

UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSERVACIÓN



Evaluación de la macrofauna edáfica, como indicador de la salud del suelo en las áreas de Frutales y Finca Demostrativa El Espino de la Universidad Nacional de Agricultura, Catacamas, Honduras.

PROYECTO DE TESIS

Presentado como requisito parcial previo a la realización del trabajo de investigación

Por:

Bayron Josue Argueta Perez

Catacamas, Olancho

Septiembre 2025

Evaluación de macrofauna edáfica, como indicador de la salud del suelo en las áreas de
Frutales y Finca Demostrativa El Espino de la Universidad Nacional de Agricultura,
Catacamas, Olancho.

Por:

Bayron Josue Argueta Perez

Ph.D. José Trinidad Reyes Sandoval
Director de tesis

TESIS

Presentado como requisito parcial para obtener el título de

INGENIERO EN GESTIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES

Catacamas, Olancho

Septiembre, 2025

ACTA DE SUSTENTACIÓN

DEDICATORIA

A Dios, por ser la luz que guía mi camino, por darme la sabiduría necesaria para comprender y aprender, la fortaleza para perseverar en media de las dificultades y la vida misma como el regalo más valioso. Gracias por darme el entendimiento para enfrentar cada desafío con esperanza y por permitirme culminar con éxito esta etapa tan importante de mi formación.

A mi madre Maria Esperanza Perez y mi padre Encarnacion Argueta Garcia, quienes con su amor incondicional, sacrificio y esfuerzo han sido el pilar fundamental en cada etapa de mi vida. Esta meta alcanzada es también de ustedes, porque sin su fortaleza, paciencia y confianza, este camino no habría sido posible.

A mis hermanos, quienes con sus palabras y ejemplo me motivan cada día a continuar persiguiendo mis metas y sueños. Gracias por su apoyo incondicional, por ser una fuente de ánimo en los momentos difíciles y por recordarme la importancia de la unión y la familia.

A Merci Karolina Reyes Hernandez, por su apoyo incondicional en cada momento de este camino, por brindarme siempre palabras de aliento y motivación para seguir adelante, incluso en los días más difíciles. Gracias por creer en mí, por confiar en mis capacidades, y por ser una fuente constante de ánimo, compañía y fortaleza.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la vida, la fortaleza y la sabiduría para culminar con éxito este trabajo.

A mis padres, por ser mi mayor inspiración, por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo y por acompañarme con amor y paciencia en cada etapa de mi vida.

A Patrick Lavelle, por su valioso apoyo y orientación durante la realización de este trabajo, cuya experiencia y disposición fueron fundamentales para alcanzar este logro.

A mi hermano Ridi Wilian Argueta Perez, por estar siempre a mi lado, brindándome fuerza, motivación y apoyo en cada paso, y por ayudarme a alcanzar este logro.

Argueta Perez B. J 2025. Evaluación de macrofauna edáfica, como indicador de la salud del suelo en las áreas de Frutales y Finca Demostrativa El Espino de la Universidad Nacional de Agricultura. Ingeniería en gestión de los recursos naturales. Universidad Nacional de Agricultura, Catacamas, Olancho, Honduras. 80 pág.

RESUMEN

El trabajo de investigación realizado en las áreas de Frutales y Finca Demostrativa El Espino de la UNAG evaluó la macrofauna edáfica como bioindicador de la salud del suelo porque a pesar de la importancia de la macrofauna como indicador de la salud del suelo, existen pocos estudios en la región que aborden esta temática, encontrando que el tipo de uso del suelo influye significativamente en la diversidad y abundancia de organismos. Se identificaron 10 grupos taxonómicos, siendo lombrices y hormigas los más representativos. Los suelos en el área de frutales (cacao) alcanzaron los valores más altos de riqueza y abundancia, reflejando mayor calidad edáfica, mientras que los de maíz, potreros y baldíos presentaron los valores más bajos (índices de 0.39 a 0.43), evidenciando degradación por prácticas de labranza intensiva y baja cobertura vegetal. En cuanto a las propiedades fisicoquímicas, como la materia orgánica, pH y porosidad, estuvieron estrechamente relacionados con la composición de la macrofauna confirmando una fuerte correlación entre la diversidad y condiciones del suelo, donde suelos compactados y arcillosos redujeron la presencia de macrofauna. El análisis de coinercia confirmó una fuerte correlación entre la composición de la macrofauna y las características del suelo (89.3% de la covarianza total, $p = 0.003$). Aunque la temporada lluviosa favoreció una mayor homogeneidad y abundancia de organismos frente a la seca, el efecto no fue estadísticamente significativo ($p = 0.053$). La macrofauna edáfica se consolidó como un indicador sensible y confiable de la calidad del suelo, evidenciando que los sistemas con mayor cobertura vegetal y manejo sostenible mantienen mejores condiciones biológicas y fisicoquímicas frente a los de uso intensivo.

Palabras clave: Correlación, salud del suelo, uso de suelo.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN.....	iv
LISTADO DE FIGURAS	vii
LISTADO DE TABLAS.....	viii
LISTA DE ANEXOS	ix
I INTRODUCCIÓN	1
II OBJETIVOS	3
III HIPÓTESIS.....	4
IV REVISIÓN DE LITERATURA	5
4.1 Calidad del suelo	5
4.1.1 Concepto de calidad del suelo.....	5
4.1.2 Importancia de la calidad del suelo en la sostenibilidad agrícola	5
4.1.3 Factores que afectan la calidad del suelo en distintos usos.....	6
4.2 Macrofauna del suelo como indicador de calidad	7
4.2.1 Macrofauna edáfica	7
4.2.2 Funciones ecológicas de la macrofauna	8
4.2.3 Macrofauna como bioindicador de salud del suelo.....	10
4.3 Impacto del uso del suelo en la macrofauna.....	11
4.3.1 Efecto de los usos agrícolas en la macrofauna.....	12
4.3.2 Influencia del uso frutícola en la macrofauna	12
4.3.3 Comparación entre suelos naturales y cultivados	13
V MATERIALES Y MÉTODOS	15
5.1 Descripción de las áreas de estudio	15
5.1.1 Área de Frutales de la Universidad Nacional de Agricultura.....	16
5.1.2 Área de Finca demostrativa El Espino de la Universidad Nacional de Agricultura	16
5.2 Materiales y equipo.	17
5.2.1 Materiales y equipos para el análisis de macrofauna edáfica (TSBF)	17
5.3 Enfoqué metodológico.....	18
5.3.1 Metodología	18
5.3.2 Descripción del diseño de campo.....	18

5.3.3	Macrofauna edáfica del suelo.....	19
5.3.4	Análisis fisicoquímicos del suelo.....	21
5.3.5	Análisis de las comunidades de macrofauna de suelo.....	22
5.3.6	Análisis estadístico.....	22
VI	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
6.1	Comunidades de macrofauna.....	24
6.1.1	ACP de las comunidades de macrofauna en el suelo	26
6.1.2	Análisis de las comunidades de macrofauna en relación con los sitios de muestreo.....	28
6.1.3	Análisis BCA de cionercia para las comunidades de macrofauna por los diferentes sitios	29
6.1.4	Análisis de las comunidades de macrofauna edáfica y temporada del año.....	30
6.1.5	Análisis entre clases (BCA) de cionercia para las comunidades de macrofauna por las temporadas del año.....	32
6.1.6	Correlación entre grupos de macrofauna e índices ecológicos	34
6.2	Propiedades fisicoquímicas	35
6.2.1	Análisis de componentes principales de las propiedades fisicoquímicas	36
6.2.2	Análisis de las variables fisicoquímicas en relación con los sitios de muestreo	38
6.2.3	Análisis de cionercia entre clases y test de Montecarlo para las propiedades de fisicoquímicas del suelo por los diferentes sitios.....	39
6.2.4	Análisis de las variables fisicoquímicas en relación con la temporada del año.	41
6.2.5	Análisis de cionercia entre clases (BCA) Y test de monte calo para las propiedades de fisicoquímicas del suelo por las temporadas del año	42
6.2.6	Correlaciones entre variables fisicoquímicas del suelo.....	43
6.3	Análisis de coinercia entre las comunidades de macrofauna y propiedades fisicoquímicas del suelo.....	45
6.3.1	Proyección factorial del análisis de coinercia	47
6.3.2	Proyección factorial del análisis de coinercia propiedades fisicoquímicas.....	48
6.3.3	Evaluación de la significancia estadística del análisis de cionercia.....	49
6.4	Dendograma del análisis clúster de los diferentes uso de suelo en el área de Frutales y finca demostrativa El Espino.....	50
6.4.1	Distribución de las comunidades de macrofauna en los diferentes usos de suelo en las áreas de Frutales y Finca Demostrativa El Espino.	53
VII	CONCLUSIONES	55
VIII	RECOMENDACIONES.....	56
IX	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de la Universidad Nacional de Agricultura	15
Figura 2. Puntos de muestreo de las áreas de Frutales y finca demostrativa El Espino.....	19
Figura 3: Indicador global de la composición, abundancia y diversidad de la comunidad de macroinvertebrados en Frutales y Finca demostrativa El Espino	25
Figura 4. Análisis de componentes principales de la macrofauna y los diferentes usos de suelo	26
Figura 5. Agrupación de las muestras por sitios según la composición de la macrofauna .	28
Figura 6. Histograma del test de Monte Carlo aplicado al análisis de coherencia entre las comunidades de macrofauna y los sitios de muestreo.....	30
Figura 7. Agrupación de las muestras por temporadas del año según la composición de la macrofauna	32
Figura 8. Histograma del test de Monte Carlo aplicado al análisis de coherencia entre las comunidades de macrofauna y las temporadas del año.....	34
Figura 9. Coeficiente de correlación de Pearson para las comunidades de macrofauna....	35
Figura 10. Análisis de componentes principales de las variables fisicoquímicas del suelo y los diferentes usos del suelo.	36
Figura 11. Agrupación de las muestras por los diferentes sitios según las propiedades fisicoquímicas.....	39
Figura 12. Histograma del test de Monte Carlo aplicado al análisis de coherencia entre las propiedades fisicoquímicas y los sitios de muestreo.....	40
Figura 13. Agrupación de las muestras por temporadas del año según las propiedades Fisicoquímicas del suelo.	41
Figura 14. Histograma del test de Monte Carlo aplicado al análisis de coherencia entre las propiedades fisicoquímicas y las temporadas del año.....	43
Figura 15. Coeficiente de correlación de Pearson de las propiedades fisicoquímicas del suelo.	44
Figura 16. Análisis de coherencia de la macrofauna y las propiedades fisicoquímicas en los diferentes usos de suelo.....	47
Figura 17. Proyección factorial del análisis de coherencia de las propiedades fisicoquímicas del suelo.	48
Figura 18. Histograma del test de Monte Carlo aplicado al análisis de coherencia entre las comunidades de macrofauna y las propiedades fisicoquímicas del suelo.....	50
Figura 19. Dendrograma del análisis de clúster de los diferentes usos de suelo de las áreas de estudio.	51
Figura 20. Distribución de las comunidades de macrofauna en los diferentes usos de suelo en las áreas de Frutales y Finca Demostrativa El Espino	54

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Grupos que componen la macrofauna del suelo.....	10
Tabla 2. Métodos utilizados para determinar las variables físicas y químicas.....	21
Tabla 3: Contribución de los factores 1 y 2 a la inercia total en los PCA de datos de macrofauna, variables físico-químicas y análisis de coinercia realizados en cada par de subconjuntos de variables.	46

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Tabla de datos generales de los puntos de muestreo del área de Frutales y finca demostrativa El espino	61
Anexo 2. Tabla de Comunidades de macrofauna en los diferentes uso de suelo en el área de Frutales.	62
Anexo 3. Tabla de Comunidades de macrofauna en los diferentes uso de suelo en la Finca demostrativa El Espino.....	63
Anexo 4. Tabla Valores de las variables fisicoquímicas en el área de Frutales	64
Anexo 5. Tabla Valores de las variables fisicoquímicas en el área de la Finca demostrativa El Espino.....	65
Anexo 6. Método de extracción del monolito 25 x 25 para la identificación y cuantificación de la macrofauna del suelo (TSBF).....	66
Anexo 7. Identificación y clasificación de las comunidades macrofauna del suelo	66
Anexo 8. Densidad porcentual de los grupos taxonómicos de la macrofauna en las áreas de Frutales Y Finca demostrativa El Espino	67
Anexo 9. ACP de la macrofauna de los diferentes usos de suelo en las áreas de Frutales y Finca Demostrativa El Espino.....	67
Anexo 10. ACP de la macrofauna de los distintos grupos taxonomicos en las áreas de Frutales y Finca Demostrativa El Espino.....	68
Anexo 11. ACP de las propiedades fisicoquimicas de los diferentes usos de suelo en las áreas de Frutales y Finca Demostrativa El Espino	68
Anexo 12. ACP de las propiedades fisicoquimicas en las áreas de Frutales y Finca Demostrativa El Espino.....	69

I INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural esencial para la vida en la Tierra, desempeñando funciones fundamentales en el sostenimiento de los ecosistemas a través de procesos como los ciclos del agua, carbono, nitrógeno y fósforo, que son críticos para la regulación climática, la producción agrícola y la biodiversidad. Sin embargo, las actividades humanas intensivas, particularmente en sistemas agrícolas, han acelerado el deterioro del suelo, afectando negativamente su estructura, fertilidad y capacidad para sostener la vida. Esta degradación resalta la necesidad urgente de desarrollar mecanismos efectivos para monitorear y evaluar la calidad del suelo, especialmente agroecosistemas intensivos.

En este contexto, el análisis de la macrofauna del suelo, que incluye organismos como lombrices, hormigas, escarabajos, y otros invertebrados, se ha convertido en una herramienta prometedora para evaluar el estado de salud del suelo. La macrofauna, con su rol clave en la estructura y la fertilidad del suelo, no solo actúa como un indicador biológico sensible a las prácticas de manejo agrícola, sino que también refleja la capacidad del suelo para mantener su funcionalidad a largo plazo. Estos macroorganismos participan activamente en procesos como la descomposición de materia orgánica, la formación de agregados del suelo y la mejora de la porosidad, contribuyendo así a la fertilidad y estructura del suelo.

En Honduras, la Universidad Nacional de Agricultura (UNAG), ubicada en Catacamas, Olancho, alberga sistemas de producción agrícola y de frutales que representan una oportunidad única para estudiar la interacción entre la macrofauna del suelo y la calidad del suelo en condiciones agroecológicas locales. La región enfrenta desafíos significativos en términos de sostenibilidad del suelo, tales como la compactación y la pérdida de materia orgánica, los cuales pueden comprometer tanto la productividad a corto plazo como la resiliencia de los sistemas agrícolas y frutícolas. En este contexto, el análisis de la macrofauna del suelo surge como una herramienta accesible y efectiva para evaluar la calidad del suelo, proporcionando información valiosa que puede orientar prácticas de manejo sostenible.

A pesar de la importancia de la macrofauna como indicador de la salud del suelo, existen pocos estudios en la región que aborden esta temática, especialmente en sistemas de producción específicos de la UNAG. Este estudio busca llenar este vacío de conocimiento al evaluar la salud del suelo a través del análisis de la diversidad y abundancia de macrofauna en áreas de Frutales y Finca Demostrativa El Espino de la universidad. En respuesta a esta necesidad, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la salud del suelo a través del análisis de la macrofauna en diversas áreas de cultivo, proporcionando así datos empíricos que puedan orientar el manejo sostenible del suelo y contribuir a la conservación de los ecosistemas locales bajo condiciones agroecológicas específicas.

Esta investigación contribuirá con el conocimiento científico sobre la calidad del suelo y también tendrá aplicaciones prácticas para el manejo agrícola en la región. Los resultados esperados podrían sentar las bases para futuras políticas de conservación de suelos y servir como referencia para agricultores interesados en la agricultura sostenible y en la preservación de los recursos naturales.

.

II OBJETIVOS

Objetivo general:

Evaluar la diversidad y abundancia de la biodiversidad de la macrofauna edáfica como indicador biológico de la salud del suelo en las áreas de frutales y finca demostrativa El Espino de la Universidad Nacional de Agricultura.

Objetivos específicos:

Cuantificar la diversidad y abundancia de la macrofauna en distintas áreas de cultivo y usos del suelo, identificando las especies presentes en cada tipo de manejo agrícola.

Evaluar el efecto de los diferentes usos y prácticas de manejo del suelo sobre la composición y distribución de la macrofauna del ecosistema edáfico.

Analizar la relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la biodiversidad de la macrofauna edáfica en diversos sistemas de cultivo.

III HIPÓTESIS

Nula

Los diferentes usos de suelo no ejercen un afecto significativo sobre la población, abundancia ni sobre la diversidad de la macrofauna edáfica presente en el área de Frutales y Finca Demostrativa El Espino.

Alternativa

Los diferentes usos de suelo influyen de manera significativa en la población, abundancia y diversidad de la macrofauna edáfica presente en el área de Frutales y Finca Demostrativa El Espino.

.

IV REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Calidad del suelo

4.1.1 Concepto de calidad del suelo

Calidad del suelo es definida, simplemente, como la “capacidad de funcionar de un específico tipo de suelo”. En general es evaluada midiendo un grupo mínimo de datos de propiedades del suelo para estimar la capacidad del suelo de realizar funciones básicas (por ej. mantener la productividad, regular y separar agua y flujo de solutos, filtrar y tamponar contra contaminantes, y almacenar y reciclar nutrientes). La calidad del suelo abarca los componentes físicos, químicos y biológicos del suelo y sus interacciones (USDA 1999).

La calidad del suelo es fundamental para las prácticas agrícolas. Un suelo fértil y sano le provee a las plantas los nutrientes esenciales para crecer y desarrollarse y las características físicas del suelo como su estructura y sus agregados le permiten al agua y al oxígeno llegar a las raíces de las plantas. La calidad del suelo quiere decir la capacidad de un tipo específico de suelo de funcionar para sostener la productividad de las plantas y de los animales, mantener o mejorar la calidad del agua y del aire y también de mantener la sanidad y la vivienda de los humanos (Stivers 2023).

4.1.2 Importancia de la calidad del suelo en la sostenibilidad agrícola

La salud del suelo se caracteriza por la capacidad de este para funcionar como un ecosistema vivo, proporcionando servicios ecosistémicos esenciales, como el ciclo de nutrientes, la retención de agua y el control de plagas. Los componentes clave de la salud del suelo son la materia orgánica, la estructura del suelo y una población diversa de microorganismos.

Para los cultivos, un suelo sano se traduce en raíces más fuertes, una mejor infiltración del agua y una mejor absorción de nutrientes, lo que se traduce en un mayor crecimiento y rendimiento (Nix 2023).

La salud del suelo también desempeña un papel clave en la salud del medio ambiente. Gracias a su capacidad para almacenar carbono, un suelo sano contribuye a mitigar el cambio climático. Además, las prácticas agrícolas que fomentan la salud del suelo pueden ayudar a mejorar la calidad del agua y aumentar la biodiversidad, creando un ecosistema agrícola más sostenible y resistente. En general, mantener un suelo sano hace que la explotación intergeneracional siga siendo productiva y rentable para las generaciones futuras y ayuda a preservar el planeta (Nix 2023).

4.1.3 Factores que afectan la calidad del suelo en distintos usos

Estos tres factores influyen en la calidad del suelo, su estructura y, como consecuencia, en la asimilación de nutrientes por la planta.

La causa principal de toda sequía es la falta de lluvias o precipitaciones, sin embargo, existen dos tipos de sequía: el primer tipo de sequía es la meteorológica, que se produce por falta de precipitaciones como ya se ha indicado. Cuando la sequía meteorológica es prolongada, ésta deriva en una sequía hidrológica, que se basa en la desigualdad entre la disponibilidad natural de agua y las demandas naturales de agua. Por otro lado, la acidez del suelo mide la concentración en hidrogeniones y se mide según el pH. El peachímetro es el aparato que mide el nivel de pH y clasifica el suelo en una escala de acidez con un valor entre el tres y el 12. Los tres factores principales que hacen que el suelo tenga un determinado valor de pH son la naturaleza del material original, los residuos de la actividad orgánica y el clima. Por lo general, los climas húmedos originan suelos ácidos. Los pH neutros son los mejores para las propiedades físicas de los suelos (CIFL_A 2019).

Finalmente, la salinidad del suelo hace referencia a la cantidad de sales en el terreno. El motivo de la salinidad en el suelo es por la acumulación de sales en capas inferiores del terreno y salen a la superficie por la acción capilar, aunque en ocasiones se debe a la actividad humana, como el uso de fertilizantes, actividades relacionadas con la acuicultura o el desmonte de tierras. El cambio climático también influye en la acumulación de sales. Se dice que un suelo es salino cuando su conductividad eléctrica (CE) es superior a cuatro dS/m en el extracto saturado. La existencia de sales afecta a la estructura del suelo, a la asimilación de nutrientes por la planta y a la actividad microbiana del suelo (CIFL_A 2019).

4.2 Macrofauna del suelo como indicador de calidad

La identificación de los indicadores de la calidad del suelo es actualmente un problema universal, debido a la importancia de este recurso para la producción vegetal y para la alimentación animal y humana. Por lo general, se han utilizado un grupo de variables para predecir la salud del suelo, a partir del estado de sus propiedades físicas, químicas y/o biológicas. Desde el punto de vista biológico, en la evaluación del estado de conservación/perturbación del suelo y del ecosistema se puede tomar en cuenta la macrofauna edáfica, que actúan como ingenieros del ecosistema en la formación de poros, la infiltración de agua y la humificación y mineralización de la materia orgánica (Grisel 2010).

4.2.1 Macrofauna edáfica

La macrofauna del suelo incluye a los invertebrados visibles a simple vista que viven, total o parcialmente, dentro del suelo o inmediatamente sobre él. Estos invertebrados (lombrices de tierra, termitas, hormigas, milpiés, ciempiés, arañas, escarabajos, gallinas ciegas, grillos, chicharras, caracoles, escorpiones, chinches y larvas de moscas y de mariposas) pueden incluir más de un millar de especies en un sólo ecosistema y alcanzar densidades y biomásas de más de un millón de individuos y más de una tonelada por hectárea, respectivamente. Estos organismos ejecutan múltiples funciones en el ecosistema y pueden ser divididos en varias clases, usando diversas clasificaciones de grupos funcionales (George G 2001).

La macrofauna edáfica está compuesta por animales invertebrados que pasan toda o una parte de su vida dentro del suelo, sobre la superficie inmediata de éste, en la hojarasca superficial y los troncos caídos en descomposición. Poseen un ancho de cuerpo o diámetro mayor de dos mm y una longitud igual o mayor de 10 mm; por lo que son posibles de detectar a simple vista (George G 2001).

Por otra parte, a partir de su función e impacto en el suelo, de su forma de vida y de su fuente de alimentación o hábito alimentario, la macrofauna se puede dividir en distintos grupos funcionales, entre ellos los detritívoros, los herbívoros y los depredadores, y con una repercusión especial en la evolución y productividad del suelo por lo que se pueden señalar a los ingenieros del ecosistema (Zerbino 2008).

4.2.2 Funciones ecológicas de la macrofauna

a) Detritívoros

Viven en la hojarasca, en la superficie e interior del suelo. Interviene en la descomposición de la materia orgánica y, fundamentalmente los invertebrados que habitan en la superficie, se encargan de la trituración de los restos vegetales y animales que componen la hojarasca. La fragmentación mecánica de estos restos hace que haya mayor disponibilidad de alimentos para otros invertebrados más pequeños y para los microorganismos (por ejemplo: hongos y bacterias), jugando los detritívoros un papel importante en el reciclaje de nutrientes. En la literatura especializada se menciona, además, que algunos individuos detritívoros podrían ser omnívoros no selectivos; siendo los organismos omnívoros consumidores de todo tipo de material de origen vegetal o animal (Cabrera 2007).

b) Macroinvertebrados (herbívoros o depredadores)

Viven tanto en el interior como en la superficie del suelo. Los primeros se alimentan de las partes vivas de las plantas y así controlan la cantidad de material vegetal que ingresa al suelo; mientras los depredadores consumen diversos invertebrados, por lo que modifican el equilibrio de sus poblaciones y el balance entre estas y los recursos disponibles del ecosistema (Cabrera *et al.*2007).

c) Ingenieros del suelo o del ecosistema.

Constituyen una clasificación relacionada especialmente con los cambios físicos que provocan en el medio edáfico (Jones *et al.*1994).

Los ingenieros existen mayormente en el interior del suelo y son responsables de la formación de poros, de la oxigenación y de la infiltración de agua, producto de las redes de galerías que construyen. También posibilitan la transformación de la materia orgánica por su interacción con algunos microorganismos. Influyen en el proceso de agregación y formación de la estructura del suelo gracias al aporte de sus heces fecales, que son el producto de la mezcla en sus intestinos de material mineral (arena y arcilla) y orgánico del suelo, constituyendo reservorios de nutrientes (Sánchez *et al.* 2022).

A continuación se detallan los grupos de invertebrados que integran la macrofauna edáfica y que con mayor frecuencia se encuentran en el suelo, así como las diferentes funciones que ellos realizan.

Tabla 1. Grupos que componen la macrofauna del suelo.

Nombre común	Grupo taxonómico reconocido (Clase, Orden o Familia)	Grupo funcional
Lombrices de tierra	Orden : Haplotaxida Familia: Megascolecidae Especie Polypheretima, Onychochaeta elegans	Detritívoros e Ingenieros del suelo
Babosas y caracoles	Familia Subulinidae Especie : Subulina octona	Detritívoros Depredadores
Cochinillas	Orden: Isopoda Familia Trachelipidae	Detritívoros
Milpiés	Clase: Diplopoda	Detritívoros
Ciempíes	Clase: Chilopoda	Depredadores
Arañas	Oden: Araneae	Depredadores
Arañas patonas	Orden: Opiliones	Depredadores
Falsos escorpiones	Orden: Pseudoscorpionida	Depredadores
Cucarachas	Clase: Insecta Orden: Dictyoptera	Detritívoros Herbívoros, Omnívoros
Escarabajos	Clase: Insecta Orden: Coleoptera	Detritívoros
Tijeretas	Clase: Insecta Orden: Dermaptera	Herbívoros Depredadores
Moscas y mosquitos	Clase: Insecta Orden: Diptera	Detritívoros Depredadores
Chinchas y salta hojas	Clase: Insecta Orden: Hemiptera	Detritívoros Depredadores
Hormigas	Clase: Insecta Orden: Hymenoptera	Herbívoros
Termitas o comejenes	Clase: Insecta Orden: Isoptera	Omnívoros, Depredadores e Ingenieros del suelo
Mariposas y orugas	Clase: Insecta Orden: Lepidoptera	Detritívoros e Ingenieros del suelo
Grillos y saltamontes	Clase: Insecta Orden: Orthoptera	Herbívoros

Fuente: (Cabrera 2007)

4.2.3 Macrofauna como bioindicador de salud del suelo

Los indicadores biológicos a diferencia de los métodos físicos y químicos permiten inferir de forma más rápida y práctica el estado de salud del suelo, ya que son capaces de manifestar cambios en un corto periodo de tiempo producto de las perturbaciones del medio (Cabrera Davila 2017).

Para determinar la calidad de los ecosistemas edáficos y el impacto que ejercen los usos de la tierra, se considera que la macrofauna es un excelente referente como indicador biológico;

debido a que ejerce una visible función ecológica y efecto en las propiedades físicas y químicas del suelo, en periodos de tiempo marcados por diversas condiciones climáticas o cambios en la cobertura vegetal (Rousseau *et al.* 2013; Gómez *et al.* 2016; Pauli *et al.* 2016;) citado por (Quiroz 2020).

La comunidad de macrofauna del suelo está asociada directa e indirectamente con la calidad del suelo y la sostenibilidad agrícola (Brussaard *et al.* 2007). Estos invertebrados juegan un papel clave en la provisión de servicios ecosistémicos del suelo ya que su densidad y diversidad están asociadas con un mejor funcionamiento del suelo (Lavelle *et al.* 2006, Rousseau *et al.* 2014).

Los grupos taxonómicos amplios de macrofauna del suelo (clase, orden o familia) a menudo se utilizan para evaluar las estrategias de manejo del suelo y el proceso de restauración (Vasconcellos *et al.* 2013, Rousseau *et al.* 2013), dado que están fuertemente influenciados por los sistemas de uso de la tierra y producen una respuesta rápida (Rousseau *et al.* 2022).

4.3 Impacto del uso del suelo en la macrofauna

La macrofauna edáfica es determinante en la fertilidad del suelo y, por ende, en el funcionamiento global del sistema edáfico (Cabrera *et al.* 2011; Cabrera 2012); por consiguiente, varios autores proponen el uso de estos organismos como indicadores de la calidad o alteración del suelo, debido a que pueden ser afectados por diferentes usos y manejos del suelo; son susceptibles y presentan una rápida respuesta a los cambios en la cobertura vegetal, transformación de la diversidad y composición florística, así como a otras variables ambientales (P. Lavelle 2003; LangOvalle *et al.* 2011) citado por (Cabrera *et al.* 2019).

Como indicador biológico del estado de conservación y/o perturbación del suelo, la macro y mesofauna edáfica debe estar relacionada con los atributos físicos y químicos del suelo, que a la vez manifiestan la productividad del ecosistema (Bedano *et al.* 2006; Botina *et al.* 2012; Tapia-Coral *et al.* 2016).

Dentro de la macrofauna edáfica se encuentran las lombrices de tierra, las cuales son afectadas por factores como el clima, alimentación, humedad, textura y condiciones químicas del suelo; por lo que éstas manifiestan cambios de composición y abundancia en una corta escala de tiempo (Clapperton, 1999; Momo *et al.* 2003) citado por (Cabrera *et al.* 2019).

4.3.1 Efecto de los usos agrícolas en la macrofauna

Según Odum (1989), las comunidades de organismos del suelo son muy sensibles a los factores climáticos y edáficos que pueden determinar la disponibilidad de alimentos y las condiciones microclimáticas para su desarrollo. Sin embargo, este comportamiento no constituye una limitante, sino que por el contrario representa el potencial que brinda la naturaleza para evaluar el efecto negativo o positivo que presentan algunas técnicas agrícolas en la macrofauna del suelo (Reinés 2001).

Los resultados obtenidos en Colombia por Decaens *et al.* (1994) demostraron que la población de macroinvertebrados del suelo responde claramente a las perturbaciones inducidas por las técnicas de manejo. En este sentido, encontraron una disminución marcada de la diversidad de la fauna cuando aplicaron técnicas como la quema de los pastos, el monocultivo y los cultivos anuales; por otra parte, señalaron que la utilización de sistemas de producción animal basados en el empleo de pasturas mejoradas en asociación presentó un impacto positivo en la macrofauna y especialmente en la población de lombrices, las cuales incrementaron su biomasa de 4,8 a 51,1 g/m² (Reinés 2001).

4.3.2 Influencia del uso frutícola en la macrofauna

El uso frutícola influye significativamente en la macrofauna, con efectos positivos y negativos según las prácticas agrícolas empleadas. Por un lado, los cultivos frutícolas diversificados pueden proporcionar hábitats, alimento y corredores ecológicos que favorecen la biodiversidad, enriqueciendo la cadena trófica y conectando fragmentos de ecosistemas naturales (Lal 2015). Además, la materia orgánica derivada de la caída de frutos y la vegetación asociada beneficia organismos clave del suelo, como lombrices y escarabajos (Altieri 2019).

Sin embargo, el manejo intensivo de estos cultivos puede tener consecuencias adversas. El uso excesivo de agroquímicos y maquinaria pesada reduce la diversidad de macrofauna, afecta organismos benéficos y compacta el suelo, disminuyendo su calidad (Tsiafouli 2015). Además, la expansión de monocultivos a menudo implica la pérdida de hábitats naturales, lo que limita la presencia de polinizadores y depredadores naturales esenciales para la sostenibilidad de los cultivos (Matson 1999).

Para mitigar estos efectos, la adopción de prácticas sostenibles es clave. Sistemas como la agroforestería, el control biológico de plagas y la diversificación de cultivos han demostrado preservar la biodiversidad de la macrofauna y mejorar la salud del suelo (Tsiafouli 2015). Estas estrategias no solo benefician al medio ambiente, sino que también contribuyen a una mayor productividad y resiliencia en los sistemas agrícolas (Lal 2015).

4.3.3 Comparación entre suelos naturales y cultivados

a) Suelo Natural

El suelo natural, según su definición tradicional, es el medio fundamental para el crecimiento de las plantas, compuesto por materiales que permiten el desarrollo de raíces y el intercambio de nutrientes. Es un sistema complejo formado por capas denominadas horizontes, las cuales se generan a lo largo del tiempo mediante procesos de meteorización física, química y biológica.

Estas capas contienen minerales fragmentados, materia orgánica en diversos estados de descomposición, aire y agua, formando un ecosistema dinámico que interactúa con los seres vivos y el clima (Brady & Weil 2019). Su estructura y composición varían según factores como el tipo de roca madre, el clima, el relieve y el tiempo transcurrido en su formación.

b) Suelo cultivado

El suelo cultivado es aquel utilizado para actividades agrícolas, que suelen implicar la remoción de la capa superior del suelo mediante arado, lo que afecta sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

Con el tiempo, este tipo de suelo experimenta un desgaste progresivo de nutrientes esenciales, como nitrógeno, fósforo y potasio, debido a la extracción constante por los cultivos. Además, la labranza reduce la compactación natural del suelo, haciéndolo más vulnerable a la erosión hídrica y eólica (Lal 2020). Este desgaste no solo disminuye la fertilidad, sino que también afecta la capacidad del suelo para retener agua y sostener la biodiversidad edáfica.

c) Diferencias entre un suelo natural y uno cultivado

La principal diferencia entre un suelo natural y uno cultivado radica en su contenido de materia orgánica y su estructura. El suelo natural, rico en humus, recibe constantemente aportes de residuos vegetales y animales que se descomponen de manera natural, manteniendo su fertilidad y capacidad de retención de agua. Por el contrario, los suelos cultivados tienden a perder materia orgánica debido a las prácticas agrícolas intensivas y la exposición al aire y al sol, lo que acelera la oxidación del carbono orgánico (Montgomery 2017). Asimismo, el suelo arado presenta menos resistencia a la erosión, lo que incrementa el riesgo de pérdida de partículas finas, esenciales para la fertilidad.

V MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Descripción de las áreas de estudio

El trabajo de investigación se desarrolló en la finca demostrativa El Espino y en el área de Frutales de la Universidad Nacional de Agricultura, que se encuentra ubicada en el barrio El Espino en Catacamas, Olancho. La Universidad se encuentra aproximadamente a una latitud de 15.8° N, presenta una altitud de 370 msnm, la temperatura media en la región oscila entre los 24° C y 27° C a lo largo del año y la precipitación aproximada es de 900 mm.

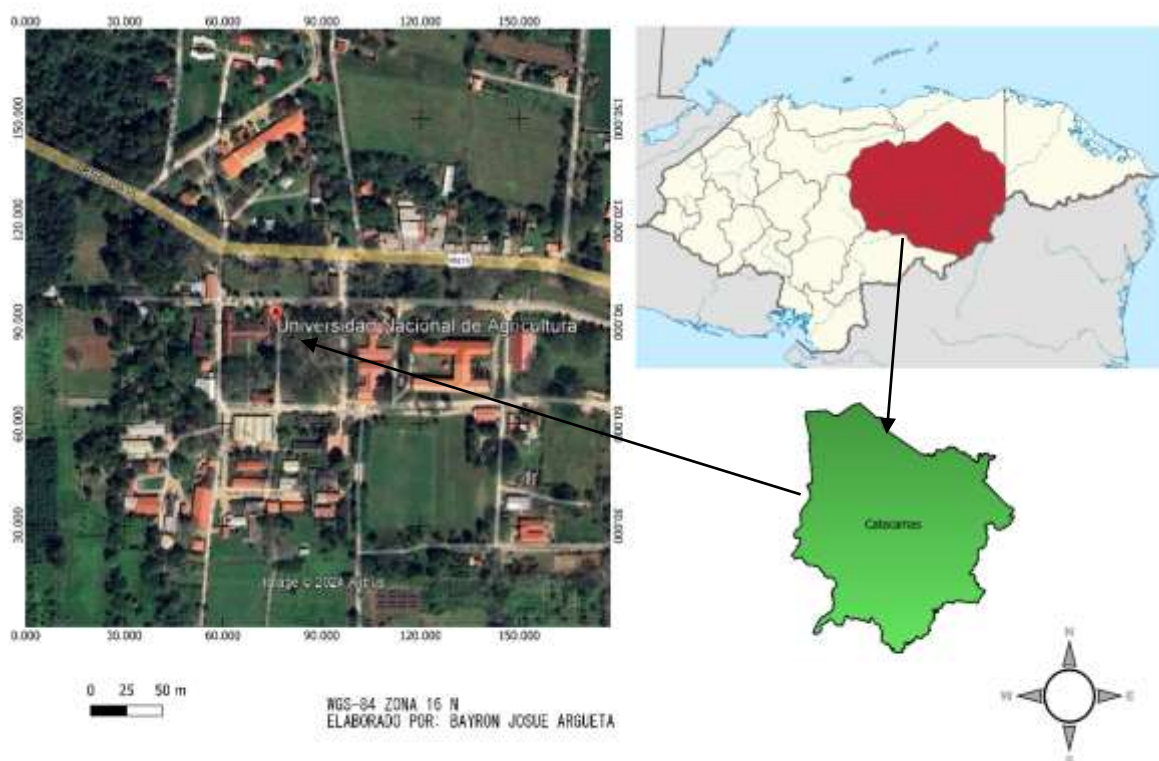


Figura 1. Ubicación geográfica de la Universidad Nacional de Agricultura

5.1.1 Área de Frutales de la Universidad Nacional de Agricultura

El Área de Frutales de la Universidad Nacional de Agricultura está organizada en distintos lotes destinados a una amplia variedad de especies como mango, guayaba, papaya, cacao, aguacate, anonas, albaricoque, guama, palma africana, entre otros. En el caso de los cultivos de mango, cacao, palma africana el manejo es de carácter extensivo, con mínima intervención, ya que únicamente se realizan chapeas o limpiezas periódicas para mantener el terreno libre de malezas, sin la aplicación de insumos agrícolas.

Por otro lado, los cultivos de guayaba y papaya, aguacate se diferencian por presentar un manejo más intensivo, pues en ellos se emplean fertilizantes químicos para mejorar el rendimiento y asegurar una mayor producción, lo que refleja un mayor nivel de tecnificación en comparación con los demás lotes. En cuanto a los cultivos de cacao, aguacate, anonas, leguminosas, guama, albaricoque y palma africana, en su mayoría se manejan con bajos niveles de intervención, limitándose a prácticas básicas de mantenimiento sin un uso intensivo de agroquímicos, lo que permite que se conserven en condiciones más naturales

5.1.2 Área de Finca demostrativa El Espino de la Universidad Nacional de Agricultura

El área de la Finca Demostrativa El Espino de la Universidad Nacional de Agricultura se caracteriza por ser un espacio productivo con distintos usos del suelo, en el que se integran cultivos agrícolas y áreas pecuarias. Una de las principales actividades es el cultivo de maíz, el cual se siembra en terrenos preparados mediante labranza mecanizada, lo que permite un mejor acondicionamiento del suelo y facilita la siembra. Estos lotes de maíz, una vez que finaliza el ciclo productivo, no quedan ociosos, sino que se transforman en potreros, lo que permite un doble aprovechamiento del terreno al ser utilizado tanto para la producción agrícola como para la alimentación del ganado afectando la estructura del suelo.

En cuanto a las áreas de pastos, estas se mantienen con mínima intervención, pues no requieren de un manejo intensivo ni del uso de maquinaria o insumos agrícolas, lo que hace que conserven un carácter más natural. Estas zonas sirven principalmente para sostener el pastoreo, contribuyendo a la disponibilidad de alimento para el ganado durante gran parte del año.

Por otro lado, existen áreas designadas directamente como potreros, que cumplen un papel fundamental en la producción pecuaria de la finca, al ser destinados exclusivamente al pastoreo del ganado. De esta manera, se evidencia que la finca combina de manera estratégica la agricultura y la ganadería, generando un sistema de uso múltiple de la tierra que permite tanto la producción de granos básicos como el sostenimiento de la actividad pecuaria.

5.2 Materiales y equipo.

5.2.1 Materiales y equipos para el análisis de macrofauna edáfica (TSBF)

Para la recolección y análisis de muestras de suelo, es necesario contar con diversos materiales y herramientas que aseguren un procedimiento adecuado. Entre ellos, se utilizan una cinta métrica o regla para delimitar las dimensiones de la muestra (25 x 25 cm) y un cuadrante o marco de madera o metálico que permite marcar con precisión el área de muestreo.

Para la extracción del suelo hasta una profundidad de 10 cm, se emplea una pala o cuchillo de suelo, y las muestras se almacenan en bolsas herméticas o de polietileno grueso, debidamente identificadas con marcadores y etiquetas resistentes que evitan confusiones. En cuanto a la separación y conservación de la macrofauna, se requiere el uso de bandejas plásticas blancas o metálicas que facilitan la observación del contenido, junto con pinzas entomológicas para recolectar los organismos manualmente.

La conservación de los especímenes se realiza con alcohol al 70%, mientras que para las lombrices de tierra se emplea formol al 4%. Finalmente, los organismos preservados se guardan en frascos o tubos de plástico o vidrio con tapa, y se apoyan en una lupa de mano o lupa binocular para la identificación preliminar de pequeños macroinvertebrados.

5.3 Enfoqué metodológico

Se llevó cabo un estudio cuantitativo de tipo descriptivo, cuyo proposito fue especificar las propiedades y características de las variables analizadas. Este tipo de investigación se centra en medir y recolectar información de manera independiente o conjunta sobre las variables de interes, sin manipularlos, con el fin de obtener una descripcion precisa en el estudio (Hernandez 2014).

5.3.1 Metodología

Se presentan las metodologías empleadas en la investigación para analizar la composición taxonómica y la abundancia de la macrofauna edáfica, así como las propiedades físicas y químicas del suelo en los distintos sistemas de manejo en las áreas de estudio.

5.3.2 Descripción del diseño de campo

Se realizó un muestreo estratificado al azar, en el cual la población se dividió en un número determinado de subpoblaciones que fueron muestreadas aleatoriamente. En el área de Frutales, se establecieron 16 subpoblaciones, de las cuales se obtuvieron 18 muestras. Por su parte, en el área de la Finca Demostrativa El Espino se dividió en seis secciones, tomando 2 muestras con un total de 12 muestras, en total se recolectaron 30 muestras durante el proceso de muestro (figura 2).

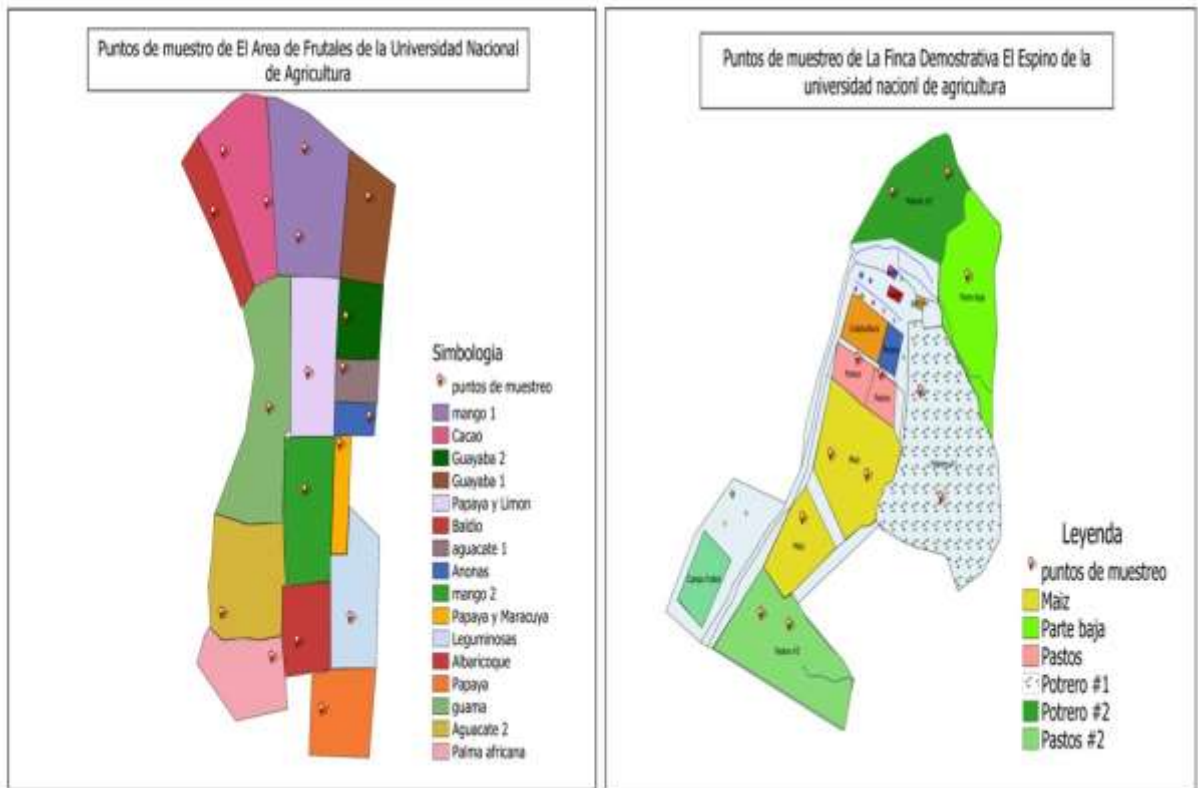


Figura 2. Puntos de muestreo de las areas de Frutales y finca demostrativa El Espino.

5.3.3 Macrofauna edáfica del suelo

La macrofauna edáfica (> 2 mm en tamaño) se muestrearon empleando la metodología TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility) modificada por (Anderson and Ingram 1993). Esta consiste en el aislamiento de una muestra de suelo (dimensiones 25 x 25 cm) a 30 cm de profundidad del perfil, la cual será almacenada en una bolsa hermética.

A continuación se describe detalladamente el procedimiento para la realización de la metodología TSBF:

1. Se establecieron puntos de muestreo con origen al azar.
2. Para la ubicación: se colocó un marco de muestreo (25 x 25 x 30cm). Removiendo rápidamente la hojarasca de dentro del marco y pasar para una bolsa plástica, cerrar inmediatamente y guardar para su posterior clasificación.

3. Se aisló el monolito mediante cortes hacia abajo usando como referencia la parte interna del marco de muestreo.

- Sacando el monolito del suelo usando un palín y procurando una mínima disturbación a su, pasar esa primera profundidad a una bolsa marcada y cerrar.
- Enterrando otra vez el monolito para la otra profundidad del suelo (10-20) y remover como el paso anterior
- Recolectando todos los invertebrados presentes (se espera que sean mayormente miriápodos y lombrices con muy bajas densidades de población, pero con una importante biomasa) lo más rápido posible, pues se deterioran rápidamente.

4. Se dividieron el monolito delimitando capas a tres profundidades: 0-10, 10-20 y 20-30 cm. En sitios donde la fauna del suelo no es muy abundante y/o el método descrito puede producir una disturbación de la muestra no aceptable, remover intactos los primeros 10 cm y luego escarbar hasta los 30 cm (sólo se obtendrían dos muestras, más la de hojarasca). Otras variaciones podrían ser consideradas en función de la abundancia de biomasa en cada capa de muestreo.

5. Se clasificaron la macrofauna del suelo y la hojarasca en bandejas de 50 x 30 cm y cinco cm de alto (también pueden usarse la que se utilizan en los comedores). Para ello depositar por partes la muestra de suelo en la parte izquierda de la bandeja y mover progresivamente hacia la derecha, dispersándola sobre toda la superficie. Después de remover la macrofauna vaciar la bandeja y continuar con la siguiente porción de la muestra.

- Este método es más eficiente para clasificación que los que involucran grandes volúmenes de material.
- Cuando sea posible, separar las sub-muestras mediante el tamizado en húmedo para evaluar la exactitud del método.

6. Se preservaron los invertebrados blandos como las lombrices en formaldehído al 4%, y la demás macrofauna en alcohol al 70%.

7. Se registraron los números y peso seco de los invertebrados de la hojarasca y suelos de acuerdo con la lista taxonómica presentada en el cuadro.

- Si es posible, una división taxonómica más precisa es altamente deseable.
- Información sobre panales de termitas también debe ser registrada.
- Agregados grandes de hormigas o termitas en hojarasca leñosa se colectan mejor como material a granel a ser clasificado en laboratorio.
- En sitios donde se sospecha de la presencia de montículos de termitas o donde se observan nidos de hormigas, enumerarlos en un área determinada y calcular su densidad por hectárea.

5.3.4 Análisis fisicoquímicos del suelo

Las variables físicas y químicas se determinaron a partir de submuestras de suelo obtenidas de las muestras recolectadas para la evaluación de la macrofauna o en muestras sin perturbar del suelo adyacente, que serán almacenadas en bolsas cerradas herméticamente. Este procedimiento se realizó en todos los sistemas de uso de suelo de las áreas de estudio.

A continuación, se detalla las variables que fueron evaluadas y sus métodos para determinarlas:

Tabla 2. Métodos utilizados para determinar las variables físicas y químicas.

Variables	Método utilizado
Físicas	
Textura del suelo	Hidrómetro Bouyoucos
Densidad aparente(g/cm ³)	Cilindro de volumen conocido
Contenido de Humedad	Gravimétrico y volumétrico
Estabilidad de agregados	Método de tamizado
Porosidad del suelo	Método basado densidad aparente y real
Químicas	
pH	Potenciómetro
Materia Orgánica	Walker y Black. Espectrometría molecular
Conductividad eléctrica(dS/m)	Conductividad eléctrica NTC 5596
Respiración Basal del suelo	Método de incubación

Fuente: (Calderón *et al.*2018)

El procesamiento y análisis de las muestras se desarrolló en el laboratorio de suelos en la Universidad Nacional de Agricultura, Catacamas, Olancho.

5.3.5 Análisis de las comunidades de macrofauna de suelo

Para evaluar las comunidades de macrofauna en los diferentes usos de suelo en las áreas de estudio se utilizó la fórmula de indicador global de composición, abundancia y diversidad de las comunidades de macroinvertebrados del suelo según (Hurtado 2024). Para cada tipo de uso de suelo se calculó el valor bruto, aplicando la siguiente formula:

$$\text{RawI} = 18.30 * \text{EW} + 16.83 * \text{AN} + 9.20 * \text{TE} + 7.69 * \text{BL} + 19.62 * \text{CO} + 15.09 * \text{AR} + 18.78 * \text{DO} + 20.12 * \text{CH} + 16.31 * \text{DL} + 11.29 * \text{HM} + 7.58 * \text{DR} + 9.15 * \text{LE} + 15.08 * \text{GA} + 19.82 * \text{OT} + 24.74 * \text{DN} + 27.88 * \text{TR}$$

RawI: Índice de abundancia relativa ponderada, EW: Crassiclitellata (lombrices de tierra), DN: densidad total, TE: Isoptera (termitas), AN: Hymenoptera (hormigas), CO: coleópteros, DP: larvas de dípteros, LE: larvas de lepidópteros, GA: gasterópodos, AR: Arachnida (arañas), BL: blatarios, HM: hemípteros, TR: riqueza taxonómica, DR: dermápteros, OT: otros, CH: quilópodos, DO: diplópodos.

Este indicador permitió estandarizar los valores obtenidos en un solo índice que facilita la comparación entre los distintos usos de suelo, reflejando su calidad ecológica en función de la biodiversidad edáfica observada..

5.3.6 Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se realizaron mediante análisis de componentes principales (ACP), con base en la metodología propuesta por (Velasquez *et al.* 2007), utilizando el entorno R 4.4.1 y la biblioteca ade4 (Análisis de datos ecológicos y del entorno con procedimientos exploratorios euclidianos) (Thioulouse 1998).

Para cada grupo de variables (macrofauna, variables físicas y químicas), se realizó un análisis de componentes principales (ACP) y un análisis utilizando el complemento ADE-4 (Thioulouse 1998). El ACP redujo los datos y construyó combinaciones lineales (componentes principales) de las variables originales que explican gran parte de la variabilidad original total. Se realizaron análisis de coinercia para evaluar la significancia de la covariación de la macrofauna y las variables fisicoquímicas.

En este análisis se utilizaron 29 variables: 10 unidades taxonómicas principales muestreadas, a las que se sumó la densidad total, el número de unidades taxonómicas y el indicador encontradas en cada muestra. Las densidades de invertebrados se convirtieron a valores de $\log_{10}(x + 1)$ para considerar las grandes diferencias en las densidades de insectos sociales frente a otros. Los valores de riqueza taxonómica se convirtieron a un rango similar a los valores de densidad total transformados en logaritmos para considerar las grandes diferencias en los valores de densidad total y riqueza taxonómica. También se analizaron las propiedades fisicoquímicas del suelo.

VI RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron análisis de componentes principales (PCA) por separado para cada grupo de variables: macrofauna y variables fisicoquímicas, con el objetivo de reducir la dimensionalidad de los datos y construir combinaciones lineales (componentes principales) de las variables principales que expliquen gran parte de la variabilidad original total (Velasquez *et al.* 2007). Posteriormente, se aplicó un análisis de coinerencia para evaluar la existencia de una estructura común entre ambos grupos de variables y determinar la correlación y significancia estadística de su relación.

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis de Monte Carlo tanto para las variables individuales para los diferentes sitios (área de Frutales y finca demostrativa El Espino) como para las diferentes temporadas climáticas (seca y lluviosa), con el fin de validar la robustez de los patrones observados y determinar si las diferencias encontradas entre temporadas son estadísticamente significativas. También se realizó un análisis de correlación de Pearson para ver las variables que tengan más similitudes entre ellas.

6.1 Comunidades de macrofauna

Se encontraron 10 grupos taxonómicos funcionales donde se midió la densidad total (individuos por m²) donde en área de frutales en el uso de suelo baldío y en finca el espino en pastos se encontraron los promedios más altos (83.49 y 83.41 respectivamente) y las más bajas en el finca el espino en maíz (53.47) y en parte baja (55.61), donde las lombrices de tierra y las hormigas fueron las más abundantes en la mayoría de todos los usos de suelo con rango de 30 a 55 m² y también se midió riqueza taxonómica .

Mediante la aplicación de la fórmula del indicador global, se observa que el cultivo de cacao presenta los valores más altos, lo que refleja una mayor diversidad y abundancia de la macrofauna edáfica sugiriendo así una mejor salud del suelo.

En contraste, los uso del suelo con valores más bajos son el baldío y frutales (0.47), el maíz (0.40-0.43), el potrero uno (0.42) y especialmente, la parte baja de la finca demostrativa El Espino, que presenta el valor más bajo (0.39) los resultados indican una menor actividad biológica del suelo, probablemente asociada a la escasa cobertura vegetal, el laboreo intensivo a los maizales y el uso de agroquímicos en la área de frutales (Figura 3).

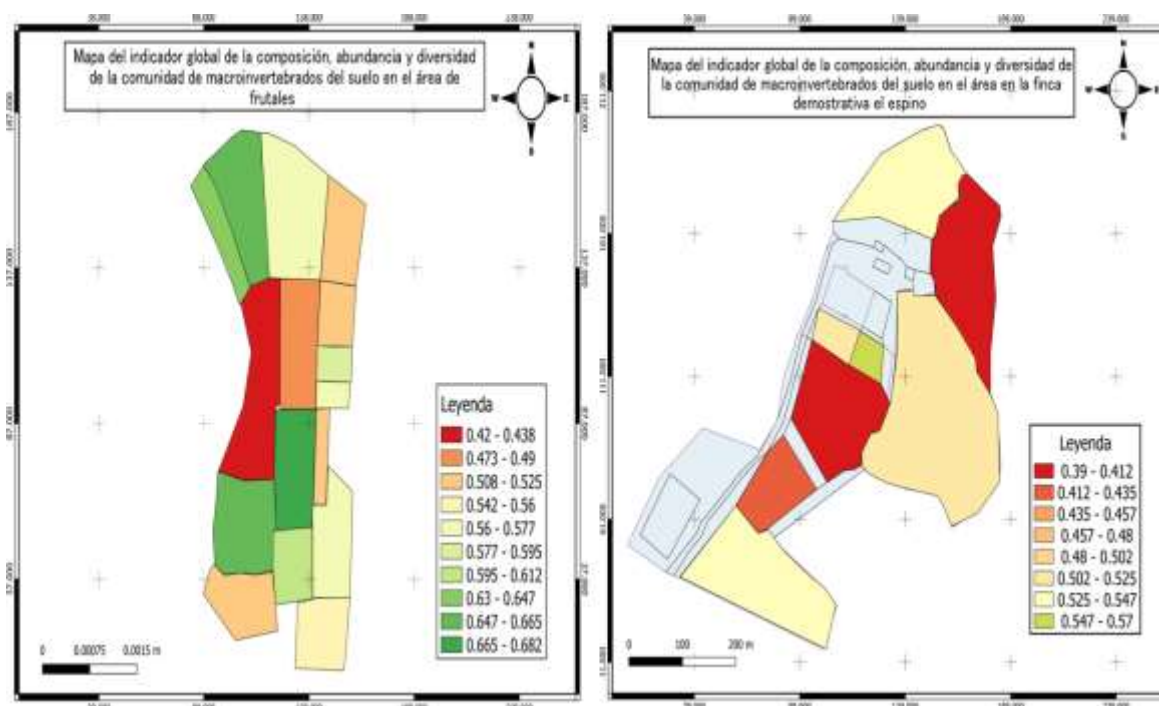


Figura 3: Indicador global de la composición, abundancia y diversidad de la comunidad de macroinvertebrados en Frutales y Finca demostrativa El Espino

Podemos observar que en el área de frutales los diferentes usos de suelo presentan los índices más altos de riqueza y abundancia de macrofauna. En contraste, en la finca demostrativa El Espino los índices son considerablemente bajos, resultado de las prácticas agrícolas y pecuarias que se han llevado a cabo durante muchos años y que han generado un deterioro progresivo del suelo.

Esta comparación resalta que los manejos aplicados en cada sitio son muy diferentes y, en consecuencia, influyen directamente en la composición y dinámica de las comunidades edáficas. Mientras que en los frutales la macrofauna encuentra condiciones más favorables para su desarrollo, en El Espino predominan grupos taxonómicos más resistentes, capaces de adaptarse a ambientes con menor calidad biológica y fisicoquímica.

6.1.1 ACP de las comunidades de macrofauna en el suelo

En el análisis de componentes principales los dos primeros factores explican el 48.36% de la varianza total, donde el factor 1 explica el 34.64% las variables que más contribuyen son el indicador (20.81%), la riqueza taxonómica (17.51%), densidad total (16.98%), lombrices (8.48%) y termitas (8.56%) y en el factor 2 el 13.72% donde las variables que más contribuyen son las hemípteras (26.47%), coleópteras (31.95%), dermápteras (21.02%) y las diplopodas (7.40%).

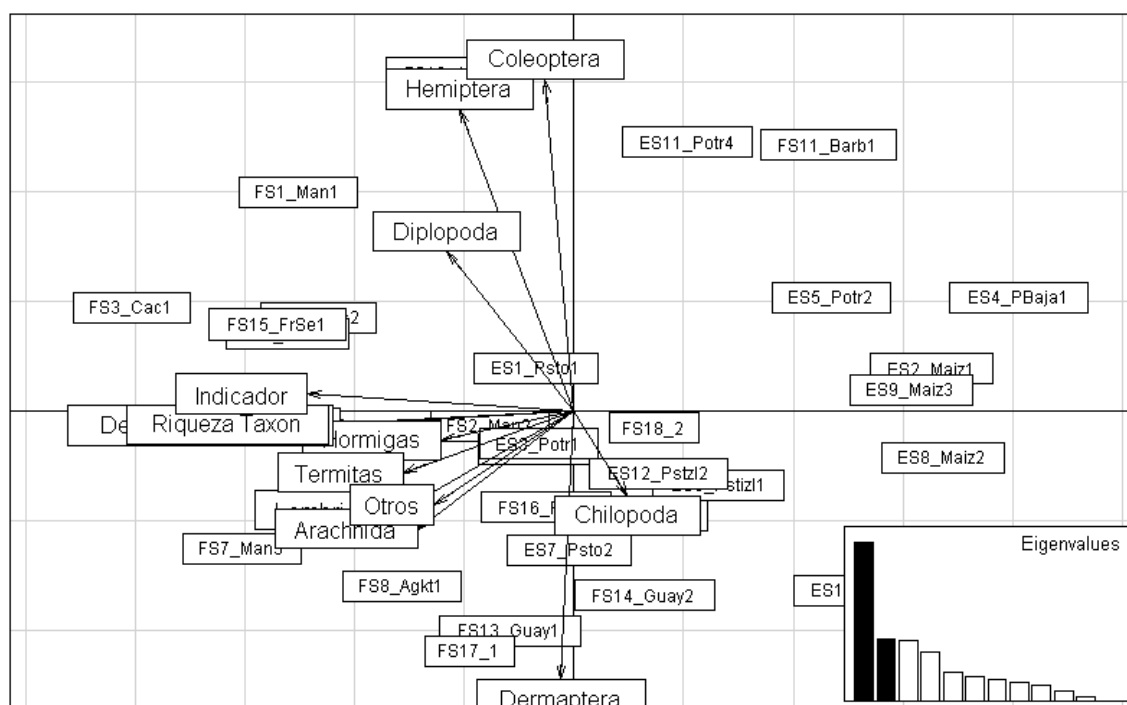


Figura 4. Analisis de componentes principales de la macrofauna y los diferentes usos de suelo

En la Figura 4 se visualiza la relación entre los diferentes grupos de macrofauna edáfica y los usos del suelo mediante un análisis multivariado. El eje uno representa el principal gradiente de variación en la comunidad de macrofauna, y muestra una relación positiva entre la riqueza taxonómica, el indicador ecológico, así como los grupos de hormigas y termitas, lo cual indica que estos elementos tienden a coincidir en los mismos tipos de uso del suelo. En particular, las muestras FS1_Man1, FS15_FrSe1 y FS3_Cac1 se ubican en esta zona del gráfico, lo que sugiere que presentan una alta riqueza y abundancia de macrofauna edáfica, probablemente debido a un manejo del suelo más conservador o con mayor cobertura vegetal (Lavelle *et al.* 2021).

Por otro lado, en el eje dos se observa la relación con grupos como los Hemípteros, Coleópteros, Diplópodos y Dermápteros. Las mismas muestras mencionadas anteriormente (FS1_Man1, FS3_Cac1, FS15_FrSe1) se agrupan cercanas a estos vectores, lo cual refuerza la interpretación de que estos sitios albergan una comunidad de macrofauna más diversa y especializada, posiblemente asociada a condiciones ambientales más favorables, como mayor disponibilidad de hojarasca o microhábitats complejos.

Asimismo, otras muestras como ES4_PBaja1, ES11_Potr4 y ES5_Potr2 se sitúan a media distancia, indicando una presencia moderada de algunos grupos como Diplópodos y Hemípteros, lo cual podrían reflejar un manejo intermedio del suelo, ni intensivo ni completamente conservado.

En contraste, las muestras ES9_Maiz3, ES2_Maiz1, ES8_Maiz2 (todas provenientes de áreas agrícolas dentro de la finca demostrativa El Espino), se ubican en el extremo derecho del eje 1. Estas se asocian negativamente con la mayoría de los grupos de macrofauna, lo que indica una baja diversidad y abundancia, probablemente debido a las prácticas de labranza mecánica y al uso intensivo de estas áreas como potreros para ganado (vacas, caballos, etc.), que afectan significativamente la estructura del suelo.

Finalmente, las muestras ubicadas cerca del centro del gráfico representan usos del suelo que no están fuertemente asociados con ningún grupo taxonómico específico. Esto sugiere una comunidad de macrofauna más heterogénea y generalista, sin dominancia clara de un grupo, lo cual podría deberse a condiciones intermedias de manejo o a una transición ecológica entre sistemas más conservados y más perturbados.

6.1.2 Análisis de las comunidades de macrofauna en relación con los sitios de muestreo.

La gráfica cinco representa la agrupación de los sitios de muestreo en función de la composición de la macrofauna edáfica, evidenciándose la conformación de dos núcleos principales. Los sitios correspondientes al área de frutales (color azul) se ubican predominantemente hacia la parte izquierda del gráfico, conformando un clúster compacto y bien definido, lo que se observa que son las muestras donde se encuentra mayor riqueza y diversidad de la macrofauna edáfica. Donde los grupos taxonómicos más representativos fueron las Oligochaeta (lombrices) y los Formicidae (hormigas), los cuales registraron las mayores abundancias relativas y una mayor distribución de los grupos taxonómicos en comparación con la otra área de estudio.

En contraste, los puntos de muestreo de la Finca demostrativa El Espino (color rojo) se agrupan hacia la parte derecha del gráfico, conformando un clúster claramente diferenciado, donde se identificaron los usos de suelos más pobres en diversidad y abundancia de la macrofauna edáfica, donde el grupo con mayor predominancia fue el de los Chilopoda, mientras que los demás taxones estuvieron ausentes o se encontraron en bajas densidades. Si bien se observa una ligera superposición en la zona central, la tendencia general indica una diferenciación marcada entre ambos sitios, lo que pone de manifiesto diferencias significativas en la estructura comunitaria y en la abundancia relativa de la macrofauna edáfica.

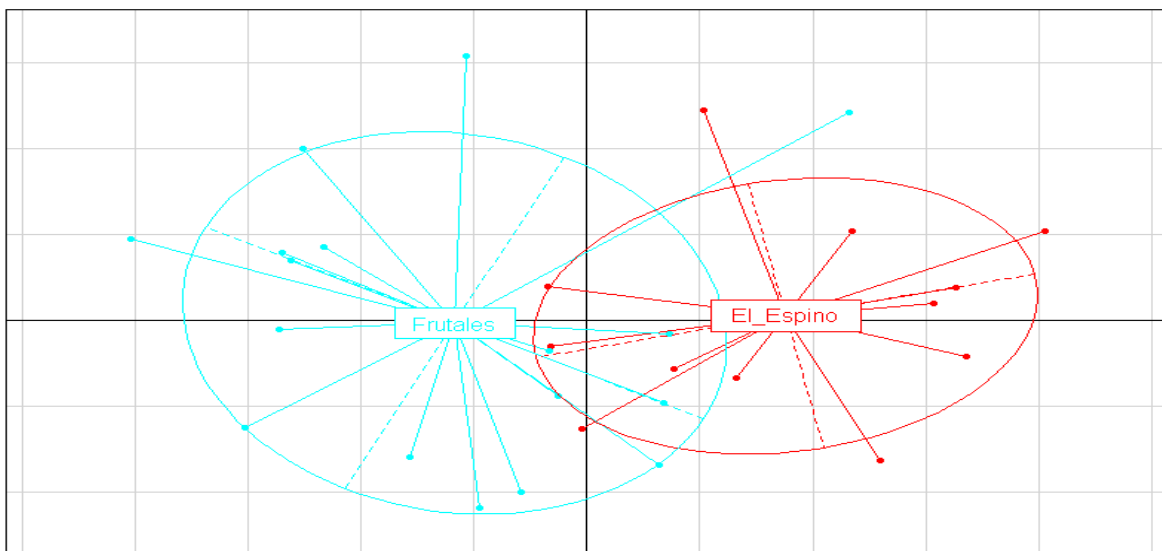


Figura 5. Agrupación de las muestras por sitios según la composición de la macrofauna

La distribución espacial observada la evidencia que el tipo de uso y manejo del suelo tiene un efecto directo en la composición de la macrofauna edáfica. En el caso del área de Frutales, la mayor cobertura vegetal, el aporte de hojarasca y residuos orgánicos generan un entorno más favorable para la presencia de grupos como lombrices, hormigas y coleópteros, que son indicadores de suelos con buena calidad biológica y estabilidad estructural. Esto explica que sus sitios aparezcan agrupados de manera más homogénea.

En contraste, en la finca demostrativa El Espino, donde los suelos son utilizados como potreros para ganado o para el cultivo de maíz, predominan condiciones de compactación, menor porosidad y reducción de materia orgánica, lo cual limita la diversidad y abundancia de la macrofauna, quedando representada por grupos más resistentes como chilópodos y lombrices en menor número.

6.1.3 Análisis BCA de coinerencia para las comunidades de macrofauna por los diferentes sitios

El análisis de coinerencia entre las comunidades y los diferentes sitios de muestreo mostró un valor observado de 0.181, el cual se ubicó muy por encima de la distribución de valores simulados obtenidos a partir de 999 permutaciones.

Esto se refleja claramente en el histograma del test de monte Carlo (Figura 6), donde la mayoría de los valores se concentran en el rango de 0.02 a 0.08, mientras que el valor observado se encuentra como un punto extremo a la derecha. En conjunto con el análisis de Monte Carlo ($p = 0.001$), estos resultados confirman que los dos sitios presentan comunidades de macrofauna edáfica significativamente diferentes desde el punto de vista ecológico, lo que refuerza su utilidad como indicadores de calidad del suelo.

El valor estandarizado del estadístico (7.87) también respalda la fuerza de esta relación, indicando que la coestructura observada entre las comunidades biológicas y los sitios de muestreo es robusta y no atribuible a la variabilidad aleatoria. La expectativa teórica (0.0347) y la baja varianza (0.00034) refuerzan la idea de que el patrón encontrado corresponde a una señal ecológica real.

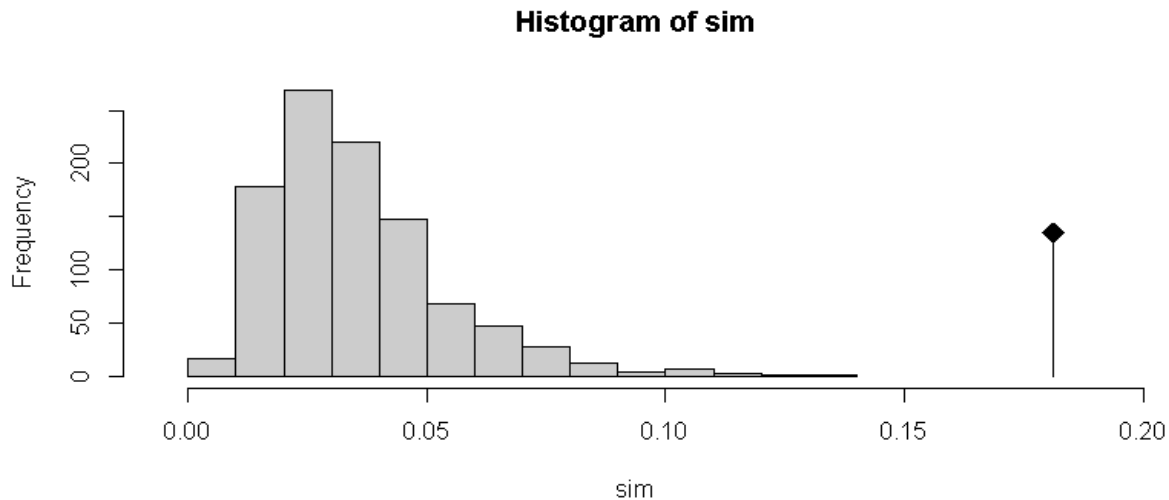


Figura 6. Histograma del test de Monte Carlo aplicado al análisis de coinerchia entre las comunidades de macrofauna y los sitios de muestreo

Estos resultados sugieren que las comunidades presentan una clara estructuración espacial vinculada a las condiciones particulares de cada sitio de muestreo, lo cual refleja que los factores ambientales y de uso del suelo influyen de manera significativa en la composición y distribución de las especies. En este sentido, la fuerte coinerchia observada puede interpretarse como evidencia de que las comunidades responden de manera congruente a gradientes ambientales o a presiones antrópicas presentes en el área de estudio.

6.1.4 Análisis de las comunidades de macrofauna edáfica y temporada del año

El análisis de la macrofauna edáfica entre la temporada seca y la temporada lluviosa revela un patrón de diferenciación visual en la distribución de los puntos de muestreo, aunque esta diferenciación no se traduce en diferencias estadísticamente significativas. En los diagramas de dispersión, los sitios correspondientes a la temporada seca, representados en color azul, tienden a agruparse hacia el lado izquierdo del gráfico. Además, muestran una mayor dispersión entre los puntos, lo que indica una variabilidad relativamente alta en la abundancia de organismos y sugiere que, durante la época seca, la macrofauna puede estar más influenciada por variaciones climáticas.

Por su parte, los sitios de la temporada lluviosa, señalados en color rojo, se concentran hacia la parte derecha del gráfico y forman un clúster más compacto. Esta agrupación refleja una composición más homogénea de la macrofauna, lo que podría estar asociado con condiciones ambientales más uniformes y favorables para el desarrollo de los organismos durante el periodo de lluvias, como mayor humedad del suelo y disponibilidad de materia orgánica.

A pesar de estas tendencias observables en los gráficos, los análisis estadísticos realizados probablemente basados en pruebas de comparación de medias o análisis multivariados de la composición de especies indican que las diferencias entre temporadas no son significativas. Esto sugiere que, aunque visualmente puedan percibirse variaciones en la dispersión y agrupamiento de los puntos, la composición y abundancia relativa de los distintos grupos taxonómicos de macrofauna no presenta cambios consistentes ni sistemáticos entre la temporada seca y la lluviosa.

En consecuencia, la estructura general de la macrofauna edáfica se mantiene relativamente estable a lo largo del año, demostrando una resiliencia frente a la estacionalidad climática. Este hallazgo resalta que, en el ecosistema estudiado, factores como la diversidad de hábitats y la disponibilidad de recursos podrían ser suficientes para sostener la comunidad de macrofauna sin que se observen fluctuaciones estacionales marcadas.

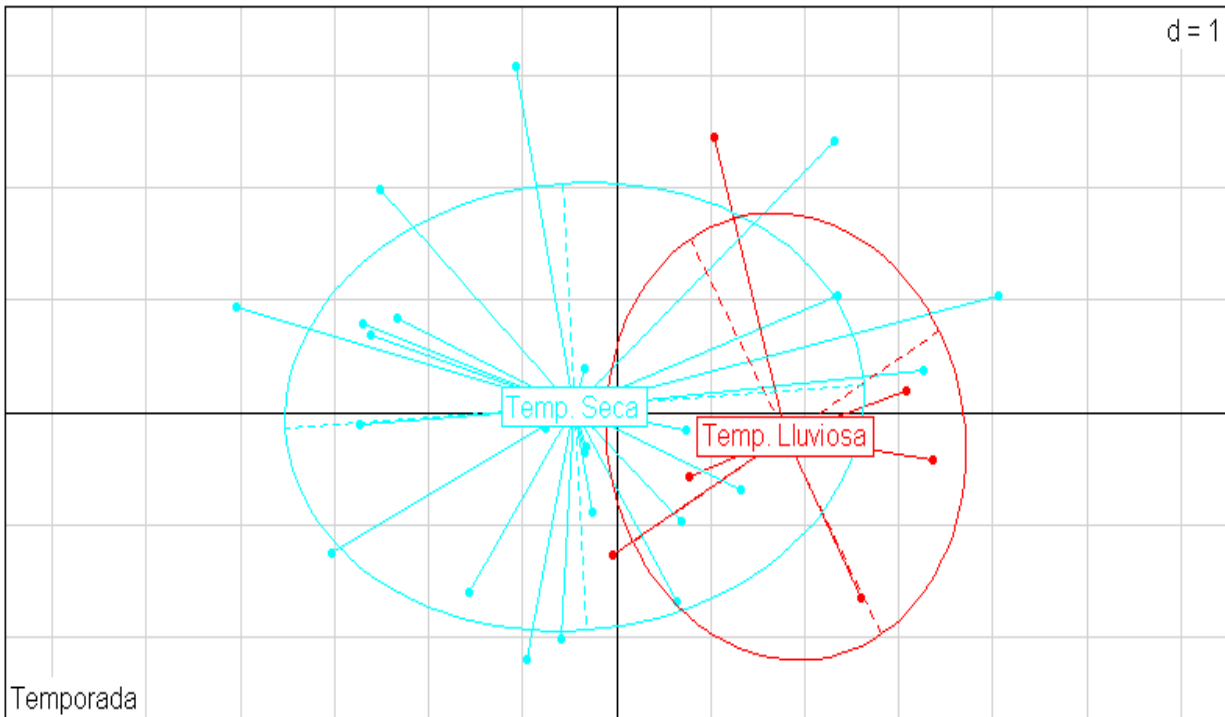


Figura 7. Agrupación de las muestras por temporadas del año según la composición de la macrofauna

Las diferencias observadas responden a la influencia de las condiciones climáticas sobre la macrofauna edáfica. Durante la temporada lluviosa, el incremento en la humedad del suelo favorece la actividad biológica y la disponibilidad de recursos, lo que se traduce en una mayor abundancia y regularidad de grupos como lombrices, hormigas y coleópteros.

Este comportamiento explica la concentración más uniforme de los puntos en el clúster lluvioso. En cambio, en la temporada seca, la reducción en la humedad y el aumento de la compactación del suelo generan ambientes más restrictivos, donde la macrofauna muestra una distribución más variable y dominada por organismos resistentes a la desecación, como algunos miriápodos.

6.1.5 Análisis entre clases (BCA) de cionercia para las comunidades de macrofauna por las temporadas del año

El análisis de coinerencia entre las comunidades y las temporadas del año (seca y lluviosa) mostró un valor observado de 0.0704, el cual se ubica ligeramente por encima de la distribución de valores generados por 999 permutaciones. En el histograma del test de monte Carlo (Figura 8) se observa que la mayoría de los valores simulados se concentran entre 0.02 y 0.06, mientras que el valor empírico aparece como un punto aislado en la parte superior de la distribución.

El valor $p = 0.053$ obtenido mediante el análisis de Monte Carlo indica que la diferencia observada no es estadísticamente significativa bajo el umbral convencional ($p < 0.05$), aunque se encuentra muy cerca. Este resultado se interpreta como una tendencia marginal a la diferenciación, lo que implica que la estacionalidad podría estar influyendo en la estructura de la macrofauna, aunque no con suficiente evidencia para afirmarlo con certeza estadística. El valor estandarizado del estadístico (2.00) respalda esta ligera señal, mostrando que el resultado se aleja moderadamente de lo esperado bajo un escenario aleatorio.

La expectativa del estadístico fue de 0.0339 con una baja varianza (0.00033), lo cual refuerza la interpretación de que el valor observado no es completamente atribuible al azar, aunque la fuerza de la asociación no es tan marcada como en otros escenarios comparables.

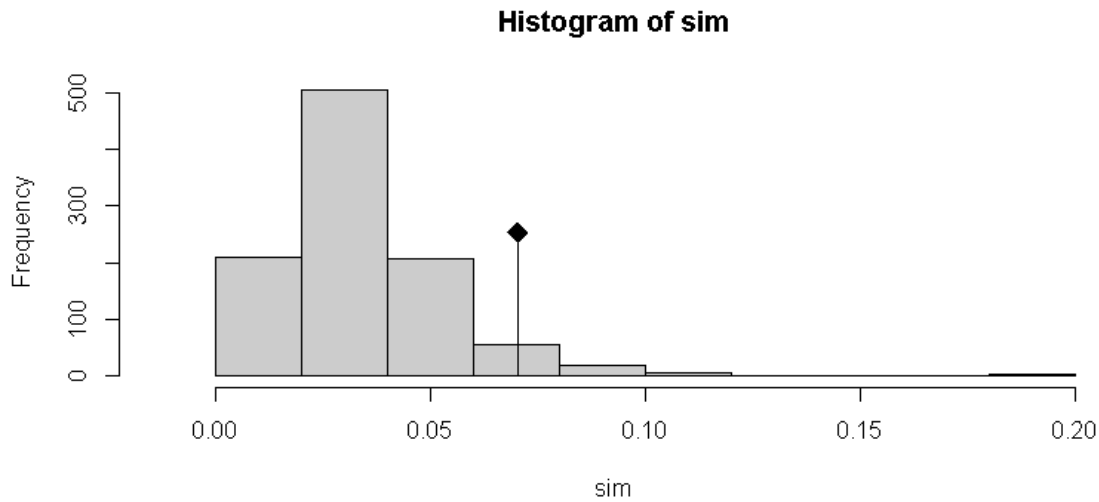


Figura 8. Histograma del test de Monte Carlo aplicado al análisis de coinerencia entre las comunidades de macrofauna y las temporadas del año

En conjunto, estos resultados sugieren que las temporadas (seca y lluviosa) influyen en la dinámica de las comunidades, aunque esta influencia no es lo suficientemente fuerte como para considerarse concluyente. Esto abre la posibilidad de que la variabilidad temporal interactúe con gradientes espaciales y con condiciones locales para modular la composición y estructura de las comunidades biológicas en las área de estudio.

6.1.6 Correlación entre grupos de macrofauna e índices ecológicos

El mapa de calor de correlaciones de Pearson entre distintos grupos de macrofauna del suelo y los indicadores de densidad total, riqueza taxonómica e indicador global se presenta en la figura 9. Se observa que la riqueza taxonómica y la densidad total presentan correlaciones muy altas con el indicador (0.92 y 0.85 respectivamente), lo que confirma que la abundancia y diversidad de organismos son determinantes para evaluar la calidad biológica del suelo. Estos resultados muestran que un suelo con mayor diversidad y número de especies tiende a reflejar mejores condiciones ecológicas.

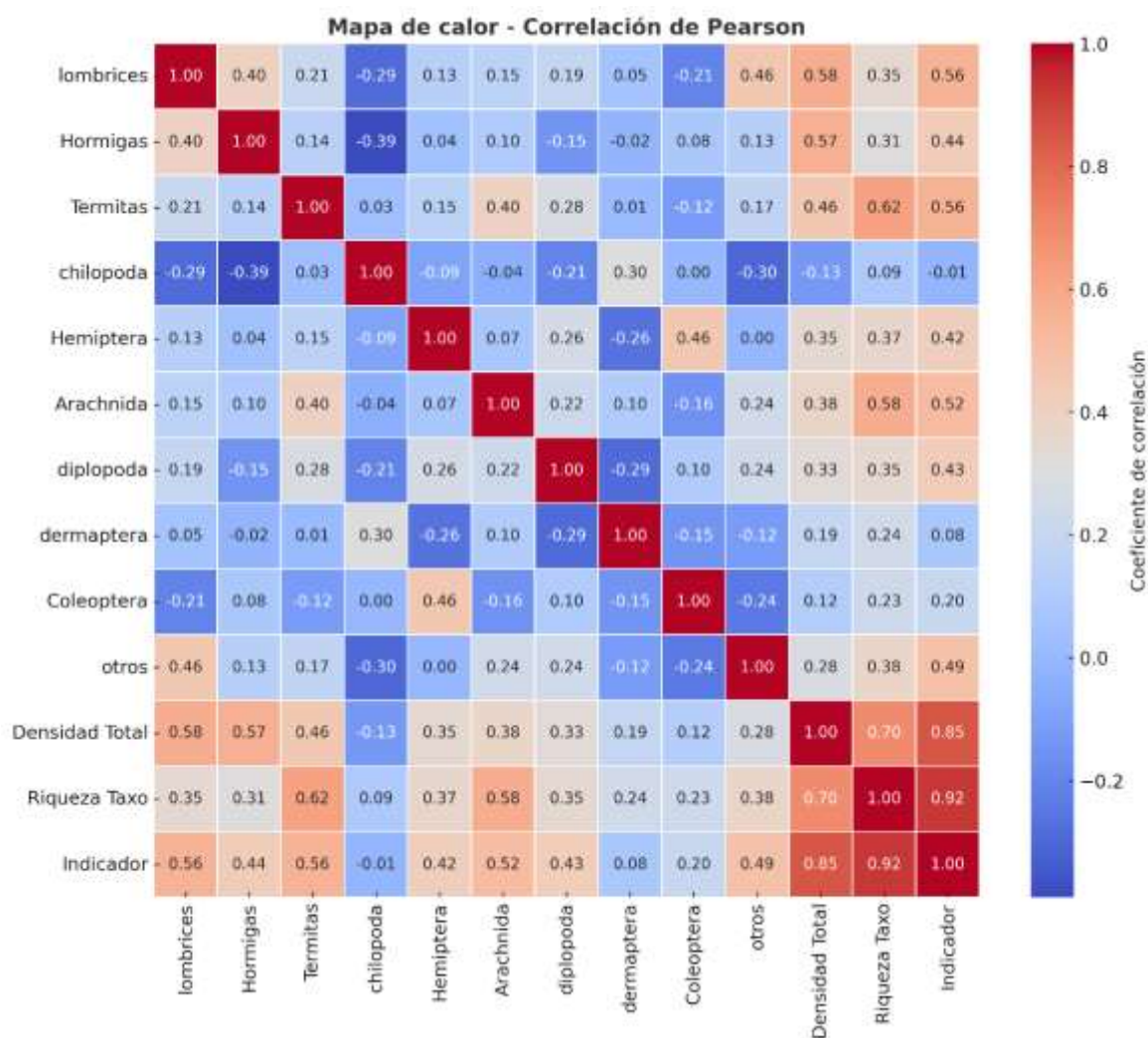


Figura 9. Coeficiente de correlación de Pearson para las comunidades de macrofauna.

Entre los grupos de macrofauna, lombrices, termitas y arácnidos destacan por sus correlaciones positivas con los indicadores, resaltando su papel como bioindicadores del estado del suelo. Las lombrices presentan relaciones importantes con la densidad total (0.58) y el indicador (0.56), mientras que las termitas se correlacionan fuertemente con la riqueza taxonómica (0.62) y el indicador (0.56). De manera similar, los arácnidos mantienen correlaciones positivas con la riqueza (0.58) y el indicador (0.52), reflejando su sensibilidad a las condiciones ambientales.

6.2 Propiedades fisicoquímicas

6.2.1 Análisis de componentes principales de las propiedades fisicoquímicas

En el análisis de componentes principales los dos primeros factores explican el 59.6% de la varianza total donde el factor uno explica el 34.3% donde las variables que más influyen son la porosidad (18.24%), pH (13.9%), la densidad aparente (13.04%) y % de arena (14.40%); el factor 2 explica el 25.3% donde las variables que dominan son %MO (21.85%), %CO(21.85%), %N(21.85%) y la Humedad(8.21%).

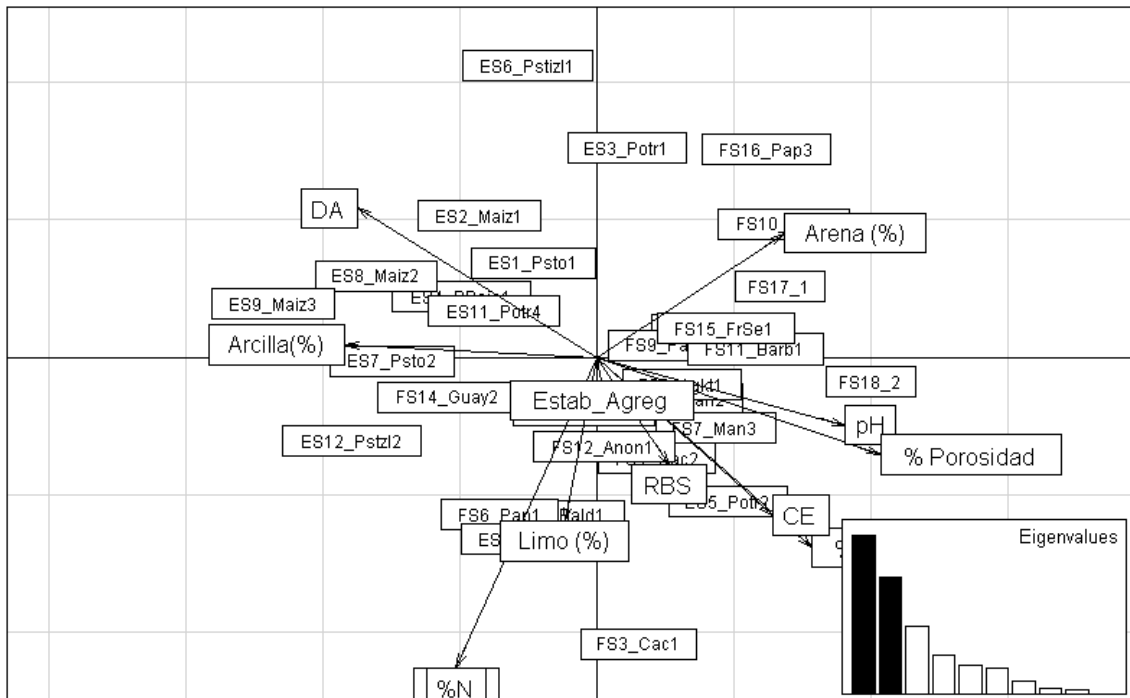


Figura 10. Análisis de componentes principales de las variables fisicoquímicas del suelo y los diferentes uso del suelo.

Se observa que los suelos con mayor compactación, reflejada en una mayor densidad aparente y un mayor porcentaje de arcilla, son los sitios donde se registraron menores cantidades de macrofauna. No obstante, los chilópodos se encuentran presentes en cantidades considerables incluso bajo estas condiciones, lo que sugiere una tolerancia particular a suelos más densos y arcillosos.

En el análisis multivariado, el porcentaje de arcilla y la densidad aparente se orientan hacia la izquierda del gráfico y muestran una relación positiva entre sí, indicando que a mayor contenido de arcilla corresponde una mayor densidad aparente. Por el contrario, el porcentaje de arena y

la porosidad presentan una relación inversa con estas variables, lo que refleja que a mayor contenido de arcilla y densidad aparente, la proporción de arena y la porosidad del suelo disminuyen. Este comportamiento es consistente con lo esperado, ya que los suelos más densos y arcillosos tienden a tener menor espacio poroso entre partículas.

Las muestras ES9_Maiz3, ES8_Maiz2 y ES7_Psto2 se encuentran cercanas a las variables arcilla (%) y densidad aparente (DA), lo que sugiere que estos sitios presentan suelos más arcillosos y compactos lo que quiere decir que son suelos con menores cantidades de macrofauna porque las comunidades de macroinvertebrados pueden verse afectadas a los cambios provocados por perturbaciones del suelo (Lavelle *et al.* 2022). En contraste, las muestras FS10 y FS16_Pap3 están orientadas hacia la variable arena (%), indicando que corresponden a suelos más arenosos y, presumiblemente, con mayor porosidad.

El análisis también mostro que la respiración basal (RBS), conductividad eléctrica (CE), pH y humedad muestran que lo sitios FS17_1, FS18_2, FS15_FrSe1, FS11_Barb1, se agrupan en la misma dirección, lo que evidencia una fuerte correlación. Esto indica que estos usos de suelo están asociados con suelos más ricos en bases, menos ácidos, con mayor conductividad y una mayor humedad de los suelos.

Se observó que los suelos con mayor porcentaje de limo en las áreas de estudio se asociaron a usos de suelo donde la distribución y abundancia de organismos edáficos resultó considerablemente baja. Si bien estos valores no correspondieron a los más bajos dentro del conjunto de muestras analizadas, sí reflejaron una menor diversidad biológica. En estos suelos se identificaron pocos grupos taxonómicos, destacando principalmente las lombrices y las hormigas, cuya presencia fue reducida tanto en número de individuos como en cobertura dentro de las unidades muestread

Las variables %MO, %CO, %N y limo se agrupan en la parte inferior del análisis de componentes principales, lo que indica que su comportamiento está explicado principalmente por el segundo componente (factor 2).

Al no mostrar una relación estrecha con las variables ubicadas en los extremos del gráfico, estas presentan un patrón propio que refleja condiciones del suelo especialmente favorables, como un mayor contenido de carbono en la materia orgánica, una estructura más estable, buena fertilidad, mayor capacidad de aporte de nutrientes a las plantas y una textura intermedia.

En estos suelos, se observó una mayor distribución de los grupos taxonómicos de macrofauna, destacando especialmente la abundancia de hormigas y lombrices, lo que sugiere que estas condiciones físicas y químicas del suelo favorecen la diversidad y densidad de los organismos edáficos. Asimismo, los sitios con usos de suelo FSE_Cac1(cacao) y FS6_Pap1(papaya) se sitúan cerca de este grupo de variables, indicando que estos terrenos están directamente vinculados con las características positivas del suelo y, por ende, con una mayor riqueza y actividad de la macrofauna.

6.2.2 Análisis de las variables fisicoquímicas en relación con los sitios de muestreo

Las variables fisicoquímicas del suelo presentan variaciones estadísticamente significativas entre los diferentes sitios evaluados (Figura 11). Estas diferencias están directamente relacionadas con el tipo de uso y manejo del suelo, ya que cada área se encuentra destinada a actividades productivas distintas.

En el área de frutales, las condiciones fisicoquímicas del suelo favorecen una mayor diversidad biológica. Esto se refleja en la presencia de una mayor variedad de especies y en una biodiversidad más equilibrada, lo cual sugiere que las prácticas de manejo implementadas en este sitio mantienen en mejores condiciones la estructura y fertilidad del suelo, promoviendo hábitats más estables y adecuados para el desarrollo de distintos grupos taxonómicos, como son los ingenieros de suelo como las lombrices, hormigas y termitas.

Por el contrario, en la finca demostrativa El Espino, el manejo del suelo ha estado orientado a la labranza para cultivos y al uso como potrero para el ganado. Estas prácticas han generado procesos de compactación y deterioro de las propiedades del suelo, reduciendo significativamente su calidad.

Como consecuencia, se observa una baja diversidad taxonómica, con predominio de grupos más resistentes y adaptados a condiciones adversas, como los chilópodos, que se convierten en los dominantes al ser capaces de tolerar ambientes empobrecidos en comparación con otros organismos edáficos más sensibles.

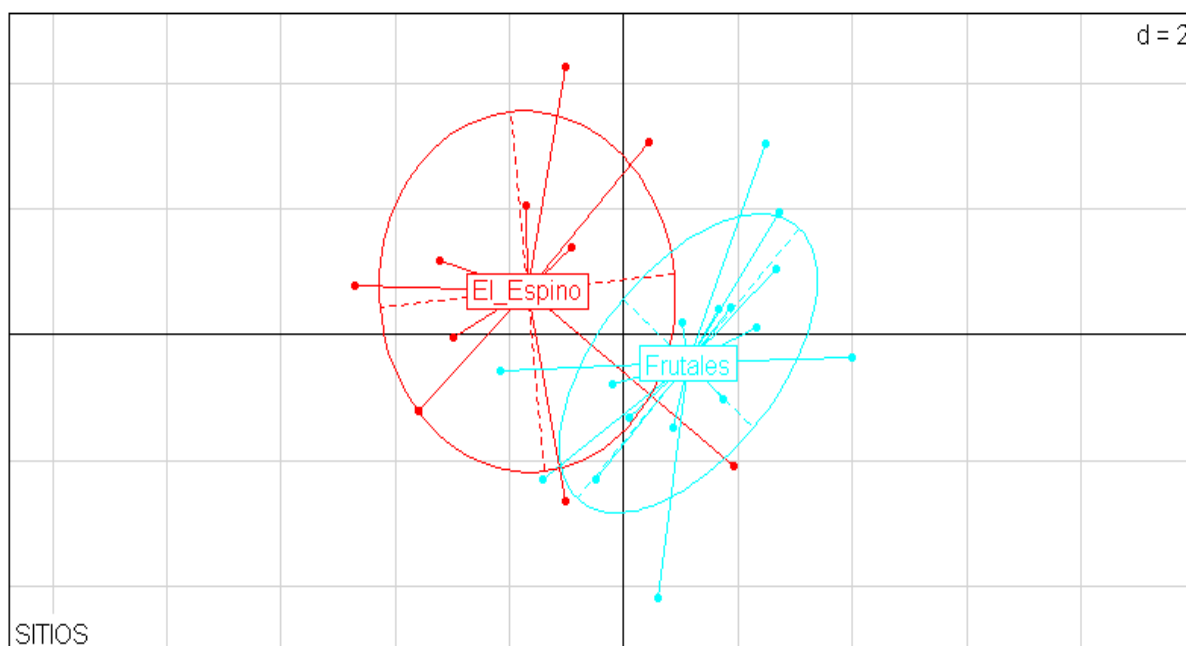


Figura 11. Agrupación de las muestras por los diferentes sitios según las propiedades fisicoquímicas.

Además se observó que en Frutales muestra una distribución más agrupada, lo que indica mayor homogeneidad en sus propiedades del suelo y en El Espino presenta mayor dispersión, lo que refleja una mayor variabilidad interna en sus características fisicoquímicas.

6.2.3 Análisis de cionercia entre clases y test de Montecarlo para las propiedades de fisicoquímicas del suelo por los diferentes sitios

El análisis de coinercia entre las variables fisicoquímicas y los sitios de muestreo (Frutales y El Espino) mostró un valor observado de 0.1883, claramente superior a los valores obtenidos en las 999 permutaciones.

En el histograma del test de monte Carlo (Figura 12) se observa que la mayor parte de los valores simulados se concentran entre 0.02 y 0.08, mientras que el valor empírico aparece como un punto extremo a la derecha de la distribución. Este resultado indica una relación estadísticamente significativa ($p = 0.001$) bajo la hipótesis alternativa de una mayor coestructura de la esperada por azar.

El valor estandarizado (7.40) confirma la fortaleza de esta asociación, alejándose de manera notable de la expectativa nula (0.0347) y sobrepasando ampliamente la variabilidad esperada (varianza = 0.00043). Esto evidencia que existe un patrón estructural robusto entre las características fisicoquímicas del suelo y los sitios de muestreo.

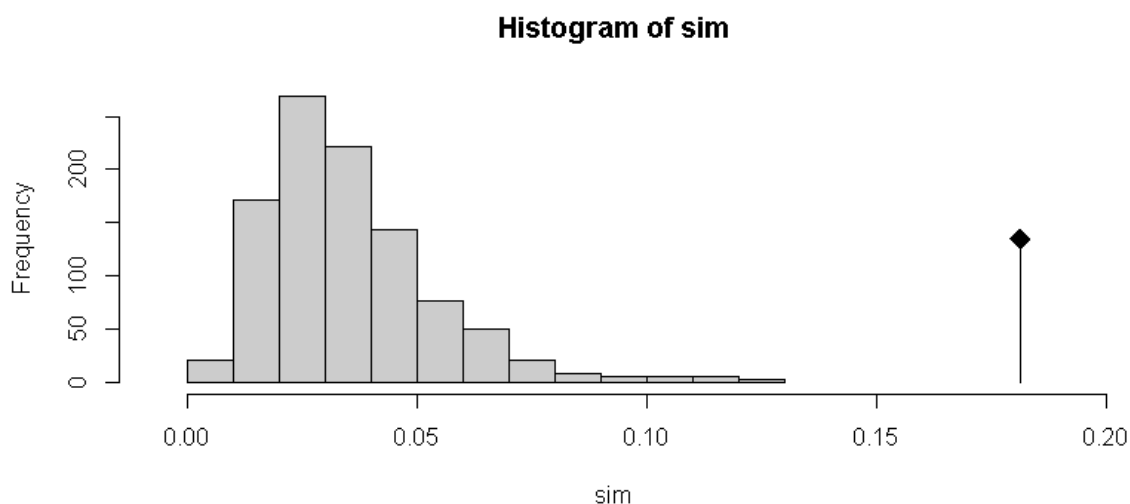


Figura 12. Histograma del test de Monte Carlo aplicado al análisis de coinerencia entre las propiedades fisicoquímicas y los sitios de muestreo

Desde el punto de vista ecológico, estos resultados sugieren que las diferencias en las propiedades fisicoquímicas entre Frutales y El Espino influyen de manera significativa en la organización ambiental de los sitios, probablemente reflejando contrastes en fertilidad, disponibilidad de nutrientes, contenido de materia orgánica y condiciones de textura. La fuerte coinerencia hallada indica que cada sitio presenta un perfil fisicoquímico distintivo, lo que a su vez puede estar condicionado por los usos del suelo, el manejo agrícola o las características edáficas propias de cada lugar.

En este sentido, se confirma que las variables fisicoquímicas no solo describen las condiciones ambientales de los sitios, sino que también permiten diferenciar de forma clara a Frutales y El Espino, resaltando la importancia de estos factores en la caracterización y evaluación de los ecosistemas locales.

6.2.4 Análisis de las variables fisicoquímicas en relación con la temporada del año

Las variables fisicoquímicas del suelo varían significativamente entre la temporada seca y la lluviosa en los dos sitios con los diferentes usos de suelo. Se observa una clara separación entre ambas temporadas, lo que indica que factores como la humedad, el lavado de nutrientes o la actividad biológica influyen en las propiedades del suelo.

Se observa que durante la temporada seca presenta mayor variabilidad entre muestras, posiblemente por diferencias en el manejo, riego o pérdida de humedad y la temporada lluviosa muestra mayor homogeneidad, lo que sugiere una distribución más uniforme de los nutrientes y condiciones edáficas.

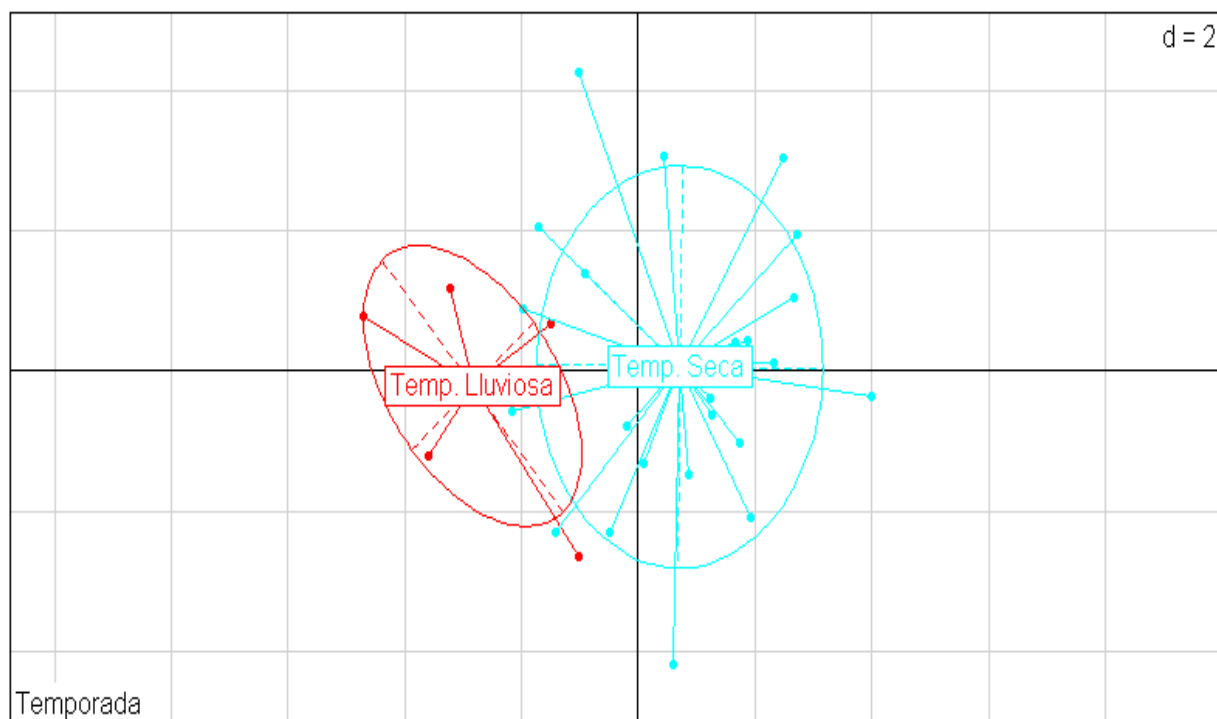


Figura 13. Agrupación de las muestras por temporadas del año según las propiedades Fisicoquímicas del suelo.

Los resultados muestran que la temporada del año (seca vs lluviosa) es un factor determinante en la dinámica de los suelos y sus comunidades biológicas. Durante la temporada lluviosa, la mayor disponibilidad de agua favorece la estabilidad de las propiedades fisicoquímicas, como la humedad, pH y conductividad eléctrica, lo que a su vez contribuye a la presencia más uniforme de macrofauna edáfica (lombrices, coleópteros, dermápteros, entre otros).

En contraste, la temporada seca se caracteriza por una disminución de la humedad del suelo, lo que provoca cambios en la estructura edáfica y reduce la disponibilidad de nutrientes. Esto genera ambientes más variables y estresantes, donde las comunidades de macrofauna responden de manera diferenciada según el uso del suelo.

6.2.5 Análisis de cionercia entre clases (BCA) Y test de monte calo para las propiedades de fisicoquímicas del suelo por las temporadas del año

El análisis de coinercia entre las variables fisicoquímicas del suelo y las temporadas del año (seca y lluviosa) evidenció una relación estadísticamente significativa. En el histograma del test de monte Carlo (Figura 14) podemos observar el valor de la prueba (0.1769) fue muy superior a los obtenidos en las 999 permutaciones aleatorias, con un valor $p = 0.001$, lo que confirma que las diferencias encontradas no se deben al azar.

El coeficiente estandarizado de 6.70, acompañado de una baja varianza esperada (0.00045), refuerza la solidez de esta asociación, señalando que las propiedades del suelo responden de manera consistente a la variabilidad estacional.

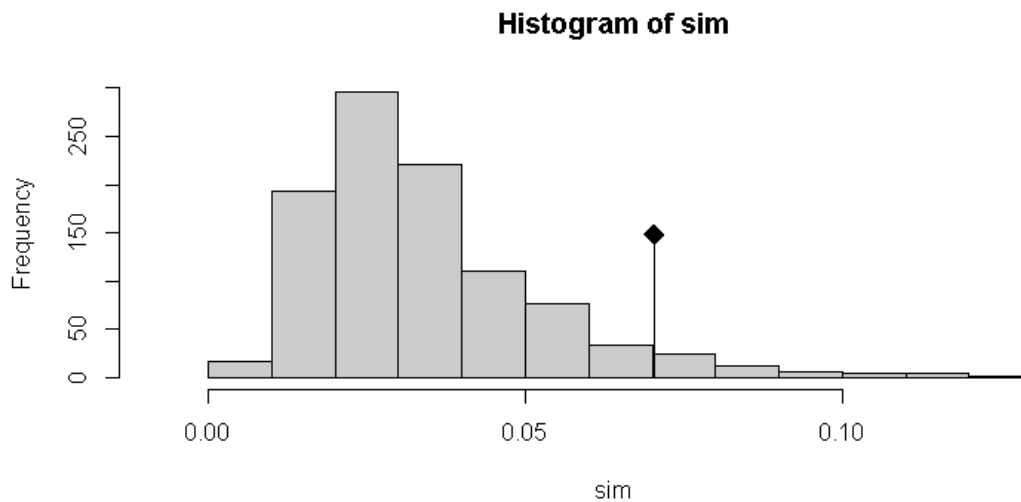


Figura 14. Histograma del test de Monte Carlo aplicado al análisis de coinerencia entre las propiedades fisicoquímicas y las temporadas del año.

El análisis demuestra que existen diferencias notorias en las propiedades fisicoquímicas del suelo entre la temporada seca y la lluviosa. La temporada seca, los valores de humedad y conductividad eléctrica tienden a ser menores, reflejando un suelo más compacto y con menor disponibilidad de nutrientes en forma soluble. Este comportamiento se asocia a la falta de precipitación, que reduce la infiltración y favorece la evaporación, lo que limita la actividad biológica y el reciclaje de nutrientes en el perfil del suelo.

La temporada lluviosa, los valores de humedad aumentan considerablemente, lo que genera mejores condiciones de aireación, disponibilidad de nutrientes y mayor conductividad eléctrica. Esta situación favorece los procesos de mineralización de la materia orgánica. No obstante, en algunos casos se observa que la excesiva humedad también puede provocar pérdidas por lixiviación, especialmente en suelos de textura ligera o con pendientes pronunciadas, lo que repercute en la fertilidad a mediano plazo.

6.2.6 Correlaciones entre variables fisicoquímicas del suelo

El análisis de correlación de Pearson revela relaciones significativas entre variables físicas como porosidad, densidad aparente, y humedad del suelo. Destaca una correlación negativa muy fuerte entre porosidad y densidad aparente (-0.91), por qué a medida que aumenta la densidad aparente del suelo, la fracción del volumen ocupado por sólidos incrementa y en consecuencia disminuye el espacio poroso disponible.

De manera contraria, valores elevados de porosidad reflejan una mayor proporción de espacios vacíos lo que se traduce en una menor densidad aparente. También se observa que la porosidad está altamente relacionada con la humedad del suelo (0.79), evidencia la estrecha relación entre la estructura del suelo y su capacidad de retención hídrica. Una mayor porosidad implica un incremento en el volumen de espacios vacíos, lo que favorece tanto la infiltración como el almacenamiento de agua en el perfil edáfico.

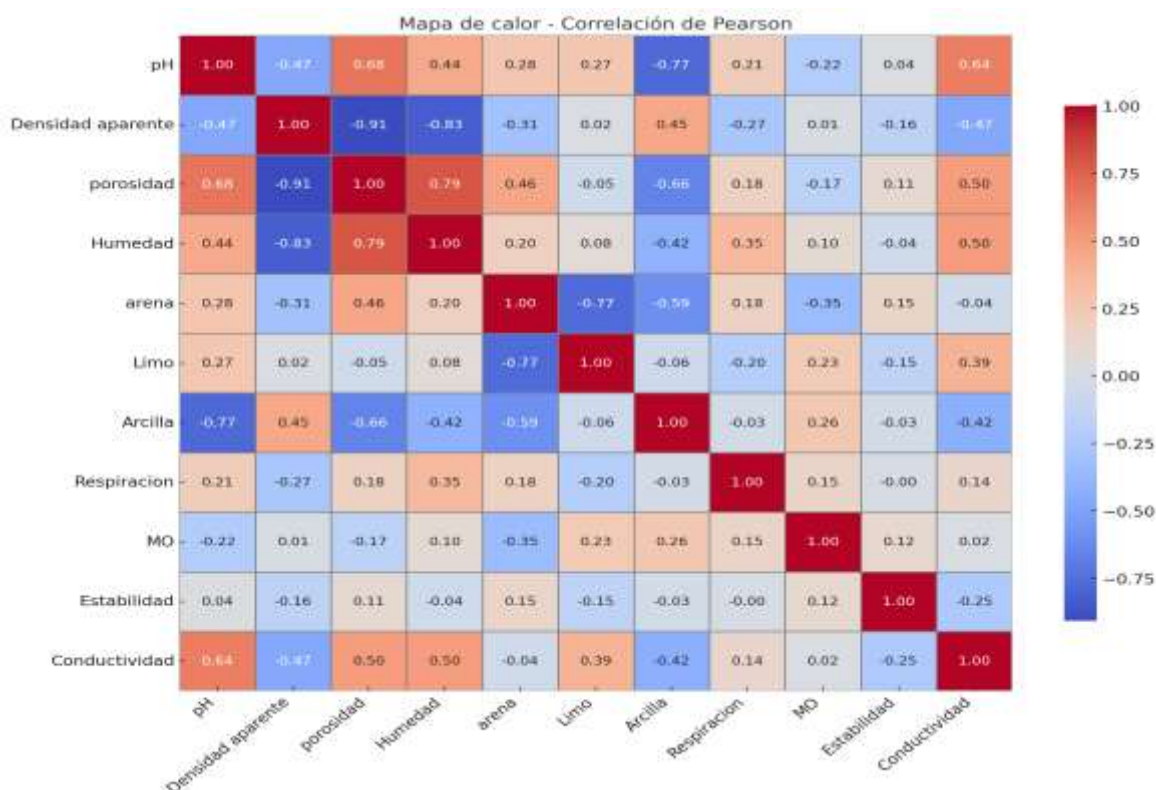


Figura 15. Coeficiente de correlación de Pearson de las propiedades fisicoquímicas del suelo.

La textura del suelo influye fuertemente en su comportamiento físico y químico. Existe una relación inversa clara entre arena y limo (-0.77) y entre arena y arcilla (-0.59), lo cual indica una variabilidad en la composición de los suelos evaluados. Estas diferencias podrían reflejar cambios entre los suelos de frutales (posiblemente más arenosos y sueltos) y los de El Espino (potencialmente más finos y con mayor contenido de arcilla). Además, la arcilla muestra una correlación negativa con el pH (-0.77), lo que sugiere que suelos más arcillosos tienden a ser más ácidos, una condición que podría limitar el desarrollo de cultivos si no se maneja adecuadamente.

Desde la perspectiva química, se observa que el pH del suelo guarda una correlación positiva con la porosidad (0.68) y la conductividad eléctrica (0.64), esto sugiere que suelos con mayor porosidad tienden a presentar valores de pH más elevados. De igual manera la correlación positiva entre el pH y la conductividad eléctrica indica que suelos con mayor concentración de sales solubles suelen mostrar valores de pH más altos.

6.3 Análisis de coinercia entre las comunidades de macrofauna y propiedades fisicoquímicas del suelo

Se realizó un análisis de coinercia para comprobar si existían relaciones significativas entre los conjuntos de datos y comprender las relaciones entre las variables.

El análisis de coinercia permitió evaluar la coestructura entre la comunidad de macrofauna edáfica y las propiedades fisicoquímicas del suelo. Los dos primeros ejes explicaron el 89.8% de la covarianza total, indicando que gran parte de la variación conjunta entre ambos conjuntos de datos es capturada por estos componentes principales.

Tabla 3: Contribución de los factores 1 y 2 a la inercia total en los PCA de datos de macrofauna, variables físico-químicas y análisis de coinercia realizados en cada par de subconjuntos de variables.

Variables	PCA		Análisis cionersia		Significancia estadística	
	Factor (Inercia%)		Variables	Factor (inercia%)		P-valor: 0.003
	1	2		1	2	
Macrofauna	34.6	13.7	Macrofauna/fisicoquímicas	66.37	22.95	
Fisicoquímicas	34.3	24.3				

El análisis de coinercia, que integro ambas matrices (macrofauna y fisicoquímicas), reveló que el primer eje explicó un 66.37% de la covariación y el segundo eje un 22.95%, alcanzando en conjunto un 89.32%. Este valor es sumamente alto y evidencia una fuerte coestructura entre los dos conjuntos de datos, es decir, que las variaciones en las comunidades de macrofauna corresponden estrechamente con los cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo. Dicho de otra manera, la macrofauna responde de forma directa a los gradientes ambientales impuestos por las características edáficas, lo que confirma su utilidad como indicador biológico de la calidad del suelo.

Finalmente, la significancia estadística ($p = 0.003$) obtenida mediante la prueba de Monte Carlo indica que la relación encontrada no es producto del azar. Este hallazgo refuerza la validez del análisis y demuestra que existe un vínculo ecológico real entre la composición de la macrofauna y las propiedades fisicoquímicas del suelo.

6.3.1 Proyección factorial del análisis de coinercia

El análisis de coinercia revela una asociación clara entre las variables físico-químicas del suelo (Y) y la comunidad de macrofauna edáfica (X). Los primeros dos ejes canónicos explican la mayor parte de la variación conjunta, indicando patrones bien definidos de respuesta de la fauna del suelo ante las condiciones ambientales.

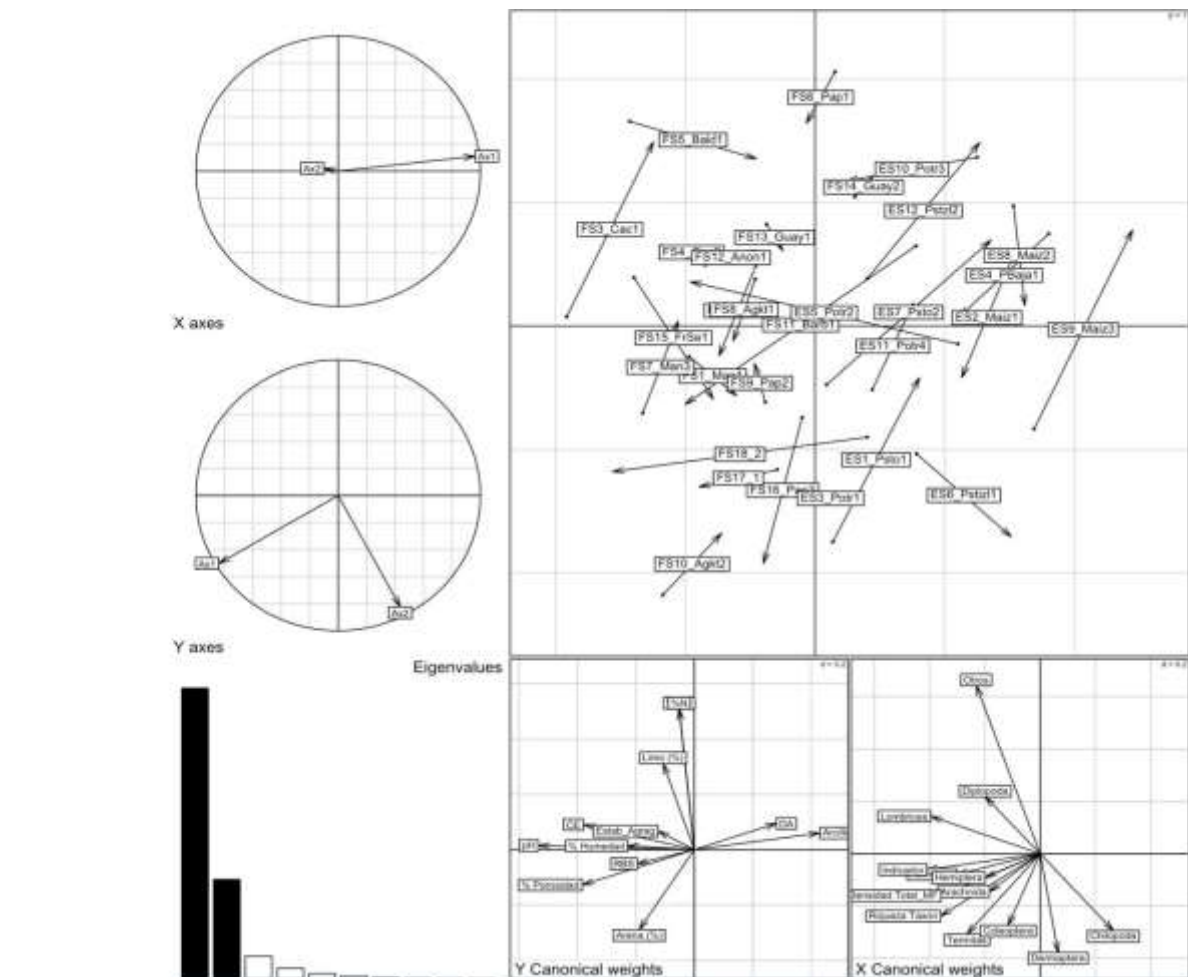


Figura 16. Análisis de coinercia de la macrofauna y las propiedades fisicoquímicas en los diferentes usos de suelo.

Se observa que suelos con mayor contenido de humedad, mayor proporción de limo y valores más altos de pH se relacionan con una mayor abundancia y diversidad de macrofauna, especialmente lombrices, diplópodos, y una mayor densidad total. Esto sugiere que estos organismos prefieren suelos con buena capacidad de retención de agua y condiciones favorables para su desarrollo y movilidad.

En cambio, suelos con mayor proporción de arena, menor porosidad, y mayor densidad aparente (DA) están asociados a grupos como coleópteros, dermápteros y quilópodos, los cuales podrían estar mejor adaptados a condiciones más secas, compactas o con menor disponibilidad de recursos.

Podemos decir que el análisis de coinercia demuestra que la composición y abundancia de la macrofauna edáfica es un reflejo directo de las características físicas y químicas del suelo. Estos resultados refuerzan la importancia de evaluar ambos componentes (suelo y fauna) de manera integrada para comprender la salud y funcionalidad de los ecosistemas edáficos.

6.3.2 Proyección factorial del análisis de coinercia propiedades fisicoquímicas

El análisis de coinercia de las proyecciones de las muestras permitió identificar la manera en que las propiedades fisicoquímicas del suelo se asocian y contribuyen a la diferenciación entre sitios. En el gráfico biplot se observan las direcciones y magnitudes de los vectores, lo que indica la fuerza y el sentido de la correlación de cada variable con los ejes principales.

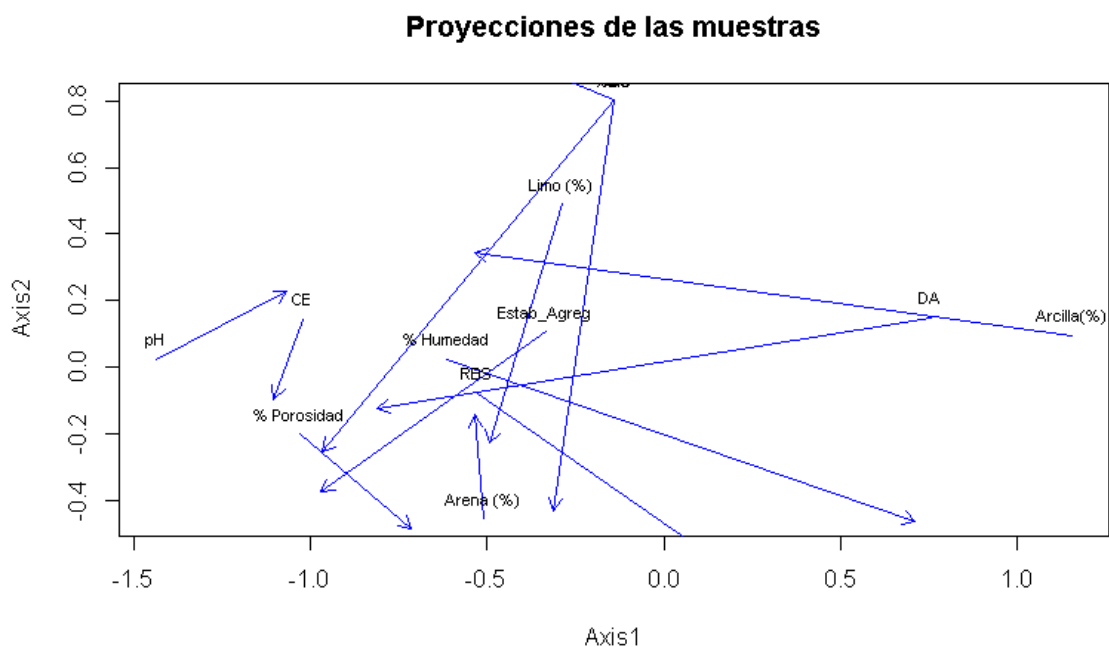


Figura 17. Proyección factorial del análisis de coinercia de las propiedades fisicoquímicas del suelo.

El primer eje (Axis uno) explica las mayores diferencias entre las propiedades del suelo. En las variables como arcilla (%) y densidad aparente (DA) se proyectan hacia la derecha, mostrando un comportamiento contrastante respecto a pH, conductividad eléctrica (CE), porosidad (%) y humedad (%), que se proyectan hacia la izquierda. Esta disposición sugiere que los suelos con mayor contenido de arcilla y DA tienden a presentar menor porosidad, menor humedad y valores más bajos de CE, lo que indica un posible efecto de compactación y menor disponibilidad de agua.

Por su parte, el segundo eje (Axis dos) permite distinguir la contribución de variables texturales como limo (%), arena (%) y estructura de agregados. La posición de estas variables señala que la textura del suelo es un factor determinante en la segregación de las muestras, generando gradientes que influyen tanto en la capacidad de retención de humedad como en la dinámica de nutrientes.

En conjunto, los resultados muestran que existe una clara coestructuración entre las variables fisicoquímicas, evidenciando relaciones opuestas entre parámetros de compactación y contenido de arcilla frente a variables relacionadas con la aireación, la porosidad y la disponibilidad de agua. Este patrón confirma que las propiedades físicas y químicas no actúan de manera aislada, sino que se organizan en gradientes ambientales que determinan la calidad y funcionalidad del suelo.

6.3.3 Evaluación de la significancia estadística del análisis de coinercia

El análisis de coinercia entre las variables fisicoquímicas y las comunidades de macrofauna mostró un valor observado de 0.3230, considerablemente mayor que los valores obtenidos en las 999 permutaciones realizadas. En el histograma del test de Montecarlo (figura 18) se observa que la mayor parte de los valores simulados se concentran entre 0.02 y 0.08, mientras que el valor empírico aparece desplazado hacia la derecha como un punto extremo, lo que evidencia un patrón de asociación muy superior a lo esperado por azar. La prueba de significancia arrojó un valor de $p = 0.003$, confirmando la existencia de una relación estadísticamente significativa entre ambos conjuntos de variables.

El estadístico estandarizado (3.80) refuerza esta conclusión, mostrando una clara desviación con respecto a la expectativa teórica (0.1737) y superando ampliamente la varianza observada (0.0015). Estos resultados indican que existe una coestructuración fuerte entre los factores fisicoquímicos del suelo y las comunidades de macrofauna.

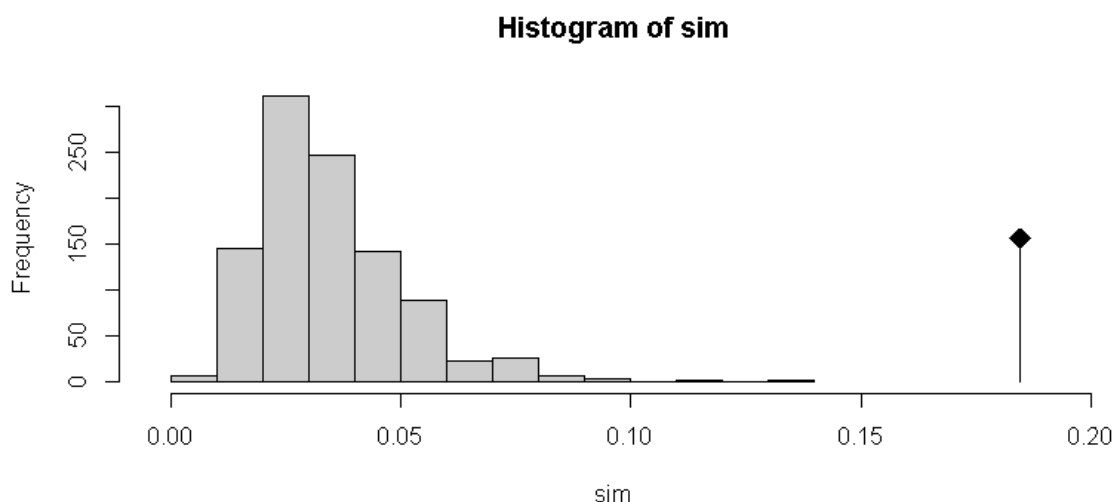


Figura 18. Histograma del test de Monte Carlo aplicado al análisis de coinercia entre las comunidades de macrofauna y las propiedades fisicoquímicas del suelo.

6.4 Dendograma del análisis clúster de los diferentes uso de suelo en el área de Frutales y finca demostrativa El Espino.

Se realizó un análisis de clúster con el objetivo de identificar si existen usos de suelo que se relacionan entre si y cuales presentan mayores diferencias. El análisis agrupó los sitios en cuatro clústeres diferenciados (Figura 19), lo que evidencia que tanto el uso del suelo como las condiciones fisicoquímicas influyen directamente en la composición y abundancia de la macrofauna edáfica.

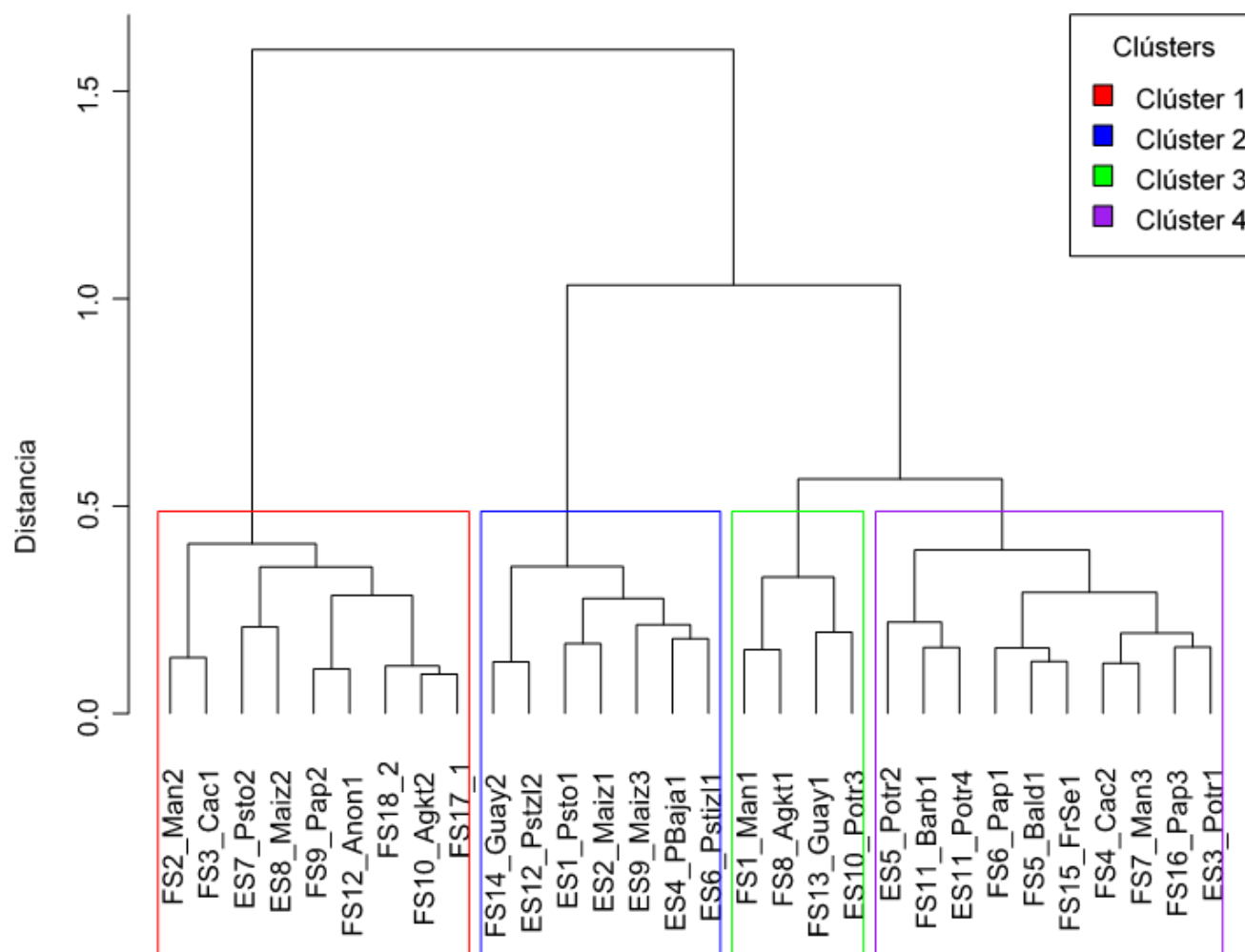


Figura 19. Dendrograma del análisis clúster de los diferentes usos de suelo de las áreas de estudio.

El clúster uno agrupa los usos de suelo correspondientes a Frutales y a la finca demostrativa El Espino, los cuales presentan la mayor diversidad biológica registrada. Este grupo incluye principalmente los sitios de frutales, caracterizados por una alta densidad de macrofauna (70–83 ind/m²) y una riqueza taxonómica elevada ($\approx$ 55–60).

En estos suelos se encontraron las mayores cantidades de lombrices y hormigas, que constituyen los grupos dominantes, acompañados por coleópteros y, en menor proporción, por diplópodos y arácnidos. En contraste, los chilópodos estuvieron presentes en cantidades muchos menores, lo que refleja que este tipo de suelo ofrece condiciones más favorables para organismos edáficos asociados a procesos de descomposición y aireación del suelo, como las lombrices y las hormigas.

Estas comunidades se desarrollan en suelos con propiedades fisicoquímicas óptimas, caracterizados por un pH neutro a ligeramente alcalino (8.2–8.5), buena porosidad (>40%), humedad moderada (30–40%) y un mayor contenido de materia orgánica (5–10%). Dichas condiciones contribuyen a generar microhábitats estables y recursos suficientes que favorecen tanto la abundancia como la diversidad de macrofauna edáfica, consolidando a los sitios de frutales como los de mayor potencial en términos de biodiversidad y funcionalidad ecológica del suelo.

El clúster dos representa los sitios con baja diversidad. Incluye la mayoría de los sitios de la finca demostrativa El Espino, especialmente los de cultivo de maíz, pastizales y potreros. Presentan baja riqueza taxonómica (47–53) y menor diversidad en la macrofauna, dominada por chilópodos y algunas lombrices, con ausencia o escasa representación de termitas, hormigas y coleópteros. Estos suelos tienen pH más ácido (5.6–7.0), alta densidad aparente (>1.4 g/cm³), baja porosidad (<35%) y menor contenido de materia orgánica. La compactación causada por el pisoteo del ganado y la labranza del maíz limita los nichos disponibles para la macrofauna, generando un ambiente menos favorable para organismos sensibles.

El clúster tres corresponde a los usos de suelo del área de Frutales Finca Demostrativa El Espino con condiciones intermedias. Este grupo presentan valores de riqueza y densidad menores en comparación con el clúster uno, aunque mantienen una representación destacada de taxones como lombrices, termitas y coleópteros. A diferencia del clúster uno, en estos suelos no se registró la presencia de Chilópodos ni de hormigas, mientras que los diplópodos se encontraron en cantidades moderadas, lo que evidencia un cambio en la composición de la macrofauna asociada.

Estas diferencias faunísticas se relacionan con condiciones edáficas particulares: menor estabilidad de agregados y contenidos intermedios de materia orgánica (4–7%). Dichas características reflejan el impacto de un manejo agrícola más intensivo, como podas, fertilización o laboreo, que modifica la estructura del suelo y reduce la disponibilidad de microhábitats. En consecuencia, aunque se mantiene una comunidad relativamente diversa, el ensamble de especies es menos equilibrado y muestra una composición distinta a la observada en los suelos con mejores condiciones de conservación.

El clúster cuatro representa los usos de suelo de Frutales y de la finca demostrativa El Espino, correspondientes a sitios aislados que muestran un estado de conservación relativamente mejor. Este clúster reúne áreas con valores intermedios de riqueza y abundancia, en las que se registró la presencia de distintos grupos, aunque en densidades menores respecto a los clústeres con mayor diversidad.

A nivel de composición faunística, se caracteriza por la ausencia de termitas, así como por la presencia muy reducida de coleópteros y diplópodos. En contraste, los Chilópodos se encontraron en cantidades considerables, lo que refleja un patrón de dominancia asociado a su capacidad de adaptación a condiciones menos favorables. Este predominio indica que, aunque los suelos presentan cierta recuperación, las comunidades edáficas tienden a estar conformadas por grupos resistentes a perturbaciones y con menores exigencias ecológicas.

Desde el punto de vista edáfico, estos suelos se distinguen por poseer mejores condiciones de agregación y un mayor contenido de carbono orgánico en comparación con el clúster tres. Esto sugiere que las prácticas menos intensivas o la menor presión ganadera en algunas de estas áreas han permitido un proceso de recuperación parcial, favoreciendo la estabilidad del suelo y la presencia de ciertos grupos de macrofauna, aunque con una composición más restringida.

6.4.1 Distribución de las comunidades de macrofauna en los diferentes usos de suelo en las áreas de Frutales y Finca Demostrativa El Espino.

Al analizar la distribución de la macrofauna en los diferentes usos de suelo, se evidencian diferencias marcadas entre el área de frutales y la finca demostrativa El Espino.

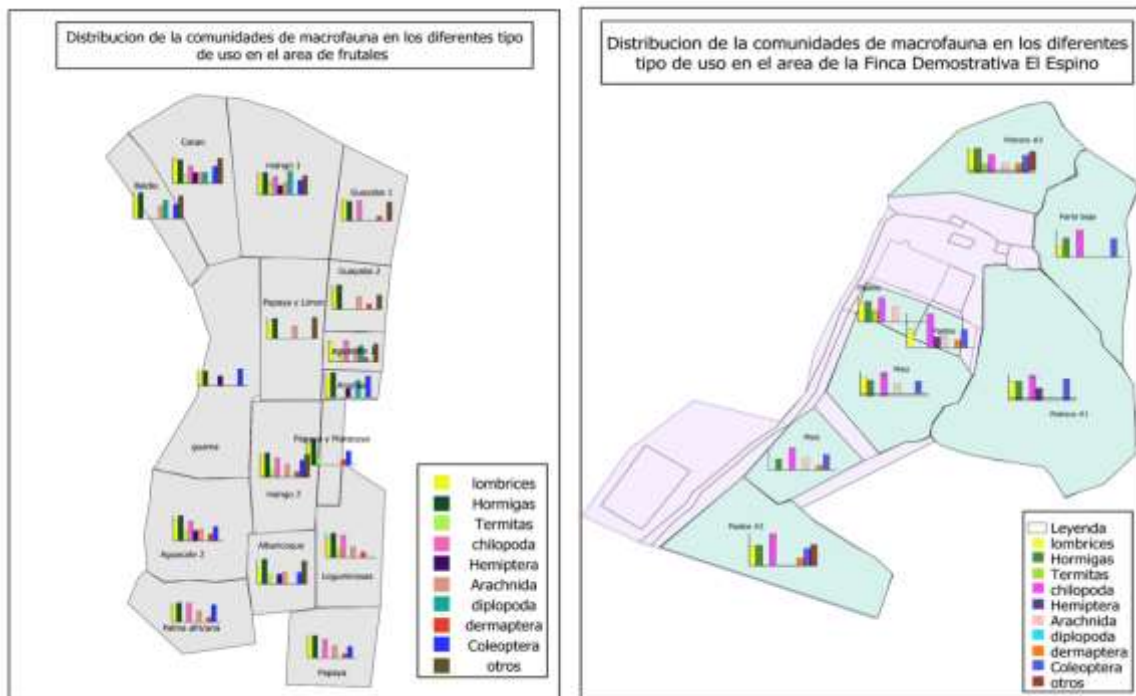


Figura 20. Distribución de las comunidades de macrofauna en los diferentes usos de suelo en las áreas de Frutales y Finca Demostrativa El Espino.

En el área de frutales, se observó una mayor riqueza y abundancia de organismos edáficos. Los grupos dominantes fueron las lombrices y las hormigas, que aparecieron en casi todos los cultivos, alcanzando densidades destacadas en aguacate, guayaba, leguminosas y papaya. Estos organismos son bioindicadores importantes, pues su presencia en cantidades considerables refleja suelos con mejores condiciones de materia orgánica, aireación y estabilidad estructural (Lavelle *et al.* 2021). Además, en varios sitios también se registró la presencia de coleópteros y diplópodos, lo cual aportó a la diversidad y mostró que en estos suelos existe un ambiente favorable para diferentes grupos de macrofauna.

En contraste, en la finca demostrativa El Espino la composición de la macrofauna fue más limitada. En los potreros y pastizales, la presencia de lombrices y hormigas fue muy reducida, mientras que los Chilópodos se encontraron en cantidades relativamente altas, convirtiéndose en el grupo dominante. Esto refleja un suelo con menor calidad biológica, ya que los chilópodos suelen adaptarse mejor a ambientes más compactados y empobrecidos. En el área de maíz se detectaron algunos grupos adicionales, pero siempre en densidades bajas en comparación con los frutales.

VII CONCLUSIONES

La identificación de 10 grupos taxonómicos funcionales en las áreas de Frutales y la finca demostrativa El Espino demuestra que, aunque ambos usos de suelo mantienen comunidades biológicas representativas, las diferencias observadas en la distribución y abundancia confirman que el manejo agrícola influye de manera directa en la diversidad y estructura de la macrofauna edáfica

Los diferentes usos de suelo influyen de manera determinante en la diversidad y abundancia de la macrofauna edáfica. En particular, los suelos manejados bajo sistemas de Frutales favorecen una mayor riqueza y equilibrio en las comunidades, mientras que en la finca demostrativa El Espino las prácticas de manejo aplicadas contribuyen a la reducción de la biodiversidad y abundancia, lo que evidencia el papel del uso y manejo del suelo como factores clave en las sostenibilidad de las comunidades de macrofauna edáfica.

Los resultados evidenciaron que las propiedades fisicoquímicas del suelo ejercen una influencia significativa sobre la diversidad de la macrofauna edáfica, determinando en gran medida su composición, abundancia y distribución.

VIII RECOMENDACIONES

Para futuros trabajo de investigación, es recomendable enfocar el estudio en una sola área y para cada tipo de uso de suelo hacer de entre tres a cinco muestras. Esto permitirá obtener una mayor cantidad y calidad de datos, facilitando así una mejor identificación de los taxonómicos presente en los diferentes usos de suelo.

Se recomienda que en futuras investigaciones se incorpore el análisis de la morfología del suelo, evaluando la contribución de los agregados de distintos tamaños y orígenes, plantas gravas piedras y otros componentes, ya que es muy importante porque permite comprender mejor las propiedades hidráulicas y el secuestró de carbono. Y así tener mayor información sobre los suelos evaluados.

Es necesario disponer con las herramientas adecuadas para la recolección e identificación de las muestras, ya que no solo facilitara mejor el trabajo de campo sino que también garantizara una mayor precisión, eficiencia y calidad de los resultados.

Para la aplicación del método TSBF, se sugiere evitar un muestreo completamente aleatorio y, en su lugar, seleccionar puntos estratégicos. Es preferible realizar el muestreo en sitios con mayor cobertura vegetal o en las cercanías de árboles o cultivos, ya que estas áreas suelen reflejar mejor la dinámica biológica del suelo

IX REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altieri, MA. «Agroecología: Bases científicas para una agricultura sostenible. monte.» 2019.
- Anderson, J.M. and Ingram, J.I.S. «Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods.» *American Journal of Climate Change* (C.A.B. International, Wallingford) 2 edición (1993): 221.
- Cabrera Davila, Griselda de la Caridad, et. «Evaluación de la macrofauna como indicador del estado de salud en siete sistemas de uso de la tierra, en Cuba.» *Pastos y Forrajes*, 2017: 118-126.
- Cabrera-Davila, Griselda de la C. «Manual práctico sobre la macrofauna del suelo.» Manual , Cuba , 2007, 7.
- Cabrera-Mireles Hector, Félix D. Murillo-Cuevas, Jacel Adame-García, José Antonio Fernández-Viveros. «IMPACTO DEL USO DEL SUELO SOBRE LA MESO Y MACROFAUNA EDÁFICA EN CAÑA DE AZÚCAR Y PASTO.» *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, nº 22 (2019): 33-43.
- Calderón-Medina, Claudia L., Gina P. Bautista-Mantilla, y Salvador Rojas-González. «Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores.» *ORINOQUIA - Universidad de los Llanos* 22, nº 2 (2018): 141-157.
- CIFL_A. «Los tres factores que influyen en la calidad del suelo.» *FOCAL*, 2019.
- CRISTINA, LEMA VELOZ NATALY. «DETERMINACIÓN DE LA MACROFAUNA EDÁFICA EN DISTINTOS USOS DE SUELO EN TRES AGROECOSISTEMAS DE LA COMUNIDAD DE NAUBUG».» Tesis, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, Liobamba, 2016.
- Elena Velasquez, , Patrick Lavelle, Mercedes Andrade. «GISQ, a multifunctional indicator of soil quality.» *Soil Biology and Biochemistry* , Junio 2007: 3066-3080.
- Eliana Hurtado Lugo, Elena Vaquez Ibañez, Patrick Lavelle. «A global indicator of soil macroinvertebrate community composition, abundance and diversity.» *Applied Soil Ecology* 193 (Enero 2024).
- George G, Brown, Carlos Frago, Isabelle Barois, Patricia Borjas, Jose C. «Diversidad y rol de la macrofauna edáfica en los ecosistemas tropicales en México.» *Acta Zool. Mex (n.s)*, nº 1 (2001): 79-110.
- Griselda, Cabrera. «La macrofauna edáfica como indicador biológico del estado de conservación/perturbación del suelo. Resultados obtenidos en Cuba.» *Pastos y Forrajes* 35, nº 4 (2010): 349-363.

- Guillaume Rousseau, Jesús Burgos-Guerrero, Luis Hernández-García, Ernesto Gómez-Cardozo, Stefania Triana, Julio Medina, Kellen da Silva, Danielle Celentano. «Potential of slash-and-mulch system with legumes to conserve soil attributes and macrofauna diversity in Eastern Amazon,» *Pedobiologia* 95 (2022).
- Gutiérrez, Ana María Rubio. «LA DENSIDAD APARENTE EN SUELOS FORESTALES DEL PARQUE NATURAL LOS ALCORNOCALES .» proyecto final de carrera , Sevilla, 2010.
- Hernandez Sampieri, Roberto, Carlos Hernandez Collado, and Lucio Pilar Bautista. "Metodología de la investigación." Edited by McGraw Hill España. *Dialnet* 6 (2014).
- Ibáñez, Juan José. «Funciones de los Organismos del Suelo: La biota Edáfica.» *Madrid Blogs*, 2007.
- Ing. Agr. L. Rucks, Ing. Agr. F. García, Ing. Agr. A. Kaplán, Ing. Agr. J. Ponce de León, Ing. Agr. M. Hill. «Propiedades Físicas del Suelo.» FACULTAD DE AGRONOMÍA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA, Montevideo- Uruguay, 2004.
- INTAGRI. «Propiedades físicas del suelo y el crecimiento de las plantas.» *Articulos Tecnicos de INTRAGI*, nº 29 (2017): 5.
- Jean Thioulouse, Monique Simier y Jean-Michell Olivier. *ADE-4 Software: a tool for multivariate analysis and graphical display*. Vol. 24, de *Oceanis*, de M. Simier et al, 393-416. 1998.
- Lal, R. «Salud del suelo y agricultura sostenible.» 2015.
- Lavelle, Patricio, y otros. «Comunidades de macroinvertebrados del suelo: una evaluación mundial.» *Global Ecology*, Marzo 2022: 1261-1276.
- Lavelle, Patrick, Ervin Duran, Laurent Rousseau, y Catalina Sanabria and Joel Vasquez. «Soil Macroinvertebrate Communities as Indicators of Ecosystem Services in American Tropical Environments.» *Biodiversity Online J* 1, nº 4 (27 2021): 0-5.
- López, Jesús Castro. «PAPEL DE LA FAUNA EDÁFICA EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS ECOSISTEMAS AGRICOLAS.» Tesis doctoral, Universidad de Vigo, VIGO, 2017.
- Matson, PA, Parton, WJ, Power, AG y Swift, MJ. «Intensificación agrícola y propiedades de los ecosistemas.» *Science*, 1999.
- Nix, Jamie. «Impacto de la Salud del Suelo en la Sostenibilidad Agrícola.» *Biome makers*, 2023.
- Orosco Luis, Chavarria Daniel, Torres Merling, Rousseau Guillaume, Chavarria Francisco, Lopez Arlene y Vasquez Fabio. «Calidad del suelo y diversidad de macrofuna e cacaotales y fragmentos de bosque eb Wasala, RAAN, Nicaragua.» *Ciencias de la UNAH-Leon* 7, nº 2 (2016): 26-38.

- P. Lavelle, B. K. Senapati and E.Barros. «Soil Macrofauna, In: Trees, Crops and soil fertility: Concepts and Research Methods.» (Eds.) G.Schroth and F..L.Sinclair, *Cabi International (U.K.)*, 2003: 303-324.
- Quiroz, Alejandra Jenyffer Pozo. «CARACTERIZACIÓN DE LA MACROFAUNA EDÁFICA COMO BIOINDICADOR DEL IMPACTO DE DOS USOS DE LA TIERRA EN EL CENTRO DE APOYO MANGLARALTO.» Tesis, Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad, 2020.
- Reinés, Saray Sánchez y Martha. «PAPEL DE LA MACROFAUNA EDAFICA EN LOS ECOSISTEMAS GANADEROS.» *Pastos y forrajes* 24, nº 3 (2001).
- Sánchez Rendón Jorge A, Grisel de la C. Cabrera Dávila, Daniel Ponce de León Lima. «Macrofauna edáfica: composición, variación y utilización como bioindicador según el impacto del uso y calidad del suelo.» *Acta Botánica Cubana* (Acta Botánica Cubana) 221 (Enero-Diciembre 2022).
- Stivers, Lee. «Introducción a los Suelos: La Calidad de los Suelos.» *Extensión de Penn State*, Enero 2023.
- Tsiafouli, MA, Thebault, E., Sgardelis, SP, et al. «La agricultura intensiva reduce la biodiversidad del suelo en toda Europa.» *Global Change Biology* 21, nº 2 (2015).
- USDA. «Guía para la Evaluación de la calidad y salud del suelo.» Instituto de Calidad de suelos , 1999.
- Zerbino, S., N. Altier, A. Morón, y C. Rodríguez. «Evaluación De La Macrofauna Del Suelo En Sistemas De producción En Siembra directa y con pastoreo.» *Agrociencia Uruguay* 12, nº 1 (2008): 44-55.

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de datos generales de los puntos de muestreo del área de Frutales y finca demostrativa El espino

Muestras	Área	Tipo de uso	Temporada	coordenadas		Fecha
FS1_Man1	área de Frutales	Mango	Temp. Seca	623889.00	1639943.00	13/2/2025
FS2_Man2	área de Frutales	Mango	Temp. Seca	623889.00	1639855.00	14/2/2025
FS3_Cac1	área de Frutales	Cacao	Temp. Seca	623767.00	1639935.00	14/2/2025
FS4_Cac2	área de Frutales	Cacao	Temp. Seca	623828.00	1639878.00	17/2/2025
FS5_Bald1	área de Frutales	Baldío	Temp. Seca	623757.00	1639899.00	17/2/2025
FS6_Pap1	área de Frutales	Papaya y limones	Temp. Seca	623891.00	1639737.00	18/2/2025
FS7_Man3	área de Frutales	Mango	Temp. Seca	623894.00	1639628.00	18/2/2025
FS8_Agkt1	área de Frutales	Aguacate	Temp. Seca	623936.00	1639734.00	19/2/2025
FS9_Pap2	área de Frutales	papaya y maracuyá	Temp. Seca	623929.00	1639664.00	19/2/2025
FS10_Agkt2	área de Frutales	Aguacate y Limones	Temp. Seca	623769.00	1639490.00	24/2/2025
FS11_Barb1	área de Frutales	Barbecho	Temp. Seca	623843.00	1639691.00	24/2/2025
FS12_Anón1	área de Frutales	Anónas	Temp. Seca	623968.00	1639674.00	3/3/2025
FS13_Guay1	área de Frutales	guayaba	Temp. Seca	623936.00	1639780.00	3/3/2025
FS14_Guay2	área de Frutales	guayaba	Temp. Seca	623974.00	1639902.00	4/3/2025
FS15_FrSe1	área de Frutales	Albaricoque	Temp. Seca	623879.00	1639452.00	7/3/2025
FS16_Pap3	área de Frutales	papaya	Temp. Seca	623904.00	1639412.00	7/3/2025
FS17_1	área de Frutales	Leguminosas	Temp. Seca	623943.00	1639467.00	19/3/2025
FS18_2	área de Frutales	Palma Africana	Temp. Seca	623842.00	1639457.00	19/3/2025
ES1_Psto1	área El Espino	pasto	Temp. Seca	623576.00	1640471.00	20/3/2025
ES2_Maiz1	área El Espino	maíz	Temp. Seca	623544.00	1640350.00	20/3/2025
ES3_Potr1	área El Espino	potrero	Temp. Seca	623719.00	1640699.00	20/3/2025
ES4_PBaja1	área El Espino	Parte Baja	Temp. Seca	623737.00	1640588.00	21/3/2025
ES5_Potr2	área El Espino	potrero	Temp. Seca	623679.00	1640424.00	21/3/2025
ES6_Pstizl1	área El Espino	pastizal	Temp. Seca	623322.00	1640195.00	21/3/2025
ES7_Psto2	área El Espino	Pasto	Temp. Lluviosa	623543.00	1640486.00	12/6/2025
ES8_Maiz2	área El Espino	Maíz	Temp. Lluviosa	623467.00	1640374.00	12/6/2025
ES9_Maiz3	área El Espino	Maíz	Temp. Lluviosa	623391.00	1640298.00	12/6/2025
ES10_Potr3	área El Espino	potrero	Temp. Lluviosa	623588.00	1640689.00	13/6/2025
ES11_Potr4	área El Espino	potrero	Temp. Lluviosa	623751.00	1640319.00	13/6/2025
ES12_Pstzl2	área El Espino	Pastizal	Temp. Lluviosa	623404.00	1640173.00	13/6/2025

Anexo 2. Tabla de Comunidades de macrofauna en los diferentes uso de suelo en el área de Frutales.

Uso_Suelo	Temporada	lombrices	Hormigas	Termitas	Chilopoda	Hemiptera	Arachnida	Diplopoda	Dermaptera	Coleoptera	Otros	Densidad Total	Riqueza Taxo	Indicador
FS1_Man1	Temp. Seca	27.79	0.00	26.71	38.40	19.08	25.51	48.89	0.00	29.79	24.39	78.26	58.84	0.63
FS2_Man2	Temp. Seca	40.39	46.27	20.30	34.01	0.00	0.00	0.00	0.00	24.14	39.38	74.65	55.39	0.57
FS3_Cac1	Temp. Seca	51.94	48.87	18.28	36.48	22.43	22.91	23.11	0.00	24.14	39.38	81.14	60.26	0.70
FS4_Cac2	Temp. Seca	47.64	47.24	0.00	34.01	17.14	22.91	0.00	0.00	35.57	51.93	79.49	57.24	0.65
FS5_Bald1	Temp. Seca	46.26	53.93	0.00	0.00	0.00	25.51	38.56	0.00	29.79	47.21	83.49	55.39	0.63
FS6_Pap1	Temp. Seca	36.36	42.18	0.00	0.00	0.00	25.51	0.00	0.00	0.00	44.56	69.44	50.54	0.48
FS7_Man3	Temp. Seca	45.03	50.78	18.28	39.97	0.00	27.36	0.00	11.66	35.57	47.77	81.32	58.84	0.68
FS8_Agkt1	Temp. Seca	41.14	0.00	22.17	44.40	0.00	28.80	34.05	9.45	0.00	37.83	72.26	57.24	0.59
FS9_Pap2	Temp. Seca	44.10	53.93	16.68	0.00	0.00	0.00	0.00	11.66	29.79	0.00	81.59	53.21	0.51
FS10_Agkt2	Temp. Seca	43.59	52.74	20.30	41.31	21.55	25.51	0.00	13.92	29.79	0.00	82.18	58.84	0.65
FS11_Barb1	Temp. Seca	30.93	30.51	0.00	0.00	20.47	0.00	0.00	0.00	35.57	0.00	58.93	50.54	0.42
FS12_Anón1	Temp. Seca	44.58	52.30	0.00	0.00	19.08	0.00	35.84	0.00	44.84	0.00	80.96	53.21	0.56
FS13_Guay1	Temp. Seca	45.46	50.78	0.00	0.00	0.00	27.36	0.00	11.66	0.00	30.10	78.38	53.21	0.52
FS14_Guay2	Temp. Seca	43.59	40.09	0.00	42.47	0.00	0.00	0.00	9.45	0.00	39.38	70.71	53.21	0.52
FS15_FrSe1	Temp. Seca	34.93	52.02	21.03	0.00	20.47	25.51	0.00	0.00	24.14	48.29	81.14	57.24	0.61
FS16_Pap3	Temp. Seca	43.59	47.24	0.00	38.40	0.00	25.51	0.00	9.45	24.14	0.00	74.65	55.39	0.55
FS17_1	Temp. Seca	41.83	51.33	18.28	47.33	0.00	22.91	0.00	11.66	0.00	0.00	79.90	55.39	0.56
FS18_2	Temp. Seca	30.93	40.09	0.00	39.97	0.00	22.91	0.00	9.45	35.57	0.00	66.71	55.39	0.52

Anexo 3. Tabla de Comunidades de macrofauna en los diferentes uso de suelo en la Finca demostrativa El Espino

Uso_Suelo	Temporada	Lombrices	Hormigas	Termitas	Chilopoda	Hemiptera	Arachnid	Diplopoda	Dermaptera	Coleoptera	Otros	Densidad Total	Riqueza Taxo	Indicador
ES1_Psto1	Temp. Seca	36.36	0.00	0.00	66.42	21.55	22.91	0.00	14.66	35.57	0.00	83.41	55.39	0.57
ES2_Maiz1	Temp. Seca	30.93	0.00	0.00	36.48	0.00	18.57	0.00	0.00	24.14	0.00	53.47	50.54	0.40
ES3_Potr1	Temp. Seca	27.79	47.24	16.68	34.01	0.00	18.57	0.00	9.45	33.16	0.00	72.66	57.24	0.54
ES4_PBaja1	Temp. Seca	30.93	0.00	0.00	38.40	0.00	0.00	0.00	0.00	33.16	0.00	55.61	47.12	0.39
ES5_Potr2	Temp. Seca	22.52	37.14	0.00	52.38	0.00	0.00	0.00	0.00	35.57	0.00	69.44	50.54	0.47
ES6_Pstizl1	Temp. Seca	27.79	38.47	0.00	60.01	0.00	0.00	0.00	13.92	24.14	0.00	76.75	53.21	0.51
ES7_Psto2	Temp. Lluviosa	36.36	40.09	22.17	47.33	0.00	28.80	0.00	0.00	0.00	0.00	73.05	53.21	0.52
ES8_Maiz2	Temp. Lluviosa	33.18	30.51	0.00	45.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	62.01	47.12	0.41
ES9_Maiz3	Temp. Lluviosa	0.00	20.71	0.00	42.47	0.00	22.91	0.00	9.45	29.79	0.00	58.19	53.21	0.43
ES10_Potr3	Temp. Lluviosa	38.62	0.00	0.00	30.55	0.00	0.00	0.00	12.98	0.00	35.93	60.27	50.54	0.42
ES11_Potr4	Temp. Lluviosa	27.79	37.14	0.00	49.02	23.18	0.00	0.00	0.00	41.41	0.00	70.46	53.21	0.52
ES12_Pstzl2	Temp. Lluviosa	36.36	25.56	0.00	44.40	0.00	0.00	0.00	11.66	29.79	40.69	65.99	55.39	0.53

Anexo 4. Tabla Valores de las variables fisicoquímicas en el área de Frutales

Sitios	Uso Suelo	Temporada	pH	Densidad aparente	% porosidad	% Humedad	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	RBS	%C O	%MO	%N	Estb agregados	Cond electrica
Frutales	FS1_Man1	Temp. Seca	8.2	1.345	42.16	35.26	80	13.2	6.8	83.41	3.16	5.46	0.27	4.56	100
Frutales	FS2_Man2	Temp. Seca	8.2	1.343	40.89	33.73	86	1.2	12.8	389.34	4.16	7.16	0.36	5.47	110
Frutales	FS3_Cac1	Temp. Seca	8.3	1.205	42.16	39.31	70	15.2	14.8	514.11	5.91	10.19	0.51	6.00	130
Frutales	FS4_Cac2	Temp. Seca	8.3	1.297	43.56	36.82	66	21.2	12.8	28.49	4.02	6.93	0.35	5.93	130
Frutales	FS5_Bald1	Temp. Seca	8.3	1.357	40.31	29.11	70	18.2	11.8	25.39	5.44	9.37	0.47	5.57	110
Frutales	FS6_Pap1	Temp. Seca	8.3	1.461	37.17	27.95	62	23.2	14.8	8.33	5.38	9.27	0.46	5.02	120
Frutales	FS7_Man3	Temp. Seca	8.3	1.249	45.04	34.25	82	7.2	10.8	73.01	4.17	7.19	0.36	6.53	140
Frutales	FS8_Agkt 1	Temp. Seca	8.3	1.271	45.35	34.63	62	21.2	16.8	91.78	2.91	5.01	0.25	6.83	130
Frutales	FS9_Pap2	Temp. Seca	8.4	1.334	39.99	30.43	66	21.2	12.8	181.10	2.78	4.80	0.24	5.45	120
Frutales	FS10_Agk t2	Temp. Seca	8.5	1.274	45.84	30.18	82	9.2	8.8	223.43	1.80	3.11	0.16	4.98	90
Frutales	FS11_Bar b1	Temp. Seca	8.2	1.194	48.64	30.07	84	9.2	6.8	51.48	3.39	5.85	0.29	5.96	100
Frutales	FS12_Ano n1	Temp. Seca	8.4	1.354	39.06	32.89	64	21.2	14.8	205.64	4.04	6.97	0.35	6.23	110
Frutales	FS13_Gua y1	Temp. Seca	8.3	1.464	33.38	25.38	58	29.2	12.8	120.61	3.46	5.97	0.30	3.67	190
Frutales	FS14_Gua y2	Temp. Seca	8.1	1.582	29.59	22.02	62	27.2	10.8	46.16	4.47	7.71	0.39	6.30	70
Frutales	FS15_FrSe 1	Temp. Seca	8.4	1.280	43.70	30.84	81.2	11	7.8	34.70	3.17	5.47	0.27	5.73	110
Frutales	FS16_Pap 3	Temp. Seca	8.5	1.465	40.65	32.42	88.2	5.4	6.4	35.51	1.52	2.61	0.13	3.95	110
Frutales	FS17_1	Temp. Seca	8.4	1.295	42.35	38.00	87.2	2.4	10.4	241.95	2.54	4.39	0.22	5.59	120
Frutales	FS18_2	Temp. Seca	8.1	1.055	51.46	47.29	84.2	7	8.8	273.20	2.78	4.80	0.24	6.03	110

Anexo 5. Tabla Valores de las variables fisicoquímicas en el área de la Finca demostrativa El Espino

Sitios	Uso Suelo	Temporada	pH	Densidad aparente	% porosidad	% Humedad	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	RBS	%C O	%MO	%N	Estb agregados	Cond electrica
El_Espino	ES1_Pst o1	Temp. Seca	7.4	1.468	39.83	27.82	69.2	10.4	20.4	49.87	3.02	5.21	0.26	5.36	60
El_Espino	ES2_Ma iz1	Temp. Seca	7.3	1.543	29.02	25.80	69.2	12.4	18.4	88.95	2.72	4.70	0.23	6.56	50
El_Espino	ES3_Pot r1	Temp. Seca	8.4	1.447	34.89	15.76	69.6	12	18.4	21.37	1.35	2.32	0.12	5.38	150
El_Espino	ES4_PB aja1	Temp. Seca	6.6	1.408	34.55	22.61	77.6	3	19.4	7.75	4.16	7.17	0.36	6.07	50
El_Espino	ES5_Pot r2	Temp. Seca	8.1	1.137	46.56	47.37	59.6	28	12.4	79.80	3.62	6.24	0.31	3.75	140
El_Espino	ES6_Pst izl1	Temp. Seca	6.7	1.435	33.28	20.01	69.6	10	20.4	15.00	1.05	1.81	0.09	5.97	40
El_Espino	ES7_Pst o2	Temp. Lluviosa	6.7	1.508	30.63	24.06	67.2	8.8	24	165.93	4.56	7.86	0.39	4.84	70
El_Espino	ES8_Ma iz2	Temp. Lluviosa	6.9	1.624	26.92	18.20	67.2	8.8	24	344.73	3.75	6.47	0.32	4.56	60
El_Espino	ES9_Ma iz3	Temp. Lluviosa	5.6	1.520	25.51	19.47	59.2	12.8	28	14.90	4.27	7.36	0.37	4.38	50
El_Espino	ES10_P otr3	Temp. Lluviosa	6.8	1.264	39.95	44.08	61.2	12.8	26	128.75	5.08	8.76	0.44	4.84	140
El_Espino	ES11_P otr4	Temp. Lluviosa	6.3	1.510	32.04	24.43	77.2	10.8	12	15.88	3.92	6.77	0.34	5.67	110
El_Espino	ES12_P stzl2	Temp. Lluviosa	6.5	1.417	31.28	21.81	67.2	10.8	22	46.04	5.66	9.75	0.49	6.50	50

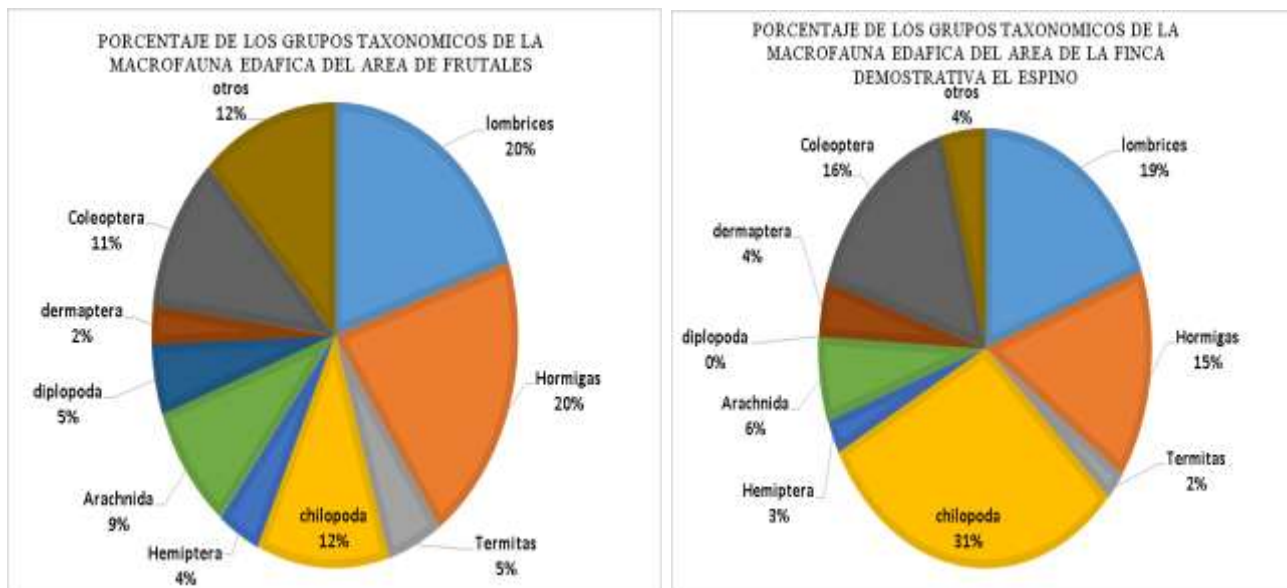
Anexo 6. Método de extracción del monolito 25 x 25 para la identificación y cuantificación de la macrofauna del suelo (TSBF).



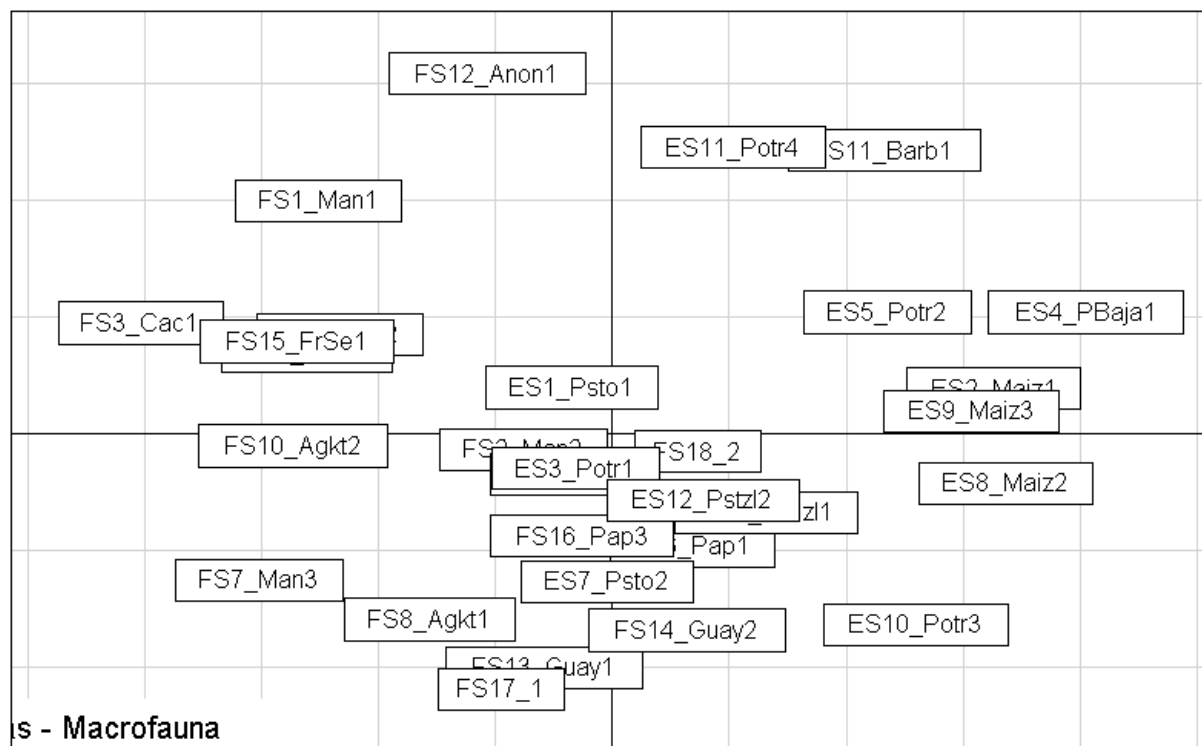
Anexo 7. Identificación y clasificación de las comunidades macrofauna del suelo



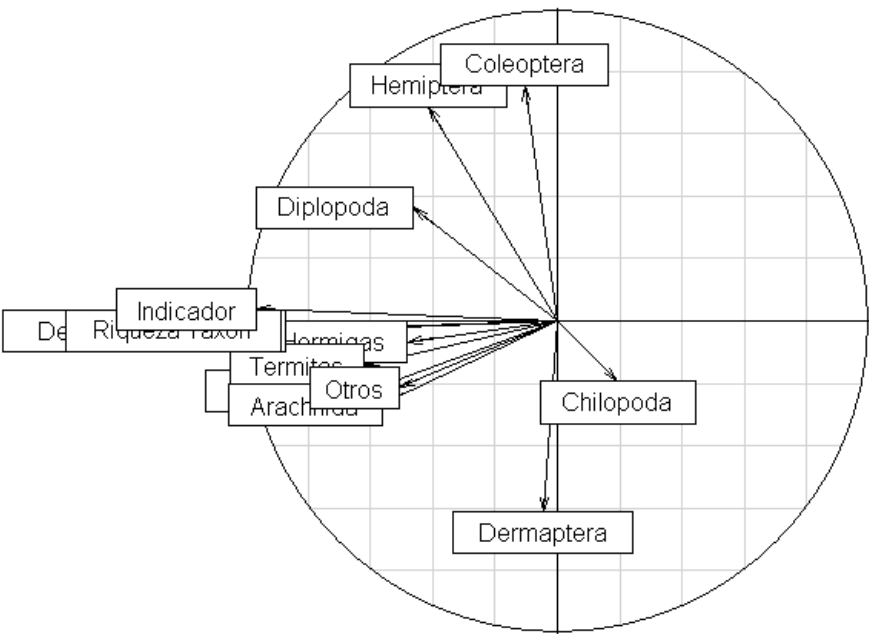
Anexo 8. Densidad porcentual de los grupos taxonómicos de la macrofauna en las áreas de Frutales Y Finca demostrativa El Espino



Anexo 9. ACP de la macrofauna de los diferentes usos de suelo en las áreas de Frutales y Finca Demostrativa El Espino

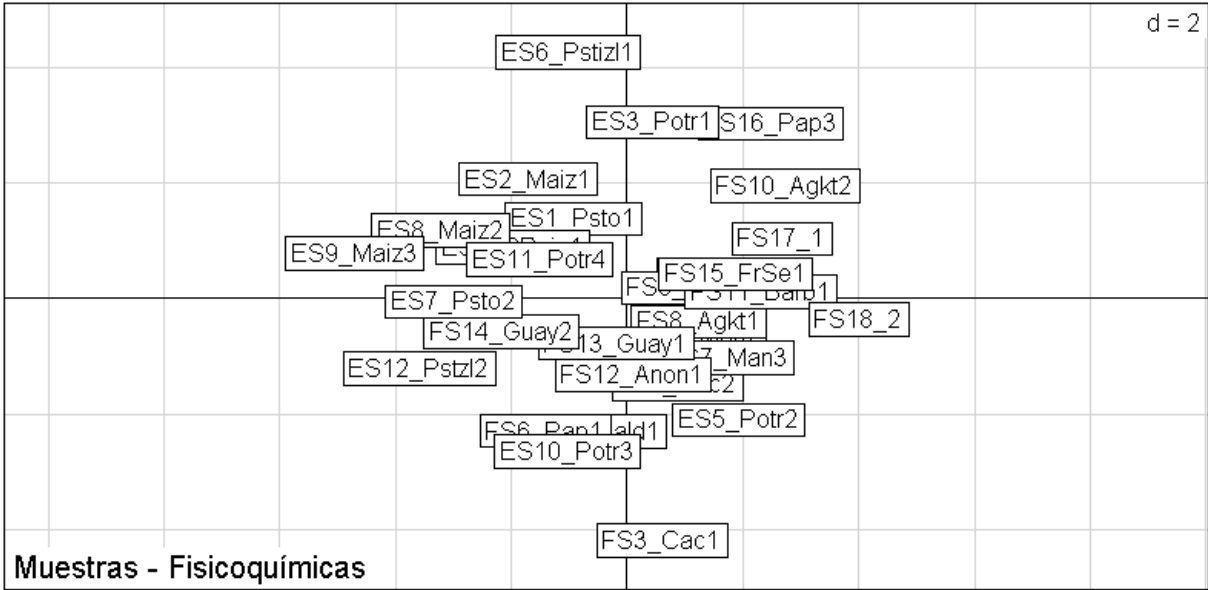


Anexo 10. ACP de la macrofauna de los distintos grupos taxonómicos en las áreas de Frutales y Finca Demostrativa El Espino

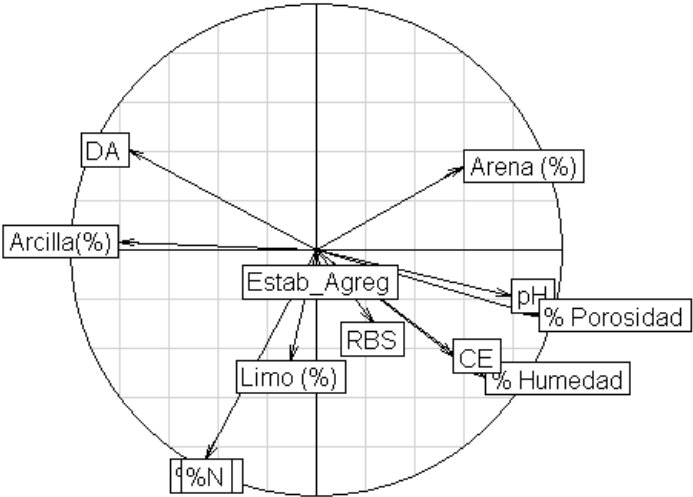


Macrofauna

Anexo 11. ACP de las propiedades fisicoquímicas de los diferentes usos de suelo en las áreas de Frutales y Finca Demostrativa El Espino



Anexo 12. ACP de las propiedades fisicoquímicas en las áreas de Frutales y Finca Demostrativa El Espino



Variables - Fisicoquímicas