siendo los órdenes Blattodea, Hymenoptera Coleoptera y el Phylum Annelida los de mayor abundancia. El número de ordenes efectivos fue 40% menos en pastos y 20% menor en cultivos, en comparación con los bosques de galería. La cobertura con mayor abundancia absoluta fueron los cultivos de plátano con 1.072 individuos, seguido de los bosques de galería con 941 individuos, y finalmente, la cobertura de pastos con 541 individuos. En cuanto a la diversidad de termitas predominó la especie humívora *Disjunctitermes insularis* Scheffrahn, 2017 (Isoptera: Apicotermitinae) se encontró en las tres coberturas, con menor abundancia en los pastos y puede considerarse una especie indicadora de calidad de sitio. A partir de un análisis de correspondencia simétrico se obtuvo que la composición de los taxones muestreados fue similar entre los cultivos de plátano y los pastos, mientras que los bosques de galería presentaron una composición más amplia. Asimismo, se destacaron los grupos taxonómicos Chilopoda y

Dermaptera en los bosques de galería, Lepidoptera en pastos y Blattodea y Diplopoda en Cultivos+Bosque de galería como órdenes y/o grupos indicadores. De manera general, de las 15 variables de suelos evaluadas, solamente se encontró una relación positiva con el pH del suelo la cual puede considerarse como factor importante para monitoreo y estrategias de manejo de la cobertura del suelo. Se discute sobre las implicaciones de estos hallazgos en la regulación hídrica del suelo.

Palabras clave: *Diversidad, Monolitos, Orinoquía, Servicios Ecosistémicos, Termitas, Variables Edáficas.*

Abstract

The biodiversity of soil macrofauna is affected by land use change causing consequences in the different ecosystem services they provide, including hydrological regulation. The objective of this research was to estimate and compare the diversity of macrofauna orders and termite species in three contrasting land covers: gallery forests, *clean* pastures and plantain (*Musa paradisiaca* L.) crops, in the municipality of Villanueva, Casanare. For the collection of macrofauna, the modified TSBF methodology proposed by Anderson and Ingram (1993) was used. Additionally, soil samples were extracted to characterize the physicochemical properties. The observed macrofauna and soil properties were correlated by means of Principal Component Analysis and Non-Metric Distance Scalling (NMSD). We obtained 2.554 individuals were obtained in 499 samples (4 phylum, 6 classes, 20 orders and 169 morphotypes) with the orders Blattodea, Hymenoptera Coleoptera and Phylum Annelida being the most abundant. The number of effective orders was 40% less in pastures and 20% less in crops, compared to gallery forests. The cover with the highest absolute abundance was banana crops with 1,072 individuals, followed by gallery forests with 941 individuals, and finally, pasture cover with 541 individuals. Regarding

termite diversity, the humivorous species *Disjunctitermes insularis* Scheffrahn, 2017 (Isoptera: Apicotermtinae) was predominant in the three coverages, with lower abundance in the pastures and can be considered an indicator species of site quality. From a symmetrical correspondence analysis, it was obtained that the composition of the sampled taxa was similar between banana crops and pastures, while gallery forests presented a broader composition. Likewise, the taxonomic groups Chilopoda and Dermaptera in gallery forests, Lepidoptera in clean pastures and Blattodea and Diplopoda in crops+Gallery forest were highlighted as orders and/or indicator groups. Overall, of the 15 soil variables evaluated, only a positive relationship was found with soil pH which can be considered as an important factor for monitoring and land cover management strategies. The implications of these findings for soil water regulation are discussed.

Keywords: *Diversity, Edaphic Variables, Monoliths, Ecosystem Services, Orinoco region, Termites.*

Introducción

La macrofauna edáfica tiene un papel importante en las funciones del suelo. La incorporación de la materia orgánica, y la capacidad de modificar algunas propiedades físicas y químicas de suelo respecto al ciclo de nutrientes, la porosidad y otros aspectos que favorecen a la regulación hídrica, son algunas de las funciones intermediadas por estos organismos, algunos de los cuales se denominan "ingenieros de ecosistemas" (Lavelle et al., 2006; Lavelle et al., 1997). Asimismo, la actividad de la macrofauna del suelo tiene impactos directos sobre el crecimiento y la calidad de una determinada cobertura (Sanabria et al., 2016). No obstante, estas actividades y la productividad del suelo pueden verse afectadas por actividades antrópicas y el cambio climático, lo que a su vez puede afectar la riqueza y la diversidad de la macrofauna (Decaëns et al., 2001).

Dentro de los organismos de la macrofauna, las termitas son organismos clave y consideradas "ingenieros del suelo" debido a que su actividad beneficia las propiedades físicas y químicas del suelo. Las termitas contribuyen a la descomposición de la materia orgánica, el reciclaje de nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico; los cuales favorecen las condiciones de estabilidad y fertilidad del suelo (Pinzón et al., 2012; Lavelle et al., 2006; Sanabria et al., 2014). Además, las termitas proveen refugio para otros organismos (Gallego-Ropero, 2013) y son fuente alimenticia de varias especies de vertebrados (Dufour, 1987).

Dentro de los organismos que componen la macrofauna del suelo. Se ha evidenciado que la diversidad y densidad de termitas es sensible a la intensificación del uso del suelo y por ello se consideran como bioindicadoras (Barros et al., 2002; Alves et al., 2011).

Las termitas son organismos clave en los suelos de la Orinoquia, en donde se ha estimado que su biomasa puede alcanzar hasta un 70% de la biomasa de macrofauna del suelo

(Decaëns et al., 1994, Lavelle et al., 2014, Sanabria et al., 2016). Por lo anterior, este estudio pretendió estimar y comparar la diversidad taxonómica de la macrofauna y la diversidad funcional y densidad de termitas en diferentes en tres tipos de cobertura de suelo y su relación con algunas propiedades del suelo en el área del proyecto Corcel, en Villanueva, Casanare.

Objetivos

Objetivo General

Estimar y comparar los cambios de la diversidad de órdenes de macrofauna y morfoespecie de termitas en tres coberturas vegetales en el área de Interés de Perforación Exploratoria Corcel Noreste (LAM4488) en Villanueva, Casanare.

Objetivos Específicos

Estimar y comparar la diversidad taxonómica de órdenes de macrofauna, y la diversidad funcional y la densidad de termitas en monolitos de la capa orgánica y la capa mineral en tres coberturas de suelo en el área de Interés de Perforación Exploratoria Corcel Noreste (LAM4488) en Villanueva, Casanare.

Correlacionar las propiedades del suelo con la densidad y la diversidad de macrofauna y diversidad funcional de las termitas en las tres coberturas.

Justificación

Colombia es un país megadiverso de acuerdo con las estimaciones de especies de aves y plantas (Rangel, 2015). Sin embargo, la diversidad de la macrofauna del suelo con funciones clave en la productividad primaria del suelo es un tema poco documentado (Eggleton et al., 1996). La Orinoquía Colombiana constituye aproximadamente el 6% de todas las sabanas tropicales del mundo, y en Colombia, posee alrededor de 17’000.000 de ha, las cuales ofrecen

una amplia gama de diversidad de hábitats considerándose como un área ecológicamente estratégica (Decaëns et al., 2002; Pinzón et al., 2015). La biodiversidad de artrópodos del suelo de la Orinoquia colombiana está amenazada por el creciente cambio de uso del suelo debido al impacto de actividades económicas como la minería y la agricultura. En cuanto a la macrofauna edáfica, es importante entender el papel ecosistémico que tienen estas y como su actividad ingenieril incide sobre la calidad del suelo y la regulación hidrológica de acuerdo su grado de degradación como por la ausencia de diversidad y riqueza (Decaëns et al., 2001).

Los estudios previos realizados en termitas en los Llanos orientales de Colombia han demostrado como la diversidad de termitas disminuye a medida que el suelo se encuentra más intervenido, especialmente en suelos donde se han llevado a cabo actividades de laboreo, aplicación de pesticidas, fertilizantes y otros químicos (Barros et al., 2002). Debido al potencial que tienen las termitas como plaga en zonas de cultivo y plantaciones, y los impactos económicos que pueden generar, los estudios de estas poblaciones se han centrado principalmente en estas áreas con termitas xilófagas (Pinzón et al., 2012). También se ha evidenciado que la mayor cantidad de estudios están dirigidos a termitas en los montículos dejan de lado la importancia y la relación que tiene este grupo en las propiedades del suelo, incluyendo la regulación hidrológica, y el impacto de las mismas poblaciones sobre otros organismos del suelo (Lavelle et al., 1997).

Particularmente, las termitas de la Orinoquia colombiana han sido poco estudiadas a pesar de que estos organismos pueden representar hasta un 70% de la biomasa de macrofauna edáfica (Decaëns et al., 1994; Sanabria et al., 2016). Los estudios que se han llevado a cabo sobre poblaciones de termitas en coberturas de bosque de galería y otras coberturas se han desarrollado de manera independiente, ya sea para evaluar diversidad, riqueza de las termitas o

generar un contraste con otros tipos de coberturas con cierto de grado de intervención. Por lo tanto, es importante contar con estudios que permitan establecer tanto la línea base de diversidad para el monitoreo de la conservación de la biodiversidad en dichos ecosistemas, asimismo, estos estudios permitirán entender la relación entre las poblaciones de termitas y su interacción con el ecosistema dando énfasis en los servicios ecosistémicos relacionadas con las coberturas del suelo, incluyendo la regulación hidrológica.

Pregunta de investigación

Teniendo en cuenta que la macrofauna edáfica en la Orinoquía colombiana tiene pocos estudios para la identificación de los grupos taxonómicos más abundantes y que la diversidad de las termitas están principalmente enfocadas hacia los grupos xilófagos, se plantean las siguientes preguntas de investigación:

¿Cómo cambia la diversidad taxonómica de órdenes de macrofauna, y la diversidad funcional y densidad de las poblaciones de termitas en tres coberturas del suelo?

¿Cuál es la relación de la macrofauna con las propiedades del suelo, incluyendo la regulación hidrológica en el área de Interés de Perforación Exploratoria Corcel Noreste (LAM4488) en Villanueva, Casanare?

Marco teórico

La macrofauna del suelo y su incidencia en la pedogénesis

La macrofauna edáfica hace referencia a los invertebrados que tiene un tamaño > 2 mm y que pasan su ciclo de vida o gran parte de el en el suelo (Huerta et al., 2011). Corresponde a organismos cuyo ciclo de vida se da principalmente en el suelo. Dentro de este grupo se encuentran: termitas (Blattodea, infraorden: Isoptera) hormigas (Hymenoptera), escarabajos y

cucarrones (Coleoptera), cochinillas de tierra (Isopoda) los milpiés (Diplopoda), arañas (Araneae) y algunas larvas de Coleoptera y Lepidoptera que tienen funciones que están asociadas a la transformación de la hojarasca (Moreira et al., 2012). La macrofauna edáfica tiene una labor de gran importancia en los procesos asociados al comportamiento del suelo. Tienen funciones en la regulación de poblaciones microbianas que son responsables en las dinámicas que hacen parte de la mineralización y humificación, lo cual está directamente relacionado con la descomposición de la materia orgánica y disponibilidad de nutrientes. Favorecen la formación de agregados que le brindan mayor estabilidad al suelo modificando la estructura. La presencia de organismos como termitas, lombrices y hormigas representan un indicador del estado de calidad del suelo debido a su desempeño en la estructuración, conformación física del perfil, y en los procesos de descomposición de la materia orgánica (Decaëns et al., 1994; Decaëns et al., 2001).

Las termitas y el cambio de uso del suelo

La diversidad de las termitas es un indicador de la degradación del suelo, ya que, a mayor grado de intervención, será menor la presencia de este grupo; lo cual se debe a su sensibilidad a la variabilidad en su hábitat natural (Sanabria et al., 2014; Decaëns et al., 2001; Decaëns et al., 2004; Pinzón et al., 2017)

Las termitas y el calentamiento global

Los efectos del calentamiento global tendrán impacto en la descomposición de madera muerta y por ende en el ciclo del carbono; considerando que el rango geográfico de ocurrencia se ampliará debido al aumento de temperatura (Zanne et al., 2022). Igualmente, la actividad de las termitas es afectada por la estacionalidad climática y particularmente, se espera que estas jueguen un papel importante en la mitigación de los efectos de las sequias en bosques tropicales,

sin embargo, se requiere de una mayor cantidad de estudios en todas las regiones geográficas que permitan comprobar dicha teoría (Ashton et al., 2019).

Las termitas y los servicios ecosistémicos

Las termitas influencian las características físicas y la actividad química en los suelos (Vendrame et al., 2009; Galvis et al., 1978; Jiménez & Decaëns, 2006; Lavelle et al., 1994; Lavelle, et al., 2006). Por su participación en procesos de bioturbación, consumo, y mineralización de material vegetal, las termitas son claves en la mejora de las propiedades fisicoquímicas de los suelos (Decaëns et al., 2008; Jiménez & Decaëns, 2006) por ende, proveen importantes servicios ecosistémicos (Decaëns, et al., 2006; Jouquet et al., 2011). Las galerías de forrajeo y los termiteros epigeos, hipogeos y subterráneos construidos por las termitas, proveen refugio y recursos a otros organismos de la meso y microfauna (Gallego-Ropero, 2013); asimismo, las termitas son un componente fundamental en la dieta de algunos vertebrados (Sandoval-Gómez et al., 2012).

Las termitas hacen parte del grupo de *ingenieros del suelo* debido a los servicios ecosistémicos que pueden brindar, los cuales van desde descomponer la materia orgánica, favorecer la porosidad, y por ende la infiltración de agua, bioturbación, hasta la creación de biogénicos (Sanabria et al., 2016; Calderón-Medina et al., 2018), factores que a su vez favorecen el movimiento del agua en la estructura vertical permitiendo la regulación hídrica dentro de un ecosistema y evitando la erosión (Sánchez-Núñez et al., 2015) Asimismo, las termitas tienen asociaciones positivas con algunas propiedades del suelo según su tipo de uso (Sanabria et al., 2016), algunas especies como *Coptotermes* sp. *Nasutitermes* sp. pueden generar impactos positivos si se tiene en cuenta las modificaciones de suelo a nivel morfológico, físico y químico (Galvis et al., 1978) en las que se considera importante tener en cuenta factores como la textura,

porosidad, densidad aparente, pH, contenido de carbono, capacidad de intercambio catiónico, porcentaje de saturación de aluminio y macronutrientes del suelo y como estos se pueden ver influenciados por las actividades de las termitas en una determinada cobertura de suelo (Sanabria et al., 2016; Galvis et al., 1978). Así las termitas desde el punto de vista químico favorecen la disponibilidad de nutrientes y desde el físico pueden contribuir a la regulación hidrológica (Turner, 2019).

Es importante considerar que las termitas también están catalogadas como organismos plaga, actividad que es considerada un diservicio, debido a los efectos nocivos que pueden provocar en cultivos agrícolas y forestales en los que se contemplan pérdidas económicas significativas. (Abadía et al., 2013, Lores & Pinzón 2011; Junqueira & Florencio, 2017).

Grupos funcionales de termitas

Los hábitos alimenticos de las termitas se asimilan como grupos funcionales y aunque se reconocen varias clasificaciones: se dividen en humívoros (se alimentan del suelo y se encuentran en el mismo suelo o en montículos epigeos), intermedios (que se alimentan de suelo que se encuentra debajo de madera en descomposición), xilófagos (que se alimentan de madera y hacen galerías en hojarasca leñosa, su hábitat lo constituyen principalmente nidos arbóreos) y consumidores de hojarasca (se alimentan de la hojarasca y hojarasca leñosa) (Eggleton et al., 1995; Eggleton et al., 1996).

Las termitas unos de los organismos dominantes de la macrofauna en la Orinoquia

Las termitas son un grupo de gran importancia en los ecosistemas tropicales debido a la dominancia que suelen ocupar en estudios de macrofauna (Galvis, et al., 1978; Lavelle et al., 2014; Decaëns et al., 2003) principalmente en bosques tropicales de zonas bajas, pastizales y sabanas en donde se han registrado una mayor riqueza y diversidad (Constantino, 2002). En la

Orinoquía son considerados los organismos con mayor abundancia en la macrofauna edáfica en los ecosistemas naturales, seminaturales e intervenidos de los Llanos Orientales, en donde pueden alcanzar hasta alrededor del 70% de la biomasa (Decaëns et al., 1994).

Las poblaciones de termitas pueden variar de acuerdo al tipo de suelo, pero no por el tipo de región cuando estás se encuentran distribuidas continuamente (Sanabria et al., 2016). Las investigaciones previas acerca de la diversidad de las termitas se han llevado a cabo principalmente en sabanas, sin embargo, también se les considera un grupo importante en los bosques de galería (Jiménez et al., 2006, Pinzón et al., 2017). Para su estudio se consideran metodologías estándar de monolito sugerida por la TSBF (Anderson e Ingram, 1993) que consiste en la excavación y extracción de monolitos a lo largo de una línea de transecto dispuesta al azar, esta metodología permitirá obtener un número de muestras de manera mucho más sencilla tanto para la macrofauna objeto de estudio y las propiedades del suelo a considerar. Esta metodología ha sido aplicada por Sanabria et al., 2016, Lavelle et al., 2014 y Decaëns et al., 2001 en las cuales se ha obtenido resultados óptimos que garantizan la efectividad del método.

Los Llanos Orientales, pese a ser un área poco estudiada como ya se mencionó, cuenta con diferentes coberturas que actualmente se están viendo afectadas debido al aumento de la ampliación de frontera ganadera y agrícola. Por lo cual, sabanas y bosques primarios (incluidos los bosques de galería) se están transformado rápidamente a coberturas seminaturalizadas que están disminuyendo las poblaciones insectiles del suelo, debido a que estos suelos poseen características de ser medianamente compactos y ácidos, por ende, requiere de actividades de laboreo y aplicación de químicos los cuales afectan las poblaciones de macrofauna edáfica (Jiménez et al., 2006; Decaëns et al., 1994).

El presente trabajo de investigación también contribuirá en el trabajo de tesis de maestría titulado “Descomposición de madera muerta por termitas xilófagas en bosques de galería de la Orinoquía colombiana” que se desarrollará en la MMUCB en la Universidad Distrital con el soporte técnico de la Asociación de Becarios del Casanare (abC Colombia) y la financiación de Frontera Energy Corp.

Metodología

Área de estudio

El desarrollo del muestreo se llevó a cabo en el área de Interés de Perforación Exploratoria Corcel Noreste (LAM4488) en el municipio de Villanueva, Casanare (4°36′31″N, 72°55′44″O), con una extensión de 852 km2, el muestreo se realizó en las veredas de Flor Amarillo y El Fical. En un rango altitudinal entre 179 y 204 msnm. La temperatura promedio es de 25 °C, siendo los meses de enero a marzo los más calurosos, la temporada de lluvias se presenta a partir del mes de abril. Siendo un municipio con clima cálido propio de un bosque húmedo tropical (Refocosta, 2023).

El municipio limita al norte con el municipio de Sabanalarga, al sur y occidente con el departamento del Meta, donde los ríos Upía y Meta son sus límites naturales, limita al oriente con los municipios de Monterrey y Tauramena, donde el río Túa es su límite natural (Agencia Nacional de Infraestructura, s.f)

En este municipio se seleccionaron tres coberturas de suelos asociadas a Bosques de Galería (Figura 2a) Cultivos de Plátano (*Musa paradisiaca* L.) (Figura 2b) y Pastos de *Brachiaria* sp. (Figura 2c), en total, se seleccionaron cuatro predios que tenían dicha cobertura requerida correspondientes a Rincón Hondo (RH), Puente de Oro (PdO), San José (SJ) y Los Acacios (LA) los cuales se pueden observar en la figura 1.

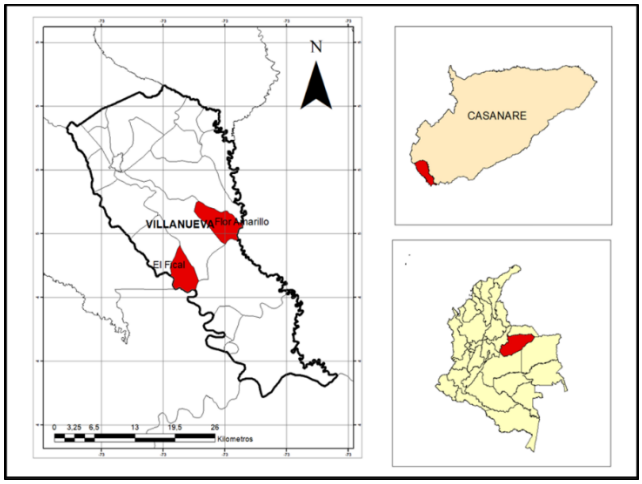


Figura 1. Mapa de ubicación veredas Flor Amarillo y El Fical en Villanueva, Casanare.



Figura 2. Área de muestreo. (a) Bosque de Galería; (b) Cultivos de plátano; (c) Pastos.

Muestreo de macrofauna

La macrofauna edáfica se muestreó utilizando el método estándar del monolito propuesto por la TSBF (Anderson e Ingram, 1993) y modificado por Sanabria et al., (2016). En cada predio y su respectiva cobertura se estableció un transecto de 100 m ubicado al azar (figura 3a), donde, teniendo en cuenta las condiciones del terreno este fue continuo o discontinuo. Cada transecto fue dividido en cinco subtransectos con un distanciamiento de 20 m para la extracción de cinco monolitos para cada cobertura. Cada monolito contó con una dimensión de 25 x 25 x 10 cm de

profundidad. Estos monolitos inicialmente fueron clasificados en tres estratos: A: Hojarasca, B: 0-10 cm y C: 10-20 cm, no obstante, al realizar el primer muestreo en los bosques de galería y su respectiva extracción de la macrofauna en el estrato C, no se evidenció la presencia de ningún espécimen. Se debe aclarar que el muestreo se realizó durante la época húmeda, por lo tanto y según Cabrera-Dávila, (2019) el no encontrar organismos en los estratos más profundos es normal, ya que se ha evidenciado que en épocas lluviosas la macrofauna se suele concentrar en las capas superiores, lo anterior permitió descartar el tercer estrato y tener un enfoque principalmente hacia la hojarasca y el estrato de 0-10 cm.

Se extrajeron un total de 45 monolitos, 15 por cobertura de estudio: (figura 3b). En cada monolito se separó toda la macrofauna presente y se preservó en viales, tubos falcón y frascos de muestras con su respectiva identificación y etiquetas y se almacenaron en etanol al 96% en una nevera portátil para evitar su degradación durante el regreso hasta el Laboratorio de Sanidad Forestal de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en Bogotá para su separación y clasificación (Figura 3c). Respecto a las muestras de suelo, se tomaron un total de 45 (15 muestras por cada cobertura de bosque de galería, cultivos de plátanos y pastos) las cuales se almacenaron en bolsas ziploc con su respectiva etiqueta y formatos diligenciados, (figura 3d) estas fueron enviadas por medio de correspondencia hasta el Laboratorio Nacional de Suelos del IGAC, ubicado en Bogotá para su respectivo análisis, cuyos resultados permitirán establecer la relación con la macrofauna recolectada.



Figura 3. Proceso de fase de campo. (a). Establecimiento de transecto; (b) extracción de monolito: (c) extracción de la macrofauna de los suelos; (d) Muestras de suelos.

Determinación taxonómica

La determinación taxonómica de las muestras se adelantó en el laboratorio de Sanidad Forestal de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, para ello, se hizo la observación mediante un estereoscopio Carl Zeiss Stemi 305, agujas entomológicas, y el uso de pinzas blandas de punta fina, viales, criocajas, gel y etanol al 96 % (figura 4a). Inicialmente las muestras fueron separadas por morfotipos (figura 4b) contadas e identificadas teniendo en cuenta el filo, clase y orden para los especímenes de macrofauna en general; cabe aclarar que los especímenes de lombrices, gusanos planos, nemátodos y las clases Diplopoda y Chilopoda no se lograron identificar hasta orden debido a que se requieren conocimientos mucho más especializados para su identificación.

Las muestras de Isoptera se determinaron al nivel de género y especie con ayuda de claves especializadas (Constantino 2002, Rocha et al., 2012, Carrijo et al., 2023), y la

comparación con especímenes pertenecientes a la Colección Entomológica Forestal -CEFUD. Para la determinación taxonómica de las termitas de la subfmilia Apicotermitinae se hizo la disección del aparato digestivo de las obreras y la extracción de la válvula entérica (VE) asimismo, se realizó el montaje y observación a 40X en un microscopio Stemi 2000c con lentes apocromáticos. Las VE fueron fotografiadas con apoyo del software ZEN (figura 4c).



Figura 4. Proceso en fase de laboratorio. (a) Alistamiento de materiales; (b) Separación de muestras; (c) Clasificación de muestras por morfotipo.

Análisis de datos

Los datos fueron recopilados en listados en el software Microsoft Excel 2019, a partir de los cuales se realizaron tablas dinámicas con el fin de obtener la clasificación por grupos taxonómicos, estimar la abundancia absoluta y relativa y hacer la clasificación por grupos tróficos.

Para validar la representatividad del muestreo se realizaron curvas de rarefacción y extrapolación con base en el número de unidades muestréales y el número de individuos para lo cual se tuvo en cuenta la riqueza presente en las tres coberturas, asimismo, para estimar y

comparar la diversidad Alfa entre las coberturas muestreadas se realizó un análisis de diversidad verdadera teniendo en cuenta los números efectivos de especies, esta estimación permitió analizar la diversidad en términos de riqueza (q=0), el inverso de diversidad de Shannon (q=1) y el inverso de la diversidad de Simpson (q=2) bajo un intervalo de confianza del 95%. para ello, se requirió de las librerías *Vegan* y *iNEXT* disponibles en el software estadístico Rstudio (Hsieh y Chao 2016).

Se estimó la densidad de las termitas para lo cual se extrapoló a m^2 teniendo en cuenta la ecuación 1.

$$Densidad\ (m^2) = Abundancia\ de\ la\ muestra * n \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

n: Número de monolitos de un área determinada que caben en un m^2

Para estimar el número de monolitos *n* primero se debe obtener el área de monolito donde tuvo en cuenta la ecuación 2, para lo cual se tuvieron en cuenta las dimensiones del mismo:

$$Área\ del\ monolito = 0.25\ m * 0.25\ m = 0 - 0625\ m^2 \text{ (Ecuación 2)}$$

Remplanzando los valores del área en la ecuación 3 se tiene como resultado en valor de *n*

$$n = \frac{1m2}{0.0625\ m2} = 16 \text{ (Ecuación 3)}$$

Para evaluar la afinidad de los órdenes con las coberturas que fueron objeto estudio, se realizó un análisis de ordenes indicadores teniendo en cuenta los aspectos de fidelidad y especificidad establecidos por Dufrêne y Legendre (1997) a partir de la instalación de la librería *indicspecies* en el software Rstudio (De Cáceres et al., 2022).

Finalmente, para explicar la abundancia de la macrofauna en función de las variables edáficas se realizaron dos análisis exploratorios de ordenación que correspondieron a un Escalado Multidimensional No Métrico (NMDS) y el Análisis de Componentes Principales

(PCA) mediante del uso de las librerías *Vegan* y *envfit* (Oksanen et al., 2013) en el software Rstudio donde se incluyó la única variable significativa que en este caso correspondió a pH.

Resultados

Se presenta el análisis de diversidad y la comparación entre coberturas de bosque de galería, cultivo de plátanos y pastos en la época húmeda en 45 monolitos de suelo en el área de Interés de Perforación Exploratoria Corcel Noreste (LAM4488) en Villanueva, Casanare, en las veredas Flor Amarillo y El Fical.

Macrofauna

Se recolectaron un total de 499 muestras donde se registraron 2.554 individuos correspondientes a 4 filos, 9 clases y 20 órdenes clasificados en 169 morfoespecies. El 12,6% de los grupos registrados correspondieron a la hojarasca, mientras que el 87,4% a la capa mineral. En la tabla 1 se especifican los órdenes y las morfoespecies determinadas de acuerdo al tipo de cobertura muestreada, se evidenció que los órdenes Blattodea (Figura 5a), Hymenoptera (Figura 5b), Coleoptera (Figura 5c) y el phylum Annelida (Figura 5d) fueron los grupos con mayor abundancia, representando el 37,6 %, 27,0%, 14,4 % y 13,4% del muestreo total respectivamente. Para el orden Hymenoptera el 100% de los individuos encontrados correspondieron a la familia Formicidae mientras que para el orden Coleoptera el 27,8% de los individuos fueron inmaduros en estado de larvas y el 72,2% en estado adulto.

Tabla 1. Abundancia absoluta (AA) y relativa (%) de macrofauna de acuerdo al tipo de cobertura.

Grupo taxonómico	Morfoespecies	Bosque de Galería		Cultivos		Pastos		Total
		AA	%	AA	%	AA	%	
Blattodea	16	479	50.9	354	33.0	129	23.8	962
Annelida	3	174	18.5	133	12.4	39	7.2	346
Hymenoptera	29	119	12.6	367	34.2	204	37.7	690
Coleoptera	52	87	9.2	148	13.8	133	24.6	368

Diplopoda	8	15	1.6	28	2.6	1	0.2	44
Araneae	11	12	1.3	2	0.2	2	0.4	16
Hemiptera	17	11	1.2	21	2.0	13	2.4	45
Chilopoda	4	10	1.1	3	0.3	0	0.0	13
Diptera	9	10	1.1	2	0.2	4	0.7	16
Dermaptera	1	6	0.6	0	0.0	0	0.0	6
Isopoda	1	6	0.6	7	0.7	0	0.0	13
Ixodida	1	3	0.3	0	0.0	0	0.0	3
Diplura	2	2	0.2	3	0.3	0	0.0	5
Lepidoptera	6	2	0.2	1	0.1	8	1.5	11
Arthropoda	3	1	0.1	2	0.2	0	0.0	3
Nematoda	1	1	0.1	0	0.0	5	0.9	6
Opiliones	1	1	0.1	0	0.0	0	0.0	1
Platyhelminthes	1	1	0.1	0	0.0	0	0.0	1
Pseudoscorpiones	1	1	0.1	0	0.0	0	0.0	1
Orthoptera	2	0	0.0	1	0.1	3	0.6	4
Total		941		1072		541		**2554**

Nota: BG: ni: Número de individuos; ar: Abundancia relativa



Figura 5. Grupos taxonómicos más abundantes por coberturas. (a) Orden Blattodea; (b) Orden Hymenoptera; (c) Orden Coleoptera; (d) Phylum Annelida.

En los bosques de galería se observó el mayor número de órdenes y de individuos especialmente del orden Blattodea (479 individuos) y del phylum Annelida (174 individuos), seguido de los cultivos de plátano con alta abundancia asociados al orden Hymenoptera y Coleoptera con 367 y 148 individuos respectivamente, mientras que los pastos presentaron el

menor número de individuos por orden (figura 6). En cuanto a la riqueza por nivel de orden, en el bosque de galería se encontraron 19 órdenes, en los cultivos de plátanos 14 y en los pastos por 12 órdenes.

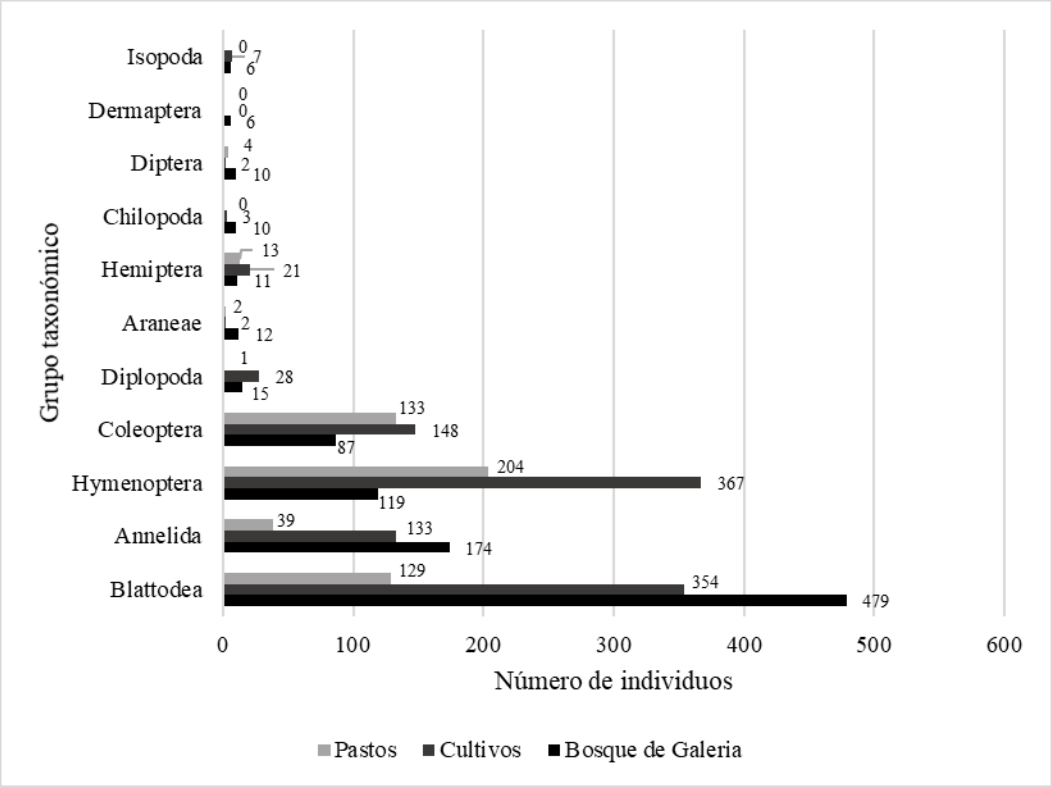


Figura 6. Abundancia absoluta de ordenes por cobertura.

La representatividad del muestreo se validó a través de las curvas de acumulación por número de monolitos (Figura 7). Se evidenció que el muestreo con 15 monolitos por cobertura sí es suficiente para representar la riqueza esperada de macrofauna, ya que se observó que las curvas extrapoladas son asintóticas y con tendencia a la estabilización llegando casi al 100%.

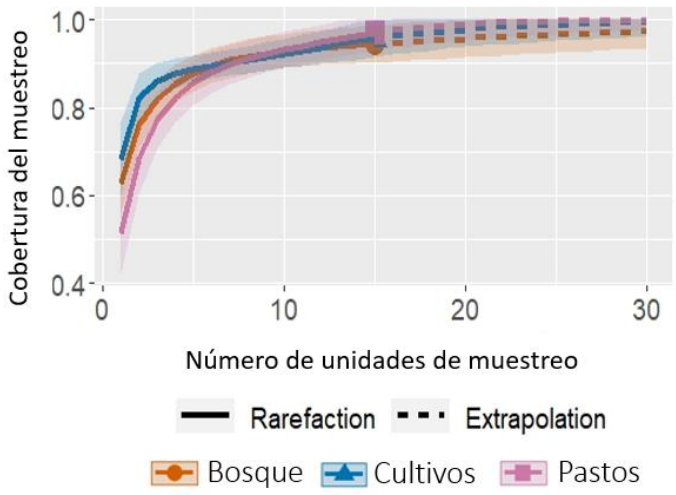


Figura 7. Curvas de acumulación, representatividad del muestreo por número de monolitos.

Respecto a la diversidad funcional de la macrofauna, el grupo de detritívoros presentó el mayor número de individuos (Figura 8), en estos se destacaron los "ingenieros del ecosistema" principalmente los órdenes Hymenoptera y Blattodea y el phylum Annelida que fueron los grupos más abundantes representando el 78,2% en todo el muestreo. Asimismo, el grupo de omnívoros tuvo una representatividad de 19,8% en las tres coberturas. La clasificación por grupo funcional para los órdenes según Brown et al., (2001) y los grupos tróficos de las termitas propuestos por Donovan et al., (2002) principalmente xilófagos, humivoros ("*soil feeders*" y descomponedores de hojarasca (Anexo 1).

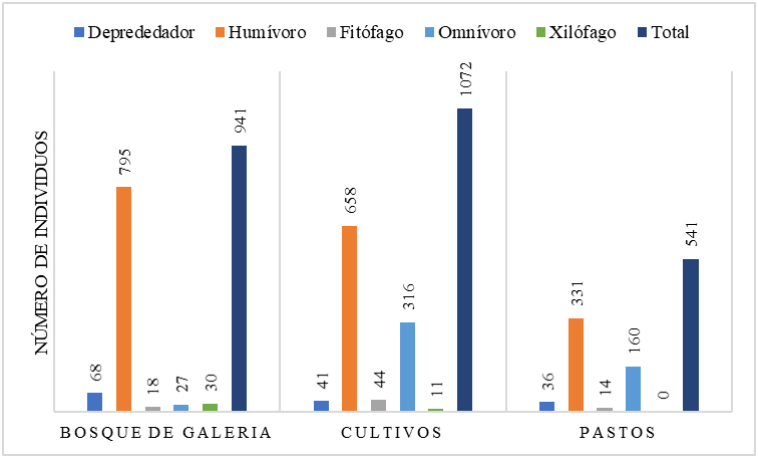


Figura 8. Abundancia absoluta de la macrofauna de acuerdo al grupo funcional y la cobertura.

Los grupos con mayor densidad (número de individuos/m^2) fueron el phylum Annelida y los órdenes Blattodea, Hymenoptera y Coleoptera. El orden Blattodea y el phylum Annelida fueron los grupos con mayor densidad en la cobertura de bosques de galería, mientras que los órdenes Hymenoptera y Coleoptera tuvieron mayor densidad en la cobertura de cultivos de plátano (Figura 9). Los humívoros representaron 31,1% en bosques de galería, 25,8% en cultivos y 13% en pastos; mientras los xilófagos representaron un 1,17% en bosques de galería y 0,43% en cultivos.

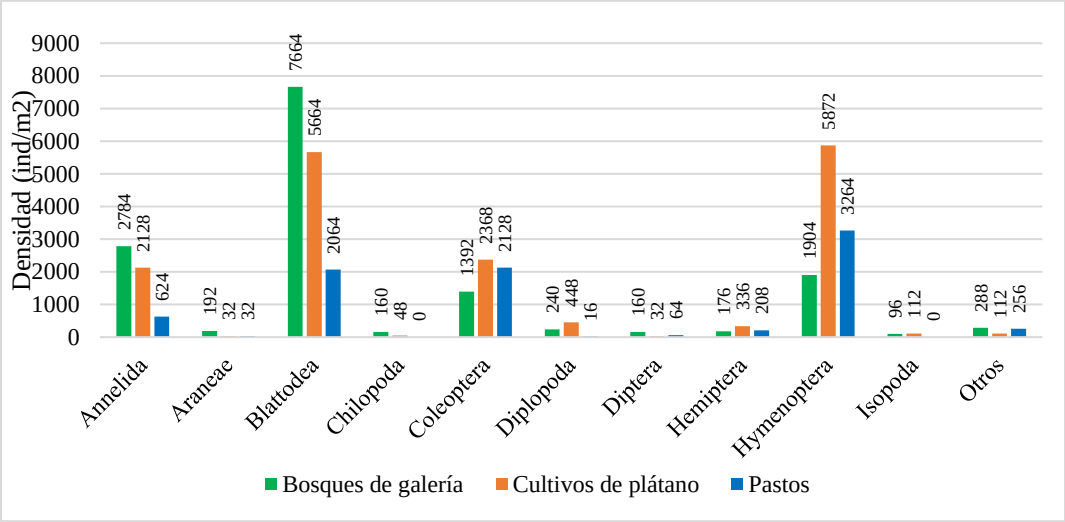


Figura 9. Densidad/m2 de los órdenes de macrofauna más representativos.

Los bosques de galería presentaron el mayor número efectivo de ordenes (q0), teniendo en cuenta un intervalo de confianza del 95% (Figura 10a) seguido de los cultivos de plátano y finalmente los pastos. En cuanto al número efectivo de órdenes raros (*q=1*) (Figura 10b) no se evidenciaron diferencias significativas entre las coberturas. Finalmente, los pastos y cultivos presentaron un mayor número efectivo de órdenes que los bosques de galería cuando se toma en cuenta el efecto de la abundancia (*q=2*) (Figura 10c).

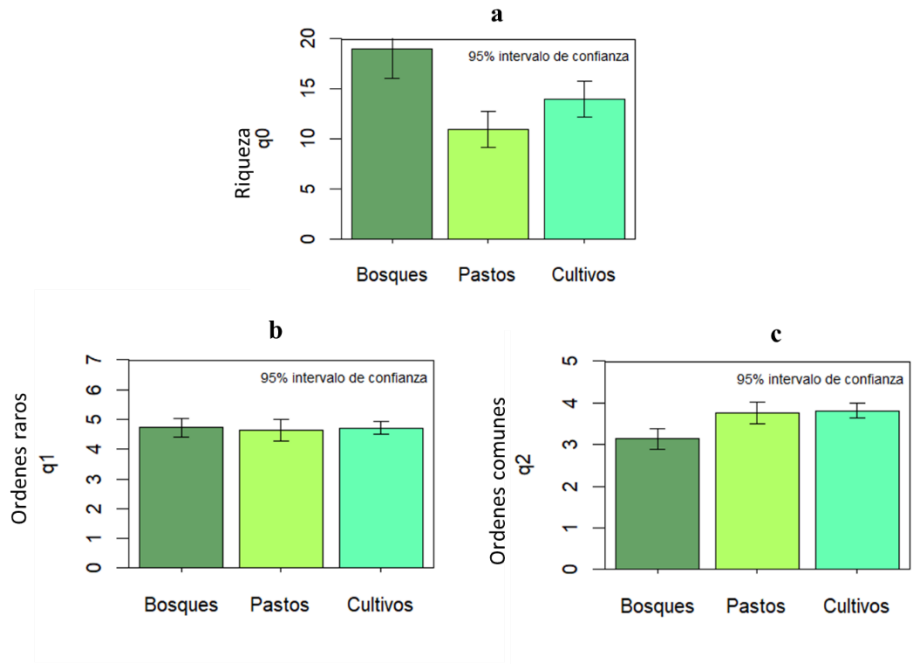


Figura 10. Diversidad de la macrofauna en las tres coberturas muestreadas expresado en número efectivo de órdenes/Especies (eje Y). (a) Riqueza de órdenes q=0; (b) Diversidad de especies raras q=1; (c) Diversidad de especies comunes q=2.

Los órdenes indicadores, a partir de los índices de fidelidad y especificidad, determinaron que en la cobertura de bosque de galería, los órdenes más afines fueron Chilopoda y Dermaptera, para la cobertura de pastos el orden indicador correspondió a Lepidoptera y finalmente, en los cultivos de plátano y en los bosques de galería indicaron que los grupos más afines fueron el orden Blattodea y la clase Diplopoda (Tabla 2).

Tabla 2. Órdenes indicadores bajo criterios de especificidad y fidelidad por cobertura.

Cobertura	Orden	A	B	Stat	Probabilidad	Nivel de significancia (0.05)
Bosques de galería	Chilopoda	0.7692	0.4667	0.599	0.05	**
	Dermaptera	1	0.2667	0.516	0.045	*
Pastos	Lepidoptera	0.7273	0.4	0.539	0.045	*

Cultivos + Bosques de galería	Blattodea	0.8659	0.7667	0.815	0.01	**
	Diplopoda	0.9763	0.5667	0.744	0.01	**

Nota: A = especificidad; B = fidelidad; * = P < 0.05; ** = P < 0.01; *** = P < 0.001; ns = no significativo.

Macrofauna edáfica y su relación con las variables del suelo

La macrofauna se diferenció de manera significativa entre coberturas (p=0,002) (Figura 11). La macrofauna de los bosques de galería fue más diversa con un 95% de todos los órdenes presentes, mientras que los cultivos de plátano tuvieron un 80% y los pastos un 55%. Asimismo, El PCA evidenció el mismo patrón similar descrito para las coberturas del NMSD donde los centroides de pastos y cultivos de plátano tienen una similitud en su composición diferentes a los bosques de galería (Figura 11c). El valor de stress del NMDS para la macrofauna fue de 0,167 (ajuste no métrico R^2: 0,972 y ajuste lineal R^2:0,866). Los valores de estrés se aproximaron a 0,2, lo que sugiere vínculos débiles; por tanto, sus ordenaciones deben interpretarse con caución (Figura 11a). Se observó además que hay diferencia significativa en la composición de la cobertura de bosques de galería ya que se evidenció que el centroide no se superpone con las coberturas de pastos y cultivos de plátano las cuales si se superponen e indican que la composición es similar.

De las 15 variables de suelos (Figura 11) incluidas en el análisis (Anexo 2), el pH fue la variable más significativa (R^2=0,1413; p=0,03896) (Figura 11b, tabla 3), para explicar la densidad de la macrofauna observada en las tres coberturas de suelo. Sin embargo, los puntos que se encuentran en la parte inferior son afines un pH menor (ácidos) y los órdenes que se agrupan en la parte superior serán afines a un pH mayor (básicos) no obstante, no se observaron afinidades fuertes, ya que los puntos están separados de la fecha, lo que indica que el pH es importante pero no una variable determinante.

En adición al pH, el contenido de arenas, magnesio también contribuyeron a explicar la densidad/m^2 de órdenes (Figura 11d) (Tabla 3). En la cobertura de bosques de galería se presentaron los contenidos más altos de arena, mientras que los cultivos de plátano y los pastos se observaron los valores más altos de Magnesio y pH.

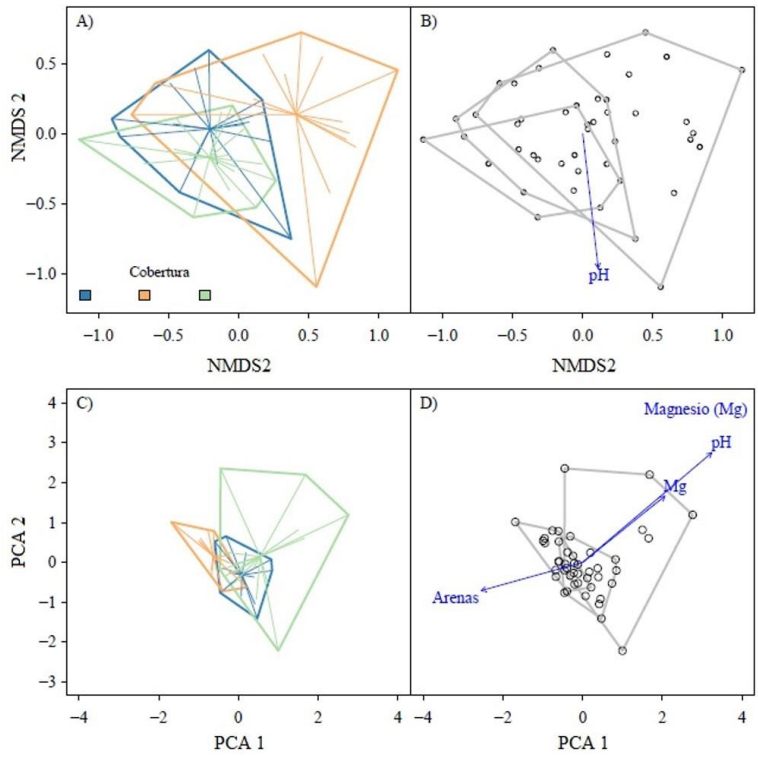


Figura 11. Ordenaciones de la macrofauna no restringidas para la cobertura de cultivos de plátano (azul) y pastos (verde) y una agrupación más amplia para bosques de galería (naranja) (a) El gráfico NMDS muestra el casco convexo para cada cobertura; (b) Variables correlacionadas significativamente pH; (c) El gráfico PCA que muestra el casco convexo para cada cobertura; (d) Las variables correlacionadas significativamente Arenas, Magnesio y pH.

*Tabla 3. Valores de correlación (*p < 0,05) con los dos primeros ejes de ordenación NMDS y PCA.*

	Correlación NMDS	**Correlación PCA**
Arena	R^2=0,0593 ; p=0,29970	R^2=0,1459 ; p=0,035 *
Limos	R^2=0,0592 ; p=0,28671	R^2=0,1308 ; p=0,057 .
Arcillas	R^2=0,0343 ; p=0,48651	R^2=0,1134 ; p=0,078 .
pH	R^2=0,1413 ; p=0,03896 *	R^2=0,3788 ; p=0,001 ***
Carbono orgánico	R^2=0,0716 ; p=0,21878	R^2=0,0200 ; p=0,592
Materia orgánica	R^2=0,0125 ; p=0,77123	R^2=0,0673 ; p=0,226

Nitrógeno	R^2=0,0505 ; p=0,39560	R^2=0,0082 ; p=0,695
Relación C/N	R^2=0,0047 ; p=0,89411	R^2=0,0099 ; p=0,695
Fósforo	R^2=0,0124 ; p=0,77722	R^{22}=0,0000 ; p=1,000
CIC	R^2=0,0987 ; p=0,13387	R^2=0,1151 ; p=0,078
Calcio	R^2=0,0766 ; p=0,20180	R^2=0,0382 ; p=0,430 .
Magnesio	R^2=0,0897 ; p=0,14785	R^2=0,1474 ; p=0,035 *
Potasio	R^2=0,0033 ; p=0,92807	R^2=0,0067 ; p=0,881
Sodio	R^2=0,0376 ; p=0,42158	R^2=0,0324 ; p=0,504
Bases totales	R^2=0,1248 ; p=0,06294	R^2=0,1008 ; p=0,095 .

Nota: * = $P < 0,05$.

Importancia de los ingenieros del suelo

Los ingenieros del suelo (Phylum Annelida y órdenes Blattodea e Hymenoptera) representaron el 78,2% (1.998 individuos). El orden Blattodea representó el 62% de la abundancia en los bosques de galería, mientras que el orden Hymenoptera fue dominante en las coberturas de cultivos de plátano y pastos (con el 43% y 54,8 respectivamente).

La dominancia de las termitas en el bosque de galería es importante, ya que los túneles de las termitas pueden incrementar la conductividad hidráulica saturada (Cheik et al., 2019), favoreciendo la infiltración y capacidad de almacenamiento del agua en estos suelos. No obstante, también hay evidencia que nidos de hormigas de gran tamaño también pueden favorecer la infiltración (Li et al., 2019). Para profundizar en las repercusiones hidrológicas de este intercambio de dominancia entre termitas humívoras dentro del bosque y la dominancia de hormigas en las coberturas de pastos y cultivos, se requeriría de unos análisis más profundos sobre propiedades hidráulicas de los suelos (porosidad y conductividad hidráulica) y en la medida de lo posible evaluación de los sistemas de galerías subterráneas.

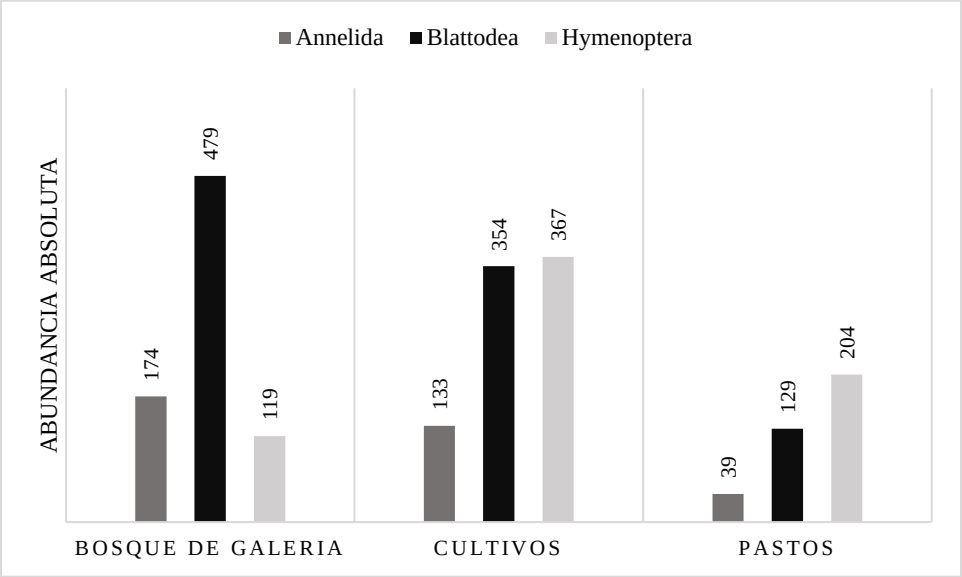


Figura 12. Abundancia absoluta de grupos de ingenieros del suelo.

El orden Hymenoptera fue más diverso en las tres coberturas con 29 morfoespecies, seguido del orden Blattodea con 15 morfoespecies y finalmente, el phylum Annelida con 3 morfoespecies. La figura 13 permite evidenciar que tanto los bosques de galería y los cultivos de plátano tuvieron un patrón similar en relación a que el mayor número de morfoespecies están en el orden Hymenoptera, seguido del orden Blattodea y finalmente el phylum Annelida. En general el orden Hymenoptera correspondió al grupo taxonómico que presentó el mayor número de morfoespecies en las tres coberturas.

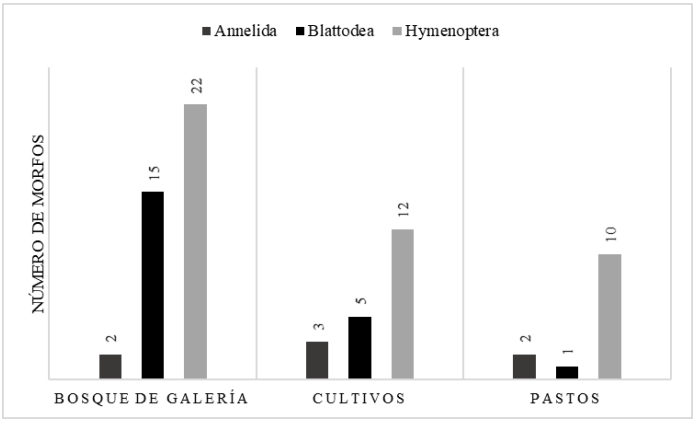


Figura 13. Número de morfoespecies de ingenieros del suelo por cobertura.

Isoptera en el área de muestreo

Se encontraron 958 individuos pertenecientes a dos familias y 13 géneros. El 74,3% de los Isoptera encontrados pertenecieron a la familia Termitidae (géneros *Anoplotermes, Aparatermes, Compositermes, Disjunctitermes, Hydrecotermes, Hirsutitermes* y *Nasutitermes*), mientras que el 25,7% correspondieron a Rhinotermitidae (género *Heterotermes*).

Se identificó que la especie dominante fue *Disjunctitermes insularis* Scheffrahn, 2017 (Figura 14, tabla 4) presente en las tres coberturas evaluadas y representando el 84,8% de los Isoptera del muestreo. Se destacaron otros géneros como *Anoplotermes* (Figura 15) y *Heterotermes* (Tabla 4, Figura 15). *Disjunctitermes insularis* tuvo el valor de abundancia absoluta más alto con un promedio de 259 ± 114 individuos en todo el muestreo.

Tabla 4. Abundancia absoluta (AA) y relativa (%) del orden Isoptera.

Especies	Bosque de galería		Cultivos		Pastos		Total
	AA	%	AA	%	AA	%	
Anoplotermes sp. Müller 1873	0	0	2	0.6	0	0	2
Anoplotermes banksi Emerson, 1925	30	6.32	1	0.3	0	0	31
Anoplotermes meridianus Emerson, 1925	11	2.32	0	0	0	0	11
Anoplotermes parvus Snyder, 1923	3	0.63	0	0	0	0	3
Aparatermes abbreviatus Silvestri, 1901	5	1.05	0	0	0	0	5
Apicotermitinae	1	0.21	35	9.9	0	0	36
Compositermes bani Carrijo, Scheffrahn & Křeček , 2016	1	0.21	0	0	0	0	1
Disjunctitermes insularis Scheffrahn, 2017	343	72.21	306	86.4	129	100	778
Heterotermes sp. Froggatt 1897	30	6.32	8	2.3	0	0	38
Heterotermes convexinotatus (Snyder, 1924)	0	0	2	0.6	0	0	2
Heterotermes tenuis (Hagen, 1858)	5	1.05	0	0	0	0	5
Hirsutitermes kanzakii Scheffrahn, Carrijo & Castro, 2023	24	5.05	0	0	0	0	24

Hydrecotermes arienesho Bourguignon & Roisin, 2016	18	3.79	0	0	0	0	18
Nasutitermes sp. Dudley 1890	3	0.63	0	0	0	0	3
Termitidae	1	0.21	0	0	0	0	1
Total	**475**		**354**		**129**		**958**

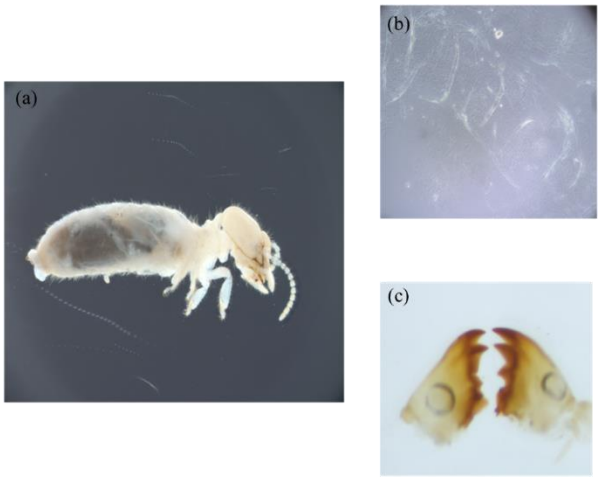


Figura 14. Disjunctitermes insularis (a): Vista lateral; (b): Válvula entérica abierta; (c): Mandíbula en vista dorsal. Fotografía: P.Pinzón.

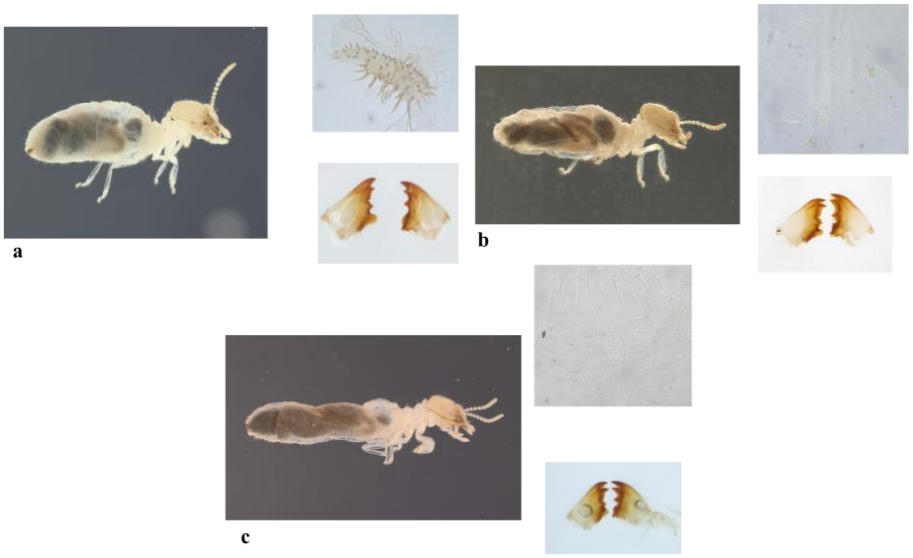


Figura 15. Especies del género Anoplotermes. (a). A. parvus; (b) A. banksi; (c) A. meridianus. Izq:Vista lateral; derecha superior: válvula entérica abierta; derecha inferior: mandíbulas en vista dorsal Fotografías: P. Pinzón.



Figura 16. Vista dorsal de soldado de Heterotermes tenuis. Fotografía: P. Pinzón.

Los bosques de galería presentaron la mayor abundancia de Isoptera con 475 individuos. Se destacó el género *D. insularis* (familia: Termitidae; subfamilia: Apicotermitinae), se evidenció que esta especie además de ser la más abundante en los bosques de galería también lo fue en las coberturas de cultivos de plátano y pastos con un total de 816 individuos encontrados en todo el muestreo.

Se encontró una mayor diversidad de especies en los bosques de galería con 13 especies presentes, en comparación con la cobertura de cultivos de plátano que presentó (3 especies con 354 individuos) y los pastos siendo la cobertura con menor riqueza ya que solo se identificó una especie con 129 individuos (Figura 17a). Se observó que todas las especies de termitas encontradas en los cultivos de plátanos y pastos están presentes en los bosques de galería.
La representatividad general del muestreo fue superior al 80% (Figura 17), no obstante, los bosques de galería tuvieron la representatividad más baja mientras que los cultivos de plátano y pastos su representatividad está cercana al 100%.

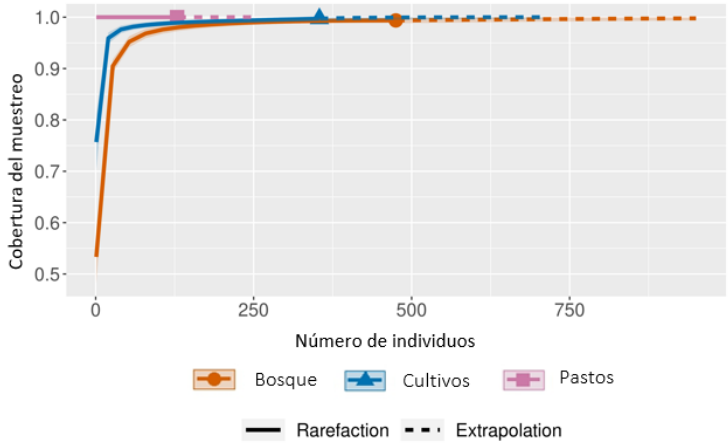


Figura 17. Curvas de acumulación para Isoptera. Representatividad del muestreo por número de individuos.

Los grupos alimenticios encontrados para las termitas fueron: el grupo de humívoros del cual sobresalieron las tres coberturas estudiadas con un 96% de representatividad, por otro lado, se encontraron algunas termitas xilófagas en las coberturas de bosque de galería y cultivos las cuales representaron el 4% (Figura 18).

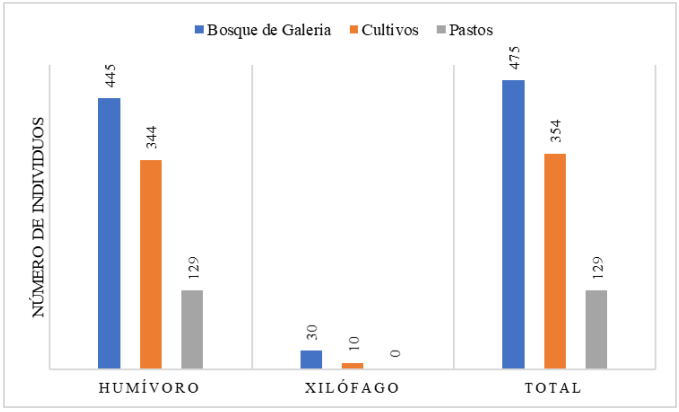


Figura 18. Abundancia absoluta de Isoptera de acuerdo al grupo funcional y la cobertura.

Disjunctitermes insularis fue la especie con mayor densidad en el muestreo y se observaron diferencias entre las tres coberturas analizadas (Figura 19). La cobertura con mayor

densidad fue bosque de galería (5488 individuos/m^2) y la de menor densidad fueron los pastos (2064 individuos/m^2).

Las termitas de hábito alimenticio humívoros estuvieron representadas en un 46,45% en los bosques de galería, 35,91% en los cultivos de plátano y 13,47% en los pastos, mientras que las xilófagas estuvieron presentes en un 3,13% en los bosques de galería, y un 1,04% en los cultivos.

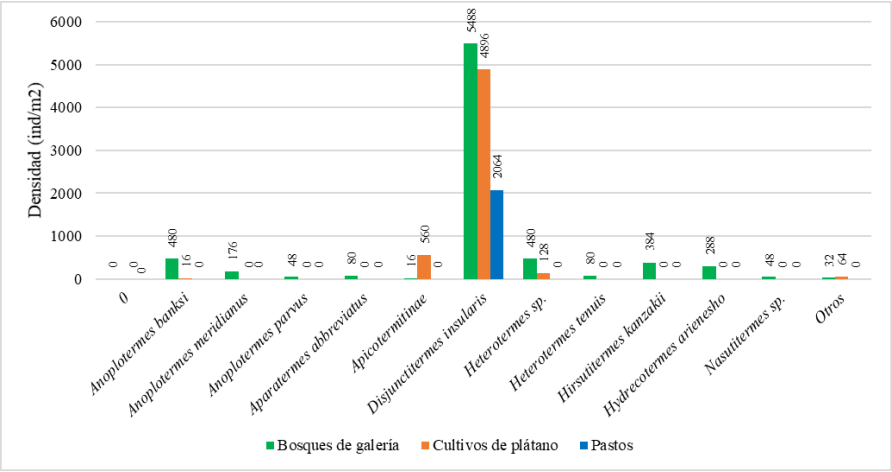


Figura 19. Densidad/m^2 de las especies de termitas más representativos.

El número efectivo de especies de los bosques de galería fue mayor (Figura 20a), que los cultivos de plátano y pastos los cuales presentaron un 63,3% y 91% menos de especies efectivas respectivamente. En términos de géneros poco comunes (q=1) (Figura 20b), hubo diferencias significativas, ya que los bosques de galería presentaron una mayor diversidad de géneros raros presentes en contraste con las coberturas de cultivos y pastos donde esta diversidad fue baja y sin diferencias significativas. Finalmente, para la diversidad de géneros comunes (q=2) (Figura 20c) se presentó un patrón similar a la diversidad de géneros raros, ya que el bosque de galería presentó un mayor número de especies efectivas que las coberturas de pastos y cultivos que fueron significativamente similares con una baja diversidad de géneros comunes.

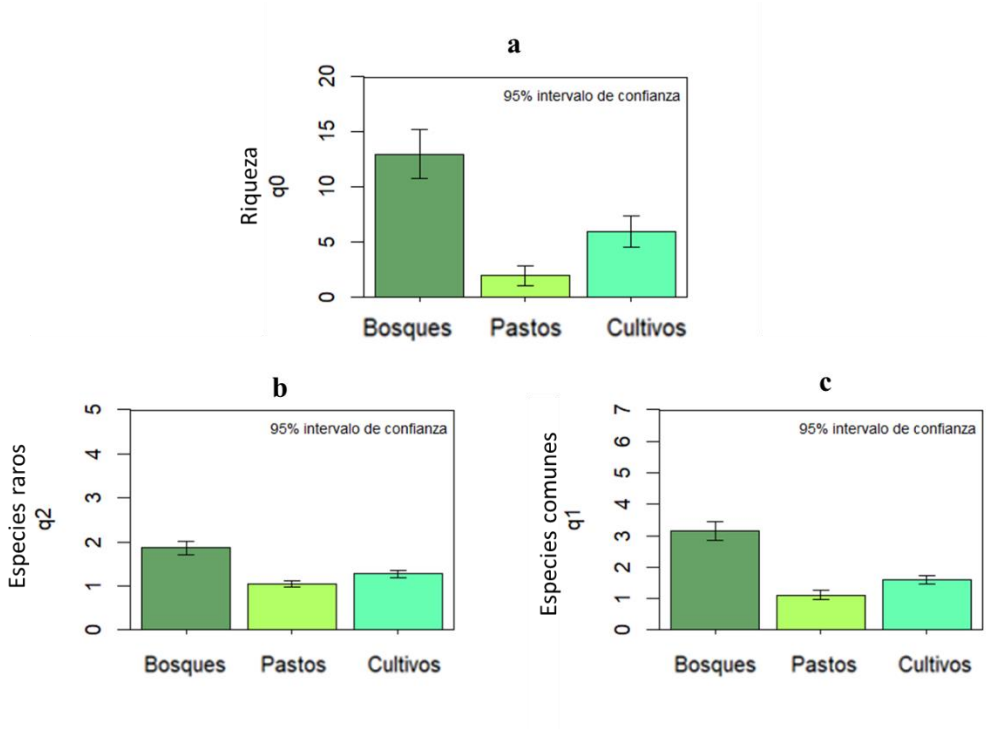


Figura 20. Número efectivo de especies de termitas en las tres coberturas muestreadas (a) Riqueza de órdenes q=0; (b) Diversidad de especies raras q=1; (c) Diversidad de especies comunes q=2.

Respecto al análisis de especies indicadoras y el análisis tipo NMDS no se obtuvieron variables que pudiesen explicar una asociación significativa en cuanto a especies, coberturas y las variables edáficas analizadas las cuales arrojaron un valor de *p-valor*<0.05

Discusión de resultados

La presente investigación reporta diferencias en la diversidad de órdenes de la macrofauna del suelo en tres coberturas del suelo en el municipio de Villanueva Casanare. La cobertura con mayor diversidad (número efectivo de órdenes q0, q1 y q2) fueron los bosques de galería (19 órdenes y la cobertura con menor diversidad fueron los pastos (11 órdenes y 8656 ind/m^2)

Asimismo, los grupos funcionales más representativos en todas las coberturas fueron los ingenieros del suelo; mientras que de las variables del suelo analizadas la que mejor explicó los ensamblajes observados fue el pH.

Diversidad de órdenes de la macrofauna, diversidad funcional y densidad de termitas

La macrofauna del suelo en el área de estudio estuvo representada por 20 órdenes, de los cuales 11 se encontraron en pastos, 14 en cultivos de plátano y 19 en los bosques de galería. La reducción en la diversidad y densidad observada en los cultivos y los pastos coincide con lo documentado por otros estudios de macrofauna del suelo en la Orinoquía. Decaëns et al., (2001) reportaron una reducción del 64,1 % y del 90% entre coberturas de pastos y cultivos de arroz cultivos de arroz y pastos lo cual se atribuye a la aplicación de insumos contaminantes para los cultivos y exceso de sobrepastoreo por actividades ganaderas para los pastos. Asimismo, estudios desarrollados por Sanabria et al., (2016) demostraron que la diversidad de hormigas y termitas se ve reducida debido a las transformaciones dadas por malas prácticas en los sistemas agrícolas y ganaderas.

Los grupos taxonómicos más representativos en este estudio (Formicidae, Isoptera, Oligochaeta y Coleoptera), coinciden con los grupos más abundantes registrados por Tapia-Coral et al., (2019) en la Amazonía entendiendo que los ingenieros del suelo en la zona neotropical cálida van a ser los más representativos independientemente del área de estudio. Además, estos mismos grupos a excepción de Coleoptera también fueron representativos y registrados por Pinzón et al., (2015) en los bosques de galería de la Amazonía oriental brasileña donde registraron las mayores densidades para Isoptera, Hymenoptera y Oligochaeta con 3.185 ind/m^2, 1.433 ind/m^2 y 440 ind/m^2 respectivamente en el mismo número de monolitos.

En el presente estudio, la cobertura con mayor abundancia absoluta correspondió a la cobertura de cultivos de plátano. Pese a que no se encontraron estudios previos que demuestren que los cultivos tengan una mayor diversidad, si se puede validar que la abundancia principalmente de los órdenes Hymenoptera y Coleoptera en cultivos suelen presentar un mayor número de individuos en comparación con otros taxones; cuya presencia se asocia a sistemas productivos con prácticas inadecuadas, donde el orden Hymenoptera posee un rango de adaptación amplio al ser organismos generalistas (Jerez-Valle, 2014; Muñoz y Villota, 2014). Asimismo, el predominio de estos grupos está basado en la oferta de recursos orgánicos que le proporcionan a la macrofauna los recursos alimenticios necesarios para su establecimiento (Neher, 1999).

Desde el punto de vista de los grupos funcionales este estudio reportó una mayor densidad en los grupos de ingenieros del ecosistema principalmente en la cobertura de bosque de galería, lo cual coincide con estudios previos sobre ingenieros del suelo en Carimagua en la Orinoquía donde se reportó una densidad de 2.806 (ind/m^2) en general para bosques de galería, con una densidad de 862 (ind/m^2) para hormigas y 251 (ind/m^2) para lombrices Decaëns et al., (1994).

La macrofauna edáfica de este estudio estuvo dominada por *los ingenieros del suelo* independientemente de la cobertura estudiada. La mayor presencia de ingenieros y detritívoros coincide con lo que se ha registrado en otros estudios (Zerbino et al., 2008; De la Rosa y Negrete-Yankelevich, 2012; citado por Cabrera-Dávila y López-Iborra, 2018; Tapia-Coral et al., 2019). La dominancia de los grupos de ingenieros del suelo y detritívoros en el muestreo se debe a que estos organismos poseen capacidades adaptativas que le han permitido tener un rango amplio de establecimiento de acuerdo a las funciones que pueden ejercer dentro del suelo, las

cuales influyen en su formación y en sus propiedades, lo cual también permite que sean clasificados como organismos bioindicadores de degradación (Lavelle et al., 2016; Decaëns et al., 2001). La presencia dominante de humívoros en el suelo en las diferentes coberturas sugiere un reciclaje importante de materia orgánica, y de túneles dentro del suelo. En ambos casos, la materia orgánica favorece la infiltración y retención del agua, mientras que los túneles incrementan la conductividad saturada y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (Turner, 2019; Li et al., 2019).

La densidad de anélidos si bien fue representativa dentro de los grupos de ingenieros del suelo, la presencia de estos organismos se asocia principalmente a la cantidad de humedad del suelo y de materia orgánica (Lavelle, 1983; Rousseau et al., 2010; Cabrera-Dávila y López-Iborra, 2018). Las preferencias de hábitat de las lombrices están relacionada a suelos con pH de 5 a 6, valores que coinciden en general con los obtenidos en campo, sin embargo, los porcentajes de materia orgánica obtenidos no superaron el 3% por lo que la presencia de anélidos puede estar condicionada por este factor e incluso a la estructura del suelo que impide la infiltración tal como lo relaciona Machado-Cuellar et al., (2020).

En el presente estudio, como era de esperarse, la dominancia de las termitas correspondió a la subfamilia Apicotermitinae las cuales constituyen 1/3 de la diversidad de termitas en las selvas tropicales cuyo grupo funcional es principalmente humívoro (Constantino, 2022).

y agrupa a las especies humívoras conocidas como “*soil feeders*”. *Disjunctitermes insularis* fue la especie más abundante en las tres coberturas analizadas presentando una disminución en la densidad desde los bosques de galería hasta la cobertura de pastos. En la región coinciden los reportes de Sanabria et al., (2016) los cuales han reportado una densidad de termitas hasta de 8.052 (individuos/m^2), sin embargo, no se especifica una alta resolución

taxonómica para el grupo de humívoros. Igualmente, en la literatura se reporta una alta variación espacial relacionada con a la ubicación del termitero; es decir, las termitas más abundantes podrían indicar que dentro del monolito se recolectaron fragmentos del termitero mientras que menos abundancias pueden indicar que las termitas se encontraban a una distancia significativa de su hábitat o en nidos difusos (Galvis et al., 1978; Laffont, 2009).

Las termitas son organismos resistentes a las perturbaciones siendo las humívoras de la subfamilia Apicotermitinae indicadoras de ecosistemas con cierto grado de perturbación (Sanabria et al., 2014). Particularmente *Disjunctitermes insularis,* la especie humívora más común en este muestreo no tenía reportes específicos en la Orinoquía, pero llama la atención que también ha sido mencionada como una especie indicadora de perturbación en diferentes usos del suelo en el Caquetá (Castro et al., 2021).

La proporción entre termitas/lombrices a partir de la densidad puede ser un indicador de perturbación, pues se afirma que si hay un mayor número de termitas sobre el número de lombrices existirá una condición de degradación (Barros et al., 2002). Lo anterior fue un patrón en las coberturas de bosques de galería, cultivos de plátano y pastos donde las proporciones fueron de 2,8, 2,7 y 3,3 respectivamente, es decir, que hubo una mayor abundancia de termitas sobre lombrices en este estudio lo que sugiere que las coberturas están bajo una degradación que se debe tener en cuenta para aspectos de manejo en el futuro, donde se tenga en cuenta la importancia de estos organismos los cuales forman estructuras biogénicas que dan estabilidad al suelo y favorecen su aireación, el flujo de agua lo que mejora la regulación hidrológica y la movilización de nutrientes (Siqueira et al., 2014).

Correlación de las propiedades del suelo con la densidad y diversidad de macrofauna y termitas

La correlación de la macrofauna con características del suelo mediante el NMDS apoyó la relación entre la composición de la macrofauna y la cobertura, principalmente en los bosques de galería y dentro de las variables del suelo estudiadas, el pH. Los resultados de este estudio coinciden con observaciones previas (Velásquez y Lavelle, 2019) quienes afirman que el pH favorable para la macrofauna está entre valores de 5 a 7 (similar a lo observado a este estudio (4,67 ± 6,57) que pueden explicar la pérdida o ganancia de cationes básicos. Asimismo, un pH con tendencia a la acidez va a tener una mayor cantidad de macrofauna de tipo descomponedora (Pollieler et al., 2020), mientras algunas especies de termitas y lombrices son prosperas en suelos con pH menores a 5 (Lavelle et al., 1995).

El porcentaje de arenas, el pH y el Magnesio fueron variables significativas en la ordenación presentada a través del PCA. En este estudio particularmente los bosques de galería tuvieron un contenido de arenas alto, debido al arrastre de sedimentos provocados por el desplazamiento del agua (Díaz-Lezcano et al., 2021). Por otra parte, los cultivos de plátano y los pastos están más afines con las variables de pH y Magnesio las cuales se encuentra correlacionadas en el sentido en que son indirectamente proporcionales, esto se debe a que, en suelos de pH ácidos, las bases intercambiables como el Magnesio son escasas debido que el intercambio de iones se dará principalmente con iones H^{+} en vez de Mg^{+2} (Casierra-Posada y Aguilar-Avendaño, 2018). El efecto del pH en la distribución y abundancia de termitas, hormigas y otros, puede tener consecuencias sobre las propiedades hidráulicas del suelo. Esto describiría una trayectoria de la intervención donde se afectaría en principio el pH, afectando las especies y poblaciones, que a su vez definirá la densidad de túneles y materia orgánica que intervienen en la infiltración (Turner, 2019; Li et al., 2019).

Conclusiones y recomendaciones

La cobertura del suelo influenció la composición de la macrofauna, siendo los cultivos y los pastos las coberturas con menor diversidad de órdenes. El bosque de galería presenta una mayor riqueza, los cultivos de plátano mayor abundancia y densidad y los pastos la menor riqueza y densidad.

Los ingenieros del suelo y los detritívoros encontrados en esta investigación son importantes debido a las funciones que favorecen a las propiedades del suelo, incluyendo las propiedades hidráulicas. El grupo Isoptera del orden Blattodea destacó por presentar especies bioindicadoras de degradación cuya presencia se debe a la tolerancia y resistencia a las perturbaciones provocadas por un mal manejo de la cobertura del suelo. Además favorecen la infiltración y capacidad de almacenamiento de agua del suelo.

El grupo Isoptera (Blattodea) y particularmente la densidad y riqueza de los humívoros son bioindicadores de los efectos de cultivos y pasturas; lo cual se evidenció con la dominancia de la subfamilia Apicotermitinae o soil feeders especialmente en los bosques de galería. *Disjuctitermes insularis* fue la especie con mayor dominancia en las tres coberturas considerándose una especie indicadora de sitio.

El porcentaje de ingenieros del suelo dentro del muestreo (78,2%) es un buen indicador, pues estos organismos son vulnerables a la degradación del suelo y los cambios drásticos que se puedan dar en la cobertura.

El pH acido explicó la densidad y la diversidad de la macrofauna en los cultivos de plátano y los pastos mientras que la textura arenosa se relaciona con la macrofauna encontrada en los bosques de galería. Las consecuencias de la variación del pH en las poblaciones de

macrofauna y esta a su vez en las propiedades hidráulicas del suelo pueden ser estudiadas a mayor profundidad.

Se debe profundizar en estudios de macrofauna con énfasis en ingenieros del suelo, teniendo en cuenta las funciones que cumple este grupo en cuanto a los servicios ecosistémicos asociados a la calidad del suelo y distribución hídrica en el mismo.

Esta investigación permitió estimar y comparar la diversidad de la macrofauna con base a las coberturas. Los resultados contribuyen al conocimiento del estado de la macrofauna en la Orinoquía y la importancia de estos organismos como bioindicadores en las coberturas. Es importante entender las funciones de la macrofauna que favorecen a las propiedades del suelo como el mejoramiento de la estructura del suelo, la descomposición de la materia orgánica y a la regulación hídrica permitiendo mejorar las condiciones de infiltración y prevenir la escorrentía y la erosión (Cheik et al., 2019).

Se debe profundizar en estudios de macrofauna con énfasis en ingenieros del suelo, teniendo en cuenta las funciones que cumple este grupo en cuanto a los servicios ecosistémicos asociados a la calidad del suelo y distribución hídrica en el mismo.

Es necesario realizar estudios más amplios que permitan comprender con mayor precisión la distribución de *Disjunctitermes insularis* para identificar las generalidades de esta especie y las preferencias de hábitat.

Es importante que en futuros estudios se consideren variables ambientales que puedan ser significativas y expliquen con mayor detalle la composición de la macrofauna como la humedad y temperatura del suelo, la elevación, los niveles de porosidad, variables que de acuerdo con otros estudios asociados a la macrofauna pueden estar relacionados con la composición en diferentes coberturas.

Referencias

Abadía L., J. C., Arcila, Á. M., & Chacón, P. (2013). Incidencia y distribución de termitas (Isoptera) en cultivos de cítricos de la costa caribe de Colombia. Revista Colombiana de Entomología, 39(1), 1–8.

Agencia Nacional de Infraestructura, (s.f). Estudios de prefactibilidad proyecto Corredor Villavicencio-Yopal. Obtenido de: https://www.ani.gov.co/sites/default/files/apendice_1_-_parte_especial.pdf

Alves, W. de F., Mota, A., Lima, R. de, Bellezoni, R., & Vasconcellos, A. (2011). Termites as Bioindicators of Habitat Quality in the Caatinga, Brazil: Is There Agreement Between Structural Habitat Variables and the Sampled Assemblages? Neotropical Entomology, 40(1), 39–46. doi:10.1590/s1519-566x2011000100006

Anderson J.M. & Ingram J.S.I. (1993). Tropical soil biology and fertility. A handbook of methods. Wallingford, UK. CAB International. 221 p.

Ashton. L.A., Griffins. H.M., Parr. C.L., Evans. T.A., Didham. R.K., Hasan. F., Teh. Y., Tin. H.S., Vairappan. C.S., & Eggleton. P. (2019). Termites mitigate the effects of drought in tropical rainforest. Science. Vol 363, Issue 6423. pp. 174-177. doi: 10.1126/science.aau9565

Barros E, B Pashanasi, R Constantino, P Lavelle. (2002). Effects of land-use system on the soil macrofauna in western Brazilian Amazonia. Biology and Fertility of Soils. 35: 338-347

Brown, G. G., Fragoso, C., Barois, I., Rojas, P., Patrón, J. C., Bueno, J., Moreno, A. G.,Lavelle, P., Ordaz, V., & Rodríguez, C. (2001). Diversidad y rol funcional de la macrofauna edáfica en los ecosistemas tropicales mexicanos. Acta Zoológica Mexicana (N.S.), 79–110. https://doi.org/10.21829/azm.2001.8401847

Cabrera-Dávila, G. & López-Iborra, G. M. (2018). Caracterización ecológica de la macrofauna edáfica en dos sitios de bosque siempreverde en El Salón, Sierra del Rosario, Cuba. Bosque (Valdivia), 39(3), 363- 373.

Calderón-Medina. C.L., Bautista-Mantilla. G.P & Rojas.González. S. (2018). Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta. Orinoquía, 22(2), 141-157. https://doi.org/10.22579/20112629.524

Carrijo TF, Castro D, Wang M, Constantini JP, Bourguignon T, Cancello EM, Roisin Y, Scheffrahn R. H. (2023). Diminishing the taxonomic gap in the neotropical soldierless termites: descriptions of four new genera and a new Anoplotermes species (Isoptera, Termitidae, Apicotermitinae). Zookeys;1167:317-352. doi: 10.3897/zookeys.1167.100001. PMID: 37397162; PMCID: PMC10311428.

Casierra-Posada, F, & Aguilar-Avendaño, O E. (2018). Stress for aluminum in plants: reactions in the soil, symptoms in plants and amelioration possibilities. A review. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 1(2), 246–257. https://doi.org/10.17584/rcch.2007v1i2.8701

Castro, D., Fernandez, F., Scheffrahn, R.H., Peña-Venegas, C.P. (2021b). Ant and termite diversity of the Colombian Amazon soils. Obtenido de: https://www.fao.org/3/cb4342en/cb4342en.pdf

Cheik, S., Bottinelli, N., Minh, T. T., Doan, T. T., & Jouquet, P. (2019). Quantification of three dimensional characteristics of macrofauna macropores and their effects on soil hydraulic conductivity in northern Vietnam. Frontiers in Environmental Science, 7, 31.

Constantino, R. (2002). The pest termites of South America: taxonomy, distribution and status. Journal of Applied Entomology, 126(7-8), 355–365. doi:10.1046/j.1439-0418.2002.00670.x

Da Silva, M. K., Da Gama, E. F., Da Gama, A. C., Machado, R. C., & Baligar, V. C. (2009). Soil and litter fauna of cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. Agrofor Syst; 76:127-138. DOI: https://link.springer.com/article/10.1007/s10457-008-9178-6.

De Cáceres, M., Jansen, F., Dell, N., & De Cáceres, M. M. (2022). Package 'indicspecies'. Indicators, 7(1), 1–31.

De la Rosa, N & Negrete-Yankelevich, S. (2012). Distribución espacial de la macrofauna edáfica en bosque mesófilo, bosque secundario y pastizal en la reserva La Cortadura, Coatepec, Veracruz, México. Revista Mexicana de Biodiversidad 83: 201-215.

Decaëns, T., Lavelle, P., Jimenez Jaen, J. J., Escobar, G., & Rippstein, G. (1994). Impact of land management on soil macrofauna in the oriental Llanos of Colombia. European Journal of Soil Biology, 30, 157–168

Decaëns, T.; Jiménez, J. J.; Rangel, A. F.; Cepeda, A.; Moreno, A. G. & Lavelle, P. (2001). La macrofauna del suelo en la sabana bien drenada de los Llanos Orientales. pp. 111-137. En: Rippstein, G.; Escobar, G. y Motta, F. (eds.). Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los llanos orientales de Colombia. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical. 308 p

Decäens, T.; Lavelle, P.; Jiménez, J. J.; Escobar, G.; Rippstein, G.; Schneidmadl, J.; Sanz, P. Hoyos.; Thomas, R. J. (2003). Impacto del uso de la tierra en la macrofauna del suelo de los Llanos Orientales de Colombia. pp. 21-45. En: Jiménez, J. y Thomas, R. (eds.). El arado natural: las comunidades de macroinvertebrados del suelo en las savanas neotropicales de Colombia. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical. 439 p.

Decaëns, T., Jimenez, J. J., & Lavelle, P. (2008). C and N concentrations in biogenic structures of a soil-feeding termite and a fungus-growing ant in the Colombian savannas. 40, 120–128. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.03.009

Decaëns, T., Jimenez, J., & Lavelle, P. (2006). Nutrient spatial variability in biogenic structures of Nasutitermes (Termitinae ; Isoptera) in a gallery forest of the Colombian ‘ Llanos .’ 38, 1132–1138.

Díaz Lezcano, M. I., Rodríguez Benítez, M. D., Moreno Resquín, H., & Britos Benítez, C. A. (2022). Servicio ecosistémico de regulación de un bosque de galería del arroyo San Lorenzo, Paraguay. Agronomía Costarricense, 46(1). https://doi.org/10.15517/rac.v46i1.49874

Donovan, S. E., Eggleton, P., & Martin, A. (2002). Species composition of termites of the Nyika plateau forests, northern Malawi, over an altitudinal gradient. African Journal of Ecology, 40(4), 379–385. doi:10.1046/j.1365-2028.2002.00397.xDufour, D. L. (1987). Insects as Food: A

Case Study from the Northwest Amazon. American Anthropologist, 89(2), 383–397. https://doi.org/10.1525/aa.1987.89.2.02a00070

Dufrêne, M. & Legendre, P. (1997). Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. Ecological Monographs, 67(3), 345-366

Duran-Bautista, E. H., Armbrecht, I., Serrão Acioli, A. N., Suárez, J. C., Romero, M., Quintero, M., & Lavelle, P. (2020). Termites as indicators of soil ecosystem services in transformed amazon landscapes. Ecological Indicators, 117, 106550. doi:10.1016/j.ecolind.2020.106550

Eggleton, P.; Bignell, D. E.; Sands, W. A.; Waite, B.; Wood, T. G.; Lawton, J. H. (1995). The species richness of termites (Isoptera) under differing levels of forest disturbance in the Mbalmayo Forest Reserve, Southern Cameroon Journal of Tropical Ecology 11: 85-89.

Eggleton, P., BigneIl, D., Sands, W., Mawdsley, N., Lawton, J., Wood, T., Bignell, N. (1996). The diversity, abundance and biomass of termites under differing levels on disturbance in the Mbalmayo forest reserve, Southern Cameroon. Philosophical Transactions: Biological Sciences 351: 51-68

Gallego-Ropero. M.C. (2013). Cohabitacion e interaccion entre formigas y cupins em ninhos de Cornitermes cumulans em area de cerrado e pastagem no Brasil Central. Tesis de Doctorado. Universidade de Brasilia.

Galvis, C., Chamorro, C., & Cortes, A. (1978). Actividad de las termitas en algunos suelos de la Orinoquia Colombiana. Revista Colombiana de Entomologia, 4, 51–60.

Hsieh, K.H. & Chao, M.A. (2016). INext: An R package for rarefaction and extrapolation of species diversity (Hill numbers). Methods in Ecology and Evolution, 7, 1451-1456.

Huerta. E., Brown. G. & Bautista. F. (2011). Macroinvertebrados del suelo y lombrices de tierra. Técnicas de muestreo para el estudio del manejo de recursos naturales.

Jerez-Valle, C., García, P. A., Campos, M., & Pascual, F. (2014). A simple bioindication method to discriminate olive orchard management types using the soil arthropod fauna. Applied Soil Ecology, 76, 42–51. doi:10.1016/j.apsoil.2013.12.007

Jiménez, J. J., & Decaëns, T. (2006). Chemical variations in the biostructures produced by soil ecosystem engineers. Examples from the neotropical savannas. European Journal of Soil Biology, 42, 92–102.

Jímenez, J., Decaëns. T. & Lavelle. P. (2006). Nutrient spatial variability in biogenic structures of Nasutitermes (Termitinae; Isoptera) in a gallery forest of the Colombian "Llanos." Soil Biology and Biochemistry, 38(5), 1132–1138. doi:10.1016/j.soilbio.2005.09.026

Jouquet, P., Traoré, S., Choosai, C., Hartmann, C., & Bignell, D. (2011). Influence of termites on ecosystem functioning. Ecosystem services provided by termites. European Journal of Soil Biology, 47(4), 215–222.

Junqueira, L. K., & Florencio, D. F. (2017). Termite Damage in Agriculture Areas and Implanted Forests: An Ecological Approach. Termites and Sustainable Management, 37–50. doi:10.1007/978-3-319-68726-1_2

Laffont, E.R., (2009). "Estudio Comparativo de la Termitofauna en tres ambientes del Nordeste de la Provincia de Corrientes, Argentina". Universidad Nacional del Nordest. Argentina. Tesis de grado. Obtenido de: https://repositorio.unne.edu.ar/bitstream/handle/123456789/28777/RIUNNE_FACENA_TD_Laffont_ER.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., & Rossi, J.-P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. European Journal of Soil Biology, 42, S3–S15. doi:10.1016/j.ejsobi.2006.10.002.

Lavelle, P., Chauvel, A., Fragoso, C. (1995). Faunal activity in acid soils. In: Date, R.A., Grundon, N.J., Rayment, G.E., Probert, M.E. (eds) Plant-Soil Interactions at Low pH: Principles and Management. Developments in Plant and Soil Sciences, vol 64. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0221-6_29

Lavelle, P. (1994). The relationship between soil macrofauna and tropical soil fertility. The Biological Management of Tropical Soil Fertility, 137–169.

Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P., Dhillion, O.W., (1997). Soil function in a changing world: The role of invertebrate ecosystem engineers. European Journal of Soil Biology 33 (4), 159–193.

Lavelle, P., Rodríguez, N., Arguello, O., Bernal, J., Botero, C., Chaparro, P., Gómez, Y., Gutiérrez, A., Hurtado, M. del P., Loaiza, S., Pullido, S. X., Rodríguez, E., Sanabria, C., Velásquez, E., & Fonte, S. J. (2014). Soil ecosystem services and land use in the rapidly changing orinoco river basin of colombia. Agriculture, Ecosystems and Environment, 185, 106–117. https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.12.020

Lavelle P. (1983). The structure of earthworm communities. In Ear&worm Ecology (J. Satchell, Ed.). pp. 449-466. Chapman & Hail, London

Léonard, J., Perrier, E., Rajot, J.L., 2004. Biological macropores effect on runoff and infiltration: a combined experimental and modelling approach. Agr. Ecosyst. Environ. 104, 277–285. https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.11.015

Li, T. C., Shao, M. A., Jia, Y. H., Jia, X. X., Huang, L. M., & Gan, M. (2019). Small-scale observation on the effects of burrowing activities of ants on soil hydraulic processes. European Journal of Soil Science, 70(2), 236-244.

Lores-Medina. A. & Pinzón- Florián. O.P. (2011) Insectos fitófagos en plantaciones comerciales de Acacia mangium willd. en la Costa Atlántica y la Orinoquia Colombiana. Colombia Forestal, vol. 14, núm., pp. 175-188 Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá, Colombia

Machado Cuellar, L., Rodríguez Suárez, L., Murcia Torrejano, V., Orduz Tovar, S.A., Ordoñez Espinosa, C.M. & Suárez, J.C. (2020). Macrofauna del suelo y condiciones edafoclimáticas en un gradiente altitudinal de zonas cafeteras, Huila, Colombia. Revista de Biología Tropical, 69(1), 102-112.

Moreira F., Huising J., Bignell D. (2012). Manual de biología de suelos tropicales. Muestreo y caracterización de la biodiversidad bajo suelo. Instituto Nacional de Ecología, México. 337 pp.

Muñoz, S.; Villota, T. (2014). Evaluación de la macrofauna y composición florística en sistemas productivos de café (Coffea arabica L.), municipio La Unión Nariño. (Disertación de pregrado, Facultad de Ciencias Agropecuarias Universidad de Nariño. Pasto.

Neher, D.A. (1999). Soil community and ecosystem proceses; comparing agricultural ecosystems with natural ecosystems. Agrofor Systems 45:159-185.

Oksanen, J., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P. R., O'hara, R. B., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, M. H., Wagner, H., & Oksanen, M. J. (2013). Package ‘vegan’. Community Ecology Package, Version, 2(9), 1–295.

Pinzón, O. P., Hernández, A. M., & Malagón, L. A. (2012). Diversidad de termitas (Isoptera: Termitidae, Rhinotermitidae) en plantaciones de caucho en Puerto López (Meta, Colombia). Revista Colombiana de Entomologia, 38(2), 291–298. https://doi.org/10.25100/socolen.v38i2.9009

Pinzón-Florián, O. P., Baquero, L., & Beltran, M. (2017). Termite (Isoptera) Diversity in a Gallery Forests Relict in the Colombian Eastern Plains. Sociobiology, 64(1), 92–100. https://doi.org/10.13102/sociobiology.v64i1.1184

Pinzón, S. T., Rousseau, G. X., Piedade, A. R. d., Celentano, D., Zelarayán, M. L. C., & Braun, H. (2015). La macrofauna del suelo como indicadora de degradación de bosques ribereños en la Amazonia oriental brasilera. Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata (2014) Vol 114 (1): 49-60

Pollierer, M.M., Klarner, B., Ott, D. et al. Diversity and functional structure of soil animal communities suggest soil animal food webs to be buffered against changes in forest land use. Oecologia 196, 195–209 (2021). https://doi.org/10.1007/s00442-021-04910-1

Ramírez, W., García, Y., Sánchez, S., López, M., & Hernández, L. (2014). Caracterización de la macrofauna edáfica en sistemasde producción intensiva de césped. Pastos y Forrajes, 37(2), 158-165.

Refocosta, (2023). Resumen plande manejo forestal 2023. Proceso: Establecimiento y mantenimiento forestal. Obtenido de: https://www.refocosta.com/wp-content/uploads/2023/08/RC-EMF-PL-01-Resumen-del-Plan-de-Manejo-Forestal-2023-V6.pdf

Rousseau, G.X., P.R. dos S. Silva & C.J.R. de Carvalho. (2010). Earthworms, ants and other arthropods as soil health indicators in traditional and nofire agro-ecosystems from Eastern Brazilian Amazonia. Acta Zoológica Mexicana (n.s.) (2): 117-134. Disponible en:

http://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/92041 6/1/Earthworms.pdf. Último acceso: enero de 2014.

Sanabria, C., Lavelle, P., & Fonte, S. J. (2014). Ants as indicators of soil-based ecosystem services in agroecosystems of the Colombian Llanos. Applied Soil Ecology, 84, 24–30. doi:10.1016/j.apsoil.2014.07.001

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. European Journal of Soil Biology, 74, 81-92.

Sánchez Núñez, D. A., Pinilla, G. A., & Mancera Pineda, J. E. (2015). Efectos del uso del suelo en las propiedades edáficas y la escorrentía superficial en una cuenca de la Orinoquía colombiana. Colombia Forestal, 18(2), 255-272.

Sandoval-Gómez, V. E., Ramérez-Chaves, H. E., & Marín, D. (2012). Registros de Hormigas Y Termitas Presentes en la Dieta de Osos Hormigueros (Mammalia: Myrmecophagidae) en Tres Localidades de Colombia. Edentata, 13(1), 1–9. https://doi.org/10.5537/020.013.0104

Souza, S. T. de, Cassol, P. C., Baretta, D., Bartz, M. L. C., Klauberg Filho, O., Mafra, Á. L., & Rosa, M. G. da. (2016). Abundance and Diversity of Soil Macrofauna in Native Forest, Eucalyptus Plantations, Perennial Pasture, Integrated Crop-Livestock, and No-Tillage Cropping. Revista Brasileira de Ciência Do Solo, 40(0). doi:10.1590/18069657rbcs20150248

Tapia-Coral, S. C., Pinto Hernández, C. A., Candre Iguedama, A., Asencio, C., Cuellar C, R. & Waldez, F. (2019). Caracterización de la macrofauna del suelo en fragmentos forestales en el 32 municipio de Leticia, Amazonia colombiana. Revista colombiana de ciencia animal recia, 11(1), 4-16. https://doi.org/10.24188/recia.v11.n1.2019.690

Turner, J. S. (2019). Termites as mediators of the water economy of arid savanna ecosystems. *Dryland ecohydrology*, 401-414.

Velasquez, E., & Lavelle, P. (2019). Soil macrofauna as an indicator for evaluating soil based ecosystem services in agricultural landscapes. Acta Oecologica, 100, 103446. doi:10.1016/j.actao.2019.103446

Vendrame, P. R. S., Marchão, R. L., Brito, O. R., Guimarães, M. de F., & Becquer, T. (2009). Relationship between macrofauna, mineralogy and exchangeable calcium and magnesium in Cerrado Oxisols under pasture. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 44(8), 996–1001. doi:10.1590/s0100-204x2009000800031

Zanne, A. E., Flores-Moreno, H., Powell, J. R., Cornwell, W. K., Dalling, J. W., Austin, A. T., Classen, A. T., Eggleton, P., Okada, K., Parr, C. L., Adair, E. C., Adu-Bredu, S., Alam, M. A., Alvarez-Garzón, C., Apgaua, D., Aragón, R., Ardon, M., Arndt, S. K., Ashton, L. A., … Zalamea, P.-C. (2022). Termite sensitivity to temperature affects global wood decay rates. Science, 377(6613), 1440–1444. doi.org/10.1126/SCIENCE.ABO3856

Zerbino, S., Altier, N., Morón, A., & Rodríguez, C. (2008). Evaluación de la macrofauna del suelo en sistemas de producción en siembra directa y con pastoreo. Agrociencia Uruguay, 12(1), 44- 55.

Anexos

Anexo 1. Grupos funcionales por orden.

Grupos	Grupos funcionales
Coleoptera	Depredadores, detritívoros, fitofagos, rizofagos
Blattodea (Isoptera)*	Xilófagos, consumidores de hojarasca, consumidores de suelos y consumidores de hongos
Oligoqueta	Geófagos, detritívoros, omnívoros
Formicidae	Fitófagos, depredadores, detritívoros, omnívoros
Chilopoda	Depredadores
Diplopoda	Detritívoros
Hemiptera	Rizófagos, fitófagos, depredadores
Orthoptera	Rizófagos, fitófagos detritívoros, omnívoros
Diptera	Detrítivoros, depredadores, parásitos
Araneae	Depredadores
Opiliones	Depredadores
Lepidoptera	Depredadores
Isopoda	Detritívoros
Pseudoscopiones	Detritívoros, depredadores
Dermaptera	Detritívoros
Diplura	Depredadores

* Donovan, et al., (2002)
Nota:Adaptado de: Brown, et al., (2001)

Anexo 2. Resultados de análisis de suelo por monolito

Monolito	Cobertura	% Arenas	% Limos	% Arcillas	Textura	pH	CO	% MO	N	C/N	% P	CIC	Ca	Mg	K	Na	Bases totales
CU-021	Cultivos de plátano	15.10	58.60	26.30	Franco limosa	5.76	0.89	1.54	0.08	11.15	33.59	10.28	7.64	5.16	0.17	0.07	13.04
CU-022	Cultivos de plátano	4.80	64.80	30.40	Franco arenosa limosa	5.68	0.92	1.59	0.08	11.55	36.25	10.91	7.04	7.07	0.23	0.07	14.41
CU-023	Cultivos de plátano	14.90	54.70	30.50	Franco arenosa limosa	5.82	0.98	1.69	0.08	12.28	19.71	11.18	8.20	5.73	0.16	0.04	14.13
CU-24	Cultivos de plátano	27.30	52.50	20.20	Franco limosa	5.96	0.49	0.85	0.04	12.30	38.03	8.10	5.90	4.94	0.13	0.04	11.01
CU-025	Cultivos de plátano	59.50	12.10	28.40	Franco arcillo arenosa	5.85	1.01	1.75	0.09	11.27	24.87	10.32	6.66	5.54	0.28	0.04	12.52
BG-006	Bosques de galería	20.00	32.80	47.20	Arcillosa	5.08	1.96	3.38	0.17	11.52	2.47	20.98	1.62	0.63	0.27	0.04	2.56
BG-007	Bosques de galería	38.10	33.00	28.90	Franco arcillosa	4.79	3.96	6.82	0.34	11.63	18.55	30.24	1.47	0.99	0.24	0.19	2.89
BG-008	Bosques de galería	37.80	26.90	35.30	Franco arcillosa	5.12	3.77	6.5	0.32	11.78	14.09	30.99	1.28	1.40	0.37	0.10	3.15
BG-009	Bosques de galería	35.90	33.10	31.00	Franco arcillosa	5.04	8.83	0.44	11.64	11.64	7.92	30.41	1.63	1.23	0.48	0.11	3.45
BG-010	Bosques de galería	30.70	34.60	34.70	Franco arcillosa	5.13	2.33	4.02	0.20	11.67	1.72	21.60	1.43	0.57	0.50	0.05	2.55
CU-026	Cultivos de plátano	59.70	26.20	14.10	Franco arenosa	5.25	0.98	1.7	0.08	12.30	31.36	7.40	5.21	2.57	0.18	0.04	8.00
CU-027	Cultivos de plátano	29.30	32.30	38.40	Franco arcillosa	5.19	0.57	0.98	0.05	11.42	7.19	17.92	1.57	1.81	0.39	0.06	3.83
CU-028	Cultivos de plátano	55.90	24.00	20.10	Franco arcillo arenosa	6.23	0.50	0.86	0.04	12.45	22.41	5.77	4.31	2.90	0.20	0.05	7.46

CU-029	Cultivos de plátano	61.80	24.10	14.10	Franco arenosa	5.94	0.00	0	0.00	0.00	96.62	7.87	4.07	2.12	0.36	0.25	6.80
CU-030	Cultivos de plátano	51.70	28.20	20.10	Franca	6.24	0.53	0.92	0.05	10.63	50.31	5.93	2.75	3.14	0.50	0.25	6.64
PA-036	Pastos	33.00	42.60	24.40	Franca	4.85	1.85	3.16	0.16	11.47	3.21	12.24	2.71	2.81	0.12	0.02	5.66
PA-037	Pastos	24.80	44.70	30.50	Franco arcillosa	4.67	1.75	3.02	0.15	11.69	4.16	13.29	7.27	2.09	0.21	0.02	4.13
PA-038	Pastos	39.30	36.40	24.30	Franca	5.12	1.79	3.09	0.15	11.94	11.15	13.60	3.91	2.83	0.25	0.01	7.00
PA-039	Pastos	65.90	18.10	16.00	Franco arenosa	5.54	0.92	1.58	0.08	11.49	9.76	5.14	1.06	1.19	0.30	0.00	2.55
PA-040	Pastos	65.70	16.20	18.10	Franco arenosa	5.65	1.45	2.51	0.13	11.18	11.68	7.34	2.84	2.11	0.16	0.00	5.11
BG-001	Bosques de galería	18.80	50.70	30.50	Franco arcillosa limosa	6.42	2.21	3.81	0.19	11.63	4.96	13.054	4.83	5.78	0.19	0.02	10.82
BG-002	Bosques de galería	35.20	42.50	22.30	Franca	6.57	1.44	2.48	0.12	12.00	11.40	8.89	4.00	4.47	0.26	0.01	8.74
BG-003	Bosques de galería	37.30	34.40	28.30	Franco arcillosa	6.14	0.61	1.05	0.05	12.17	7.22	6.81	1.80	1.77	0.19	0.04	3.80
BG-004	Bosques de galería	27.10	44.50	28.40	Franco arcillosa	5.87	1.04	1.79	0.09	11.54	7.15	8.15	2.03	1.73	0.10	0.02	3.97
BG-005	Bosques de galería	49.50	30.30	20.20	Franca	5.25	1.21	2.08	0.10	12.05	15.28	8.03	3.80	2.83	0.14	0.01	6.78
CU-016	Cultivos de plátano	63.80	22.10	14.10	Franco arenosa	5.17	0.38	0.66	0.03	12.71	2.66	6.16	0.86	0.64	0.08	0.03	1.61
CU-017	Cultivos de plátano	65.40	22.50	12.10	Franco arenosa	5.20	0.85	1.46	0.07	12.12	6.97	5.12	1.76	1.66	0.14	0.04	3.60
CU-018	Cultivos de plátano	49.20	30.60	20.20	Franca	5.15	0.86	1.48	0.07	12.29	2.02	7.46	1.61	1.98	0.13	0.02	3.74
CU-019	Cultivos de plátano	51.30	28.60	20.10	Franca	4.98	0.81	1.39	0.07	11.55	6.21	7.05	1.20	1.56	0.13	0.02	2.91
CU-020	Cultivos de plátano	39.50	38.30	22.20	Franca	5.13	0.90	1.55	0.08	11.22	5.11	10.35	1.98	2.06	0.10	0.01	4.15
PA-031	Pastos	34.90	44.90	20.20	Franca	5.39	1.43	2.46	0.12	11.89	17.01	10.48	7.66	3.27	0.24	0.06	7.52
PA-032	Pastos	20.50	53.10	26.40	Franco limosa	6.06	1.43	2.47	0.12	11.95	14.58	12.15	10.78	3.94	0.21	0.06	14.99

PA-033	Pastos	51.20	28.60	20.20	Franca	5.53	0.94	1.62	0.08	11.74	12.61	6.96	1.58	2.30	0.55	0.03	4.46
PA-034	Pastos	32.70	38.90	28.40	Franco arcillosa	5.22	1.51	2.6	0.13	11.60	15.72	12.46	2.11	2.98	0.40	0.07	5.56
PA-035	Pastos	36.80	40.90	22.30	Franco	5.30	1.52	2.62	0.13	11.71	17.22	12.49	2.55	2.76	0.25	0.05	5.61
BG-011	Bosques de galería	79.90	10.00	10.10	Franco arenosa	4.82	1.02	1.75	0.09	11.29	24.85	5.66	0.82	1.21	0.27	0.00	2.30
BG-012	Bosques de galería	85.90	6.10	8.00	Arenoso franco	4.70	0.94	1.61	0.08	11.70	16.71	4.73	0.51	0.70	0.11	0.00	1.32
BG-013	Bosques de galería	81.90	8.10	10.00	Arenoso franco	4.83	0.79	1.36	0.07	11.24	30.07	4.97	0.51	0.66	0.14	0.00	1.31
BG-014	Bosques de galería	86.00	6.00	8.00	Arenoso franco	4.73	0.70	1.21	0.06	11.67	17.70	5.12	0.51	0.66	0.14	0.00	1.16
BG-015	Bosques de galería	73.90	14.00	12.10	Franco arenosa	4.84	0.94	1.62	0.08	11.73	19.91	6.65	0.76	0.02	0.16	0.00	1.94
PA-041	Pastos	73.80	18.20	8.00	Franco arenosa	5.47	1.19	2.05	0.10	11.86	2.70	5.97	0.18	0.21	0.13	0.04	0.56
PA-042	Pastos	73.80	14.10	12.10	Franco arenosa	5.62	1.25	2.15	0.11	11.33	6.84	4.714	0.42	0.83	0.32	0.08	1.65
PA-043	Pastos	61.80	18.10	20.10	Franco arcillo arenosa	5.15	0.83	1.43	0.07	11.81	0.41	5.62	0.09	0.11	0.05	0.04	0.29
PA-044	Pastos	69.90	16.00	14.10	Franco arenosa	5.05	0.72	1.24	0.06	12.02	0.70	4.44	0.04	0.07	0.05	0.03	0.19
PA-045	Pastos	73.90	16.10	14.10	Franco arenosa	5.18	0.69	1.18	0.06	11.46	1.04	3.31	0.05	0.08	0.05	0.02	0.20