

**UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE
MENDOZA DE AMAZONAS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA ZOOTECNISTA,
BIOTECNOLOGÍA, AGRONEGOCIOS Y CIENCIA DE DATOS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ZOOTECNISTA
TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERA ZOOTECNISTA**

**ASOCIACIÓN DEL MICROBIOMA DEL SUELO CON
LA COMPOSICIÓN FÍSICOQUÍMICA, MACROFAUNA
Y CALIDAD DEL PASTO EN SISTEMAS GANADEROS
DE AMAZONAS, PERÚ.**

Autora: Bach. Lizbeth Juanita Puerta Chavez

Asesor 1: Dr. José Américo Saucedo Uriarte

Asesor 2: M.Sc. Leandro Valqui Valqui

Registro: (.....)

CHACHAPOYAS – PERÚ

2025

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, con todo mi amor y gratitud, a mi madre, por ser mi pilar inquebrantable, por su amor incondicional, su esfuerzo incansable y por enseñarme a nunca rendirme, incluso en los momentos más difíciles. A mis hermanas, por su apoyo constante. A mi familia, que con su cariño y fe en mí me ha impulsado a seguir adelante. Finalmente, a mí misma, por la valentía de soñar, la disciplina para luchar y la fuerza para llegar hasta aquí.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme permitido llegar hasta aquí, por darme la fortaleza para no rendirme, por brindarme salud y mantener siempre encendida en mí la voluntad de salir adelante.

Mi más profundo agradecimiento a mi madre, la Sra. Lidia Mercedes Chavez Picón, y a mis hermanas, por acompañarme en cada etapa de este camino. Su apoyo incondicional, tanto en los momentos de logro como en los de dificultad, ha sido fundamental para mí. A mis tíos, gracias por sus palabras de aliento, por su orgullo y, sobre todo, por nunca dejarme sola.

Extiendo mi agradecimiento al Proyecto de Estaciones del Instituto de Investigación en Ganadería y Biotecnología (IGBI), así como a los equipos de trabajo del Laboratorio de Nutrición Animal y Bromatología de Alimentos, el Laboratorio de Enfermedades Infecciosas y Parasitarias de Animales Domésticos, y el Laboratorio de Agrostología, por facilitar el desarrollo de esta investigación.

A mis asesores, el Dr. José Américo Saucedo Uriarte y el M.Sc. Leandro Valqui Valqui, les expreso mi más sincera gratitud por su orientación, su constancia y paciencia durante todo el proceso de elaboración de este trabajo de investigación. Su guía ha sido clave para culminar esta etapa de mi formación profesional.

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ
DE MENDOZA DE AMAZONAS**

Ph. D. Jorge Luis Maicelo Quintana

Rector

Dr. Oscar Andrés Gamarra Torrez

Vicerrector Académico

Dra. María Nelly Lujan Espinoza

Vicerrectora de Investigación

Dr. Segundo José Zamora Huamán

**Decano de la Facultad de Ingeniería Zootecnista, Biotecnología,
Agronegocios y Ciencia de Datos.**

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 3-L

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM ()/Profesional externo (), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada Asociación del microbioma del suelo con la composición físicoquímica, macrofauna y calidad del pasto en sistemas ganaderos de Amazonas, Perú.; del egresado Lizbeth Susmila Puerto Chavez de la Facultad de Ingeniería Zootécnica, Botánica, Microbiología y Ciencia de Datos, Escuela Profesional de Ingeniería Zootécnica de esta Casa Superior de Estudios.

El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.

Chachapoyas, 8 de agosto de 2025

Firma y nombre completo del Asesor

José Américo Saucedo Oriarte



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

ANEXO 3-L

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM ()/Profesional externo (), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada Asociación del microbioma del suelo con la composición físicoquímica, macrofauna y calidad del pasto en sistemas ganaderos de Amazonas, Perú; del egresado Lizbeth Suñita Puerta Chauz de la Facultad de Ingeniería zootecnista, Biotecnología, Acuicultura y Ciencia de Datos Escuela Profesional de Ingeniería zootecnista de esta Casa Superior de Estudios.

El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.

Chachapoyas, 6 de agosto de 2025

Firma y nombre completo del Asesor

JURADO EVALUADOR DE LA TESIS

JURADO EVALUADOR DE LA TESIS



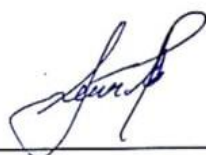
Ms.C. Cesar Augusto Maravi Carmen

Presidente



Ms.C. Luis Homero Zagaceta Llanca

Secretario



Ms.C. Segundo Melecio Portocarrero Villegas

Vocal

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS



ANEXO 3-Q

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

Los suscritos, miembros del Jurado Evaluador de la Tesis titulada:

ASOCIACION DEL MICROBIOTA DEL SUELO CON LA COMPOSICION FISICOQUIMICA
MACROFAUNA Y CALIDAD DEL PASTO EN SISTEMAS GANADEROS DE ALTIZONAS, PERU.

presentada por el estudiante ()/egresado (x) LIZBETH JUANITA PUERTA CHAVEZ

de la Escuela Profesional de INGENIERIA ZOOTECNISTA

con correo electrónico institucional 7281070271@UNTRM.EDU.PE

después de revisar con el software Turnitin el contenido de la citada Tesis, acordamos:

- a) La citada Tesis tiene 18 % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es menor (x) / igual () al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM.
- b) La citada Tesis tiene _____ % de similitud, según el reporte del software Turnitin que se adjunta a la presente, el que es mayor al 25% de similitud que es el máximo permitido en la UNTRM, por lo que el aspirante debe revisar su Tesis para corregir la redacción de acuerdo al Informe Turnitin que se adjunta a la presente. Debe presentar al Presidente del Jurado Evaluador su Tesis corregida para nueva revisión con el software Turnitin.



Chachapoyas, 29 de SEPTIEMBRE del 2025


SECRETARIO


PRESIDENTE


VOCAL

OBSERVACIONES:

.....
.....

REPORTE TURNITIN

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ZOOTECNISTA

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%	16%	7%	5%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	www.scielo.org.pe Fuente de Internet	1%
2	cipav.org.co Fuente de Internet	1%
3	Submitted to Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas Trabajo del estudiante	1%
4	revistas.untrm.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%
6	1library.co Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.chapingo.edu.mx Fuente de Internet	<1%
8	Leandro Valqui, José Américo Saucedo-Uriarte, Miguel A. Altamirano-Tantalean, Leidy	<1%


CESAR A.
ITARAVI CARHU

ACTA DE SUTENTACION DE LA TESIS



ANEXO 3-S

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Chachapoyas, el día 13 de Octubre del año 2025, siendo las 16:00 horas, el aspirante: LIZBETH JUANITA PUERTA CHAVEZ, asesorado por Dr. JOSÉ AMÉRICO SAUCEDO URIARTE/MSc. LEANDRO VALQUI VALQUI defiende en sesión pública presencial () / a distancia () la Tesis titulada: ASOCIACIÓN DEL MICROBIOMA DEL SUELO CON LA COMPOSICIÓN FÍSICO QUÍMICA, MACROFAUNA Y CALIDAD DEL PASTO EN SISTEMAS GANADEROS DE AMAZONAS, PERÚ, para obtener el Título Profesional de INGENIERA ZOOTECNISTA, a ser otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas; ante el Jurado Evaluador, constituido por:

Presidente: MSc. CÉSAR AUGUSTO MARAVI CARMEN

Secretario: MSc. LUIS HOMERO ZAGACETA LLANCA

Vocal: MSc. SEGUNDO MELECIO PORTOCARRERO VILLEGAS



Procedió el aspirante a hacer la exposición de la Introducción, Material y métodos, Resultados, Discusión y Conclusiones, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la Tesis presentada, los miembros del Jurado Evaluador pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones y objeciones consideraron oportunas, las cuales fueron contestadas por el aspirante.

Tras la intervención de los miembros del Jurado Evaluador y las oportunas respuestas del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los presentes en el acto de sustentación, para que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

Seguidamente, a puerta cerrada, el Jurado Evaluador determinó la calificación global concedida a la sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional, en términos de:

Aprobado () por Unanimidad () / Mayoría () Desaprobado ()

Otorgada la calificación, el Secretario del Jurado Evaluador lee la presente Acta en esta misma sesión pública. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las 17:00 horas del mismo día y fecha, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional.


SECRETARIO


VOCAL


PRESIDENTE

OBSERVACIONES:

.....

INDICE

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS.....	iv
VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS	v
JURADO EVALUADOR DE LA TESIS.....	vii
CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS	viii
REPORTE TURNITIN	ix
ACTA DE SUTENTACION DE LA TESIS	x
INDICE	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
I. INTRODUCCION.....	17
II. MATERIALES Y METODOS.....	19
2.1 Área de estudio	19
2.2 Población, muestra y muestreo.....	19
2.2.1. Población.....	19
2.2.2. Muestra	20
2.2.3. Muestreo	20
2.3 Metodología.....	20
2.3.1 Caracterización de la composición fisicoquímica del suelo de diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.	20
2.3.2 Determinación de la macrofauna en suelos de diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.....	24

2.3.3	Evaluación del rendimiento productivo y bromatológico de los pastos en diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.....	25
2.3.4	Asociación del microbioma del suelo con la productividad del pasto en diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.....	30
2.4	Análisis de datos.....	32
III.	RESULTADOS	33
3.1.	Composición fisicoquímica del suelo de diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.....	33
3.2.	Macrofauna en suelos de diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.....	34
3.3	Rendimiento productivo y bromatológico de los pastos en diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.....	36
3.4	Microbioma del suelo con la productividad del pasto en diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.....	38
IV.	DISCUSIÓN.....	42
4.1.	Composición fisicoquímica del suelo de diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.....	42
4.2.	Macrofauna en suelos de diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.....	44
4.3.	Rendimiento productivo y bromatológico de los pastos en diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.....	45
4.4.	Microbioma del suelo con la productividad del pasto en diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.....	47
V.	CONCLUSIONES.....	49
VI.	RECOMENDACIONES	50
VII.	BIBLIOGRAFIA.....	51
	ANEXOS.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición fisicoquímica del suelo de diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.....	34
Tabla 2. Rendimiento productivo y bromatológico de los pastos en diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación geográfica del distrito de Molinopampa, Amazonas	19
Figura 2. Proceso de obtención de muestras de suelo para análisis fisicoquímico.....	21
Figura 3. Procedimiento de análisis de Potencial de Hidrógeno (pH) y Conductividad Eléctrica	22
Figura 4. Procedimiento de análisis de Materia Orgánica	23
Figura 5. Flujograma para caracterizar la composición fisicoquímica del suelo	24
Figura 6. Flujograma del proceso de determinación de macrofauna	25
Figura 7. Obtención de macrofauna presente en el suelo	25
Figura 8. Proceso para determinar el rendimiento productivo y bromatológico de los pastos	29
Figura 9. Proceso de recolección de muestras de pasto y análisis bromatológico en laboratorio	29
Figura 10. Proceso para determinar microbioma del suelo	31
Figura 11. Proceso de extracción y cuantificación de ADN del suelo	32
Figura 12. Macrofauna en suelos de diferentes sistemas ganaderos registrada en época de verano	35
Figura 13. Macrofauna en suelos de diferentes sistemas ganaderos registrada en época de invierno	36
Figura 14. Composición relativa del microbioma del suelo a nivel de filo bacteriano (A) en distintos sistemas ganaderos (Aliso, Ciprés, Pino y Campo Abierto) (B) época de seca y lluvia.	39
Figura 15. Índices de diversidad en sistemas: Alfa (Índice de diversidad de Shannon, OTU observadas), Beta (Distancia de Bray-Curtis, distancia de Jaccard).	42
Figura 16. Índices de diversidad para épocas: Alfa (Índice de diversidad de Shannon, OTU observadas), Beta (Distancia de Bray-Curtis, distancia de Jaccard).....	43
Figura 17. Diversidad encontrada (A) Staphylinidae, (B) Erigone, (C) Lumbricidae, (D) Premnotrypes vorax, (E) Araneae mygalomorpha, (F) Tisanopteros anthura, (G) Haplotaxidos, (H) Chilopoda, (I) Isopoda y (J) Orthopteros	58
Figura 18. Curva de rarefacción donde (A) es por sistemas y (B) por épocas	59

RESUMEN

Los sistemas ganaderos en el Perú se desarrollan en entornos altamente biodiversos. El objetivo del presente estudio fue analizar la asociación del microbioma del suelo con la composición fisicoquímica, la macrofauna y la calidad del pasto en sistemas ganaderos de la región Amazonas. Se utilizó un diseño en bloques completos al azar con cuatro tratamientos con Aliso (*Alnus acuminata*), Pino (*Pinus patula*), Ciprés (*Cupressus sp.*) y campo abierto, con cinco repeticiones por sistema. Se colectaron muestras de suelo a 0–30 cm para evaluar pH, conductividad eléctrica, textura y materia orgánica. La macrofauna edáfica fue recolectada mediante el método de monolito. El rendimiento y calidad bromatológica del pasto se evaluaron por m². El microbioma del suelo fue caracterizado mediante secuenciación del gen 16S con tecnología Illumina MiSeq. Se identificaron diferencias edáficas entre sistemas ganaderos, destacando una mayor conductividad eléctrica en campo abierto y mayor materia orgánica en suelos con *Alnus acuminata* durante el invierno. La macrofauna estuvo dominada por lombrices en sistemas con árboles, especialmente *Pinus patula*, mientras que en campo abierto se observó mayor diversidad de artrópodos. Los mayores rendimientos forrajeros se registraron en sistemas con *Pinus patula* y *Cupressus sp.* según la estación. La composición y diversidad del microbioma del suelo se mantuvieron estables entre tratamientos, con filos bacterianos dominantes comunes y sin diferencias en la diversidad alfa. La incorporación de especies arbóreas en sistemas ganaderos mejoró las condiciones del suelo y la producción forrajera, incrementando la actividad de organismos beneficiosos y la fertilidad edáfica. Estos efectos positivos en productividad contrastan con cambios limitados en la diversidad bacteriana del suelo, que se mantuvo estable frente a la presencia arbórea.

Palabras clave: Microbioma del suelo, macrofauna, pastos, sistema ganadero, *Alnus acuminata*, *Pinus pátula*, *Cupressus sp.*

ABSTRACT

Livestock systems in Peru develop in highly biodiverse environments. The objective of this study was to analyze the association of the soil microbiome with the physicochemical composition, macrofauna, and pasture quality in livestock systems of the Amazonas region. A randomized complete block design was used with four treatments Aliso (*Alnus acuminata*), Pine (*Pinus patula*), Cypress (*Cupressus sp.*), and open field, with five replications per system. Soil samples were collected at a depth of 0–30 cm to evaluate pH, electrical conductivity, texture, and organic matter. Soil macrofauna was collected using the monolith method. Pasture yield and bromatological quality were evaluated per m². The soil microbiome was characterized by sequencing the 16S gene using Illumina MiSeq technology. Soil differences were identified among livestock systems, with higher electrical conductivity in the open field and higher organic matter in soils with *Alnus acuminata* during winter. The macrofauna was dominated by earthworms in systems with trees, especially *Pinus patula*, while greater arthropod diversity was observed in the open field. The highest forage yields were recorded in systems with *Pinus patula* and *Cupressus sp.*, depending on the season. The composition and diversity of the soil microbiome remained stable among treatments, with common dominant bacterial phyla and no differences in alpha diversity. The incorporation of tree species in livestock systems improved soil conditions and forage production, increasing the activity of beneficial organisms and soil fertility. These positive effects on productivity contrast with limited changes in soil bacterial diversity, which remained stable in the presence of trees.

Keywords: Soil microbiome, macrofauna, pastures, livestock system, *Alnus acuminata*, *Pinus patula*, *Cupressus sp.*

I. INTRODUCCION

Los sistemas ganaderos en el Perú, se desarrollan en un entorno altamente biodiverso que se relacionan con la biodiversidad. La relación entre el suelo, propiedades fisicoquímicas, macrofauna y microbioma, pueden influir en la productividad y calidad del pasto (Decaëns et al., 2004; Vásquez et al., 2021). Históricamente, los sistemas ganaderos se han basado principalmente en monocultivos de pastos. Tal es así que, la principal fuente de alimento para la ganadería en el Perú lo constituyen las pasturas alto andinas, con una extensión aproximada de 22 millones de hectáreas, sustentando al 84% de la ganadería nacional (MINAM, 2010; FAO, 2025).

Las áreas de pastoreo que conforman los sistemas de crianza actuales suelen estar compuestos solo por una o pocas especies forrajeras (Distel et al., 2020). Los pastos monocultivos han derivado en la degradación del suelo y la disminución de la productividad de biomasa a largo plazo (Mamani et al., 2024). Existen estudios que indican que, los sistemas ganaderos basados en monocultivos están en el centro de este debate respecto a sistemas con forestería, la crianza en monocultivos muestra una mayor intensidad de emisiones y tierra utilizada por kilogramo de carne de vacuno producida (Blaustein-Rejto et al. 2023; Agethen et al., 2024). Este fenómeno podría deberse a que en estos sistemas no se dan las interacciones benéficas existentes entre especies, como la fijación asociativa del nitrógeno de las leguminosas hacia las gramíneas (Kakraliya et al., 2018) o la disponibilidad de nutrientes para el óptimo desarrollo de las pasturas debido a la reducida carga biológica del suelo y macrofauna (Lal, 2011). Además, los sistemas basados en pasturas monocultivas están expuestos directamente a cambios climáticos que podrían influir en la producción de la biomasa forraje por radiación solar, escorrentías de agua, erosión del suelo por el viento o lluvia (Milazzo et al., 2023).

Los sistemas silvopastoriles (SSP) son prácticas agropecuarias sostenibles en el tiempo. Estos sistemas integran árboles, pastos y animales en una misma área específica que se relacionan con el ser humano. Dentro de estos sistemas ganaderos, las especies arbóreas juegan un papel fundamental, por sus efectos sobre el microclima y por su influencia en las propiedades fisicoquímicas del suelo y la biodiversidad del ecosistema edáfico, como la macrofauna y el microbioma (Bato et al., 2020; Rofner et al., 2023; Xiaofang et al., 2024). Estos organismos, como lombrices, artrópodos, hongos y bacterias son esenciales para la fertilidad del suelo y, en consecuencia, para la productividad de los

pastos utilizados en la ganadería (Lavelle et al., 2014; Nadarajah et al., 2023). Los microorganismos son un elemento importante en el desarrollo de ganadería sostenible. Su papel en la fertilidad y la salud del suelo es importante para mantener el crecimiento, el desarrollo y la producción de los pastos y forrajes (Nadarajah et al., 2023; Gupta et al., 2022).

La integración de árboles en sistemas ganaderos puede ofrecer múltiples beneficios sociales, ecológicos y productivos (Giraldo-Echeverril et al., 2015; Oliva et al., 2018; Saucedo-Uriarte et al., 2022). Sin embargo, la selección de la especie arbórea puede influir de diferentes maneras sobre la macrofauna y microbioma del suelo, las características físicoquímicas del mismo y el rendimiento de los pastos. Por ejemplo, algunas especies arbóreas pueden mejorar la estructura del suelo y aumentar su contenido de materia orgánica, favoreciendo la actividad de la macrofauna y, la descomposición de la materia orgánica y la ciclicidad de los nutrientes (Vásquez et al., 2021; López-Vigoa et al., 2017). En los sistemas ganaderos, las prácticas de manejo pueden alterar las propiedades físicoquímicas del suelo, composición y actividad de la macrofauna edáfica, organismos que contribuyen a la aireación, el ciclo de nutrientes, captura de nitrógeno y descomposición de la materia orgánica (Bato et al., 2020; Nadarajah et al., 2023; Delgado-Baquerizo et al., 2018; Oliveira et al., 2024). Estas interacciones complejas entre el microbioma, las características del suelo y la macrofauna tienen implicaciones directas en el rendimiento productivo y la calidad bromatológica de los pastos, elementos fundamentales para la nutrición animal y la eficiencia de los sistemas ganaderos (López-Vigoa et al., 2017).

La incorporación de árboles dentro de estos sistemas ganaderos ha demostrado ser una estrategia viable para revertir estos efectos negativos, mejorar la sostenibilidad y aumentar la resiliencia ante el cambio climático (Pérez et al., 2020). La interacción entre árboles, suelo, fauna y pastos es de interés científico y una necesidad práctica para mejorar la productividad y sostenibilidad ganadera en diferentes pisos altitudinales (Saucedo et al., 2020; Durand-Chávez et al., 2022). Esta investigación tiene como objetivo analizar la influencia de las especies arbóreas en la macrofauna, las características físicoquímicas del suelo y la producción de pastos en sistemas ganaderos de la región Amazonas. Los resultados contribuirán a la construcción del conocimiento más amplio y actualizado sobre la interacción entre las especies arbóreas y los componentes del suelo en los sistemas ganaderos amazónicos.

II. MATERIALES Y METODOS

2.1 Área de estudio

El presente trabajo de investigación se realizó de mayo del 2024 hasta enero del 2025. Se llevó a cabo en el distrito de Molinopampa, ubicado a una altitud de 2421 msnm, latitud 06°12'20'' Sur y longitud 77°40'06'' Oeste, con un clima ligeramente húmedo y templado cálido. Con una superficie de 333.86 km², temperatura promedio anual de 14.5 °C, y precipitación promedio anual 1200 mm/año de lluvia (Saucedo et al., 2020).

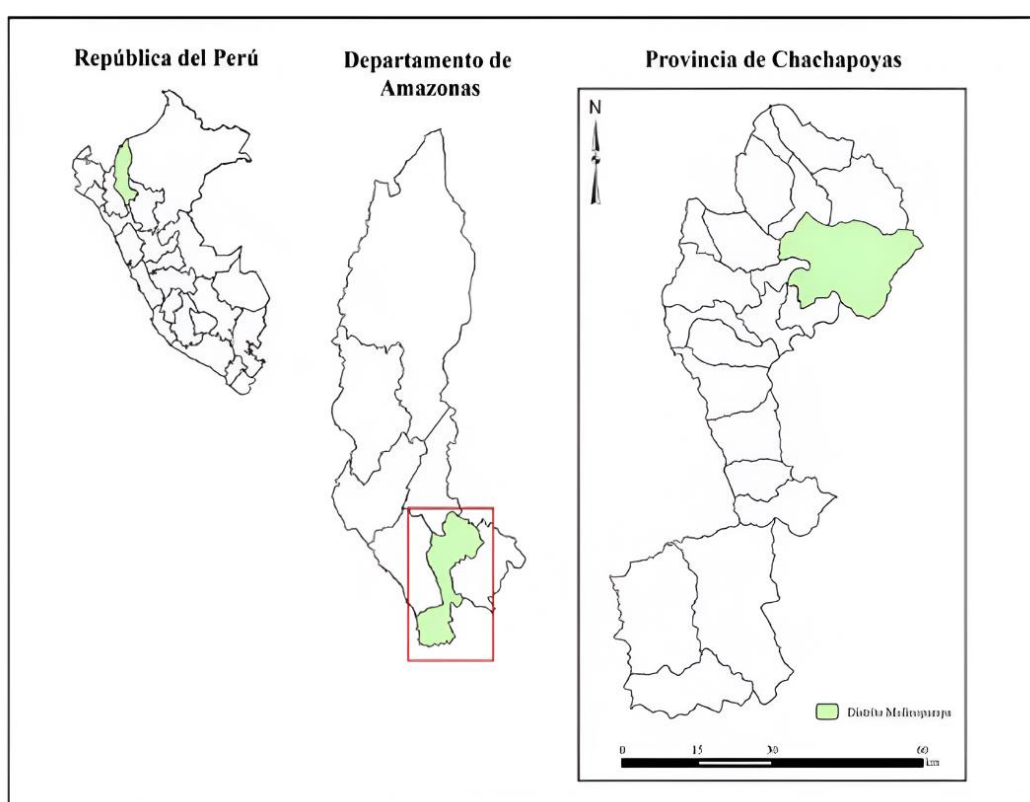


Figura 1. Mapa de ubicación geográfica del distrito de Molinopampa, Amazonas.

2.2 Población, muestra y muestreo

2.2.1. Población

Conformada por todos los sistemas ganaderos que cuenten con especie arbórea de Aliso (*Alnus acuminata*), Pino (*Pinus patula*), ciprés (*Cupressus sp.*) y sistema a campo abierto en la microcuenca ganadera de Molinopampa.

2.2.2. Muestra

La muestra estuvo constituida de 5 repeticiones por sistema de pastoreo por microcuenca, dando un total de 20 repeticiones.

2.2.3. Muestreo

El tipo de muestreo que se utilizó para la identificación de los sistemas fue el muestreo probabilístico aleatorio simple (Tillé, 2023), debido a que, las parcelas consideradas como tratamientos (Aliso, Pino, Ciprés y campo abierto) son similares en la composición florística.

2.3 Metodología

2.3.1 Caracterización de la composición fisicoquímica del suelo de diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.

El muestreo del suelo se realizó según el reglamento de levantamiento de muestras de suelos del DS N° 013-2010-AG (MINAGRI, 2010) y a 3 metros de distancia del árbol. Se colectó un total de 20 muestras (considerando 4 sistemas y 5 bloques). Se identificó el área y se marcaron puntos para la metodología del zigzag. Se limpió la superficie del punto de muestreo a ras del suelo y se extrajo 1 kg de suelo de una calicata de 0-30 cm de profundidad (Figura 2). Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Investigación de Suelos y Aguas de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza (LABISAG), considerando los parámetros de pH, conductividad eléctrica (CE), textura y materia orgánica (MO).



Figura 2. Proceso de obtención de muestras de suelo para análisis fisicoquímico.

El pH fue medido con un potenciómetro de suspensión suelo - agua 1:1, la CE fue medida a través de la lectura del extracto acuoso en la relación suelo - agua 1:1. Utilizaron 10 mg de suelo en un vaso, adicionando al mismo 50 ml de agua destilada. Luego, se agito durante 50 minutos (Figura 3) y, posteriormente, se dejó reposar 5 minutos para luego agitar por 40 minutos y con la ayuda de movimientos circulares se fue filtrando para finalmente realizar la lectura de la CE en el conductímetro (Figura 4).

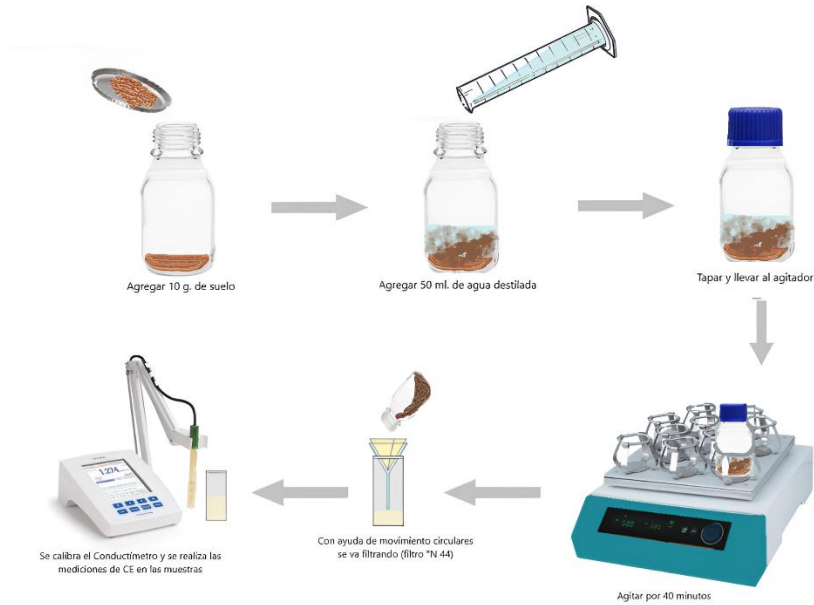


Figura 3. Procedimiento de análisis de Potencial de Hidrógeno (pH) y Conductividad Eléctrica.

Para el análisis de materia orgánica, se pesó 0.5 g de suelo y se pasó por un tamizador de 0.5 mm. Luego, se colocó en un matraz Erlenmeyer de 250 ml, adicionando 10 ml de dicromato de potasio 1 N y 10 ml de H₂SO₄. Después de agitar por un minuto, se agregó 10 ml más de dicromato de potasio 1 N, se dejó reposar por 60 minutos, se enrasa a 100 ml con agua destilada y se dejó reposar por 12 horas. Finalmente, se extrajo una alícuota de 10 ml de muestra concentrado en un vaso de precipitado de 50 ml, se adiciono 3 gotas del indicador de difenilamina y se tituló con disolución de sulfato ferroso gota a gota hasta un punto final verde claro.

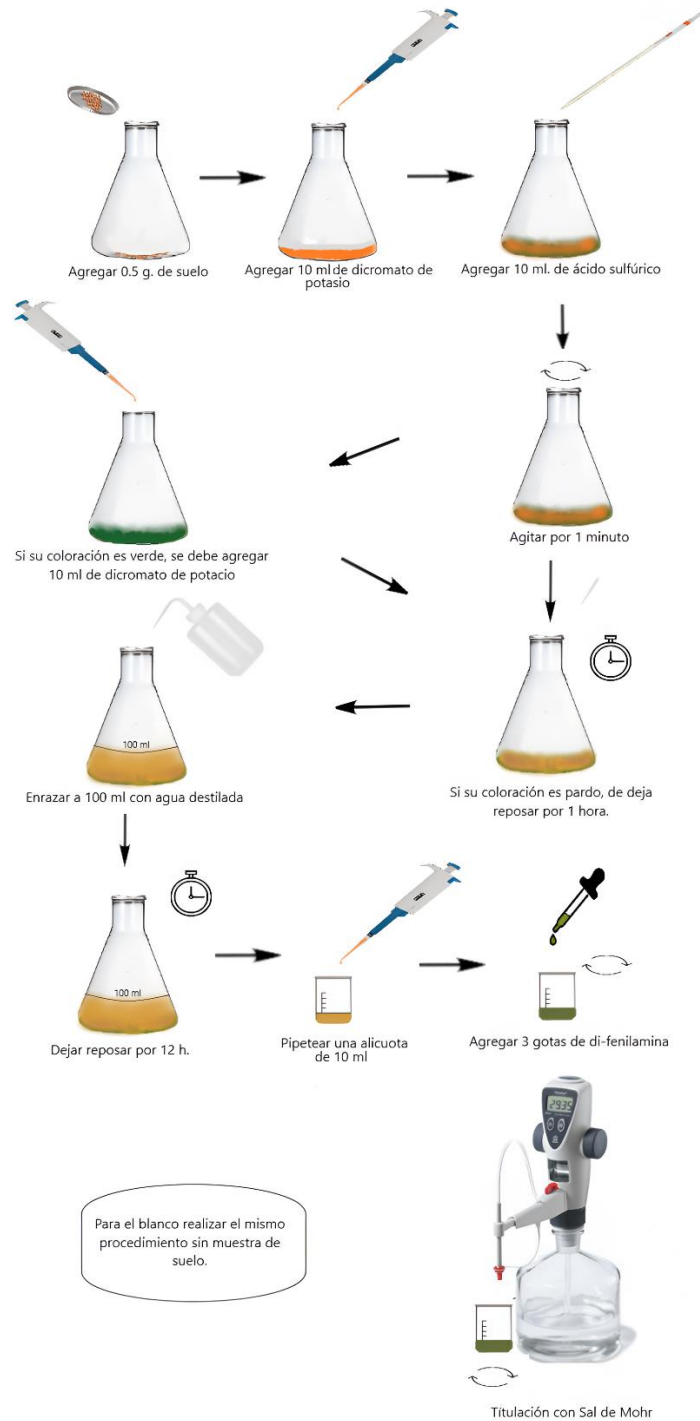


Figura 4. Procedimiento de análisis de Materia Orgánica

La textura fue analizada en un Hidrómetro de Bouyoucos, pesaron 50 g de suelo y lo colocaron en un vaso de precipitados. Luego se añadió 15 ml de solución de hexametáfosfato de sodio al 10% más agua destilada hasta $\frac{3}{4}$ partes del vaso. Se llevó al agitador por 5 minutos, se trasvaso el contenido a la probeta y se añadió agua hasta los 1000 ml. Además, con la varilla de

agitación se agitó vigorosamente el contenido de la probeta, y luego que se dejó de agitar, se sumergió el hidrómetro en la solución por 40 segundos, y se registró la lectura.

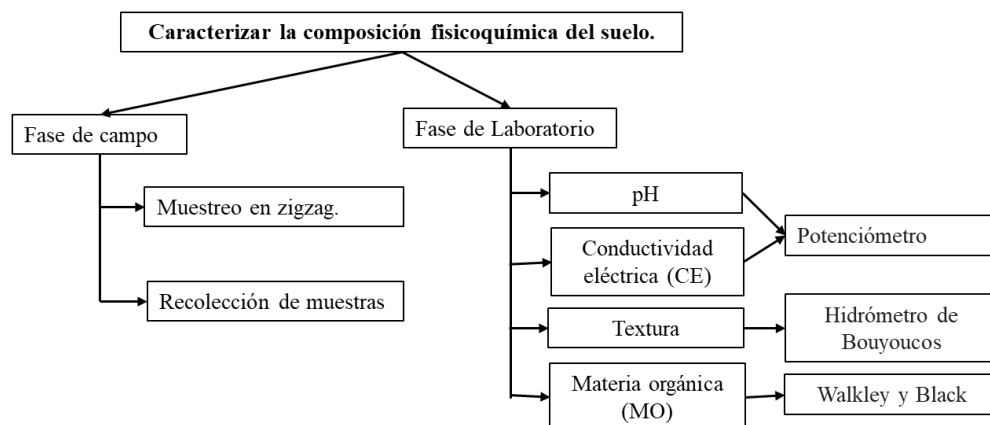


Figura 5. Flujograma para caracterizar la composición fisicoquímica del suelo.

2.3.2 Determinación de la macrofauna en suelos de diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.

La determinación de la macrofauna se realizó utilizando el método del monolito aleatoriamente en cada sistema de suelo libre de hojarasca y a 3 metros de distancia del árbol. En un área de 25 cm de largo × 25 cm de ancho × 10 cm de profundidad. La macrofauna del suelo se recolectó a mano en 1 capa vertical de 0–10 cm de profundidad (Gao et al., 2023). Toda la macrofauna que fue capturada se preservó en etanol al 95% para el traslado al Laboratorio de Enfermedades Infecciosas y Parasitarias de Animales Domésticos. La macrofauna se identificó en el laboratorio con la ayuda de un estereomicroscopio (Nikon, C-PSN, China) y se agrupó en los principales taxones.

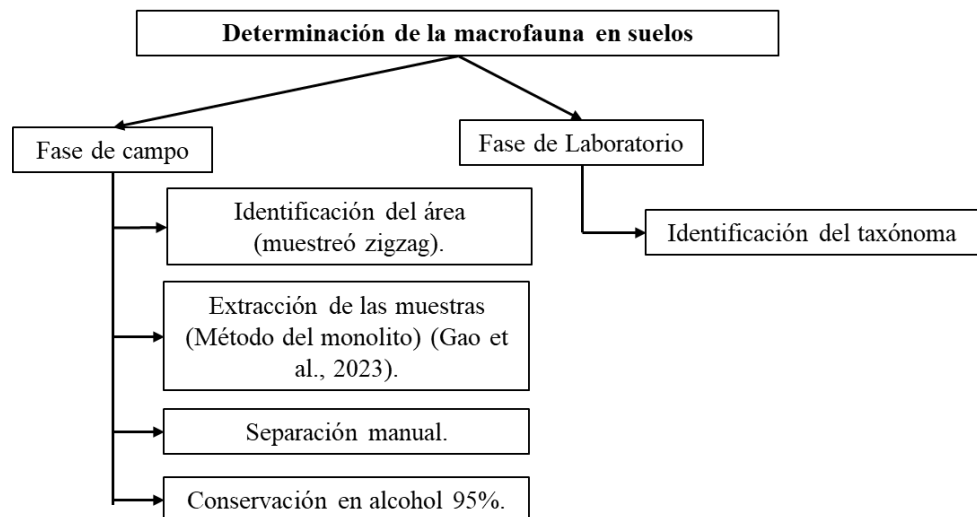


Figura 6. Flujograma del proceso de determinación de macrofauna.



Figura 7. Obtención de macrofauna presente en el suelo

2.3.3 Evaluación del rendimiento productivo y bromatológico de los pastos en diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.

Para evaluar el rendimiento de forraje verde, se utilizó un marco de un metro cuadrado, se lanzó al azar y a 3 metros de distancia del árbol. Se cortó el forraje con una hoz a una altura promedio de 5 cm del suelo.

El rendimiento de forraje se determinó pesando el forraje en una balanza electrónica (Coretto, NC-30K) y luego se llevó 100 g al laboratorio para determinar el porcentaje de materia seca. Se colocó 100 g a una estufa de aire comprimido (Efe clave M300) a una temperatura de 105 °C por 24 horas (Carrasco et al., 2021).

Para el análisis bromatológico se pesó 200 g y se colocaron a una estufa a 60 °C por 48 horas y luego de esto las muestras fueron molidas en un mini molino de rotación fija en 1730 rpm para luego determinar la proteína, ceniza, grasa, fibra, FDA, FDN, energía y digestibilidad (Carrasco et al., 2021).

La proteína se determinó siguiendo el método 928.08 - Kjeldahl de AOAC (2000). Se pesó 1 g de muestra en papel filtro libre de nitrógeno. Se colocó la muestra en un tubo de digestión y ahí se agregó 1 tableta del catalizador y 12 ml de H₂SO₄. Luego, se colocó los tubos en el sistema de digestión (bloque digestivo) y se tapó los tubos con el colector de humus, para dar inicio al proceso de digestión. Luego, se colocaron el primer tubo en el Destilador de nitrógeno Kjeldahl automático VELP Scientifica UDK 159 que hizo la destilación automática para la determinación de proteínas Kjeldahl, nitrógeno no proteico (NPN), volátiles y más.

Para determinar la concentración de ceniza se siguió el método 942.05 de la AOAC (2005). Los crisoles fueron colocados en una estufa a 105°C durante 20 minutos. Posteriormente, se transfirieron a un desecador para enfriarse a temperatura ambiente y se pesaron, utilizando siempre pinzas de metal para evitar la absorción. Luego, se pesó 1 g de muestra en el crisol y se llevó a la mufla para su incineración a 550°C durante 8 horas, hasta que se obtuvieron cenizas blancas o grisáceas. Finalmente, las muestras se retiraron de la mufla, se colocaron en un desecador para enfriarse y luego fueron pesadas.

La cantidad de grasa se determinó con el método 920.39 - Soxhlet (AOAC, 1990). Se pesaron los filtros y se registró el peso. Luego, se pesó 1 g de muestra dentro de los filtros, los cuales se sellaron con un sellador de calor, se colocaron los filtros dentro del cartucho del extractor automatizado de grasa cruda ANKOM XT15, se fijó el programa y encendió el equipo para dar inicio al proceso de determinación de grasa total, el proceso duro 3 horas, se hizo una adición programada de éter dietílico y se hizo un reciclado automático de disolventes.

La cantidad de FDA se determinó según Van Soest (1991). Se pesaron los filtros y se registró el peso. Luego, se pesaron 0.5 g de muestra dentro de los filtros, los cuales se sellaron con un sellador de calor. Se colocaron un máximo de 24 filtros en el suspensor de bolsas, distribuyendo 3 filtros por canasta, y luego se ensamblaron. Se colocó una pesa sobre la canastilla para mantener el conjunto sumergido. A continuación, se agregaron 1900 – 2000 ml de solución detergente ácida en el vaso de digestión del ANKOM (A200). El suspensor de bolsas con las muestras fue colocado en la solución dentro del vaso de digestión, se activó la agitación y el calor, y se verificó que el suspensor agitara correctamente. Se activó el cronómetro por 60 minutos, se oprimió el botón de inicio, y se cerró y presionó la tapa del vaso. Después de los 60 minutos, se apagó el equipo, se abrió la válvula de escape y se drenó la solución caliente antes de abrir la tapa. Posteriormente, se agregaron 2000 ml de agua caliente (90 – 100°C) sin apretar la tapa, activando solo la agitación durante 5 minutos en cada enjuague. Este proceso se repitió tres veces hasta que el pH del agua fue neutro. Luego, se retiraron los filtros con cuidado, se exprimió el agua sobrante y se colocaron en un vaso de laboratorio con acetona, dejándolos reposar por 5 minutos. Finalmente, los filtros se retiraron, se extendieron hasta que la acetona se evaporara y se secaron en la estufa a 105°C por 2 horas.

FDN se determinó según Van Soest (1991). Se pesaron los filtros y se registró el peso. Luego, se pesaron 0.5 g de muestra dentro de los filtros, los cuales se sellaron con un sellador de calor (Figura 9). Se colocaron un máximo de 24 filtros en el suspensor de bolsas, distribuyendo 3 filtros por canasta, y luego se ensamblaron. Se colocó una pesa sobre la canastilla para mantener el conjunto sumergido. A continuación, se agregaron 1900 – 2000 ml de solución detergente ácida en el cilindro de digestión del ANKOM (A200). El suspensor de bolsas con las muestras fue colocado en la solución dentro del cilindro de digestión, agregar 4ml de alfa amilasa y 20g de sulfito de sodio, prender la agitación y el calor y verificar que el suspendedor funcione, activar el cronometro por 75 min y presionar start, cerrar la tapa del cilindro de digestión. Pasado el tiempo apagar la

agitación y el calor. Abrir la válvula de escape y drenar la solución caliente, luego agregue 2000 ml de agua caliente (90-100°C) y 4 ml de alfa amilasa al primer y segundo enjuague, cerrar, pero apriete la tapa, prenda la agitación y dejar apagado el calor, cada enjuague debe durar 5 min, drenar el agua y repetir el enjuague 2 veces más. Luego, se retiraron los filtros con cuidado, se exprimió el agua sobrante y se colocaron en un beaker con acetona, dejándolos reposar por 5 minutos. Finalmente, los filtros se retiraron, se extendieron hasta que la acetona se evaporara y se secaron en la estufa a 105°C por 2 horas.

La digestibilidad se realizó siguiendo los lineamientos propuestos por Tilley y Terry (1963). Como primer paso, se prepararon los filtros y la muestra. Los filtros fueron enjuagados con acetona durante 5 minutos y luego se dejaron secar al aire libre. Posteriormente, cada filtro fue pesado y su peso registrado. Se colocaron 0.5 g de muestra en cada filtro, los cuales se sellaron y colocaron en los envases de digestión de la incubadora (Daisy II), con un máximo de 25 filtros por envase, incluyendo un filtro vacío. En el segundo paso, se preparó la solución buffer. Se precalentaron las soluciones buffer A y B a 39°C, mezclándose luego 266 ml de buffer A con 1330 ml de buffer B en un recipiente de vidrio. A cada envase de digestión se le agregaron 1600 ml de esta mezcla. Luego, se colocaron los envases con las muestras y la solución buffer en la incubadora, activando el equipo. El tercer paso consistió en preparar el inóculo de incubación. Para ello, se recolectaron 2 litros de inóculo ruminal, los cuales se transfirieron a un termo previamente precalentado a 39°C con agua. También se añadió al termo aproximadamente dos puñados de material fibroso del rumen. En el laboratorio, se precalentó el envase de la licuadora a 39°C, se purgó con CO₂, y se añadió el inóculo para licuarlo y desprender los microorganismos adheridos al material, asegurando una población microbiana representativa para la fermentación in vitro. La muestra ruminal licuada se filtró a través de cuatro capas de gasa en un envase de 5 litros, también precalentado a 39°C, y se purgó con CO₂ durante la transferencia del inóculo. Luego, se retiraron los envases de digestión de la incubadora y se agregaron 400 ml del inóculo a la solución buffer ya la

muestra, purgando el envase con CO₂ durante 30 segundos antes de cerrarlo herméticamente. Este proceso se repitió para todos los envases. Posteriormente, se incubaron durante 48 horas a una temperatura de 39.5°C. Al finalizar la incubación, se vaciaron los envases, enjuagando completamente los filtros con agua fría destilada hasta que el agua saliera clara, usando el mínimo de agitación. Finalmente, los filtros se colocaron en el equipo de extracción de fibras para continuar con el procedimiento.

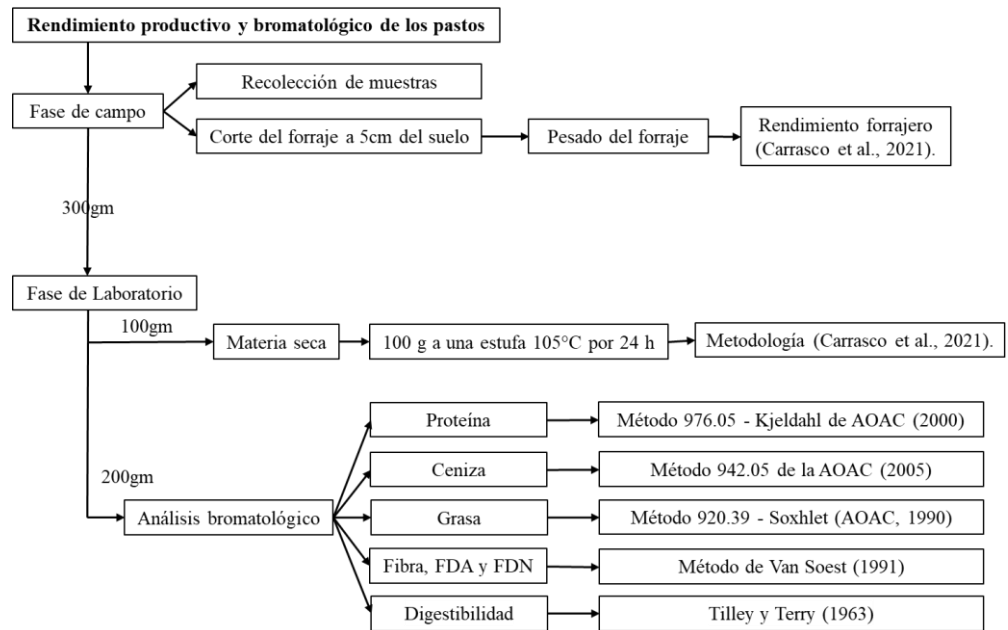


Figura 8. Proceso para determinar el rendimiento productivo y bromatológico de los pastos.



Figura 9. Proceso de recolección de muestras de pasto y análisis bromatológico en laboratorio.

2.3.4 Asociación del microbioma del suelo con la productividad del pasto en diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.

Muestreo de suelo

Para cada sistema, se excavó a 10 cm de profundidad y a 3 metros de distancia del árbol. Se recogió la muestra lo más cerca de las raíces de los árboles. Se recolectaron 20 muestras de suelo en total. Todas las muestras de suelo se colocaron en bolsas de plástico esterilizadas, se colocaron en un cooler y se transportaron al laboratorio. Después de pasar por un tamiz de 2 mm y se almacenó a -80 °C para la extracción de ADN (Bradshaw et al., 2024).

Extracción de ADN y Secuenciamiento

El ADN se extrajo de 400 mg de muestra de suelo con dos repeticiones, utilizando el kit de extracción Quick-DNA Fecal/Soil Microbe Miniprep Kit y según el manual de procedimientos descrito por el fabricante. Luego, se colocó en un tubo de lisis ZR BashingBead™ con 750 µl de tampón BashingBead™. Se procesaron en un batidor de perlas bajo condiciones optimizadas de velocidad y tiempo, y se centrifugaron a $\geq 10\ 000$ g por 1 minuto. Se transfirieron hasta 400 µl del sobrenadante a un filtro Zymo-Spin™ III-F y se centrifugaron a 8000 xg por 1 minuto. Posteriormente, se agregaron 1200 µl de tampón de lisis genómica, se mezcló bien y se transfirieron 800 µl de la mezcla a una columna Zymo-Spin™ IICR4, centrifugando a 10 000 xg por 1 minuto. Este paso se repitió, desechando el flujo. Se agregaron 200 µl de tampón de prelavado de ADN y 500 µl de tampón de lavado de g-ADN, centrifugando a 10 000 xg por 1 minuto en cada caso. La columna se transfirió a un tubo limpio de 1.5 ml y se eluyeron 100 µl de ADN con tampón de elución, centrifugando a 10 000 xg por 30 segundos. Finalmente, se preparó un filtro Zymo-Spin™ III-HRC con 600 µl de solución de preparación, se centrifugó a 8000 xg por 3 minutos, y se transfirió el ADN eluido al filtro, centrifugándose a 16 000 xg durante 3 minutos.

La extracción se realizó de forma aséptica y el ADN extraído se almaceno a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. La concentración se cuantifico utilizando el fluorómetro Qubit $\text{\textcircled{R}}$ 3.0 (Invitrogen, Life Technologies, Van Allen Way, Carlsbad, CA, EE. UU.). Una vez verificada la calidad y cantidad del ADN metagenómico, se envió al Laboratorio de la Fundación para el Fomento de la Investigación Sanitaria y Biomédica de la Comunidad Valenciana (Fisabio, Valencia, España) para su amplificación y secuenciación en la plataforma Illumina MiSeq (Klindworth et al., 2013; García-Mantrana et al., 2020; Moreno-Mesonero et al., 2020):

Illumina_16S_341F (5'-TCGTCGGCAGCGTCAGATGTGTATAAGAGACAGCCTACGGGN GGCWGCAG-3')

Illumina_16S_805R(5'-GTCTCGTGGGCTCGGAGATGTGTATAAGAGACAGGACTACHV GGGTATCTAATCC-3')

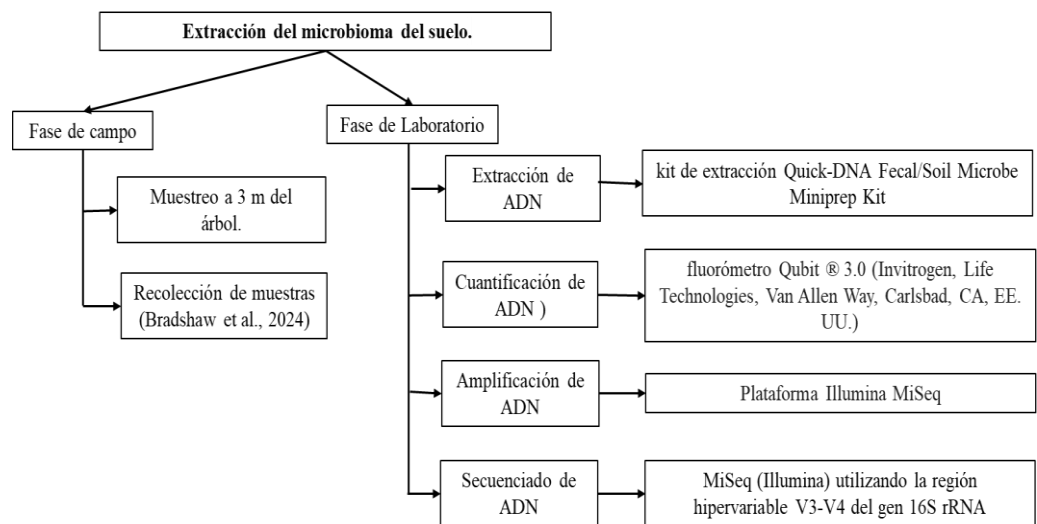


Figura 10. Proceso para determinar microbioma del suelo.

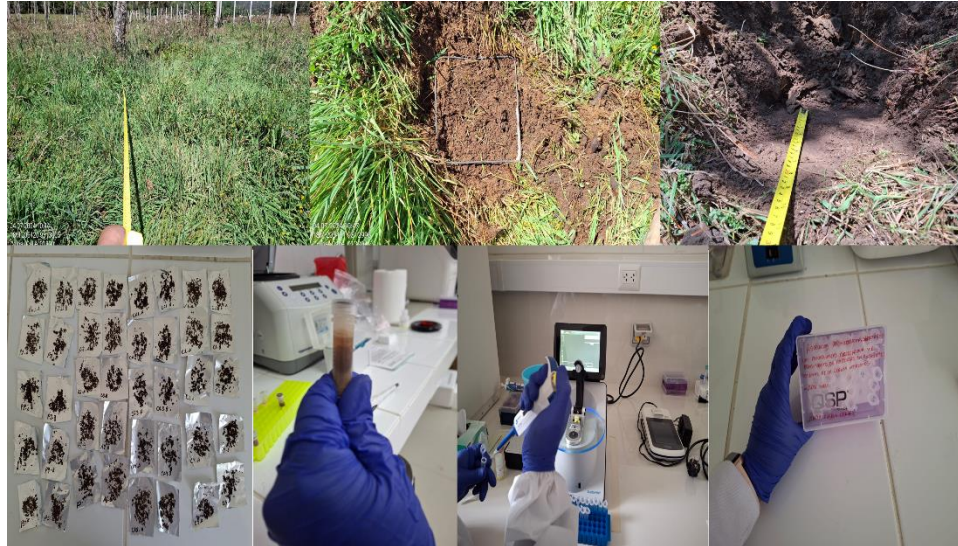


Figura 11. Proceso de extracción y cuantificación de ADN del suelo.

2.4 Análisis de datos

Los datos fueron analizados en un diseño en bloques completos al azar. Se consideró cuatro sistemas ganaderos Aliso (*Alnus acuminata*), Pino (*Pinus pátula*), Ciprés (*Cupressus sp.*) y campo abierto. Cada sistema contó con cinco repeticiones. Se analizaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de los datos con la prueba de Shapiro-Wilk y Levene. Los datos que cumplieron los supuestos fueron sometidos a un análisis de varianza ($p < 0.05$) y de existir diferencias, los grupos fueron clasificados con la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0.05$) para observar los valores promedios de la composición fisicoquímica del suelo y los valores productivos y bromatológicos de la pastura.

Los valores de macrofauna se presentaron en gráficos de pastel, en el que se muestra valores porcentuales de cada invertebrado según los sistemas ganaderos (campo abierto, aliso, pino y ciprés) considerando las épocas de verano e invierno.

La correlación de los indicadores del suelo con la productividad del pasto fue realizada con la prueba estadística de Pearson ($p < 0.05$). La similitud del microbioma del suelo según sistema mediante la curva de rarefacción y la diversidad alfa se evaluó a través del objeto Phyloseq (McMurdie & Holmes, 2013). Se realizaron scripts modificados utilizando las librerías Microeco (Liu et al., 2021) y MicrobiotaProcess (Xu et al., 2023). Se utilizó

índices como Shannon, Uniformidad de Pielou y el número de OTU observadas. Las comparaciones entre grupos se realizaron mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, aplicando la corrección de Bonferroni para comparaciones múltiples.

La diversidad beta se evaluó mediante el análisis de coordenadas principales (PCoA) utilizando las métricas de distancia Bray-Curtis, Jaccard y UniFrac ponderada y no ponderada. Las diferencias significativas se comprobaron mediante PERMANOVA. Todos los datos fueron procesados en el Software R Studio 4.4.1.

III. RESULTADOS

3.1. Composición fisicoquímica del suelo de diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.

La descripción de la composición fisicoquímica para la época de verano e invierno del suelo según sistema se detalla en la Tabla 1. La especie arbórea no afectó al pH, conductividad eléctrica y materia orgánica. Asimismo, en la concentración de arena y limo en suelo fueron similares entre los sistemas ($p > 0.05$). Sin embargo, se observó mayor concentración de arcilla en el sistema campo abierto y sistema con especie arbórea de Aliso (*Alnus acuminata*). Para la época de invierno se observó una tendencia hacia valores de pH más ácidos en suelos respecto a valores de pH en suelos analizados en verano en todos los sistemas evaluados, aunque las diferencias entre los sistemas en cada estación fueron mínimas. La conductividad eléctrica mostró valores significativamente mayores ($p < 0.05$) solo en el sistema de campo abierto, mientras que en época de verano los valores fueron altos en todos los sistemas. En cuanto a la materia orgánica, se registraron valores similares para los sistemas de Aliso (*Alnus acuminata*) y campo abierto, mientras que Cipres (*Cupressus sp.*) y Pino (*Pinus patula*) tuvieron valores inferiores ($p < 0.05$). En la concentración de arena, limo y arcilla en suelo no presentó diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas analizados ($p > 0.05$).

Tabla 1. Composición fisicoquímica del suelo de diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas

Especie	pH	CE	MO	Arena	Limo	Arcilla
Verano						
Pino	5.51±0.37a	0.32±0.14a	5.41±0.22a	55.37±11.69a	21.25±3.60a	23.38±8.66ab
Aliso	5.20±0.38a	0.37±0.32a	5.13±0.39a	47.41±7.34a	21.61±3.83a	30.98±5.15a
Cipres	5.17±0.48a	0.28±0.07a	4.86±0.88a	61.51±7.66a	20.20±3.85a	18.30±4.59b
CA	5.51±0.32a	0.29±0.18a	4.78±0.58a	48.94±5.82a	19.27±2.26a	31.79±4.54a
p-valor	0.356	0.01	0.331	0.064	0.704	0.007
Invierno						
Pino	4.63±0.33a	0.78±0.26b	6.88±0.50b	67.9±8.12a	24.07±9.42a	8.01±2.23
Aliso	4.46±0.24a	0.73±0.27b	8.22±0.50a	75.1±9.35a	18.94±5.44a	5.97±4.12
Cipres	4.38±0.24a	0.46±0.12b	6.13±0.68b	72.7±7.72a	23.11±7.68a	4.22±1.67
CA	4.79±0.08a	0.93±0.18a	7.22±0.96ab	77.9±8.07a	15.27±5.93a	6.85±3.29
p-valor	0.071	0.029	0.002	0.314	0.241	0.271

Media ± desviación estándar. Letras diferentes en cada columna demuestran diferencias significativas al nivel de $p < 0.05$. Comparación múltiple con la prueba de Tukey

3.2. Macrofauna en suelos de diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.

La macrofauna registrada en época de verano y existente en los diferentes sistemas ganaderos se muestra en la Figura 12, donde el grupo Lumbricidae es el componente más abundante de la macrofauna del suelo, representando más de la mitad de los individuos en cada sistema, con proporciones mayores en los sistemas de Pino (*Pinus patula*) (83%) y Cipres (*Cupressus sp.*) (77.8%) y menores en los sistemas de Campo abierto (67.7%) y Aliso (*Alnus acuminata*) (55.7%). Los Premnotrypes vorax también constituyen una porción importante de la macrofauna siendo el segundo grupo más abundante en los sistemas de Campo abierto (21.1%), Aliso (*Alnus acuminata*) (19.9%) y el Cipres (*Cupressus sp.*) (8.7%) y el sistema con menor proporción el Pino (*Pinus patula*) (7.5%). Los Staphylinidae se encuentran en pequeñas cantidades en los cuatro sistemas, siendo su presencia mayor en los sistemas de Cipres (*Cupressus sp.*) (10.9%) y Aliso (*Alnus acuminata*) (7.7%) y con menor proporción en los sistemas de Pino (*Pinus patula*) (6.9%) y Campo abierto (5.8%). Solo para el sistema de Aliso (*Alnus acuminata*) el grupo Isopoda muestra una presencia significativa de (9.2%) igual que el grupo Erigone con (4.8%), mientras que otros grupos representan una proporción mucho menor en los diferentes sistemas ganaderos.

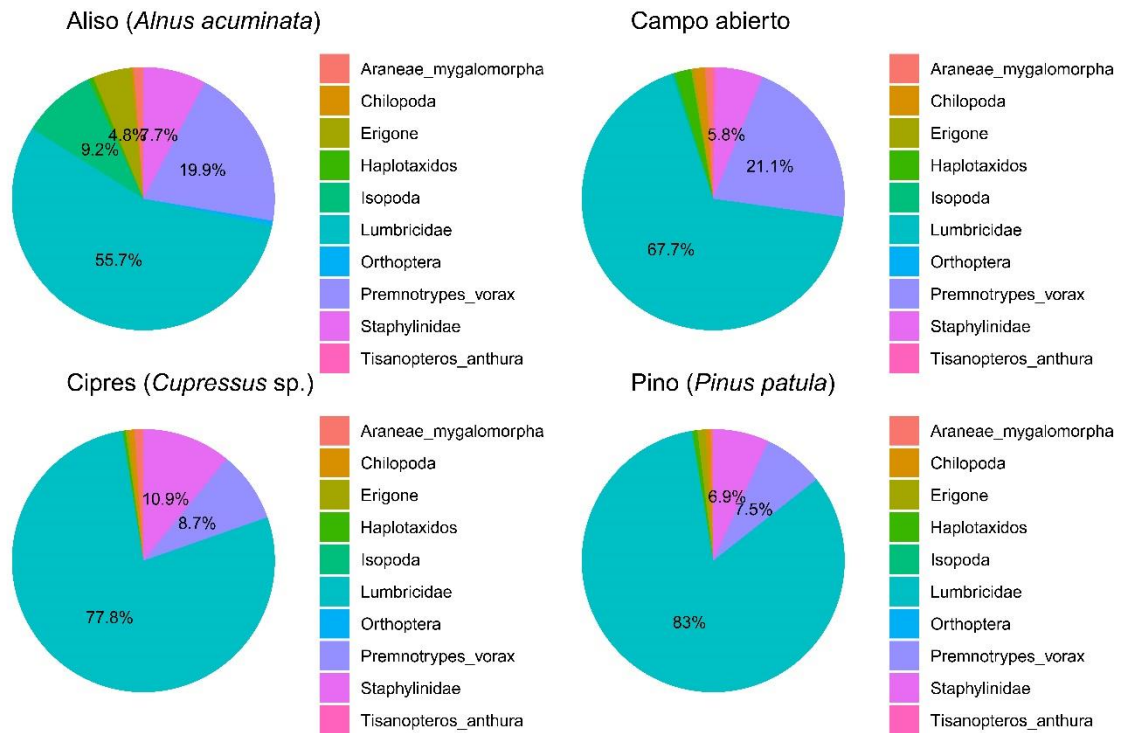


Figura 12. Macrofauna en suelos de diferentes sistemas ganaderos registrada en época de verano.

La macrofauna registrada en época de invierno y existente en los diferentes sistemas ganaderos se muestra en la Figura 13, donde el grupo Lumbricidae es el componente más abundante de la macrofauna del suelo, representando más del 78% de los individuos en cada sistema, con proporciones mayores en los sistemas de Pino (*Pinus patula*) (92.5%) y Ciprés (*Cupressus sp.*) (81.2%) y menores en los sistemas de Campo abierto (78.8%) y Aliso (*Alnus acuminata*) (78.2%). Los Premnotrypes vorax también constituyen una porción importante de la macrofauna siendo el segundo grupo más abundante en los sistemas de Campo abierto (20.2%), Aliso (*Alnus acuminata*) (16.9%) y el Cipres (*Cupressus sp.*) (16.7%) y el sistema con menor proporción el Pino (*Pinus patula*) (4.2%). Solo para el sistema de Aliso (*Alnus acuminata*) el grupo Isopoda muestra una presencia significativa de (3.1%), mientras que otros grupos representan una proporción mucho menor en los diferentes sistemas ganaderos.

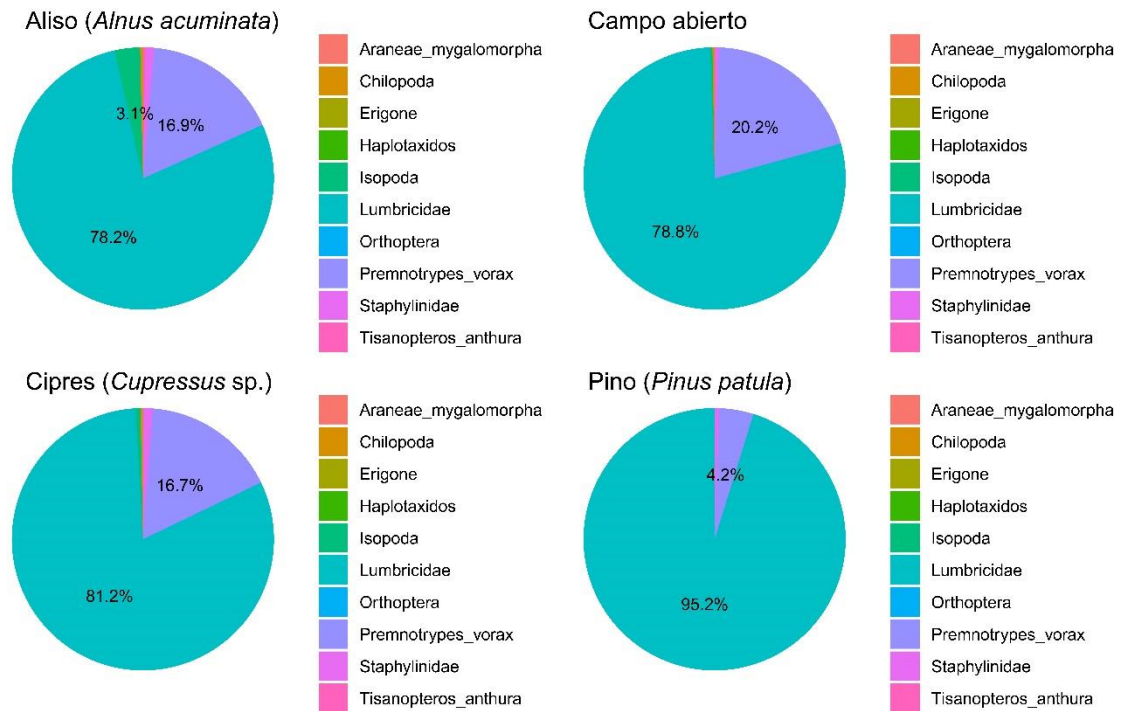


Figura 13. Macrofauna en suelos de diferentes sistemas ganaderos registrada en época de invierno.

3.3 Rendimiento productivo y bromatológico de los pastos en diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.

La descripción de rendimiento productivo y bromatológico de los pastos para la época de verano e invierno del suelo según sistema se detalla en la Tabla 2. La presencia de especies arbóreas ejerce una influencia significativa sobre la productividad forrajera en los sistemas evaluados, para la época de verano se puede observar que la cantidad de forraje fue mayor en los sistemas de Pino (*Pinus patula*) y campo abierto ($p < 0.05$). En contraste, los sistemas caracterizados de Aliso (*Alnus acuminata*) y Cipres (*Cupressus sp.*) exhibieron valores inferiores de rendimiento forrajero en este periodo. Por otro lado, para la época de invierno solo el sistema con Cipres (*Cupressus sp.*) fue el que presentó los valores más altos respecto a los otros sistemas ($p < 0.05$). En cuanto a la MS se observa que solo el sistema con Cipres (*Cupressus sp.*) presentó valores más altos en comparación a los otros sistemas ($p < 0.05$). No obstante, durante la época de invierno, el análisis estadístico no reveló diferencias significativas en el contenido de MS entre los sistemas comparados ($p > 0.05$).

Si bien el porcentaje de proteína no mostró diferencias relevantes, el porcentaje de ceniza presentó variaciones notables según la especie arbórea y la estación del año. En verano, el sistema de Ciprés (*Cupressus sp.*) registró los valores más altos

de ceniza, mientras que los sistemas de Pino (*Pinus patula*), Aliso (*Alnus acuminata*) y campo abierto mostraron valores inferiores ($p < 0.05$). En invierno, los porcentajes de ceniza fueron similares en los sistemas de Cipres (*Cupressus sp.*), Pino (*Pinus patula*) y campo abierto, aunque el sistema de Aliso (*Alnus acuminata*) exhibió un menor porcentaje ($p > 0.05$). El porcentaje de fibra detergente neutra (FDN) no reveló diferencias significativas en ninguna de las épocas evaluadas ($p > 0.05$). La fibra detergente acida (FDA) en pasturas analizadas en la época de verano fueron similares para los sistemas de Pino (*Pinus patula*) y Cipres (*Cupressus sp.*) mientras que el sistema de campo abierto registró valores aún menores que el sistema de Aliso (*Alnus acuminata*)- La FDA en la época de invierno, los valores fueron similares en sistemas de Aliso (*Alnus acuminata*), campo abierto y Pino (*Pinus patula*) siendo las pasturas del sistema de Cipres (*Cupressus sp.*) con menor FDA. El porcentaje de grasa solo exhibió diferencias significativas durante el verano ($p < 0.05$). En las pasturas de los sistemas de Pino (*Pinus patula*), Aliso (*Alnus acuminata*) y Ciprés (*Cupressus sp.*) se registró valores similares, y las pasturas del sistema de campo abierto presentaron valores inferiores de grasa. Finalmente, el porcentaje de digestibilidad (DIV) de las pasturas no reveló diferencias significativas según sistema ganadero en ninguna de las épocas evaluadas ($p > 0.05$).

Tabla2. Rendimiento productivo y bromatológico de los pastos en diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.

Especie	F (g/m ²)	MS	Proteína (%)	Ceniza (%)	FDN (%)	FDA (%)	Grasa (%)	DIV (%)
Verano								
Pino	3349.4±415.5 ^a	16.4±3.4 ^b	17.6±2.6 ^a	9.5±1.2 ^b	54.03±5.94	34.80±3.65 ^a	2.2±0.4 ^a	51.05±9.28
Aliso	1587.3±209.7 ^b	22.0±2.0 ^{ab}	14.2±1.5 ^a	8.9±1.1 ^b	55.73±3.62	25.74±5.50 ^b	1.59±0.4 ^{ab}	58.26±8.00
Cipres	1888.0±254.0 ^b	24.6±3.9 ^a	16.1±0.8 ^a	12.2±2.2 ^a	52.52±6.75	32.95±5.23 ^{ab}	1.78±0.4 ^{ab}	53.46±4.72
CA	3349.4±974.2 ^a	23.0±5.5 ^{ab}	14.6±3.1 ^a	9.3±0.8 ^b	63.23±7.78	29.00±3.23 ^c	1.31±0.4 ^b	53.02±7.56
p-valor	<0.001	0.022	0.091	0.008	0.066	0.025	0.023	0.504
Especie								
Invierno								
Pino	7157.0±722.0 ^b	13.8±1.7 ⁹	11.7±1.0 ¹	10.28±1.05 ^{ab}	62.49±1.57	38.81±2.41 ^{ab}	1.86±0.38	50.41±2.64
Aliso	7072±791.0 ^b	16.4±3.2 ¹	10.8±1.0 ³	8.59±0.97 ^b	66.04±3.30	40.26±2.25 ^a	2.07±0.65	48.25±4.32
Cipres	9024.0±558.0 ^a	14.6±3.1 ³	12.3±1.5 ³	11.54±2.19 ^a	61.33±3.65	34.63±3.37 ^b	1.61±0.48	53.46±4.47
CA	7893.0±07.0 ^b	14.4±1.9 ⁵	11.6±1.3 ⁴	10.36±0.79 ^{ab}	62.04±2.03	40.49±1.56 ^a	1.94±0.17	50.74±1.21
p-valor	0.0003	0.451	0.332	0.028	0.070	0.006	0.464	0.164

Media ± desviación estándar. Letras diferentes en cada columna demuestran diferencias significativas al nivel de $p < 0.05$. Comparación múltiple con la prueba de Tukey

3.4 Microbioma del suelo con la productividad del pasto en diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.

Los resultados presentados en la Figura 14 muestran la composición relativa del microbioma del suelo a nivel de filo bacteriano en distintos sistemas ganaderos con aliso (*Alnus acuminata*), pino (*Pinus patula*), ciprés (*Cupressus sp.*) y campo abierto, considerando tanto la época de verano como la de invierno. En ambos casos, los filos dominantes fueron *Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Acidobacteria*, *Firmicutes* y *Chloroflexi*, con ligeras variaciones en la abundancia relativa entre los sistemas y estaciones. En la sección A de la figura se aprecia que los distintos sistemas ganaderos, tanto en la época de verano como en la de invierno, presentan perfiles similares de composición microbiana a nivel de filo. No se observaron cambios drásticos en la estructura general del microbioma atribuibles a las especies arbóreas presentes. La sección B de la figura compara directamente las estaciones climáticas. Aunque hay una leve tendencia a un aumento en la abundancia de algunos filos como *Bacteroidota* y *Firmicutes* durante la época invierno, la composición sigue siendo relativamente estable a nivel de filo. Además, La variabilidad entre las réplicas fue más alta en la época de verano, posiblemente debido al efecto estresante que las condiciones climáticas más áridas ejercen sobre el microbioma del suelo.

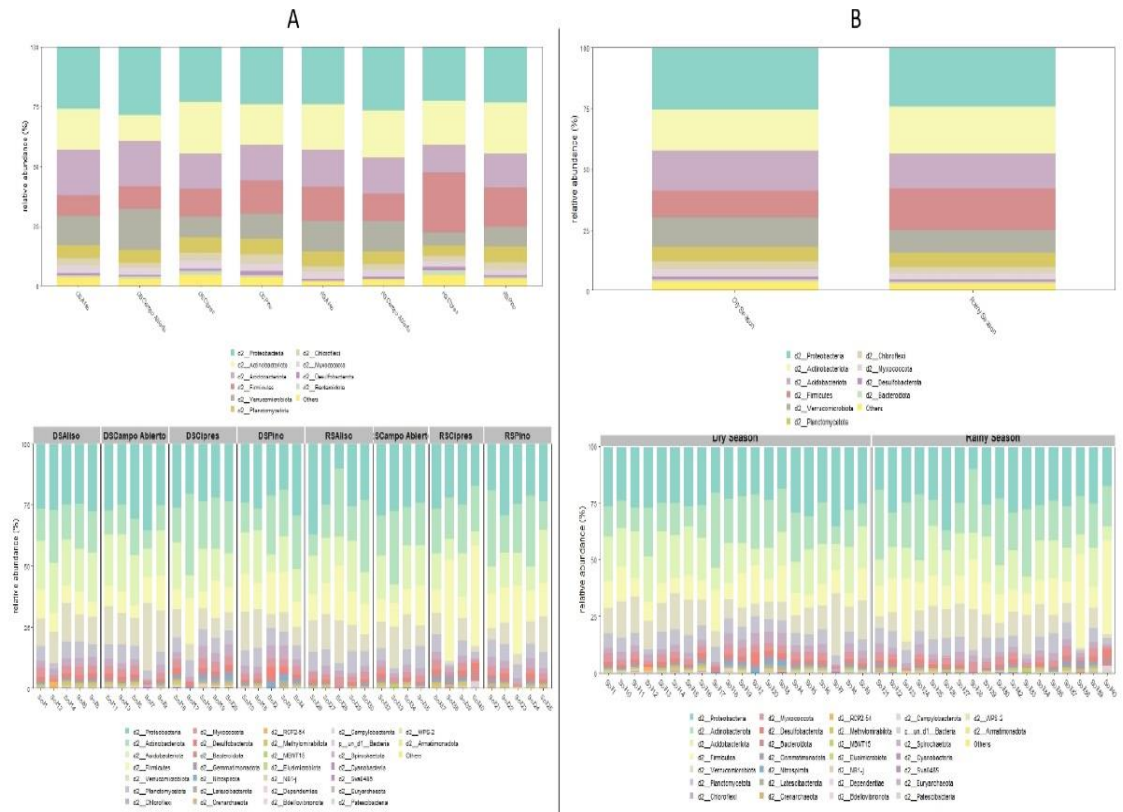


Figura 14. Composición relativa del microbioma del suelo a nivel de filo bacteriano (A) en distintos sistemas ganaderos (Aliso, Ciprés, Pino y Campo Abierto) (B) época de seca y lluvia.

Se evaluó la diversidad alfa mediante el índice de Shannon (cuantitativo) y el número de OTUs observados (cualitativo). El índice de Shannon no mostró diferencias significativas entre la época de verano y la época de invierno ($p \approx 0.184$), mientras que la cantidad de OTUs fue ligeramente mayor en la época de verano (≈ 320 vs. ≈ 280), diferencia que resultó significativa ($p \approx 0.044$), lo que sugiere una mayor riqueza de ASVs en esa temporada. Para la diversidad beta, se usaron las distancias Bray-Curtis y Jaccard representadas en análisis PCoA. Las muestras de ambas estaciones no se agruparon de forma clara, y el análisis PERMANOVA confirmó que no hay diferencias significativas en la composición microbiana entre estaciones ($p = 0.2$ en ambos casos). Respecto a los sistemas ganaderos, no se observaron diferencias significativas en la diversidad alfa: tanto el índice de Shannon como los OTUs fueron similares en todos los grupos ($p > 0.05$). Sin embargo, la diversidad beta sí presentó variaciones entre sistemas. Los PCoA mostraron agrupamientos parciales según el tipo de manejo, y PERMANOVA arrojó diferencias significativas generales ($p < 0.05$). Aun así, las

comparaciones por pares no evidenciaron diferencias significativas entre sistemas tras aplicar correcciones estadísticas ($q > 0.05$).

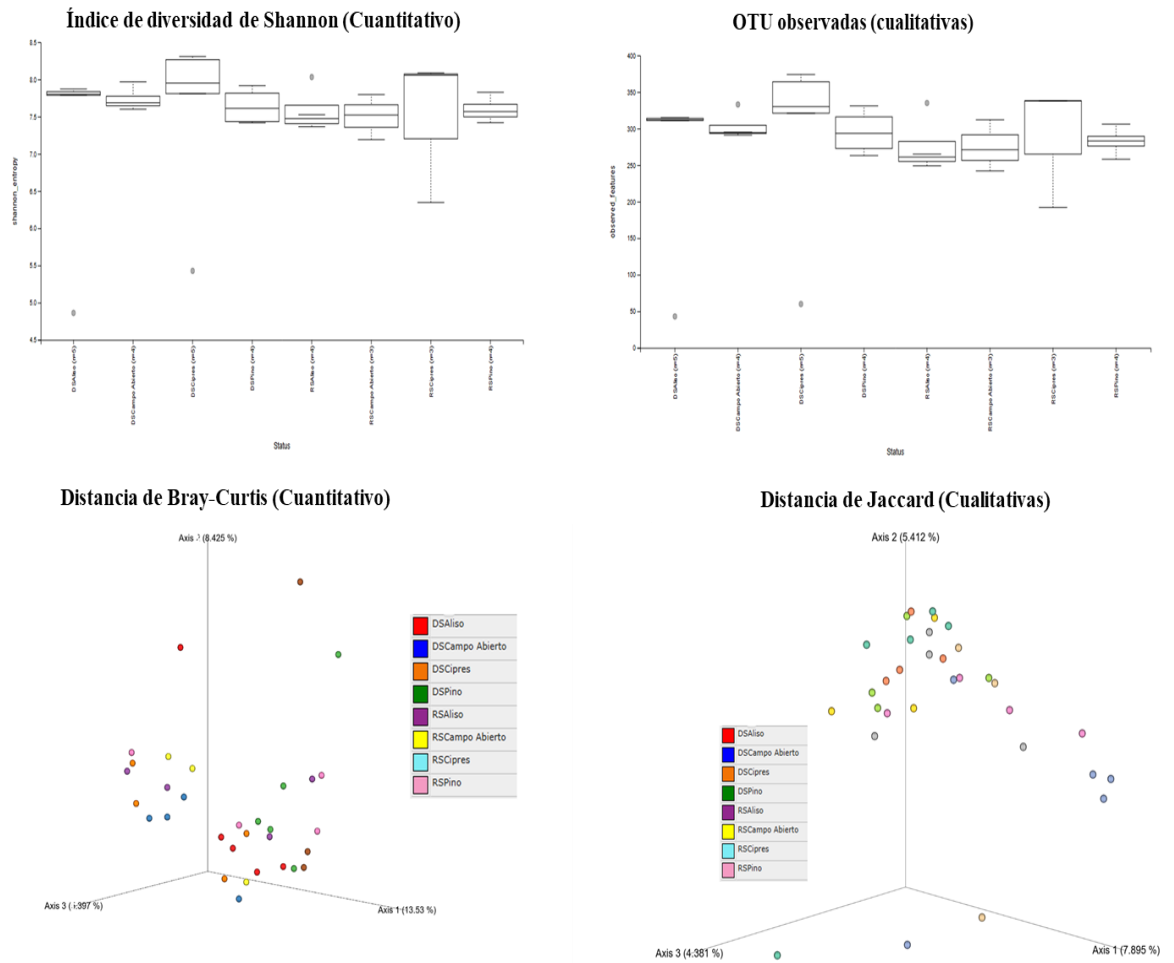


Figura 15. Índices de diversidad en sistemas: Alfa (Índice de diversidad de Shannon, OTU observadas), Beta (Distancia de Bray-Curtis, distancia de Jaccard).

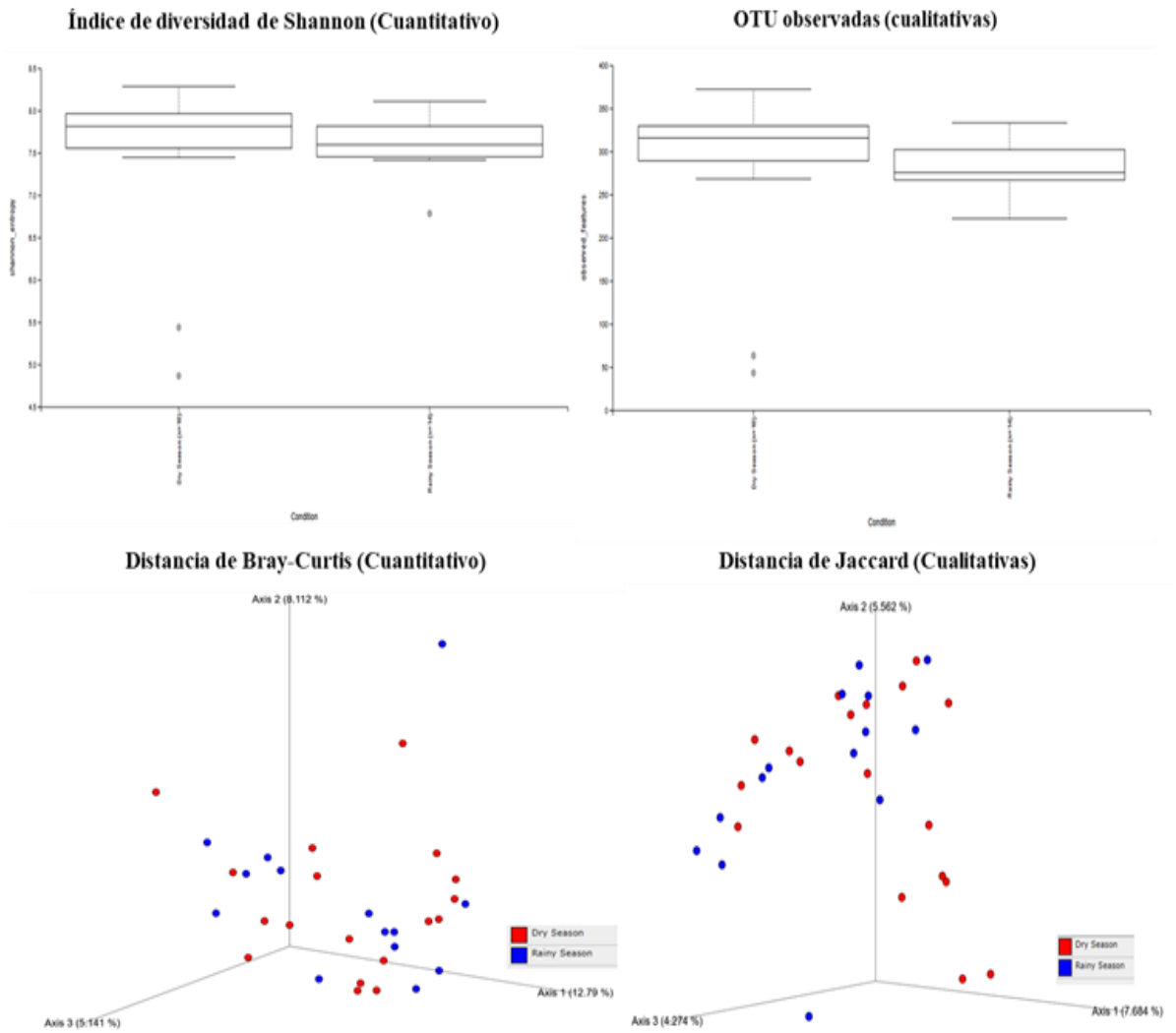


Figura 16. Índices de diversidad para épocas: Alfa (Índice de diversidad de Shannon, OTU observadas), Beta (Distancia de Bray-Curtis, distancia de Jaccard).

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian una conexión diversa entre las especies arbóreas, las propiedades fisicoquímicas del suelo, la macrofauna y la calidad del pasto en los sistemas ganaderos de la región Amazonas. Algunas variables edáficas mostraron diferencias significativas entre los sistemas evaluados, otras permanecieron relativamente constantes. Esta variación de ciertas variables sugiere que la influencia de las especies arbóreas en el suelo es diversa y dependiente de la época del año considerado.

4.1. Composición fisicoquímica del suelo de diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.

La influencia significativa de los sistemas con Aliso (*Alnus acuminata*), Pino (*Pinus patula*), ciprés (*Cupressus sp.*) y sistema a campo abierto y los sistemas de manejo en las características texturales y fisicoquímicas del suelo. Este resultado coincide con lo reportado por Valles et al. (2022), quienes indican que, la presencia de diferentes especies arbóreas en un sistema ganadero no altera significativamente el pH del suelo (5.3) en verano. Además, en este mismo estudio revelaron que las múltiples especies arbóreas no influyeron en la conductividad eléctrica y materia orgánica del suelo (Valles et al., 2022). Sin embargo, en nuestro estudio no se registró variaciones en pH en ningún sistema ganadero y estación del año valor promedio (4.5), mientras que la conductividad eléctrica y la materia orgánica presentaron valores mayores. Estos resultados contrastan con lo reportado por (Bato et al., 2020; Rofner et al., 2023), quienes indican que, en suelos con pasturas establecidas registraron un pH óptimo de 6.5 a 7.5. Las pasturas en suelos con estos valores de pH, muestran rendimientos de forraje valor mayor en comparación con pasturas que se cultivan en suelos ácidos o alcalinos. Se observó que las pasturas en suelos ácidos ($\text{pH} < 5.5$) tenían una reducción del 30% en la producción de biomasa en comparación con suelos neutros (Rofner et al., 2023). Además, según Vásquez et al. (2021) describe que, el pH del suelo varía según especie arbórea, por ejemplo, en sistemas ganaderos con Pino (*Pinus patula*) se registraron valores fuertemente ácidos de 4.37 de pH, al igual que en sistemas con Pona (*Ceroxylon quindiuense*) con 4.09 de pH. En estos mismos sistemas se muestra que, a mayor profundidad del muestreo, los niveles de pH se

van con dirección a ser neutros (4.75 y 4.99 para *Pinus patula* y *Ceroxylon quindiuense*, respectivamente). Además, en suelos de sistemas ganaderos a campo abierto (sin la presencia de árboles) se ha reportado valores de pH de 6.00 a 6.49 y en sistemas ganaderos con *Cupressus* se ha registrado pH de 5.41 (Bato et al., 2020).

En la época de verano, la textura del suelo, específicamente la fracción de arcilla, presentó variaciones significativas entre los sistemas evaluados, observándose una mayor concentración en los sistemas de campo abierto y Aliso nombre científico. Estas diferencias podrían atribuirse a la distinta cobertura vegetal y a los sistemas de raíces, factores que modulan la erosión y la deposición de partículas del suelo. En particular, la relación inversa identificada entre la proporción de arena y arcilla subraya la diferenciación en las propiedades texturales del suelo. Este hallazgo concuerda con las conclusiones de Huang et al. (2022) y Danise et al. (2021), quienes también resaltaron la importancia de la textura del suelo para comprender las variaciones asociadas a los sistemas de manejo y la caracterización de suelos. Los suelos con una textura equilibrada, con aproximadamente un 40% de arena, 40% de limo y 20% de arcilla, tienden a favorecer un mejor crecimiento del pasto. Por ejemplo, según Giannitsopoulos et al. (2021) indican que, las parcelas con suelos de textura equilibrada produjeron un 25% más de biomasa de pasto en comparación con aquellas con texturas desequilibradas. La diversidad microbiana y la presencia de ciertos grupos microbianos específicos están estrechamente relacionadas con un mayor rendimiento de pasto, con un incremento del 20% en la biomasa en suelos con alta diversidad microbiana en comparación con suelos con baja diversidad (Putatunda et al., 2024).

La relación inversa entre la arena y la arcilla refleja un patrón bien documentado en la literatura, como el descrito por Grisso et al. (2009), este análisis destaca que la conductividad eléctrica del suelo varía en función de su textura, siendo más elevada en suelos arcillosos y menor en aquellos de tipo arenoso. La relación establecida entre las propiedades fisicoquímicas del suelo, como la conductividad eléctrica y la materia orgánica, subraya la conexión existente entre la cobertura arbórea y las características edáficas. Esta observación se ve respaldada por Huang et al. (2022), quienes enfatizaron la importancia de las propiedades fisicoquímicas en la diferenciación de sistemas de manejo. Además, los suelos con un contenido

de materia orgánica superior al 3% presentan una mayor capacidad de retención de nutrientes, lo que favorece el crecimiento y desarrollo de pastos de mayor calidad (Raiesi, 2021; Danise et al., 2021). Alem et al. (2022) refuerzan la noción de que tanto la textura como la composición química del suelo son elementos críticos para determinar la calidad y su influencia en el crecimiento de las pasturas.

4.2. Macrofauna en suelos de diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.

La influencia que las especies arbóreas ejercen sobre la macrofauna del suelo, evidencia cómo las condiciones edáficas específicas (textura del suelo y cobertura arbórea), determinan la composición y distribución de estos organismos. Este hallazgo concuerda con los estudios de Walmsley et al. (2019), quienes encontraron que la macrofauna del suelo está fuertemente influenciada por las características del suelo y la vegetación circundante. La macrofauna del suelo desempeña un papel fundamental en la salud del ecosistema, al influir directamente en la descomposición de la materia orgánica, el ciclo de nutrientes y la estructura del suelo. Nuestros resultados evidencian diferencias en la composición y abundancia de la macrofauna entre los sistemas ganaderos y a lo largo de las épocas evaluadas. Esto sugiere que las especies arbóreas y las prácticas de manejo asociadas ejercen un impacto significativo en estas comunidades biológicas del suelo.

En particular, la adaptación de la macrofauna a las diversas texturas del suelo pone de manifiesto la complejidad de las interacciones ecológicas que caracterizan estos ecosistemas. La relación observada entre las especies de macrofauna, como Orthoptera y Erigone, con la textura del suelo, se alinea con la investigación de Bufebo et al. (2021), quienes documentaron variaciones significativas en la diversidad de macrofauna según el uso de la tierra. Esto sugiere que las características edáficas, como la composición y estructura del suelo, juegan un papel crucial en la determinación de la abundancia y diversidad de estos organismos. Esto es consistente con los hallazgos de Wurst et al. (2018), donde se destaca la importancia de la estructura del suelo en la distribución de la macrofauna. En suelos naturales y sistemas integrados mejora la abundancia y diversidad de macrofauna en 20% respecto a suelos convencionales (Mamabolo., 2023). Según Bradshaw et al. (2024) indican que, existen algunos organismos que pueden excavar hasta 30 cm de profundidad, proporcionando una cierta resistencia a la compactación que afectan principalmente las capas superficiales (5 a 20 cm).

La mayor diversidad y abundancia de macrofauna en los sistemas con Aliso (*Alnus acuminata*) y Pino (*Pinus patula*) podría atribuirse a la mayor cantidad y calidad de la hojarasca, que proporciona alimento y refugio para estos organismos. En contraste con suelos de menor calidad, con un pH ligeramente ácido de 6.44, menor contenido de materia orgánica (2.59%), influye en la menor existencia de macrofauna en el suelo. Los sistemas ganaderos favorecen la composición trófica de la macrofauna del suelo. Según Gutiérrez-Bermúdez et al., (2020) indican que, la diversidad de familias es mayor en un sistema silvopastoril en comparación con un sistema convencional, que se identificaron 6 clases, 15 órdenes y 33 familias en el sistema silvopastoril, mientras que en el convencional se encontraron menos. Además, la estructura del suelo y la humedad, influenciadas por la presencia de árboles, pueden crear condiciones más favorables para el desarrollo de la macrofauna (Cabrera et al., 2022). En contraste, el sistema de campo abierto, con menor cobertura vegetal y mayor exposición a la radiación solar y la erosión, podría ofrecer un hábitat menos favorable para la macrofauna.

4.3. Rendimiento productivo y bromatológico de los pastos en diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.

La productividad y calidad del pasto son factores críticos para la productividad del ganado. La cantidad y composición del forraje pueden verse afectadas por la presencia de especies arbóreas. Los mayores rendimientos de forraje fueron para los sistemas de pino (*Pinus patula*) y campo abierto para verano. En invierno el mayor rendimiento se obtuvo en los sistemas de ciprés (*Cupressus sp.*) y campo abierto respecto a las pasturas presentes en los sistemas de aliso (*Alnus acuminata*) y pino (*Pinus patula*). Oliva et al. (2018) refieren que el sistema silvopastoril es el que proporciona los mejores resultados con valores superiores a 0.70 kg/m² en *Lolium multiflorum* y 0.13 kg/m² en *Trifolium repens* y evidencia el efecto beneficioso que produce el componente arbóreo en la producción de biomasa del forraje coincidiendo con Vásquez et al. (2020), quienes informaron que los sistemas silvopastoriles mejoraron los rendimientos de pastos. Estos demuestran que, la producción de forraje obtenida por los sistemas silvopastoriles evaluados en este estudio varía y está, afectada por la forma de manejo. Los sistemas evaluados incluyen pastizales naturales que han sido manejados históricamente sin

fertilizantes químicos, dependiendo exclusivamente de la función de reciclaje de nutrientes para renovar la fertilidad del suelo. Ramírez et al. (2017) informaron que el rendimiento también está influenciado por la frecuencia e intensidad del pastoreo, así como por la temporada de corte.

La concentración de materia seca alcanzada fue ligeramente mayor en el sistema de ciprés (*Cupressus sp.*) durante el verano y en el sistema de aliso (*Alnus acuminata*) en invierno. Las diferencias podrían atribuirse al mayor contenido de humedad en las leguminosas en los sistemas silvopastoriles (Oliva et al., 2018). Sin embargo, otros autores consideran que la MS puede ser mayor en los sistemas silvopastoriles (López-Vigoa et al. 2017). Estos sistemas silvopastoriles concentran más humedad relativa y temperaturas más estables, lo que facilita la generación de microclimas, y la presencia de árboles reduce la evapotranspiración (Vásquez et al., 2021).

El uso de sistemas silvopastoriles con aliso (*Alnus acuminata*), pino (*Pinus patula*), ciprés (*Cupressus sp.*) aumenta los valores de proteína y cenizas en ambas estaciones. Aunque las diferencias no fueron significativas, el contenido de proteína fue mayor en verano en comparación con invierno y el contenido de cenizas en verano fue mayor que en invierno. Estos beneficios del sistema silvopastoril que muestran nuestros resultados están en línea con los resultados de Oliva et al. (2018) y Gaviria et al. (2015), quienes informaron un aumento de la calidad del forraje bajo sistemas silvopastoriles.

En cuanto a FDA, FDN y grasa, no se observarán diferencias en el FDA entre sistemas en ambas estaciones. Pero los sistemas silvopastoriles tenían más grasa y FDN que los sistemas de campo abierto. En nuestro estudio, los valores obtenidos para grasa y FDN fueron menores y para FDA mayores, observándose los más altos durante el invierno. Esto contrasta con Oliva et al. (2018), quienes encontraron 2.51% y 32.20% de grasa cruda y FDA, respectivamente, y 66.00% de FDN. Tales diferencias en la composición química pueden asociarse con diferencias de temperatura entre las áreas ensayadas, ya que temperaturas más altas conducen a una mayor lignificación de la pared celular. De hecho, el bajo contenido de FDN en nuestro estudio hace del forraje una especie muy valiosa como fuente de energía. Esto se debe a que acelerar la fragmentación del forraje por los microorganismos del rumen, requiere menos energía para la disrupción de la pared celular, favoreciendo la reducción del tiempo que el material insoluble permanece en el

rumen (Escobar et al., 2020; Villalobos y Sánchez, 2010; Castro-Hernández et al., 2017).

La digestibilidad en el pasto no difirió entre los sistemas ganaderos comparados y fue constante a lo largo de las estaciones. Este hallazgo concuerda con el valor de digestibilidad reportado por Arcos (2022), quien también refleja un declive en la digestibilidad de los forrajes con la edad. Las bajas tasas de digestibilidad observadas podrían atribuirse a una gestión del pasto demasiado restrictiva, que consiste en un pastoreo permanente y pocas prácticas de limpieza (Mejía, 2019).

4.4. Microbioma del suelo con la productividad del pasto en diferentes sistemas ganaderos de la región Amazonas.

No hubo cambios significativos en la estructura microbiana según sistema ganadero, ya que los niveles de diversidad alfa, es decir, el índice de Shannon y el número de OTUs fueron estadísticamente iguales entre los sistemas ($p > 0.05$). Estos resultados contrastan con los de Acharya et al. (2021), quienes encontraron que los pastizales orgánicos tenían una mayor riqueza y diversidad bacteriana que los convencionales. Esto podría deberse a que, en los sistemas evaluados en este estudio, los productores no hacen uso de ningún fertilizante inorgánico lo que hace que dependan del ciclo natural de nutrientes en comparación con pastos que son fertilizados (Putatunda et al., 2024).

La productividad de los pastos varió con el sistema y la estación. El rendimiento de forraje más alto en verano se alcanzó en los sistemas de pinos y campo abierto, y en invierno, en los sistemas de cipreses y campo abierto. Estas tendencias parecen estar más influenciadas por características micro climáticas y de gestión que por la diversidad microbiana. Por ejemplo, el campo abierto con alta exposición solar permitió altos niveles de producción en ambas estaciones. Los árboles, por otro lado, tienen un impacto en la luz, la humedad y la temperatura del suelo, lo que afecta el crecimiento del forraje. Al respecto, Acharya et al. (2021) subrayan la importancia de un microbioma del suelo más diverso para mejorar la disponibilidad de nutrientes y el crecimiento de las plantas. En este estudio, no encontramos una asociación entre la diversidad microbiana y el rendimiento de las pasturas. La diversidad alfa no difirió entre sistemas y no estuvo asociada con las diferencias observadas en la

biomasa de forraje. Los suelos con una alta diversidad microbiana pueden producir hasta un 20% más de biomasa de forraje (Ren et al., 2024).

La composición fisicoquímica del suelo es crucial para la estructura y función de los microbiomas. Esta interacción es especialmente importante para muchos procesos ecológicos, incluyendo, por ejemplo, la revisión de materia orgánica, la fijación de nitrógeno y la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Shi et al., 2021). Yuting et al. (2017) identificaron que la conversión de cereales en un sistema orgánico mejora claramente la riqueza bacteriana. No se emplearon fertilizantes en nuestro trabajo, todos los sistemas podrían, en este sentido, ser tratados como orgánicos. Pero la entrada de materia orgánica natural difería: en parcelas con árboles, había hojarasca y raíces muertas de especies arbóreas, lo que normalmente mejora el suelo. Gurmessa et al. (2021) identifican de manera similar cambios en la estructura del microbioma en relación con el pH del suelo, el carbono y los nutrientes. No observamos una relación directa entre estas variables específicas y la diversidad alfa en nuestros resultados, pero podemos mapearlos en patrones establecidos. Por ejemplo, como destacó Acharya et al. (2021) al observar relaciones positivas y negativas entre el pH del suelo y las abundancias de los filos (Acidobacteria, Actinobacteria y Chloroflexi).

En nuestros sistemas silvopastoriles el pino (*Pinus patula*), ciprés (*Cupressus sp.*) mostraron una tendencia a acidificar el suelo, lo que podría favorecer parcialmente a los microorganismos acidófilos, mientras que el campo abierto con el pH casi neutro podría sostener otras comunidades. Además, se ha observado que el carbono y el nitrógeno del suelo están positivamente correlacionados con los filos Gemmatimonadetes y Planctomycetes Acharya et al. (2021). Yuting et al. (2017) demostraron que la diversidad microbiana del suelo aumenta con las prácticas agroforestales que promueven la materia orgánica. En otro contexto, otros estudios mostraron que las parcelas con >3% de materia orgánica sostienen más nutrientes y pastos de alta calidad. Nuestros sistemas con árboles aliso (*Alnus acuminata*) habrían tenido más materia orgánica, beneficiando potencialmente el microbioma y el crecimiento del pasto. (Tong et al., 2025). Esa acidificación, sumada a la de otros árboles, probablemente filtró la diversidad bacteriana hacia filotipos acidófilos (ácido-correlacionados) y desplazó otros.

V. CONCLUSIONES

La incorporación de especies arbóreas en los potreros generó efectos complejos sobre el suelo y los pastos. En la época de verano, el pH medio del suelo y la materia orgánica fueron similares en todos los sistemas, aunque los suelos bajo Aliso o sin árboles tendieron a tener más arcilla. En la época de invierno los suelos de todos los sistemas fueron notablemente más ácidos, con conductividad eléctrica más alta en el campo abierto y materia orgánica ligeramente mayor en potreros con Aliso. En conjunto, los árboles modifican la textura del suelo y ayudan a conservar nutrientes e hidratación, factores clave para la fertilidad edáfica.

La composición de la macrofauna también varió según el sistema ganadero. En época de verano las lombrices (*Lumbricidae*) dominaron la macrofauna en todos los potreros alcanzando hasta el 83% bajo Pino, mientras que en campo abierto y Aliso las lombrices representaron menos de dos tercios (55–68%) y aumentó la proporción de insectos como *Premnotrypes*. En época invierno la tendencia se mantuvo: bajo árboles las lombrices llegaron a representar casi la totalidad de los invertebrados (>90% en Pino), mientras que en campo abierto y Aliso hubo mayor presencia de coleópteros y otros artrópodos. Estos hallazgos indican que los sistemas con árboles (especialmente Pino y Ciprés) favorecen poblaciones elevadas de lombrices, organismos que mejoran la aireación del suelo y el ciclo de nutrientes, mientras que en potreros abiertos o con Aliso aumenta la diversidad de grupos edáficos.

El rendimiento y la calidad del forraje respondieron al tipo de sistema ganadero. En época de verano los sistemas ganaderos con Pino o sin árboles produjeron más forraje que los sistemas con Aliso o Ciprés, mientras que en invierno el mayor rendimiento correspondió a Ciprés. En cuanto a la calidad nutricional, el contenido de proteína cruda fue similar en todos los sistemas, pero los pastos bajo árboles presentaron niveles de ceniza más altos y, en algunos casos, menor porcentaje de grasa. Las diferencias en fibra FDA y FDN fueron pequeñas y la digestibilidad aparente del pasto no mostró variación significativa entre sistemas.

El análisis del microbioma del suelo reveló poca variación entre sistemas: todos mostraron los mismos filos dominantes (*Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Acidobacteria*, *Firmicutes*, *Chloroflexi*) tanto en época de verano como en época de invierno, sin cambios drásticos atribuibles a la especie arbórea. Asimismo, los índices de diversidad

alfa (riqueza de OTUs e índice de Shannon) fueron equivalentes entre los sistemas. Solo se observó un leve aumento general de ciertos filos (por ejemplo, Bacteroidota y Firmicutes) en la época de invierno, pero la estructura global del microbioma permaneció relativamente estable. Esto sugiere que, aunque los árboles afectan el suelo físico y a sus organismos edáficos, la comunidad bacteriana es menos sensible a cambios puntuales y está dominada por factores generales del medio.

Los resultados demostraron que integrar especies arbóreas en los potreros influye positivamente en la fertilidad del suelo. La cobertura arbórea mejora la estructura del suelo y aumenta la actividad de organismos beneficiosos, lo que a la larga favorece la producción forrajera sostenible. Aunque algunas especies como Ciprés o Pino pueden acidificar el suelo con el tiempo, su presencia creó microclimas más benignos y variedades de pasto nutritivo que compensan esos efectos. El estudio destaca que los sistemas silvopastoriles tienden a ser más resilientes y productivos que los potreros a campo abierto.

VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda fomentar la implementación de sistemas silvopastoriles que integren árboles adecuados, como el aliso, en las áreas de pastoreo, debido a sus beneficios en la fertilidad del suelo, la biodiversidad edáfica y la producción de pastos. Para asegurar la sostenibilidad de estos sistemas, es importante mantener una cobertura arbórea parcial que aporte hojarasca, regule el microclima y favorezca el desarrollo de organismos como lombrices, esenciales para la salud del suelo. También se debe promover el uso de prácticas como el pastoreo rotacional y el manejo adecuado de la carga animal, así como la realización de análisis periódicos del suelo y del forraje para corregir deficiencias con enmiendas orgánicas. Además, es fundamental continuar investigando especies nativas y leguminosas forrajeras, así como su efecto sobre el microbioma del suelo, con el fin de adaptar los esquemas silvopastoriles a las condiciones específicas de Amazonas.

VII. BIBLIOGRAFIA

- Acharya, M., Ashworth, A.J., Yang, Y., Burke, J.M., Lee, J.A., y Sharma-Acharya R. (2021). Diversidad microbiana del suelo en sistemas de pasturas orgánicas e inorgánicas. PeerJ 9: e11184 <https://doi.org/10.7717/peerj.11184>.
- Arcos, D. (2022). Digestibilidad de la pastura tropical con predominancia del pasto alemán *Echinochloa polystachya* (Kunth) Hitchc, a partir de los nutrientes fecales utilizando diferentes modelos de estimación en toretes de carne al pastoreo. Tesis para la obtención de grado de Ingeniero Zootecnista. <https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/ca36baa3-8451-4185-b07c-6f86f1300a63/content>
- Association of Official Analytical Chemistry (AOAC). (1990). Fat (Crude) or Ether Extract in Animal Feed (920.39). Official Methods of Analysis, 15th Edition, AOAC, Washington DC. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2958058>
- Association of Official Analytical Chemistry (AOAC). (2000). Official Methods of Analysis of AOAC International (928.08). 17th Edition, AOAC INTERNATIONAL, Gaithersburg, MD. <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=168769>
- Association of Official Analytical Chemistry (AOAC). (2005). Official Methods of Analysis of AOAC International (942.05). 18 Edition, AOAC INTERNATIONAL, Gaithersburg, MD. https://www.researchgate.net/publication/292783651_AOAC_2005
- Barreto-García, O. A., Guevara Gutiérrez, R. D., Olguín López, J. L., Mancilla, V. O. R., Medina, V. E., y Murillo, H. J. E. (2018). Macroinvertebrados de hojarasca y suelo en selva baja caducifolia y zonas perturbadas. *Idesia* (Arica), 36(1), 105-113. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34292018000100105&script=sci_arttext
- Bato, Y., Bekele, T., & Demissew, S. (2020). Changes in Soil Chemical Properties Under Different Land-Use Systems and Soil Depth Layers: A Case Study

from the Central Highlands of Ethiopia. Research Square, 2-15.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-74895/v1>

Bradshaw, C., Iburg, S., Morys, C., Sköld, M., Pusceddu, A., Ennas, C., Jonsson, P., y Francisco, J.A. (2024). Effects of bottom trawling and environmental factors on benthic bacteria, meiofauna and macrofauna communities and benthic ecosystem processes. *Science of The Total Environment*, 921(1), 171076. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171076>.

Cabrera, C., Sánchez, J y Ponce, D. (2022). Macrofauna edáfica: composición, variación y utilización como bioindicador según el impacto del uso y calidad del suelo. *Acta botánica cubana*, 221(3).
<https://revistasgeotech.com/index.php/abc/article/view/404/445>

Cabrera, D. G., Sánchez, R. J., y De Leon, L. D. (2022). Macrofauna edáfica: composición, variación y utilización como bioindicador según el impacto del uso y calidad del suelo. *Acta Botánica Cubana*, 221, 2519-7754.
<https://revistasgeotech.com/index.php/abc/article/view/404/446>

Carrasco, C. W. L., Álvarez, W. Y., Vásquez, P. H. (2021). Rendimiento productivo de dos genotipos de Avena Sativa L. en 10 localidades, y el momento óptimo para la producción de ensilado en asociación con Vicia sativa L. en la sierra norte del Perú. *Agroindustrial science*, 11(2), 193-199.
https://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/20.500.12955/1468/6/Carrasco-et-al_2021_Rendimiento_Forraje.pdf

Castro-Hernández, F., Navarro-Flores, J., y Castro-Barquero, L. (2023). Adición de inóculos microbianos y condiciones optimizadas de elaboración en un compost comercial. *Agronomía Costarricense*, 47 (10), 15517.
https://www.researchgate.net/publication/373006712_Adicion_de_inoculos_microbianos_y_condiciones_optimizadas_de_elaboracion_en_un_compost_comercial

Danise, T., De Castro, O., Zaccone, C., Guggenberger, G., Menta, C., Innangi, M., De Luca, D., Dilorio, E., Turchetti, B., e Fioretto, A. (2025). Implications of nurse species in mixed forest plantations management on soil fungal

- community diversity. *Applied Soil Ecology*, 206. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0929139325000307>
- Decaëns, T., Jiménez, J. J., Barros, E., Chauvel, A., Blanchart, E., Fragoso, C., & Lavelle, P. (2004). Soil macrofaunal communities in permanent pastures derived from tropical forest or savanna. *Agriculture, ecosystems & environment*, 103(2), 301-312. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.005>
- Delgado-Baquerizo, M., Oliverio, A.M., Brewer, T.E., Benavent-González, A., Eldridge, D.J., Bardgett, R.D., Maestre, F.T., Singh, B.K., y Fierer, N., (2018). A global atlas of the dominant bacteria found in soil. *Science*, 359(6373), 320–325. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aap9516>
- Escobar, L. O., Mejía, F. L., Vásquez Pérez, H. V., Bernal, W., & Alvarez García, W. Y. (2020). Composición botánica y evaluación nutricional de pasturas en diferentes sistemas silvopastoriles en Molinopampa, Región Amazonas, Perú. *Livestock Research for Rural Development*. 32, 6. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/6439836>
- Gao, M., Peng, C., Hu, Y., Liu, W., Ye, Y., Zheng, Y., y Ting-Wen, W. (2023). Composition and vertical distribution of agricultural soil Macrofauna community after an extreme high temperature event in the summer of 2022. *Ecological Indicators*, 153(2023), 110439. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110439>
- García-Mantrana, I., Selma-Royo, M., González, S., Parra-Llorca, A., Martínez-Costa, C., y Collado, M. C. (2020). Distinct maternal microbiota clusters are associated with diet during pregnancy: impact on neonatal microbiota and infant growth during the first 18 months of life. *Gut Microbes*, 11(4), 962-978. <https://doi.org/10.1080/19490976.2020.1730294>
- Gaviria, X., Rivera, J.E., Barahona, R. (2015). Calidad nutricional y fraccionamiento de carbohidratos y proteína en los componentes forrajeros de un sistema silvopastoril intensivo. *Pastos y Forrajes* 38(2): 194-201. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942015000200007

- Giannitsopoulos, M.L., Burgess, P.J., Richter, G.M., Bell, M.J., Topp, C.F.E., Ingram, J., y Takahashi, T. (2021). Modelling the Interactions of Soils, Climate, and Management for Grass Production in England and Wales. *Agronomy*, 11(4), 677. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040677>
- Giraldo-Echeverri, C., Montoya-Molina, S., Montoya-Lerma, J., Escobar, F., Chará, J., y Murgueitio, E. (2015). Diversidad de escarabajos coprófagos en sistemas silvopastoriles del Valle del río Cesar, Researchgate. https://www.researchgate.net/publication/282815814_Diversidad_de_escarabajos_coprofagos_en_sistemas_silvopastoriles_del_Valle_del_rio_Cesar_Colombia
- Gupta, A., Singh, U.B, Sahu, P.K., Paul, S., Kumar, A., Malviya, D., Singh, S., Kuppusamy, P., Singh, P., Paul, D., Rai, J.P., Singh, H.V., Manna, MC, Crusberg, TC, Kumar, A., y Saxena, A.K. (2022). Vinculación de la diversidad microbiana del suelo con las prácticas agrícolas modernas: Una revisión. *Revista Internacional de Investigación Ambiental y Salud Pública*, 19 (5), 3141. <https://doi.org/10.3390/ijerph19053141>
- Gurmessa, B., Ashworth, A., Yang, Y., Adhikari, K., Savin, M., Owens, P., Sauer, T., Foppa, E., Cocco, S., Corti, G. (2021). Soil bacterial diversity based on management and topography in a silvopastoral system. *Applied Soil Ecology*, 163(1). <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103918>.
- Gutiérrez-Bermúdez, C., Mendieta, B., y Noguera-Talavera, J.A. (2020). Composición trófica de la macrofauna edáfica en sistemas ganaderos en el corredor seco de Nicaragua. *ResearchGate*, 43(1), 32-40. https://www.researchgate.net/publication/348407079_Composicion_trofica_de_la_macrofauna_edafica_en_sistemas_ganaderos_en_el_Corredor_Seco_de_Nicaragua
- Huang, X., Wang, W., Gong, T., Wickell, D., Li-Yaung, L., Zhang, X., Wen, J., Kim, H., Lu, Fachuang, Z., Chen, S., Li, H., Wu, W., Yu, C., Chen, S., Fan, W., Chen, S., Bao, X., Li, L., y Li, Q. (2022). The flying spider-monkey tree fern genome provides insights into fern evolution and arborescence. *Nature Plants*. https://www.researchgate.net/publication/360474556_Huang_et_al_-

[2022 - The flying spider-monkey tree fern genome provides insights into fern evolution and arborescence](#)

- Kakraliya, S., Jat, H., Singh, I., y Jat, M. (2018). Effect of Climate Smart Agriculture Practices on Crop yields and Factor Productivity of Rice-Wheat Cropping System in Indo-Gangetic Plains of India. Researchgate. https://www.researchgate.net/publication/350694790_Effect_of_Climate_Smart_Agriculture_Practices_on_Crop_yields_and_Factor_Productivity_of_Rice-Wheat_Cropping_System_in_Indo-Gangetic_Plains_of_India/citation/download
- Klindworth, A., Pruesse, E., Schweer, T., Peplies, J., Quast, C., Horn, M., & Glöckner, F. O. (2013). Evaluation of general 16S ribosomal RNA gene PCR primers for classical and next-generation sequencing-based diversity studies. *Nucleic Acids Research*, 41(1), e1-e1. <https://doi.org/10.1093/nar/gks808>
- Liu, C., Cui, Y., Li, X., y Yao, M. (2021). Microeco: An R package for data mining in microbial community ecology. *FEMS Microbiol Ecol*, 26;97(2). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33332530>
- López-Vigoa, O., Sánchez-Santana, T., Iglesias-Gómez, J. M., Lamela-López, L., Soca-Pérez, M., Arece-García, J., y Milera-Rodríguez, M. (2017). Los sistemas silvopastoriles como alternativa para la producción animal sostenible en el contexto actual de la ganadería tropical. *Pastos y forrajes*, 40(2). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942017000200001
- Mamabolo, E. (2023). Characterisation of soil macro- and mesofauna diversity and their contribution to soil health in grain agroecosystems (Tesis doctoral). Stellenbosch University, ciudad de Stellenbosch. <http://hdl.handle.net/10019.1/127231>
- Mamani. P. J., Terroba, N., Quispe, M. J., y Supo, H. F. (2024). Respuesta de pastizales naturales degradados a la revegetación y la aplicación de estiércol de ovino. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 26(2), 86-93.

http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2313-29572024000200086

Martínez-Aguilar, F. B., Guevara-Hernández, F., Aguilar-Jiménez, C., Rodríguez-Larramendi, L., Reyes-Sosa, M., y O-Arias, M. (2020). Caracterización físico-química y biológica del suelo cultivado con maíz en sistemas convencional, agroecológico y mixto en la Frailesca, Chiapas. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 871-881.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792020000500871

McMurdie, P. J., Holmes, S. (2013). Phyloseq: An R Package for Reproducible Interactive Analysis and Graphics of Microbiome Census Data. *PLoS One*.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0061217>

Mejía, F., Yoplac, I., Bernal, W., & Castro, W. (2019). Evaluación de modelos de predicción de composición química y energía bruta de kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) usando espectroscopía en infrarrojo cercano (NIRS). *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 30(3), 1068-1076.

http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1609-91172019000300009&script=sci_abstract7

Milazzo, F., Francksen, R., Zavattaro, L., Abdalla, M., Hejduk, S., Ravetto, E., Pittarello, M., Newell, P., René, L. M., Vanwalleghem, T. (2023). The role of grassland for erosion and flood mitigation in Europe: A meta-analysis, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 348.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880923001020>

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MINAGRI). (2010). Reglamento para la Ejecución de Levantamiento de Suelos.

<https://www.gob.pe/institucion/serfor/normas-legales/998187-0010-2010-minagri-serfor-dggspffs>

Ministerio del Ambiente (MINAM). (2010). Mapa de pastos altoandinos 2010.

<https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-pastos-altoandinos-2010>

Moreno-Mesonero, L., Ferrús, M. A., & Moreno, Y. (2020). Determination of the bacterial microbiome of free-living amoebae isolated from wastewater by

- 16S rRNA amplicon-based sequencing. *Environmental Research*, 190, 109987. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109987>
- Murillo-Cuevas, F. D., Adame-García, J., Cabrera-Mireles, H., Fernández-Viveros, J. (2019). Fauna y microflora edáfica asociada a diferentes usos de suelo. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 6(16), 23-33. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282019000100023
- Nadarajah, K. y Abdul Rahman, NSN (2023). La conexión microbiana con la agricultura sostenible. *Plants*, 12 (12), 2307. <https://doi.org/10.3390/plants12122307>
- Oliva, M., Valqui, L., Meléndez, J., Milla, M., Leiva, S., Collazos, R., y Maicelo, J. L. (2018). Influencia de especies arbóreas nativas en sistemas silvopastoriles sobre el rendimiento y valor nutricional de *Lolium multiflorum* y *Trifolium repens*. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 579-583. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172018000400014
- Oliveira, E. M., Wittwer, R., Hartmann, M., Keller, T., Buchmann, N. (2024). Effects of conventional, organic and conservation agriculture on soil physical properties, root growth and microbial habitats in a long-term field experiment. *Geoderma*, 447(2), 116927. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116927>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura sustenta (FAO). (2025). La ganadería y el medio ambiente. <https://www.fao.org/livestock-environment/es>
- Pérez, J., López, L., & Sánchez, E. (2020). Influencia de los sistemas agroforestales sobre la productividad y calidad del suelo en la Amazonía. *Revista de Agroforestería y Conservación de Suelos*, 15(2), 123-131. <https://www.cifor-icraf.org/publications/downloads/Publications/PDFS/b14535.pdf>
- Putatunda, C., Kitnya, N., y Solanki, P. (2024). Soil Microbiome as a Key Factor in Soil Health. ResearchGate.

https://www.researchgate.net/publication/379043577_Soil_Microbiome_as_a_Key_Factor_in_Soil_Health

- Quinto-Mosquera, H., Ayala-Vivas, G., y Gutiérrez, H. (2022). Contenido de nutrientes, acidez y textura del suelo en áreas degradadas por la minería en el Chocó biogeográfico. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(179), 514-528. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082022000200514
- Raiesi, F. (2021). The quantity and quality of soil organic matter and humic substances following dry-farming and subsequent restoration in an upland pasture. *Catena*, 202, 105249. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105249>
- Ramírez, J.L., Zambrano, D.A., Campuzano, J. (2017). El clima y su influencia en la producción de pastos. *Revista Electrónica de Veterinaria* 18(6): 1-12. <https://www.redalyc.org/pdf/636/63651420007.pdf>
- Ren, X., Whitton, M. M., Trotter, T., Ashwath, N., Stanley, D., y Sharma, B.Y. (2024). Enhancing soil health and carbon sequestration through phytogenic treatment: insights into microbial functional pathways in pasture dieback affected soil. *Plant and Soil*, 1(17). 10.1007/s11104-024-06594-x
- Rofner, N., Principe, R., Rengifo, R.A., & Cipriano, J. (2023). Efecto a largo plazo del pastoreo rotacional en *Urochloa brizantha* vv. Marandú sobre indicadores de calidad del suelo. *Tropical Grasslands-Forrajeros Tropicales*, 11(2), https://www.researchgate.net/publication/356755827_FAO_ITPS_GSBI_CBD_and_EC_2020_State_of_knowledge_of_soil_biodiversity
- Saucedo, J., Oliva, M., Maicelo, J. L., Quispe, H., & Melendez, J. B. (2020). Arreglos silvopastoriles con especie arbórea *Alnus acuminata* (aliso) y su efecto sobre los factores ambientales de sistemas ganaderos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 46(3), 323-328. https://ria.inta.gob.ar/wp-content/uploads/2021/02/pubria2020_46n3_dic.pdf
- Saucedo-Uriarte, J. A., Oliva-Cruz, S. M., Maicelo-Quintana, J. L., Meléndez-Mori, J. B., Y Collazos-Silva, R. (2022). Arreglos silvopastoriles con *Alnus acuminata* y su efecto sobre parámetros productivos y nutricionales del

- componente forrajero. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 13(2), 573-583. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v13i2.5007>
- Shi, S., Nuccio, E., Shi, Z., He, Z., Zhou, J., y Firestone, M. (2021). The interconnected rhizosphere: High network complexity dominates rhizosphere assemblages. *Ecology Letters*, 19(8). https://www.researchgate.net/publication/303817448_The_interconnected_rhizosphere_High_network_complexity_dominates_rhizosphere_assemblages
- Simón, M., Peralta, N., y Costa, J. (2013). Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. *Ciencia del Suelo*. 31, 45-55. https://www.researchgate.net/publication/262663093_Relacion_entre_la_conductividad_electrica_aparente_con_propiedades_del_suelo_y_nutrientes
- Tilley, J. M. A., & Terry, D. R. (1963). A two-stage technique for the in vitro digestion of forage crops. *Grass and Forage Science*, 18(2), 104-111. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1963.tb00335.x>
- Tong, A., Liu, W., Liu, X., Zhu, J., Zhou, YoU., Li, J. (2025). Comparative analysis of actinorhizal nodule and associated soil microorganism diversity and structure in three *Alnus* species. *Frontiers in Plant Science*, 16(1). <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2025.1572494>
- Van-Soest, P. J. (1991). Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74 (10). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030291785512>
- Vásquez, H. V., Valqui, L., Bobadilla, L. G., Arbizu, C. I., Alegre, J. C., & Maicelo, J. L. (2021). Influence of arboreal components on the physical-chemical characteristics of the soil under four silvopastoral systems in northeastern Peru. *Heliyon*, 7(8), e07725. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07725>

- Vásquez, H. V., Valqui, L., Orihuela, J. C., Gómez, C., y Maicelo, J. L. (2020). Análisis de cuatro sistemas silvopastoriles en Perú: Caracterización física y nutricional de pasturas, composición florística, reserva de carbono y CO₂. *Scientia Agropecuaria*, 11(2), 167-176. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172020000200167#B30
- Villalobos, L., Sánchez, J.M. (2010). Evaluación agronómica y nutricional del pasto rye grass perenne tetraploide (*Lolium perenne*) producidos en lecherías de las zonas altas de Costa Rica. II. Valor nutricional. *Agronomía costarricense* 34(1): 43-52. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242010000100004
- Xiaofang, L., Xin, Z., Nikita, Y., Shouvik, S., Salama, E., Xiangkai, L., Likun, W., y Jeon, B. (2024). Rational management of the plant microbiome for the Second Green Revolution. *Plant Communications*, 5(4), 100812. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590346224000324>
- Xu, S., Zhan, L., Tang, W., Wang, Q., Dai, Z., Zhou, L. (2023). MicrobiotaProcess: A comprehensive R package for deep mining microbiome. *Innovation*, 4(2). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666675823000164>
- Yuting, X., Hong, H., Xinhua, H., Ben, Y., Newton, L., Xiyang, H., Matthew, T., Xiaojun, S. (2017). Fertilization Shapes Bacterial Community Structure by Alteration of Soil pH. *Frontiers in Microbiology*, 8. <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2017.01325>

ANEXOS

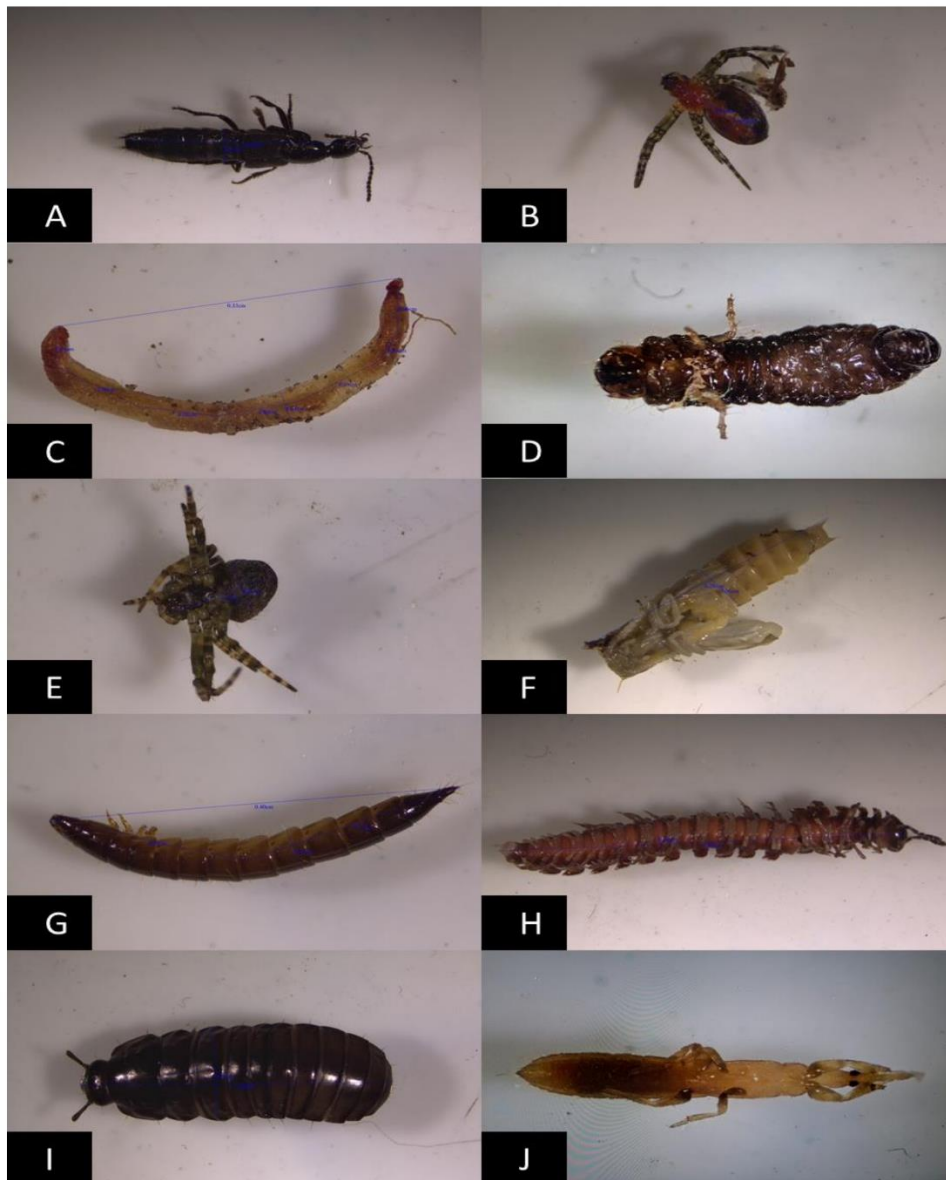


Figura 17. Diversidad encontrada (A) Staphylinidae, (B) Erigone, (C) Lumbricidae, (D) *Premnotrypes vorax*, (E) Araneae mygalomorpha, (F) Tisanopteros anthura, (G) Haplotaxidos, (H) Chilopoda, (I) Isopoda y (J) Orthopteros.

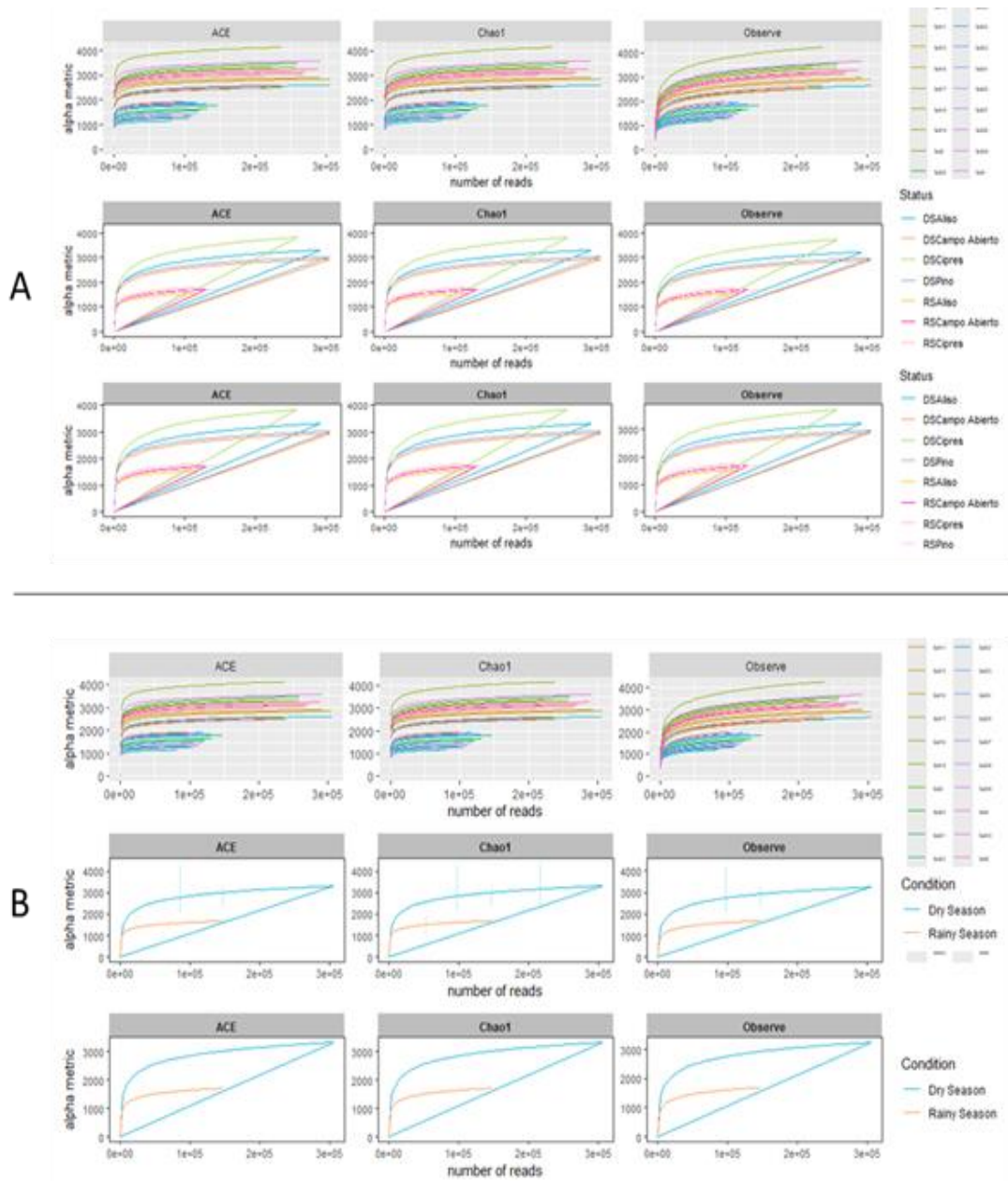


Figura 18. Curva de rarefacción donde (A) es por sistemas y (B) por épocas.