

UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Evaluación integral de la salud del suelo en sistemas pastoriles y silvopastoriles en el trópico seco**

**Lucía Eloísa Ocampo Quijano**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias, Posgrado en Biotecnología  
Medellín, Colombia  
Septiembre 8 2022



# **Evaluación integral de la salud del suelo en sistemas pastoriles y silvopastoriles en el trópico seco**

**Lucía Eloísa Ocampo Quijano**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

**Doctor en Biotecnología**

Director (a):

Ingeniero Agrónomo (Ph.D.) Nelson Walter Osorio Vega

Codirector (a):

Ingeniera Agrícola (Ph.D.) Judith Martínez Atencia

Línea de Investigación:

Desarrollo de indicadores de calidad del suelo

Grupo de Investigación:

Microbiología del suelo

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Posgrado en Biotecnología

Medellín, Colombia

Septiembre 8 2022



*Para Anselmo, compañero por siempre por su amor y comprensión*

*A mis padres Hernán y Nora quienes siempre soñaron con mis logros.*

*A todos mis profesores, mis seres queridos y amigos que de una u otra forma han contribuido en mi formación.*

*Gracias, gracias, gracias*



## Declaración de obra original

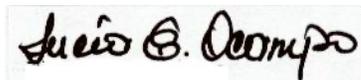
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



---

Nombre Lucía Eloísa Ocampo Quijano

Fecha 24/11/2021

## **Agradecimientos**

Al profesor Nelson Walter Osorio Vega por su valiosa orientación desde el inicio en el cambio de programa doctoral, sus acertadas sugerencias, su apoyo académico, por escuchar siempre las dificultades y brindar una solución a los problemas con claridad meridiana y sobre todo agradezco su gran amistad.

A la Codirectora Judith Martínez Atencia por su apoyo académico, en el desarrollo logístico y académico de la investigación. Por brindarme su valiosa amistad, por permitirme conocer su hermosa familia y su madre, la señora Aracelly de Atencia, quienes me acogieron en la hermosa ciudad de Montería.

Al profesor Orlando Ruiz por su decidida colaboración con el espacio en el Laboratorio de Suelos para la realización de las mediciones enzimáticas, los análisis del laboratorio de Suelos y sus aportes en la Química del suelo.

Al profesor Kenneth Roy Cabrera por todo su apoyo en la parte estadística de esta investigación, de igual manera por brindarme su amistad.

A la profesora Olga Montoya por brindarme el espacio del laboratorio de Microbiología para la realización de los análisis microbiológicos de suelo.

A mi colega Blanca Luz Pineda por su valiosa colaboración en la realización de análisis microbiológicos del suelo.

Al grupo de trabajo de Agrosavia, a los profesionales José Contreras, Emel Berrio, Yeison Garrido, José Rodríguez por su disponibilidad permanente durante mi estadía, colaboración en los trabajos de campo y aportes en general.

A las Tecnólogas Químicas del laboratorio: Anita Henao Valencia, Margarita Sizquiarco Ramírez, María Cristina Valencia Uribe, a la Magister Gloria Arango, y Auxiliares de Laboratorio Suelos Diego Vásquez Cortés y Liliana Vásquez Cortes por su colaboración y sus aportes en elaboración de reactivos, uso de equipos y su experiencia en el análisis química del suelo.

Al Biólogo y Magister Andrés Puerta González y al Ingeniero Ángel Sabogan por sus aportes y conocimiento en Informática.

A mi esposo Anselmo por comprender el tiempo de mis ausencias, y por brindarme todo su apoyo y amor.

A mis hermanos por su increíble lucha, a mi hermano el Ingeniero mecánico Sergio Ocampo por su apoyo incondicional en el diseño y elaboración de un prototipo para los ensayos físicos del suelo.

A mi familia Ocampo y Quijano por estar presentes en mi vida.

A los estudiantes del grupo de Física Radiológica Mateo Zuta, Vanessa Peña, Carolina Osorio, Bibiana Peña por compartir el espacio y el día a día.

A los compañeros del grupo de Microbiología del suelo, a las Ingenieras agrónomas Claudia Londoño, María Victoria Salazar e Inés Osorio, a la Ingeniera Erika María Restrepo y a la Bióloga Leidy Carolina García por brindarme su amistad.

## X Evaluación integral de la salud del suelo en sistemas pastoriles y silvopastoriles en el trópico seco

---

A la empresa Biofertilizar por permitirme realizar parte de los análisis físicos del suelo, a la Ingeniera Frack Delly Zuluaga por las indicaciones en física del suelo y al personal del laboratorio Manuela Osorno, Daniel y a Camila por compartir. A todos muchas gracias.

A los compañeros y amigos del grupo cantores Drako, por generar un espacio ineludible de diversión, tertulia, música y canto que me permitió siempre recuperar las energías tras largas horas de trabajo.

Agradezco a las secretarias del Posgrado Gloria Rivas Ramírez, por todo su apoyo y gestión en el posgrado de Biotecnología y a la profesional Lina Marcela Rojas Arango por su valiosa gestión en el posgrado.

Demás actores sin los cuales no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

## Resumen

El bosque seco tropical (Bs-T), amenazado y poco conocido, ha tenido cambios drásticos en su estructura y diversidad debido a su degradación. Esto ha resultado principalmente de la deforestación y el establecimiento de cultivos intensivos y la actividad ganadera convencional. Los sistemas silvopastoriles (SSP) brindan beneficios al suelo, tales como el aporte de hojarasca y nutrientes entre otros. Sin embargo, poco se sabe del mejoramiento de los indicadores de la salud del suelo al establecer los SSP. El objetivo de esta investigación es evaluar el efecto del uso y manejo del suelo sobre la salud del suelo a través de indicadores químicos, físicos y biológicos de la salud del suelo bajo cinco diferentes arreglos: (i) cultivo intensivo de maíz (*Zea mays*) (M), (ii) pastura mixta (*Megathyrus maximum* + *Dichanthium aristatum*) (P), (iii) SSP compuesto por (*M. maximum* + *D. aristatum*) + arbustos (*Crescentia cujete* + *Leucaena leucocephala*) (P+a), (iv) SSP multiestrato compuesto por pastura (*M. maximum* + *D. aristatum*) + arbustos (*C. cujete* + *L. leucocephala*) + arboles (*Guazuma ulmifolia*, *Cassia grandis* y *Albizia saman*) (P+a+A) y (v) como referencia se incluyó un arreglo forestal correspondiente a un bosque secundario (Bs). Las evaluaciones se hicieron en condiciones de tiempo contrastantes (húmedo y seco) en suelos del Valle medio del río Sinú que presentan un gradiente de drenaje. En general, el suelo cultivado con M presentó un deterioro integral en las condiciones físicas, químicas y biológicas (caracterizado por menor contenido de MO, N-total, Ca, K, CICE, S, B, Fe, Cu; mayor densidad real y aparente, menor porosidad total, menor tamaño y estabilidad de agregados; menor carbón activo oxidable, menor potencial bioquímico); este fue seguido en estos indicadores por el Bs. Se encontró que los suelos de los SSP, con respecto a los de la pastura, presentaron mayores valores en el contenido de materia orgánica del suelo, C-activo oxidable, Ca, Mg, P, B, CICE en época seca y N-NO<sub>3</sub> en época lluviosa. Por lo anterior, se puede concluir que el establecimiento de SSP mejoró el valor de muchos de los indicadores de la salud del suelo en comparación a lo que ocurre en la pastura y al monocultivo de maíz. En general, el suelo del bosque de restauración presentó valores bajos a medios.

## XII Evaluación integral de la salud del suelo en sistemas pastoriles y silvopastoriles en el trópico seco

---

**Palabras claves:** agricultura tropical, bosque de restauración secundario, sistemas productivos, maíz, pasto guinea, arboles leguminosos

# Comprehensive Assessment of soil health in silvopastoral and pastoral systems in a tropical dry forest

## Abstract

Threatened and little-known tropical dry forest Bs-T has undergone drastic changes in structure and diversity due to degradation. Deforestation is mainly a consequence, the establishment of intensive cropping and livestock activity. The silvopastoral systems, (SSP), which provide benefits to the soil such as the contribution of leaf and nutrients, among others. However, it is little knowing the improve of the health soil indicators when establishment SSP. The objective is to evaluate the effect of the soil use and management on health soil by chemical, physical, and biological indicators of soil health under five different arrangements, which have been established for at least 19 years: (i) intensive maize (*Zea mays*) cropping (M), (ii) mixed pasture (*Megathyrsus maximum* + *Dichanthium aristatum*) (P), (iii) SSP consisting of (*M. maximum* + *D. aristatum*) + shrubs (*Crescentia cujete* + *Leucaena leucocephala*) (P+a), (iv) multistrata SSP made up of pasture (*M. maximum* + *D. aristatum*) + shrubs (*C. cujete* + *L. leucocephala*) + trees (*Guazuma ulmifolia*, *Cassia grandis* and *Albizia saman*) (P+a+A) and (v) a forest arrangement corresponding to a restoration forest (Bs) was included. The evaluations were made under contrasting climatic conditions (wet and dry) in soils of the Middle Valley of the Sinú river,

#### XIV Evaluación integral de la salud del suelo en sistemas pastoriles y silvopastoriles en el trópico seco

---

which present a drainage gradient. Chemical, physical, and biological indicators were used to quantitatively evaluate the impact of soil use and management on the different arrangements. It was found that SSP soils presented increase in soil organic matter, total Nitrogen, N-NO<sub>3</sub>, Ca, Mg, K, P, B, Effective Cation Exchange Capacity (ECEC), oxidizable C-active (COXP), detecting higher enzymatic activities (alkaline phosphatase and catalase), CO<sub>2</sub>, lower bulk density, higher total porosity, greater water stability of aggregates, and greater weighted average diameter (DMP) and greater equivalent diameter of aggregate size, were detected. Therefore, it can be stated that the establishment of SSP improved soil chemical, physical and biological indicators of soil health compared to what occurs in the pasture and corn monoculture. Usually, the restoration of forest soil showed intermediate to low values.

Keywords: tropical agriculture, Secondary restoration forest, productive systems, corn, guinea grass, angleton, leguminous trees

# Contenido

*Pág.*

<b>Resumen.....</b>	<b>XI</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>XXVIII</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>XXVI</b>
<b>Lista de abreviaturas.....</b>	<b>XXVIII</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Hipótesis.....	2
1.2 Objetivo general .....	3
1.2.1 Objetivos específicos.....	3
<b>Bibliografía .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Indicadores químicos de la salud del suelo en sistemas silvopastoriles, bosque de restauración y cultivo de maíz en el bosque seco tropical de Colombia .....</b>	<b>7</b>
2.1 Resumen.....	7
2.2 Introducción.....	8
2.3 Materiales y métodos .....	10
2.3.1 Localización .....	10
2.3.2 Suelo.....	11
2.3.3 Sistemas silvopastoriles .....	12
2.3.4 Muestreo.....	13
2.3.5 Variables.....	13
2.3.6 Análisis estadísticos .....	14
2.4 Resultados .....	15
2.4.1 pH del suelo.....	19
2.4.2 Aluminio .....	19
2.4.3 Materia orgánica del suelo (MOS).....	19
2.4.4 Calcio.....	21
2.4.5 Magnesio .....	22
2.4.6 Potasio.....	22
2.4.7 Sodio.....	24
2.4.8 Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE).....	25
2.4.9 Fósforo.....	26
2.4.10 Boro .....	27
2.4.11 Azufre .....	28
2.4.12 Hierro .....	29

2.4.13 Manganeseo.....	29
2.4.14 Cobre.....	31
2.4.15 Zinc.....	32
2.4.16 Nitrógeno total.....	33
2.4.17 Amonio.....	35
2.4.18 Nitrato.....	35
2.4.19 Conductividad eléctrica.....	36
2.5 Discusión.....	38
<b>Bibliografía.....</b>	<b>42</b>
<b>3. Indicadores biológicos de la salud del suelo en sistemas silvopastoriles en comparación con otros sistemas agrarios en un bosque seco tropical de Colombia</b>	<b>49</b>
3.1 Resumen.....	49
3.2 Introducción.....	50
3.3 Materiales y métodos.....	52
3.3.1 Localización.....	52
3.3.2 Sistemas silvopastoriles.....	52
3.3.3 Muestreo.....	53
3.3.4 Análisis de laboratorio.....	54
3.4 Actividad microbiana.....	54
3.4.1 Fosfatasa alcalina.....	54
3.4.2 Catalasa.....	55
3.4.3 Carbono activo oxidable.....	56
3.4.4 Producción de CO <sub>2</sub> .....	56
3.4.5 Aislamiento y conteo de grupos funcionales.....	57
3.4.6 Biodiversidad taxonómica.....	58
3.4.7 Análisis estadísticos.....	59
3.5 Resultados.....	61
3.5.1 Respiración (CO <sub>2</sub> ).....	65
3.5.2 Fosfatasa alcalina.....	65
3.5.3 C- activo oxidable.....	67
3.5.4 Grupos Funcionales.....	68
3.5.5 Índice del potencial bioquímico de la fertilidad del suelo (Mw).....	71
3.5.6 Análisis microbiológico por secuenciamiento profundo.....	72
3.5.7 Índices de biodiversidad.....	73
3.6 Discusión.....	76
3.6.1 Componentes principales y clúster jerárquico.....	78
<b>Bibliografía.....</b>	<b>83</b>
<b>4. Indicadores físicos de la salud del suelo en sistemas silvopastoriles en comparación con otros sistemas agrarios en un bosque seco tropical de Colombia</b>	<b>91</b>
4.1 Resumen.....	91
4.2 Introducción.....	92
4.3 Materiales y métodos.....	94
4.3.1 Localización.....	94
4.3.2 Sistemas silvopastoriles.....	94
4.3.3 Muestreo.....	96
4.3.4 Variables.....	96

4.3.5	Análisis estadístico .....	97
4.4	Resultados .....	98
4.4.1	Densidad aparente ( $\text{Mg m}^{-3}$ ).....	101
4.4.2	Densidad real ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) .....	101
4.4.3	Porosidad total (%) .....	102
4.4.4	Microporosidad (%).....	102
4.4.5	Macroporosidad (%) .....	103
4.4.6	Estabilidad de los agregados al agua (%).....	104
4.4.7	Diámetro equivalente del tamaño de agregados, $D_{50}$ (%) .....	104
4.4.8	Diámetro ponderado medio de agregados (DPM, mm).....	105
4.5	Discusión.....	106
<b>Bibliografía .....</b>		<b>109</b>
<b>5. Efectos de la densidad aparente y el tamaño medio de los agregados de suelos de bosque seco tropical sobre el crecimiento radicular de pastos guinea .....</b>		<b>113</b>
5.1	Resumen .....	113
5.2	Introducción.....	114
5.3	Materiales y métodos .....	116
5.3.1	Localización .....	116
5.3.2	Muestreo.....	116
5.3.3	Plantas.....	117
5.3.4	Tratamientos con densidad aparente .....	117
5.3.5	Tratamientos con el tamaño de agregados .....	117
5.3.6	Variables.....	117
5.3.7	Análisis estadísticos .....	118
5.3.8	Desarrollo de los modelos funcionales.....	118
5.4	Resultados .....	119
5.4.1	Densidad aparente .....	119
5.4.2	Tamaño de agregados.....	120
5.4.3	Modelos funcionales de la biomasa seca radicular y los indicadores físicos del suelo	122
5.5	Discusión.....	124
5.6	Conclusiones.....	127
<b>Bibliografía .....</b>		<b>128</b>
<b>6. Conclusiones y recomendaciones .....</b>		<b>135</b>
6.1	Conclusiones.....	135
6.2	Recomendaciones.....	136

## Lista de figuras

*Pág.*

**Figura 1-1:** pH en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). 19

**Figura 1-2:** Concentración de aluminio ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). 20

**Figura 1-3:** Contenido de MOS (%) en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). 20

**Figura 1-4:** Contenido de MOS (%) en función de la interacción tiempo (lluvioso y seco) x drenaje (D1: bien, D2: moderado y D3: pobre). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco) que no fueron significativos. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). 21

**Figura 1-5:** Valor de calcio ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). 21

**Figura 1-6:** Concentración de magnesio ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción arreglos x drenaje x tiempo (A x Tx D). Los arreglos son: cultivo de maíz (M), pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados en tres niveles de drenaje: bueno (D1), moderado (D2) y pobre (D3) y y dos tiempos (lluvioso y seco). Cada valor representa

- el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco) que no fueron significativos. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). ..... 23
- Figura 1-7:** Nivel de potasio ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de los arreglos: cultivo de maíz (M), pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). ..... 23
- Figura 1-8:** Nivel de potasio ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de los arreglos: cultivo de maíz (M), pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). ..... 24
- Figura 1-9:** Concentración de sodio ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). ..... 24
- Figura 1-10:** Concentración de sodio ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción tiempo (lluvioso y seco) x drenaje (D1: bien, D2: moderado y D3: pobre). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco) que no fueron significativos. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). ..... 25
- Figura 1-11:** Valor de la CICE ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción arreglos x drenaje x tiempo (A x T x D). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque de restauración secundario (Bs) combinados en tres niveles de drenaje: bueno (D1), moderado (D2) y pobre (D3) y y dos tiempos (lluvioso y seco). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco) que no fueron significativos. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). ..... 26
- Figura 1-12:** Niveles de fósforo ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción tiempo (lluvioso y seco) x drenaje (D1: bien, D2: moderado y D3: pobre). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). ..... 27
- Figura 1-13:** Concentración de boro ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción tiempo (lluvioso y seco) x drenaje (D1: bien, D2: moderado y D3: pobre). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). ..... 27

- Figura 1-14:** Concentración de azufre ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción arreglos x drenaje (AxD). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados en tres niveles de drenaje: bueno (D1), moderado (D2) y pobre (D3). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco) que no fueron significativos. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).....28
- Figura 1-15:** Concentración de hierro ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción arreglos x drenaje (AxD). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados en tres niveles de drenaje: bueno (D1), moderado (D2) y pobre (D3). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco) que no fueron significativos. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).....29
- Figura 1-16:** Concentración de manganeso ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).....30
- Figura 1-17:** Concentración de manganeso ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción tiempo (lluvioso y seco) x drenaje (D1: bien, D2: moderado y D3: pobre). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco) que no fueron significativos. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). .....30
- Figura 1-18:** Concentración de cobre ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). .....31
- Figura 1-19:** Concentración de cobre ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función del drenaje (D1: bien, D2: moderado y D3: pobre). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).....32
- Figura 1-20:** Concentración de zinc ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). .....33

- Figura 1-21:** Concentración de zinc ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción tiempo (lluvioso y seco) x drenaje (D1: bien, D2: moderado y D3: pobre). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco) que no fueron significativos. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). ..... 33
- Figura 1-22:** Concentración Valor del nitrógeno total (%) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). ..... 34
- Figura 1-23:** Concentración de zinc ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción tiempo (lluvioso y seco) x drenaje (D1: bien, D2: moderado y D3: pobre). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco) que no fueron significativos. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). ..... 34
- Figura 1-24:** Contenido de amonio ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción arreglos x tiempo (AxT). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados en dos tiempos (lluvioso y seco). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco) que no fueron significativos. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). ..... 35
- Figura 1-25:** Contenido de nitrato ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción arreglos x tiempo (AxT). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados en dos tiempos (lluvioso y seco). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco) que no fueron significativos. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). ..... 36
- Figura 1-26:** Conductividad eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ) ..... 37
- Figura 1-27:** Conductividad eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción arreglos x tiempo (AxT). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados en dos tiempos (lluvioso y seco). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco) que no fueron significativos. Las barras indican el error estándar.

Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).....37

**Figura 2-1:** Contenido de C-CO<sub>2</sub> (mg g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>) en función de la interacción arreglos x tiempo (AxT). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados con dos tiempos (lluvioso y seco). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).....65

**Figura 2-2:** Actividad fosfatasa ( $\mu\text{mol g}^{-1}\text{h}^{-1}$ ) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). .....66

**Figura 2-3:** Actividad catalasa ( $\text{mmol g}^{-1}\text{h}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción arreglos x tiempo (AxT). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados en dos tiempos (lluvioso y seco). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). .....67

**Figura 2-4:** Actividad catalasa ( $\text{mmol g}^{-1}\text{h}^{-1}$ ) en el suelo en función del drenaje (D1: bien, D2: moderado y D3: pobre). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).....67

**Figura 2-5:** C- activo oxidable (mg kg<sup>-1</sup>) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). .....68

**Figura 2-6:** Logaritmo del número de Bacterias fijadoras de nitrógeno (log UFC g<sup>-1</sup>) en el suelo en función de la interacción arreglos x tiempo (AxT). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados en dos tiempos (lluvioso y seco). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).....69

**Figura 2-7:** Logaritmo del número de Proteolíticos (log UFC g<sup>-1</sup>) en el suelo en función de la interacción arreglos x tiempo (AxT). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados en dos tiempos

(lluvioso y seco). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). ..... 69

**Figura 2-8:** Logaritmo del número de Bacterias solubilizadoras de fósforo ( $\log \text{ UFC g}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción arreglos x tiempo (AxT). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados en dos tiempos (lluvioso y seco). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). ..... 70

**Figura 2-9:** Logaritmo del número de Hongos solubilizadores de P (HSP) ( $\log \text{ UFC g}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción arreglos x drenaje x tiempo (AxTxD). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados en tres niveles de drenaje: bueno (B1), moderado (B2) y pobre (B3) y y dos tiempos (lluvioso y seco). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y dos tiempos (lluvioso y seco) que no fueron significativos. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). ..... 71

**Figura 2-10:** Abundancias relativas a nivel de Phylum del suelo en función de los arreglos (0-10 cm): Pastura, Pastura+arbustos (P+a), Pastura + arbustos (P+a+A), (Maíz) y Bosque secundario (Bs), en la CI Turipaná del Valle del río Sinú (Córdoba). ..... 75

**Figura 2-11:** Abundancias relativas de *Phylum*, *Orden*, *Clase*, *Familia* y *Género*, del suelo en función de los arreglos (0-10 cm): Pastura, Pastura+arbustos (P+a), Pastura + arbustos (P+a+A), (Maíz) y Bosque secundario (Bs), en la CI Turipaná del Valle del río Sinú (Córdoba). 76

**Figura 2-12:** Abundancias relativas de *Phylum*, *Orden*, *Clase*, *Familia* y *Género*, del suelo en función de los arreglos (0-10 cm): Pastura, Pastura+arbustos (P+a), Pastura + arbustos (P+a+A), (Maíz) y Bosque secundario (Bs), en la CI Turipaná del Valle del río Sinú (Córdoba). 79

**Figura 2-13:** Cluster jerárquico de las variables biológicas de los arreglos (M, Bs, P, SSP P+a, P+a+A). ..... 81

**Figura 3-1:** Densidad aparente ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) en el suelo en función del factor arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de seis datos por parcela y tres repeticiones por arreglo. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). ..... 101

**Figura 3-2:** Densidad real ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) en el suelo en función del factor arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de seis datos por parcela y tres repeticiones por arreglo.

Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ )..... 102

**Figura 3-3:** Porosidad total (%) en el suelo en función del factor arreglos. Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de seis datos por parcela y tres repeticiones por arreglo. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). 102

**Figura 3-4:** Microporosidad (%) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ )..... 103

**Figura 3-5:** Macroporosidad (%) en el suelo en función de los arreglos: Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ )..... 103

**Figura 3-6:** Estabilidad de los agregados al agua (%) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ )..... 104

**Figura 3-7:** Valor del diámetro equivalente ( $D_{50}$ ) asociado en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. .... 105

**Figura 3-8:** Diámetro ponderado medio (DPM, mm) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ )..... 105

**Figura 4-1:** Altura (A) y biomasa seca aérea (B) y radicular (C) de pasto guinea (*Megathyrsus maximum* cv. Mombasa) en función de la densidad aparente de un Inceptisol de bosque seco tropical de Colombia. .... 122

**Figura 4-2:** Altura (A) y biomasa seca aérea (B) y radicular (C) de pasto guinea (*Megathyrsus maximum* cv. Mombasa) en función del tamaño medio de agregados de un Inceptisol de bosque seco tropical de Colombia. .... 123

**Figura 4-3:** Modelo funcional de biomasa radicular seca del pasto Mombasa en función de la densidad aparente de un Inceptisol de bosque seco tropical de Colombia.  
123

**Figura 4-4:** . Modelo funcional de biomasa radicular seca del pasto Mombasa en función del tamaño de agregados de un Inceptisol de bosque seco tropical de Colombia.  
124

## Lista de tablas

*Pág.*

<b>Tabla 1-1:</b> Número de muestras colectadas en cada uno de las combinaciones de arreglos y drenajes para un tiempo de muestreo.....	14
<b>Tabla 1-2:</b> Niveles de significancia en el análisis de varianza de los factores y sus interacciones sobre indicadores químicos de la salud del suelo en el Valle medio del río Sinú, Colombia. ‡, *, **, ***, indican que $P$ es $\leq 0.1$ , 0.05, 0.01 y 0.001, respectivamente.	17
<b>Tabla 2-1:</b> Número de muestras colectadas en cada una de las combinaciones de arreglos y drenajes para un tiempo de muestreo.....	60
<b>Tabla 2-2:</b> Niveles de significancia en el análisis de varianza de los factores y sus interacciones sobre indicadores biológicos de la salud del suelo en el Valle medio del río Sinú, Colombia. ‡, *, **, ***, indican que $P$ es $\leq 0.1$ , 0.05, 0.01 y 0.001, respectivamente.	63
<b>Tabla 2-3:</b> Índice del potencial bioquímico de la fertilidad del suelo calculado con la actividad catalasa y fosfatasa alcalina en función de los arreglos (0-10 cm): Pastura, Pastura+arbustos (P+a), Pastura + arbustos (P+a+A), (Maíz) y Bosque secundario (Bs), en la CI Turipaná del Valle del río Sinú (Córdoba) (Kompala-Bağba et al., 2021).....	72
<b>Tabla 2-4:</b> Análisis exploratorio de la biodiversidad del suelo en función de los arreglos (0-10 cm): Pastura, Pastura+arbustos (P+a), Pastura + arbustos (P+a+A), (Maíz) y Bosque secundario (Bs), en la CI Turipaná del Valle del río Sinú (Córdoba).....	74
<b>Tabla 2-5:</b> Valores promedio de propiedades del suelo en función de los arreglos (0-10 cm): Pastura, Pastura+arbustos (P+a), Pastura + arbustos (P+a+A), Cultivo (Maíz) y Bosque secundario (Bs), Turipaná (Córdoba). Cada valor representa el promedio de 4 repeticiones. Promedios con letra minúsculas diferentes, en cada arreglo, son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Comparaciones horizontales.	77
<b>Tabla 3-1:</b> Niveles de significancia en el análisis de varianza de los factores y sus interacciones sobre indicadores físicos de la salud del suelo en el Valle medio del río Sinú, Colombia. ‡, *, **, ***, indican que $P$ es $\leq 0.1$ , 0.05, 0.01 y 0.001, respectivamente. ....	99
<b>Tabla 4-1:</b> Parámetros biométricos de <i>Megathyrus maximum</i> cv. Mombasa en función de la variación de la densidad aparente. Cada valor es el promedio de cuatro repeticiones. Promedios con letras minúsculas son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).....	120

---

**Tabla 4-2:** Parámetros biométricos de *Megathyrus maximum* cv. Mombasa en función de la variación del tamaño medio de agregado. Cada valor es el promedio de cuatro repeticiones. Promedios con letras minúsculas son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0,05$ )..... 121

## Lista de abreviaturas

### Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
<i>A</i>	Arena
<i>Al</i>	Aluminio
<i>Ar</i>	Arcilla
<i>B</i>	Boro
<i>Ca</i>	Calcio
<i>C.E.</i>	Conductividad eléctrica
<i>CICE</i>	Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva
<i>C:N</i>	Relación Carbono/Nitrógeno
<i>CO<sub>2</sub></i>	Dióxido de Carbono (Respiración del suelo)
<i>Cu</i>	Cobre
<i>Fe</i>	Hierro
<i>K</i>	Potasio
<i>L</i>	Limo
<i>Mg</i>	Magnesio
<i>Mn</i>	Manganeso
<i>Na</i>	Sodio
<i>N-NO<sub>3</sub></i>	Nitratos
<i>N-NH<sub>4</sub></i>	Amonio
<i>Nt</i>	Nitrógeno total
<i>P</i>	Fósforo
<i>S</i>	Azufre
<i>Zn</i>	Zinc
<i>COXP</i>	Carbon activo oxidable

# Introducción

El suelo es un recurso natural finito y no renovable, desempeña un papel destacado en la prestación de servicios ecosistémicos (Vereecken et al., 2016; Labrière et al., 2015; Martínez, Cajas, León, y Osorio, 2014; Tarrasón, et al., 2016). A nivel global las intervenciones humanas han provocado la degradación de las tierras comprometiendo la seguridad alimentaria a través de la deforestación y explotación de bosques (574 Mha), sobrepastoreo (679 Mha), manejo impropio de suelos agrícolas (552 Mha), sobreexplotación de la vegetación para usos domésticos (133 Mha) y actividades industriales (23 Mha) (Mekuria et al., 2018). En América latina la deforestación alcanza (100 Mha), el sobrepastoreo (68 Mha), el manejo de cultivos (64 Mha), la explotación de la vegetación, y actividades bioindustriales (12 Mha) (Raju, et al., 2013).

En Colombia 45 Mha presentan algún grado de degradación del suelo por erosión, 18.5 Mha de estas se encuentran en clima seco, 1.79 Mha de uso agrícola, 2.99 Mha de bosques fragmentados con pastos y cultivos (IDEAM, U.D.C.A, 2015). El mal manejo de los suelos agrícolas y las pasturas para ganadería altera el ciclo de nutrientes, limitando su capacidad natural de reciclaje, la producción bovina de tipo extractivo en la cual no se retornan los nutrientes al suelo agrava esta situación (Liu, et al., 2019, Barragán-Hernández y Cajas-Girón, 2019; Portilla Pinzón et al., 2015), y las grandes extensiones bajo monocultivo limitan la producción de biomasa, disminuyendo la biodiversidad. Además, la labranza del suelo y la aplicación de agroquímicos que contribuyen al deterioro de las propiedades del suelo (López-vigoa et al., 2017; Vides-Borrell et al., 2019). Lo anterior, conduce a una baja eficiencia y rentabilidad (Vides-Borrell et al., 2019; Paredes et al., 2018).

La agrosilvicultura es una alternativa sostenible del suelo basada en sistemas agroforestales, como son los sistemas silvopastoriles (SSP) (Murgueitio 2003). Estos son un sistema de cultivo integrado en el que se combinan pastos tropicales, arbustos y árboles, no requieren labranza ni insumos químicos ya que los árboles y arbustos

proporcionan grandes entradas de material orgánico y nutrientes al suelo (vía caída de hojarasca) , por lo que mejora las propiedades físico-químicas del suelo (León y Osorio, 2014). Desafortunadamente, poco se sabe acerca del efecto que puedan tener los SSP en la salud del suelo (Silva-Olaya et al., 2022).

El concepto de salud del suelo ha surgido para integrar las funciones del suelo permitiendo la toma de decisiones dirigidas al manejo sostenible de los suelos, y al mantenimiento de sus servicios ecosistémicos (Blum, 2005; Ussiri y Lal, 2005; Burneo, 2013; Osman, 2013). La salud del suelo es reflejada y monitoreada cuantitativamente a través de la medición de los indicadores de salud del suelo para determinar el estado de degradación de los suelos afectados y el grado de avance de los procesos de biorremediación, particularmente en zonas tropicales donde poco se ha estudiado este tema (Linares, 2006).

La metodología utilizada para la medición de la salud del suelo fue la establecida en el manual de procedimientos de Cornell (2016), para los métodos enzimáticos en Peláez et al. (2004), métodos microbiológicos y bioquímicos del suelo en Bottomley et al. (1994) y García et al (2003), para los métodos químicos del suelo en USDA, (2004).

Este trabajo busca cuantificar de manera integral la salud de suelo bajo cinco diferentes arreglos: (i) cultivo intensivo de maíz (*Zea mays*) (M), (ii) pastura mixta (*Megathyrus maximum* + *Dichanthium aristatum*) (P), (iii) SSP compuesto por (*M. maximum* + *D. aristatum*) + arbustos (*Crescentia cujete* + *Leucaena leucocephala*) (P+a), (iv) SSP multiestrato compuesto por pastura (*M. maximum* + *D. aristatum*) + arbustos (*C. cujete* + *L. leucocephala*) + arboles (*Guazuma ulmifolia*, *Cassia grandis*, *Albizia saman*) (P+a+A) y (v) como referencia se incluyó un arreglo forestal correspondiente a bosque de restauración secundario (Bs). Las evaluaciones se hicieron en dos tiempos contrastantes en suelos del Valle medio del río Sinú que presentan un grado de drenaje.

## 1.1 Hipótesis

La salud del suelo puede ser mejorada mediante el establecimiento de SSP y de bosques de restauración, cuyo efecto es diferente al que se genera en los sistemas agrarios de

monocultivo. Tal efecto puede ser condicionado por la lluvia (período seco o período lluvioso) y por el gradiente de drenaje. Lo anterior, se refleja a través de la medición de indicadores químicos, físicos y biológicos de la salud del suelo.

## **1.2 Objetivo general**

Evaluar los cambios en la salud del suelo medida a través de indicadores químicos, físicos y biológicos, al establecer el efecto cuando el suelo es sometido a diferentes usos y sistemas de manejo, entre parcelas experimentales con SSP y un bosque de restauración secundaria en comparación a lo que ocurre en un monocultivo de maíz y una pastura, en una zona de vida de bosque seco tropical.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

- Evaluar el cambio de la salud del suelo debido al efecto de los usos del suelo y sistemas de manejo a través de la medición y correlación de indicadores químicos de la salud del suelo en parcelas experimentales con SSP, pastura, un bosque de restauración secundaria (Bs) y un monocultivo de maíz.
- Estimar el cambio de la salud del suelo debido al efecto del uso del suelo sometido a diferentes usos y sistemas de manejo a través de la medición y relación de indicadores biológicos de la salud del suelo en parcelas experimentales con SSP, pastura, un bosque de restauración secundaria (Bs) y un monocultivo de maíz.
- Valorar el cambio de la salud del suelo debido al efecto del uso del suelo sometido a diferentes usos y sistemas de manejo a través de la medición y ordenación de indicadores físicos de la salud del suelo tales como: en parcelas experimentales con SSP, pastura, un bosque de restauración secundaria (Bs) y un monocultivo de maíz.
- Evaluar el efecto en el suelo en indicadores físicos de la salud del suelo, como son la densidad aparente y del tamaño medio de agregados sobre el crecimiento aéreo y radicular del pasto guinea en un suelo de bosque seco tropical Bs-T de Colombia.

## Bibliografía

- Andrade, B. O., Koch, C., Boldrini, I. I., y Vélez-martin, E. (2015). Natureza y Conservação Essays and Perspectives Grassland degradation and restoration: a conceptual framework of stages and thresholds illustrated by southern Brazilian grasslands. 13(2), 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.ncon.2015.08.002>
- Barragán-Hernández, W. A., y Cajas-Girón, Y. S. (2019). Cambios bromatológicos y estructurales en *Megathyrus maximum* bajo cuatro arreglos silvopastoriles. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 20(2), 231–244. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol20\\_num2\\_art:1458](https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num2_art:1458)
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2013). Capítulo 4 Propiedades de los Suelos (p. 45). [www.igac.gov.co](http://www.igac.gov.co)
- Labrière, N., Locatelli, B., Laumonier, Y., Freycon, V., y Bernoux, M. (2015). Soil erosion in the humid tropics: A systematic quantitative review. Agriculture, Ecosystems and Environment, 203, 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.027>
- León, J. D., y Osorio, N. W. (2014). Review Article Role of Litter Turnover in Soil Quality in Tropical Degraded Lands of Colombia. 2014.
- Linares Arias Juan C. (2006). Evaluación de algunas propiedades del suelo como indicadores de sostenibilidad para pastoreo rotacional en silvopastoreo en un Endoaquept del valle medio del río Sinú Colombia. Tesis de maestría. Montería. Universidad Nacional de Colombia-Sede Palmira y Universidad de Córdoba.
- Liu, Y., Zhang, Z., Tong, L., Khalifa, M., y Wang, Q. (2019). Assessing the effects of climate variation and human activities on grassland degradation and restoration across the globe. Ecological Indicators, 106(June), 105504. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105504>
- López-vigoa, O., Sánchez-santana, T., Iglesias-gómez, J. M., Lamela-lópez, L., Socapérez, M., Arece-garcía, J., y De, 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), 83–95.
- Martínez, J., Cajas, Y. S., León, J. D., y Osorio, N. W. (2014). Silvopastoral systems enhance soil quality in grasslands of Colombia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/359736>
- Mekuria, W., Wondie, M., Amare, T., Wubet, A., Feyisa, T., y Yitaferu, B. (2018). Restoration of degraded landscapes for ecosystem services in North-Western Ethiopia. February. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00764>
- Moebius-Clune, B.N., D.J. Moebius-Clune, B.K. Gugino, O.J. Idowu, R.R. Schindelbeck, A.J. Ristow, H.M. van Es, J.E. Thies, H. A. Shayler, M. B. McBride, D.W. Wolfe, and G. S. A. (2016). *Comprehensive Assessment of Soil Health. The Cornell Framework Manual*. <https://doi.org/10.1080/00461520.2015.1125787>
- Murgueitio, E. (2003). Murgueitio E 2003: Impacto ambiental de la ganadería de leche en Colombia y alternativas de solución. *Livestock Research for Rural Development*, 15(10).
- Obade de paul, V., y Lal, R. (2016). A standardized soil quality index for diverse field conditions. *Science of The Total Environment*, 541, 424–434. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.096>
- Osman, K. T. (2013). Soils: Principles, properties and management. *Soils: Principles, Properties and Management*, 9789400756, 1–271. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2>
- Paredes, S. S., Stritzler, N. P., Bono, A., y Distel, R. A. (2018). Perennial warm-season grass monocultures and mixtures: Biomass production and soil improvement in semiarid and shallow soil conditions. *Journal of Arid Environments*, 154(March), 82–88. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.02.008>
- Peláez, C., Mejía, A., y Planas, A. (2004). Development of a solid phase kinetic assay for determination of enzyme activities during composting. *Process Biochemistry*, 39(8), 971–975. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00208-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00208-5)
- Portilla Pinzón, Danilo; Barragán Hernández, Wilson Andrés; Carvajal Bazurto, Christian Thomas; Cajas Girón, Yasmín Socorro y Rivero Espitia, S. T. (2015). *Establecimiento de sistemas silvopastoriles para la región Caribe* (L. G. Garcia (ed.); Primera ed, Issue October). Carvajal Soluciones de Comunicación S.A.S. <https://doi.org/10.21930/978-958-740-196-7>

- Raju, S. S. V, Nagre, P. K., Bharathi, N., y Naik, P. (2013). Productivity and soil fertility status as influenced by integrated use of bio-fertilizers, organic manures and inorganic fertilizers in onion. *Ecology, Environment and Conservation*, 19(1), 221–224. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84877997050&partnerID=40&ymd5=c7d6456f8b84c3255563fb7aca02b147>
- Silva-Olaya, A.M.; Olaya-Montes, A.; Polanía-Hincapié, K.L.; Cherubin, M.R.; Duran-Bautista, E.H.; Ortiz-Morea, F.A. Silvopastoral Systems Enhance Soil Health in the Amazon Region. *Sustainability* 2022, 14,320. <https://doi.org/10.3390/su14010320>
- Tarrasón, D., Ravera, F., Reed, M. S., Dougill, A. J., y Gonzalez, L. (2016). Land degradation assessment through an ecosystem services lens: Integrating knowledge and methods in pastoral semi-arid systems. *Journal of Arid Environments*, 124, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.08.002>
- Ussiri, D. A. N., y Lal, R. (2005). Carbon sequestration in reclaimed minesoils. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24(3), 151–165. <https://doi.org/10.1080/07352680591002147>
- Bottomley, P. S., Angle, J. S., Weaver, R. W. (1994). *Methods of Soil Analysis: Part 2—Microbiological and Biochemical Properties*. Soil Science Society of America book series; no. 5. American Society of Agronomy (pp. 1152). ISBN: 978-0-891-18865-0. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:methods+of+soil+analysis+part2#1%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Methods+of+soil+analysis,+Part+2%231>
- Vides-Borrell, E., Porter-Bolland, L., Ferguson, B. G., Gasselin, P., Vaca, R., Valle-Mora, J., y Vandame, R. (2019). Polycultures, pastures and monocultures: Effects of land use intensity on wild bee diversity in tropical landscapes of southeastern Mexico. *Biological Conservation*, 236(December 2018), 269–280. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.04.025>

## 2. Indicadores químicos de la salud del suelo en sistemas silvopastoriles, bosque de restauración y cultivo de maíz en el bosque seco tropical de Colombia

### 2.1 Resumen

Uno de los aspectos críticos en la agricultura tropical es la degradación de los suelos asociada a los sistemas de monocultivo tanto de cultivos agrícolas como de pasturas. Alternativamente se han desarrollado sistemas silvopastoriles múltiples (SSP) que están orientados a sostener la calidad del suelo mientras se produce. Sin embargo, existen pocos estudios que soporten los beneficios que estos sistemas pueden tener sobre los indicadores químicos de la salud del suelo. Por lo anterior, se estableció un estudio con el fin de evaluar los cambios en la salud del suelo medidos a través de indicadores químicos de la salud del suelo. Para tal fin, se usaron los siguientes arreglos que tienen al menos 19 años de establecidos: (i) cultivo intensivo de maíz, (ii) una pastura mixta *Megathyrus maximum* y *Dichanthium aristatum* (P), (iii) SSP con *M. máximus* + *D. aristatum* y arbustos forrajeros *Crescentia cujete* (totumo) y *Leucaena leucocephala* (acacia forrajera) (P+a), (iv) SSP multiestrato con *M. máximus* + *D. aristatum*, *C. cujete* + *L. leucocephala* y árboles forrajeros *Guazuma ulmifolia* (guácimo), *Cassia grandis* (caña fistula), *Albizia saman* (campano) (P+a+A) y (v) como referencia se incluyó un arreglo forestal constituido por un bosque secundario (Bs). Las evaluaciones se hicieron en dos tiempos contrastantes (seco y lluvioso) en suelos del Valle medio del río Sinú que presentaban un gradiente de drenaje. Aunque hubo efectos individuales e interacciones de los factores arreglo, tiempo y drenaje, en general, el suelo cultivado con M presentó un deterioro de las condiciones químicas (caracterizado por menor contenido de MO, N-total, Ca, K, CICE, S, B, Fe y Cu); el M fue seguido en estos indicadores por el Bs. Se encontró que los suelos de los SSP, con respecto a los suelos de la pastura, presentaron mayores valores en el contenido de

materia orgánica del suelo, Ca, Mg, P, B, CICE en época seca y N-NO<sub>3</sub> en época lluviosa. Por lo anterior, se puede concluir que los SSP mejoraron la salud del suelo, medida a través de los indicadores químicos del suelo, en comparación a lo que ocurre en la pastura y al monocultivo de maíz. En general, el suelo del bosque de restauración presentó valores bajos a medios.

**Palabras Claves:** agricultura tropical, bosque de restauración secundario, sistemas productivos, maíz, pasto guinea, arboles leguminosos.

## 2.2 Introducción

Los bosques tropicales cubren solo del 7 al 10% de la superficie de la Tierra (Lewis et al., 2009; Deklerck et al. 2019). Entre los principales tipos de bosques tropicales, los bosques secos tropicales (Bs-T), también llamados bosques tropicales estacionalmente secos, se desarrollan en regiones cálidas entre 0-1000 m.s.n.m, con clima estacional que incluye un período de sequía de 4-6 meses del ciclo anual, temperatura promedio > 24 °C y precipitación anual entre 700-2000 mm (Chaturvedi, Raghubanshi y Singh, 2012). Este es uno de los ecosistemas más amenazados, contiene muchas especies vegetales con distribución severamente restringida, y alto grado de endemismo (Murphy y Lugo 1986, Portillo-Quintero y Sánchez-Azofeifa 2010) desprotegido y poco estudiado en comparación con otros ecosistemas forestales (Espírito-Santo et al. 2009).

En la India, el Bs-T se puede encontrar como grandes extensiones continuas, ocupan el 40.86 % del área forestal (313.06 Mha) (Forest Survey of India 2019), en México el 38% del área total (18.1 Mha total) (Busse et al., 2019), representa el 50% (54.2 Mha) en Suramérica, en Brasil 3.21% del territorio (27.4 Mha) (Espírito-Santo, 2009). El 42% (42 Mha) de las áreas boscosas en de Norte y Centroamérica y un 3.8 % (3.8 Mha) en Australasia y Asia suroriental (Pizano y García 2014). La expansión agrícola sigue siendo la principal causa de deforestación y fragmentación del bosque tropical (FAO-PNUMA 2020). La implementación de pastizales artificiales, introducidos principalmente como pastos para ganado, ha causado la deforestación (Sánchez, 1998; Murgueitio 2003), han dominado los bancos de semillas y superado a las especies de plantas nativas, alterando drásticamente la estructura y diversidad del Bs-T (Tweiten et al. 2014) especialmente en los países en desarrollo, que han perdido casi el 80% de su cobertura original, afectando

la conservación del Bs-T (Ballesteros-Correa, Morelo-García, y Pérez-Torres 2019; Sánchez-Romero et al. 2021).

La sostenibilidad del suelo es clave para mantener el crecimiento forestal y los servicios ecosistémicos (Brevik et al. 2018). Por eso, uno de los retos que enfrenta la ganadería es desarrollar un sistema de cultivo sostenible con un mínimo de degradación del suelo (Sadeghian, S., Rivera, J. M., y Gómez, M., 2000). La salud del suelo, entendida como la capacidad continua del suelo para funcionar como un ecosistema vital vivo que sostiene plantas, animales y seres humanos (USDA-NCRS, 2008), difiere del concepto de la calidad del suelo. Así la salud del suelo no solo determina el funcionamiento del suelo por sus cualidades inherentes propias del proceso pedogenético de formación del suelo, sino que concibe el suelo como un ecosistema vivo que necesita ser manejado cuidadosamente para mantener su óptima habilidad de funcionamiento (Moebius-Clune et al. 2016). Importantes funciones del suelo como el almacenaje, ciclaje y disponibilidad de nutrientes para las plantas requiere de la medición directa de indicadores químicos que reflejen la salud del suelo. Esto permite las decisiones enfocadas en la conservación, sostenibilidad y productividad del suelo. Tales indicadores son: la concentración de fósforo, nitratos, potasio, magnesio, calcio, hierro, aluminio, manganeso, zinc, cobre, sodicidad y pH, entre otros, de acuerdo con el protocolo de (Cornell, (2016), USDA (2004) y A.O.A.C. 1990. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 15<sup>th</sup> Ed. Kenneth Helrich Editor. Arlington, Virginia. USA. 771 p.

Los SSP ofrecen una alternativa sostenible para aumentar la biodiversidad animal y vegetal, y aumentar los niveles de producción animal con bajos insumos externos (Gamarra et al. 2018; Sánchez 1998), las combinaciones de especies vegetales-animales y, patrones de uso y manejo agroecológico aportan condiciones que permiten el bienestar animal, así como la protección del suelo contra la erosión y la compactación (Buitrago-Guillen, Ospina-Daza y Narváez-Solarte, 2018). Además, estos SSP pueden mejorar la fertilidad del suelo a través del ciclaje y transporte de nutrientes, desde el subsuelo hasta la copa; y la acumulación de materia orgánica superficial (Gamarra et al., 2018). Según Ballesteros-Correa et al. (2019), el establecimiento de ganadería extensiva en sistemas silvopastoriles (SSP) dotados de fragmentos relictuales de Bs-T, podría ampliar la cobertura vegetal e incrementar la conectividad funcional, posibilitando la supervivencia de las especies sensibles a la deforestación y pérdida de hábitat (López-Vigoa, 2017). Sin

embargo, los arreglos silvopastoriles multiestrato han sido poco estudiados en sus propiedades químicas y se desconoce el real impacto de estos sistemas en la salud del suelo (Martínez et al. 2014).

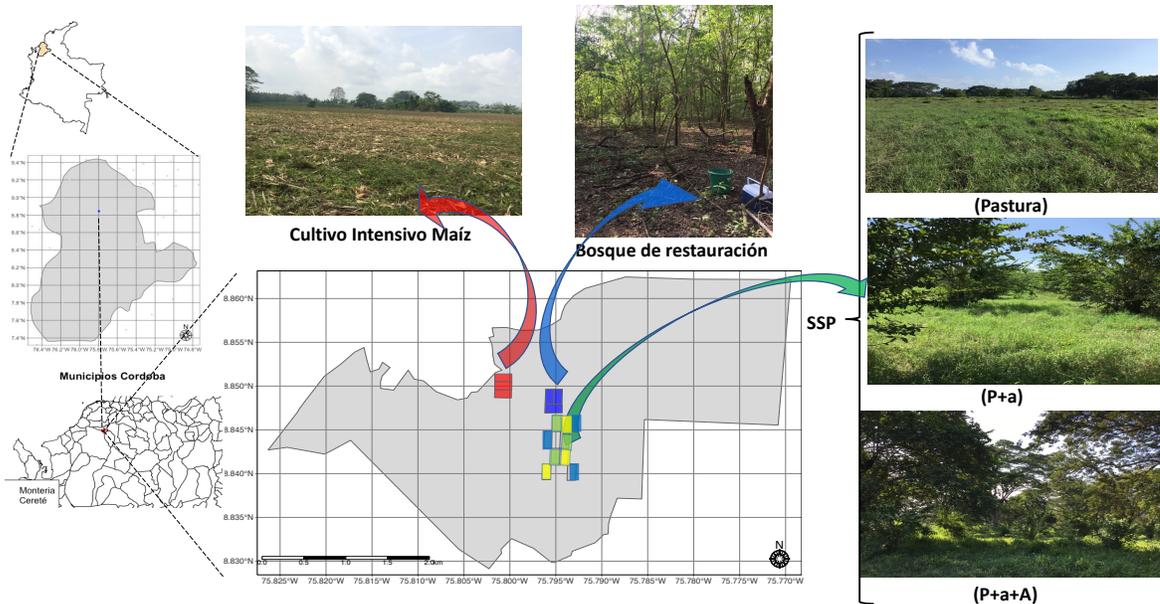
La hipótesis de este estudio fue que la salud del suelo medida por indicadores químicos, puede ser mejorada mediante el establecimiento de SSP y de un bosque de restauración, en comparación a lo que ocurre en la pastura, un monocultivo de maíz. Tal efecto puede ser condicionado por el tiempo (seco o lluvioso) y por el gradiente de drenaje.

El objetivo del presente estudio es establecer una serie de estudios para evaluar las diferencias en la salud del suelo (medida a través de indicadores químicos, físicos y biológicos) entre parcelas experimentales con SSP y un bosque de restauración. Para tal fin se usaron los siguientes arreglos: (i) cultivo intensivo de maíz (*Zea mays*) (M), (ii) pastura de *P. maximum* (P), (iii) SSP compuesto por pastura (*P. maximum*) y arbustos de totumo (*Crescentia cujete*) (P+a), (iv) SSP multiestrato compuesto por pastura (*P. maximum*), arbustos (*C. cujete*) y árboles (*Guazuma ulmifolia*, *Cassia grandis*, *Albizia saman*) (P+a+A) y (v) como referencia se incluyó un arreglo forestal constituido por un bosque secundario (Bs). Las evaluaciones se hicieron en dos tiempos contrastantes (seco y lluvioso) en suelos del Valle medio del río Sinú que presentaban un gradiente de drenaje (Tabla 1-1).

## 2.3 Materiales y métodos

### 2.3.1 Localización

El estudio se realizó en el Centro de Investigación-Turipaná (Agrosavia, 08°51'N, 75°49'O, 18 m de altitud) ubicado en el municipio de Cereté (Córdoba, Colombia). Figura 1-1. Este tiene un clima cálido seco, con un período de lluvias de mayo a noviembre y un período seco de diciembre a abril. La precipitación media anual es de 1380 mm, la temperatura promedio de 28°C, humedad relativa de 81% y una evapotranspiración potencial de 1240 mm año<sup>-1</sup> (Estación climatológica Agrosavia-C.I. Turipaná). Según Holdridge (1971) la zona de vida ecológica se clasifica como un bosque seco tropical (Bs-T).



**Figura 2-1:** Localización del estudio. Arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs), en el C.I. Turipaná (Agrosavia). Cereté (Córdoba–Colombia). Rojo: Maíz, Azul oscuro: bosque de restauración Azul: Pastura, Amarillo: P+a y Verde: P+a+A. Fuente: Elaboración propia.

### 2.3.2 Suelo

El suelo de este estudio está ubicado en un paisaje de planicie fluvioacustre, con un relieve plano de terrazas bajas formadas con material parental que consiste en sedimentos medios y finos del río Sinú, son moderadamente profundos, caracterizados por presentar texturas finas (arcillosos) con condiciones verticas; las pendientes son de 0-3%, imperfectamente a pobremente drenados, susceptibles a encharcamiento prolongados, de color gris oscuro a pardo grisáceo en el primer horizonte. Lo anterior afecta la evolución de los suelos y dificultan la actividad de los microorganismos, lo que favorece la acumulación de materia orgánica, dificulta la diferenciación de horizontes. Además, se observa una fuerte reducción, lo que da lugar a suelos hidromórficos con poco desarrollo pedogenético. Entre los suelos más abundantes están: Endoaquepts, Epiaquepts y Endoaquents, que cubren una buena extensión en el departamento de Córdoba. Los suelos estudiados en este trabajo están representados en su gran mayoría por las series La Pozona (LP), Playón (PL), El Claval (XL) y Sinú (SN) y corresponden a: Aquic Haplusteps, Vertic Endoaquepts y Fluvaquentic Haplusteps (Morales, 1971; IGAC, 2009).

### 2.3.3 Sistemas silvopastoriles

Los tratamientos consistieron en cinco arreglos: (i) cultivo de maíz (*Zea mays*) (M), (ii) pastura mixta de pastos guinea (*Megathyrus maximus*) cv. Mombasa y Angleton (*Dichiantum aristatum*) (P) sin fertilización, (iii) arreglo de SSP compuesto por los pastos + totumo (*Crescentia cujete*) + leucaena (*Leucaena leucocephala*) (P+a), (iv) arreglo de SSP multiestrato compuesto por los mismos pastos y arbustos forrajeros + arboles leguminosos de guácimo (*Guazuma ulmifolia*), caña fistula (*Cassia grandis*) y campano (*Albizia saman*) (P+a+A); (v) Bosque secundario (Bs) de restauración natural, establecido con fines de conservación del suelo.

La parcela del cultivo de maíz ha tenido un manejo tradicional durante 25 años en la zona con dos pases de rastra pesada y un pase de rastra liviana o pulidor, irrigación y tuvo aplicaciones al momento de la siembra de fosfato diamónico (DAP) a razón de 100 kg ha<sup>-1</sup>, cloruro de potasio (KCl) 50 kg ha<sup>-1</sup> y Vicor 10 kg ha<sup>-1</sup>; a los 15 días de emergido se adicionó urea 100 kg ha<sup>-1</sup> y KCl 50 kg ha<sup>-1</sup>; a los 25 días de emergido se aplicó nuevamente urea 100 kg ha<sup>-1</sup>. Por otro lado, los SSP tienen tamaño de parcela de 2 ha (100 m x 200 m), con una densidad de arbustos 300 ha<sup>-1</sup> sembrados a una distancia de 4 m x 4 m y arboles inicialmente establecidos a 8 m x 8 m y luego de cuatro años se hizo una entresaca y quedaron a 16 m x 16 m, para una densidad de 11 árboles ha<sup>-1</sup>. Estas parcelas experimentales fueron establecidas en 1998 (Cajas-Giron y Sinclair, 2001; Barragán-Hernández y Cajas-Girón, 2019; Martínez-Atencia et al., 2020).

En la pastura y en los arreglos de los SSP (P+a y P+a+A), desde su establecimiento, ha habido un pastoreo rotacional de bovinos en franjas de 0.4 ha, con periodos de ocupación de 2 días y 28 días de descanso. El mantenimiento de las parcelas correspondió a controles manuales de maleza después de cada pastoreo y a mantenimiento de canales de drenaje. Los bloques se distribuyeron según el drenaje natural (bueno -D1: > 61 mm/hora, moderado-D2: 13 - 60 mm/hora y pobre-D3: < 12 mm/hora). Clasificación teniendo en cuenta la velocidad de infiltración básica del suelo (Madriñan, 1997) (Tabla 1-1). Las parcelas de bosque secundario (de 2 ha) fueron manejadas sin adición de fertilizantes ni riego, no ha habido intervención humana en 20 años.

**Tabla 2-1.** Clasificación de la velocidad de infiltración básica del suelo

CLASE	VALOR (mm/hora)
Muy lenta	< 2
Lenta	3-5
Moderadamente lenta	6-12
Moderada	13-30
Moderadamente rápida	31-60
Rápida	61-100
Muy rápida	101-200
Extremadamente rápida	> 200

Fuente: Madriñan, R. Manual de prácticas de laboratorio de física de suelos. Universidad Nacional de Colombia- Sede Palmira. 1997.

### 2.3.4 Muestreo

En todos los tratamientos, se tomaron muestras de suelo en el horizonte A (0-10 cm). En los tratamientos M, P y Bs, se tomaron 20 submuestras al azar de 50 g de suelo por sitio. En el arreglo SSP "P+a" se tomaron al azar 20 submuestras (50 g cada una) de la pastura y por separado se escogieron al azar 20 arbustos y alrededor de ellos 50 g en cada sitio (30-40 cm desde el tallo). En el SSP P+a+A se hizo lo mismo que en el SSP P+a y adicionalmente se escogieron al azar 20 árboles y se tomaron 50 g por sitio (1-2 m desde el tallo). En cada caso las submuestras se mezclaron, homogenizaron y se tomó finalmente 1 kg de suelo para el análisis de suelo. El muestreo se repitió en dos época secas y dos lluviosas.

### 2.3.5 Variables

Las muestras se enviaron al laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, para la medición de los indicadores fisicoquímicos del suelo. Allí, las muestras se secaron en un horno a 60°C por 48 h y luego se pasaron por una malla de 2 mm. Los índices medidos fueron: contenido de arena, limo, arcilla (Bouyoucos; %), textura, pH (agua, 1:1), contenido de materia orgánica (MO; Walkley y Black, %), Al, Ca, Mg y K (acetato de amonio 1 M, cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>), CICE (suma de cationes de intercambio, cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>),

P (Bray II, mg kg<sup>-1</sup>), S (fosfato de calcio 0.008 M, mg kg<sup>-1</sup>); Fe, Mn, Cu y Zn (Olsen-EDTA, mg kg<sup>-1</sup>), B (agua caliente, mg kg<sup>-1</sup>) y N total (Kjeldahl, %). Detalles de los métodos pueden ser obtenidos en (USDA, 2004).

### 2.3.6 Análisis estadísticos

El muestreo se realizó bajo un diseño experimental de bloques al azar, desbalanceado, asimétrico, y con efectos fijos. Se consideraron como factores de muestreo el arreglo seleccionado según el uso del suelo correspondiente (M, P, P+a, P+a+A y Bs) representó un tratamiento (para un total de cinco) y tres condiciones de drenaje (bueno, regular, pobre), cada uno tuvo 3 réplicas por muestreo. Los muestreos se hicieron en dos épocas secas y dos lluviosas, para un total de 96 unidades experimentales.

**Tabla 2-2:** Número de muestras colectadas en cada una de las combinaciones de arreglos y drenajes para un tiempo de muestreo.

Drenaje	Arreglo				
	M	P	P+a	P+a+A	Bs
Bueno	3	1	2	3	3
Moderado	0	1	2	3	0
Pobre	0	1	2	3	0

A los residuales de los modelos se les hizo un diagnóstico de análisis de homogeneidad de la varianza, independencia, normalidad y detección de valores influyentes (Box et al., 2005). Los datos fueron sometidos a análisis de varianza y a la prueba de comparación de medias de Tukey (Lawson, 2015). En ambos casos se empleó un nivel de significancia ( $P \leq 0.05$ ). Los análisis se realizaron en el software libre R (3.6.5), R-Studio versión (1.4.0) (Xie y Yihui. 2015). A continuación, se describe el modelo lineal utilizado (ver Ecuación 1.1)

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{i,j} + (\alpha\gamma)_{i,k} + (\beta\gamma)_{j,k} + (\alpha\beta\gamma)_{i,j,k} + E_{ijk} \quad (2.1)$$

Donde,

$Y_{ijk}$  : valor de la respuesta en la i-ésima observación del arreglo i, del nivel j-ésimo drenaje j, del k-ésimo tiempo k.

$\mu$ : media global

$\alpha_i$ : efecto del arreglo i (i = M, P, P+a, P+a+A y Bs)

$\beta_j$  : efecto del i-ésimo drenaje j (j = bueno, moderado y pobre)

$\gamma_k$  : efecto del k-ésimo tiempo k (k = 1º muestreo t: seco, 2º muestreo t: seco, 1º muestreo t: lluvioso, 2º muestreo t: lluvioso).

$(\alpha\beta)_{i,j}$  : interacción del i-ésimo arreglo con el j-ésimo drenaje

$(\alpha\gamma)_{i,k}$  : interacción del i-ésimo arreglo con el k-ésimo tiempo

$(\beta\gamma)_{j,k}$  : interacción del j-ésimo drenaje con el k-ésimo tiempo

$(\alpha\beta\gamma)_{i,j,k}$  : interacción del i-ésimo arreglo con el j-ésimo drenaje y el k-ésimo tiempo

$E_{ijk}$ : error de la i-ésimo arreglo del j-ésimo drenaje y del k-ésimo tiempo

## 2.4 Resultados

La Tabla 1-3 presenta la significancia en el análisis de varianza de los factores arreglo (A), tiempo (T), drenaje (D) y sus interacciones sobre los indicadores químicos del suelo estudiados, permite evidenciar que los arreglos tienen un efecto significativo en todas las variables (Tabla 1-3). Mientras que los factores tiempo y drenaje solo tienen efecto en algunas variables. En general, los niveles de significancia ( $P$ ) fueron  $\leq 0.05$ , excepto para la interacción TxD para K y Mn. Vale la pena resaltar que hubo significancia en la interacción triple AxTxD para Mg y CICE. Es necesario tener en cuenta que como el diseño experimental fue desbalanceado, en las interacciones AxD el modelo es incompleto.

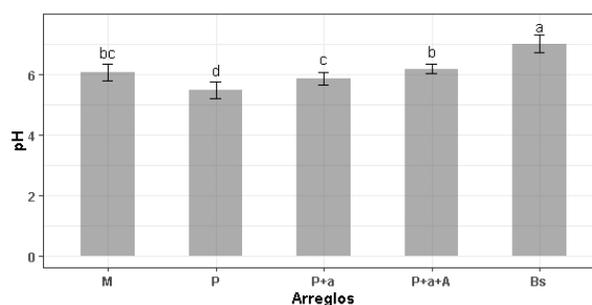






## 2.4.1 pH del suelo

Los resultados muestran que hubo diferencias altamente significativas ( $P \leq 0.001$ ) en el valor del pH en función de los arreglos (Tabla 1-3). El valor del pH tuvo el siguiente orden decreciente Bs (7.02, neutro) >P+a+A, M (6.18, 6.07, ligeramente ácido) >P+a (5.86, moderadamente ácido) >P (5.47, fuertemente ácido) (Figura 1-2). Por otro lado, el pH presentó diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ) en función del tiempo (tiempo lluvioso 6.20 y tiempo seco 6.04). Durante el tiempo seco fue ligeramente menor (6.04) que el registrado durante el período lluvioso (6.20).



**Figura 2-2:** pH en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de la interacción de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

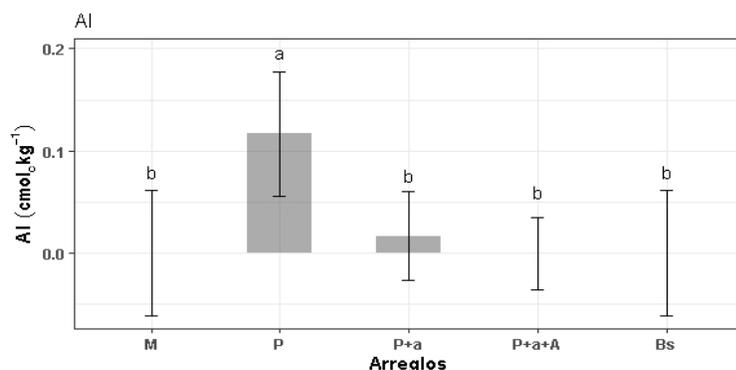
## 2.4.2 Aluminio

La concentración de aluminio extraído con KCl 1 M fue afectada significativamente por los arreglos. Este solo fue detectable en los arreglos pastura y P+a (0.12 y 0.02  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ , respectivamente), siendo significativamente mayor el primero (Figura 1-3).

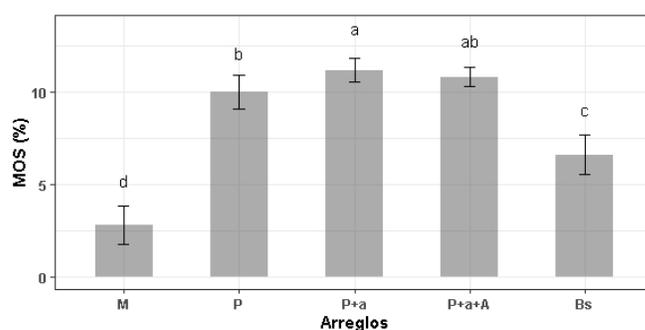
## 2.4.3 Materia orgánica del suelo (MOS)

Los resultados indican diferencias muy altamente significativas ( $P \leq 0.001$ ) en el contenido de, MOS en función de los arreglos y la interacción TxD (Tabla 1-3). El valor de la MOS tuvo el siguiente del suelo orden decreciente P+a (11.19a %) >P+a+A (10.82ab %) >P (10.01b %) >Bs (6.62c %) y M (2.83d %) (Figura 1-4). En general, el contenido de MOS en

el tiempo lluvioso fue mayor que en el tiempo seco, cuando se tuvieron un drenaje moderado y pobre pero no cuando se tuvo un buen drenaje. Sin embargo, la interacción indica que el contenido de MOS en el drenaje imperfecto fue significativamente mayor durante el tiempo lluvioso que durante el tiempo seco (10.51 vs. 7.22 %); lo mismo sucedido en el drenaje moderado (9.20 vs. 6.48 %, respectivamente). Por otro lado, cuando la condición del drenaje fue buena no se presentaron diferencias significativas en el contenido de MOS entre los dos tiempos (8.62 vs. 7.73 %, respectivamente) (Figura 1-5).

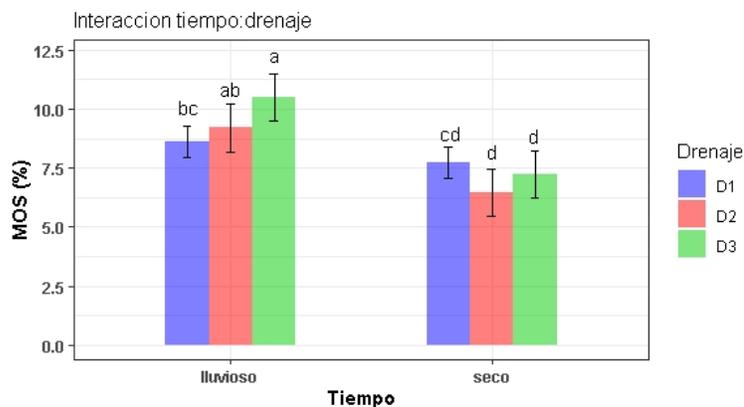


**Figura 2-3:** Concentración de aluminio ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).



**Figura 2-4:** Contenido de MOS (%) en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras

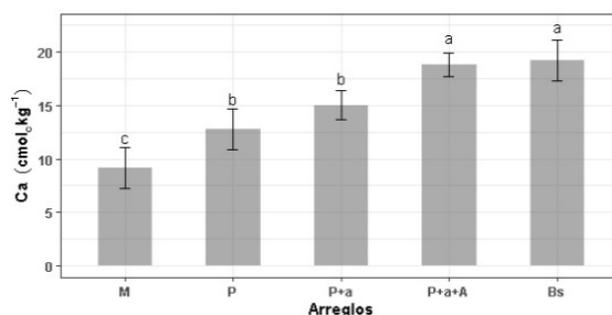
indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).



**Figura 2-5:** Contenido de MOS (%) en función de la interacción tiempo (lluvioso y seco) x drenaje (D1: bien, D2: moderado y D3: pobre). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

## 2.4.4 Calcio

Hubo diferencias altamente significativas ( $P \leq 0.001$ ) en el valor del Calcio en función de los arreglos (Tabla 1-3). El valor del Ca en el suelo tuvo el siguiente orden decreciente Bs ( $19.21 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), P+a+A ( $18.80 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) > P+a ( $15.00 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) > P ( $12.78 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) > M ( $12.78 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) (Figura 1-6).



**Figura 2-6:** Valor de calcio ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos).

Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

### 2.4.5 Magnesio

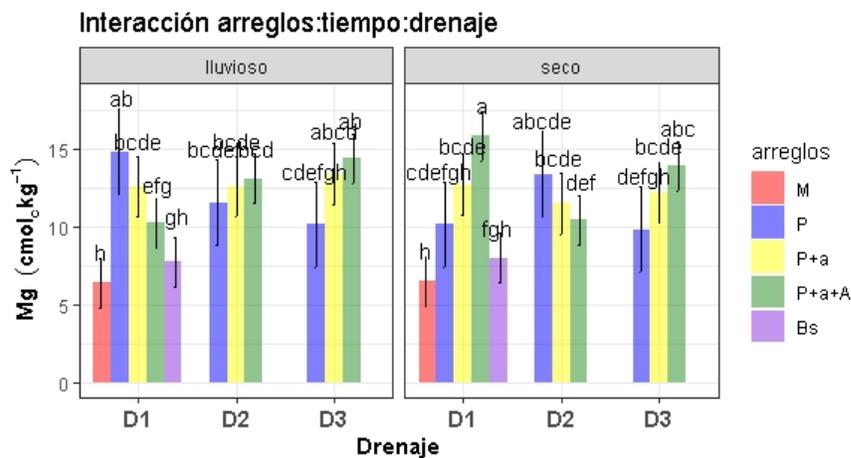
La concentración de magnesio en el suelo fue influenciada significativamente ( $P \leq 0.001$ ) por los arreglos y la triple interacción AxTxD (Tabla 1-3). En esta última se observa que el arreglo cultivo maíz (M) presentó la menor concentración de este elemento en ambos tiempos (6.45-6.52  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), seguido por el sistema forestal- Bs (7.77-8.02  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), la pastura (P) y los SSP presentaron valores más altos, pero cambiaron al interactuar con los otros factores (Figura 1-7). Por ejemplo, en el tiempo seco se detectó que en las parcelas bien drenadas el suelo en el SSP P+a+A registró mayor concentración de magnesio que los otros arreglos (15.83 vs. 10.15-12.72  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), en las parcelas moderadamente drenadas no hubo diferencias entre P, P+a y P+a+A (10.47-13.40  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) y en las parcelas pobremente drenadas hubo diferencias entre el SSP P+a+A y la P (13.90 vs. 9.85  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), pero no con el SSP P+a (12.22  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ).

En contraste, en el tiempo lluvioso se detectó que en las parcelas bien drenadas el arreglo P (14.80  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) fue mayor que el SSP P+a+A (10.28  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) pero no que el P+a (12.60  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ). En las parcelas moderadamente drenadas de nuevo no hubo diferencias entre P, P+a y P+a+A (11.55-13.08  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), similar a lo ocurrido en el tiempo seco. En las parcelas pobremente drenadas hubo diferencias significativas entre el SSP P+a+A y la P (14.38 vs. 10.15  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), pero no con el SSP P+a (13.40  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), tal como ocurrió en el tiempo seco.

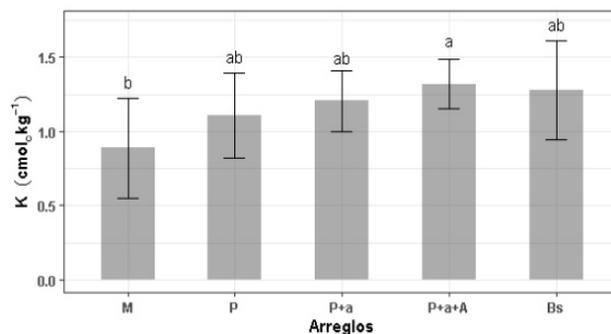
### 2.4.6 Potasio

El nivel de potasio en el suelo fue afectado significativamente ( $P < 0.05$ ) por el factor arreglos (Tabla 1-3). Se observó una diferencia significativa entre el SSP P+a+A (1.319  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) y el arreglo M (0.887  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), pero estos no fueron diferentes de los otros arreglos (1.108 -1.277  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) (Figura 1-8).

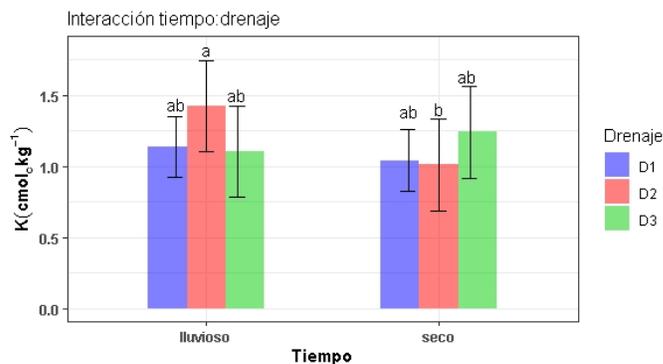
También se detectó una interacción significativa ( $P < 0.1$ ) TxD (Tabla 1-3). En esta se observó que en las parcelas moderadamente drenadas hubo diferencias en el contenido de K en el suelo entre el tiempo lluvioso y el seco (1.42 vs. 1.01  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), pero no con el resto de valores (1.04-1.24  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) (Figura 1-9).



**Figura 2-7:** Concentración de magnesio ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción arreglos x drenaje x tiempo (AxTxD). Los arreglos son: cultivo de maíz (M), pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados en tres niveles de drenaje: bueno (D1), moderado (D2) y pobre (D3). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluvioso y secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).



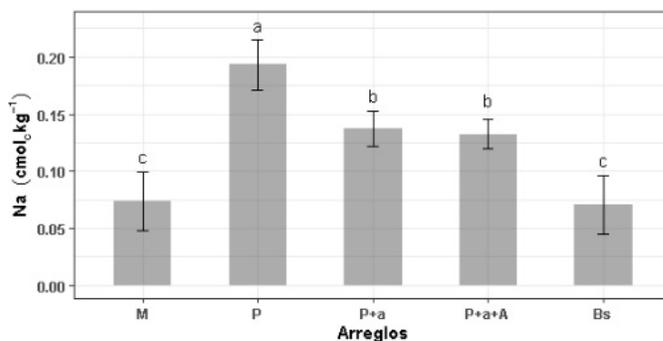
**Figura 2-8:** Nivel de potasio ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de los arreglos: cultivo de maíz (M), pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).



**Figura 2-9:** Nivel de potasio ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de los arreglos: cultivo de maíz (M), pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

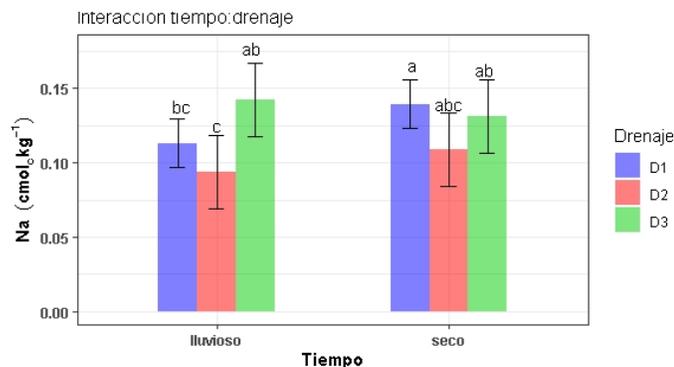
### 2.4.7 Sodio

La concentración de sodio en el suelo fue afectada significativamente ( $P < 0.001$ ) por los arreglos (Tabla 1-3). Así, el valor del sodio tuvo el siguiente orden decreciente P ( $0.1933a \text{ cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) > P+a = P+a+A ( $0.1376$  y  $0.1325b \text{ cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) > Bs = M ( $0.0735$  y  $0.0710 \text{ cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) (Figura 1-10). También se detectó una interacción significativa ( $P < 0.05$ ) TxD (Tabla 3). En esta se observó que en las parcelas bien drenadas hubo diferencias en contenido de Na entre el tiempo lluvioso y el seco ( $0.1133$  vs.  $0.1422 \text{ cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ); también hubo diferencias en el tiempo lluvioso entre las parcelas moderadamente drenadas y las pobremente drenadas ( $0.939$ - $0.1422 \text{ cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) (Figura 1-11).



**Figura 2-10:** Concentración de sodio ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos

(P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

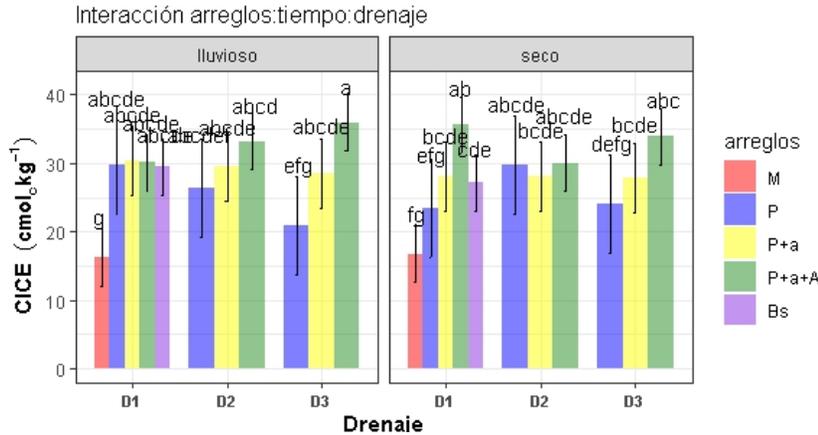


**Figura 2-11:** Concentración de sodio ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción tiempo (lluvioso y seco) x drenaje (D1: bien, D2: moderado y D3: pobre). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

### 2.4.8 Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE)

La concentración de la CICE en el suelo fue afectada significativamente por los arreglos ( $P \leq 0.001$ ) y por la triple interacción  $A \times T \times D$  ( $P \leq 0.05$ ) (Tabla 1-3). En la interacción se observa que el arreglo M presentó los menores valores de la CICE en ambos tiempos (16.3-16.7  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ), el arreglo forestal Bs presentó valores intermedios (27.2- 29.4  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ), sin ser diferentes significativamente entre los tiempos de muestreo (Figura 1-12). En el tiempo seco se detectó que en las parcelas bien drenadas el SSP P+a+A fue mayor que el Bs y la P (35.6 vs. 27.2-24.3  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ), pero no fue diferente del SSP P+a (28.1  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ), en las parcelas moderadamente drenadas no se presentaron diferencias significativas entre P, P+a y P+a+A (28.1-30.0  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) y en las parcelas pobremente drenadas se presentó un comportamiento similar a las bien drenadas ya que hubo diferencias entre el SSP P+a+A y la P (33.9 vs. 24.1  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ), pero no con el SSP P+a (27.9  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ). En contraste, en el tiempo lluvioso se detectó que en las parcelas bien drenadas no se presentaron diferencias significativas para la CICE entre arreglos (30.3-29.6  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ), excepto con el sistema agrario M. En las parcelas moderadamente drenadas, de nuevo se presentaron diferencias significativas entre el SSP P+a+A y la P

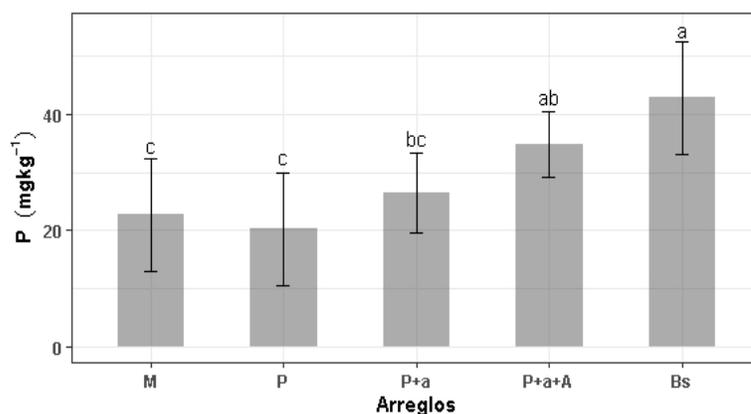
(33.2-26.4  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ), pero no con el SSP P+a (29.5  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ). De igual manera, en las parcelas pobremente drenadas hubo diferencias significativas entre el SSP P+a+A y la P (35.9 vs. 20.9  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ), pero no con el SSP P+a (28.6  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ), tal como ocurrió en el tiempo seco.



**Figura 2-12:** Valor de la CICE ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción arreglosxdrenajex tiempo (AxDxT). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque de restauración secundario (Bs) combinados en tres niveles de drenaje: bueno (D1), moderado (D2) y pobre (D3) y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

### 2.4.9 Fósforo

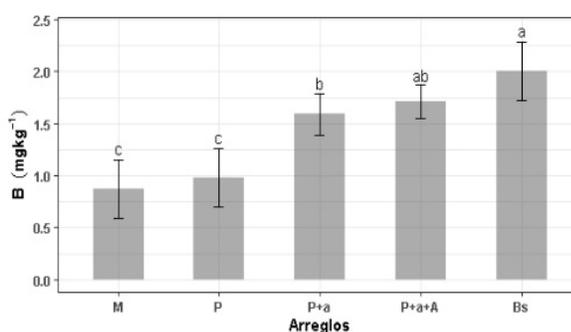
El nivel de fósforo en el suelo fue afectado muy significativamente ( $P < 0.001$ ) por el factor arreglos (Tabla 1-3). Se observó que el valor más alto de fósforo se presentó en el arreglo Bs (42.8  $\text{mg kg}^{-1}$ ), el cual fue diferente del resto de los arreglos excepto del SSP P+a+A (34.8  $\text{mg kg}^{-1}$ ); este a su vez fue diferente a los arreglos M y P, pero no al SSP P+a (26.5  $\text{mg kg}^{-1}$ ). En los arreglos M y P se presentaron los valores significativamente más bajos (M: 22.8  $\text{mg kg}^{-1}$ ; P: 20.2  $\text{mg kg}^{-1}$ ) (Figura 1-13).



**Figura 2-13:** Niveles de fósforo ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción tiempo (lluvioso y seco) x drenaje (D1: bien, D2: moderado y D3: pobre). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

#### 2.4.10 Boro

La concentración de boro en el suelo fue afectada muy significativamente ( $P < 0.001$ ) por el factor arreglos (Tabla 1-3). La concentración más alta se halló en el arreglo forestal Bs ( $2.1 \text{ mg kg}^{-1}$ ), el cual fue diferente del resto de los arreglos, excepto del SSP P+a+A ( $1.71 \text{ mg kg}^{-1}$ ); este a su vez fue diferente a los arreglos P y M, pero no al SSP P+a ( $1.59 \text{ mg kg}^{-1}$ ). En los arreglos S y M las concentraciones de B fueron significativamente más bajas (M:  $0.85 \text{ mg kg}^{-1}$ ; P:  $0.98 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Figura 1-14).

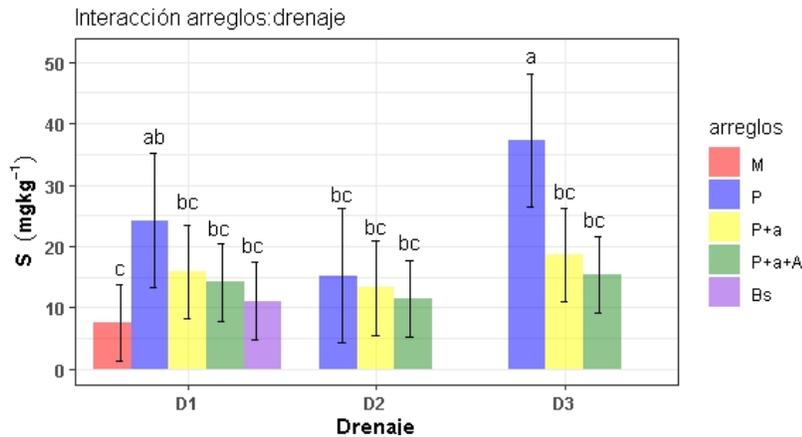


**Figura 2-14:** Concentración de boro ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción tiempo (lluvioso y seco) x drenaje (D1: bien, D2: moderado y D3: pobre). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras

indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

### 2.4.11 Azufre

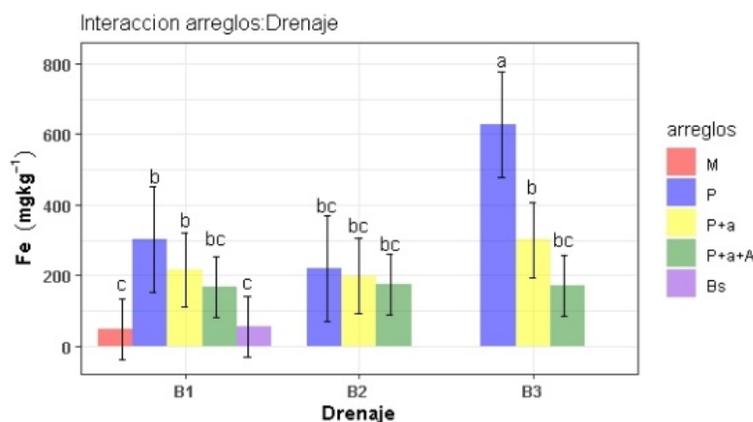
El valor del azufre en el suelo se vio afectado significativamente ( $P \leq 0.05$ ) por el factor arreglo y la interacción AxD (Tabla 1-3). Se observó que en las parcelas bien drenadas hubo diferencias significativas en la concentración de S entre los arreglos P ( $24.25^{ab}$  mg  $\text{kg}^{-1}$ ) y M ( $7.58^c$  mg  $\text{kg}^{-1}$ ). Los otros arreglos presentaron valores intermedios y no fueron diferentes de los anteriores ( $11.08$ - $18.62^{bc}$  mg  $\text{kg}^{-1}$ ). En las parcelas con drenaje moderado no presentaron diferencias significativas entre los arreglos ( $11.50$ - $15.25$  mg  $\text{kg}^{-1}$ ). En las parcelas con mal drenaje la concentración de S en el suelo fue significativamente mayor en el sistema P ( $37.25^a$  mg  $\text{kg}^{-1}$ ) que en los SS P+a+A y P+a ( $15.33^{bc}$  y  $18.62^{bc}$  mg  $\text{kg}^{-1}$ ), pero no entre ellos (Figura 1-15).



**Figura 2-15:** Concentración de azufre (mg  $\text{kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción arreglos x drenaje (AxD). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados en tres niveles de drenaje: bueno (D1), moderado (D2) y pobre (D3). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

### 2.4.12 Hierro

Se detectó efectos muy significativos ( $P \leq 0.001$ ) del factor Arreglo y la interacción AxD sobre el Fe en el suelo (Tabla 1-3). En las parcelas bien drenadas hubo diferencias significativas en la concentración de Fe en el suelo entre los arreglos P y P+a ( $301.0^b$  y  $215.8^b$  mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente) y los arreglos M ( $49.0^c$  mg kg<sup>-1</sup>) y Bs ( $53.5^c$  mg kg<sup>-1</sup>). El SSP P+a+A presentó un valor intermedio ( $168.2^{bc}$  mg kg<sup>-1</sup>), el cual no fue significativamente diferente de los anteriores (Figura 1-16). Por otro lado, en las parcelas con drenaje moderado no se presentaron diferencias significativas entre los arreglos ( $173.3$ - $219.0$  mg kg<sup>-1</sup>). En las parcelas con drenaje pobre el sistema de la P fue significativamente mayor ( $626.5^a$  mg kg<sup>-1</sup>) que con los otros arreglos de los SSP P+a y P+a+A ( $300.6^b$  y  $172.4^{bc}$  mg kg<sup>-1</sup>), que no difirieron entre sí.

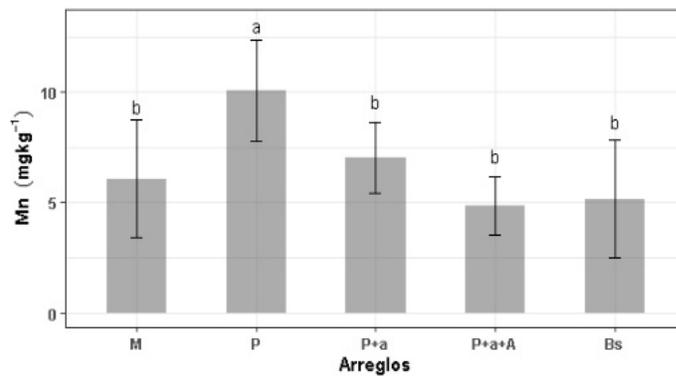


**Figura 2-16:** Concentración de hierro (mg kg<sup>-1</sup>) en el suelo en función de la interacción arreglos x drenaje (AxD). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados en tres niveles de drenaje: bueno (D1), moderado (D2) y pobre (D3). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

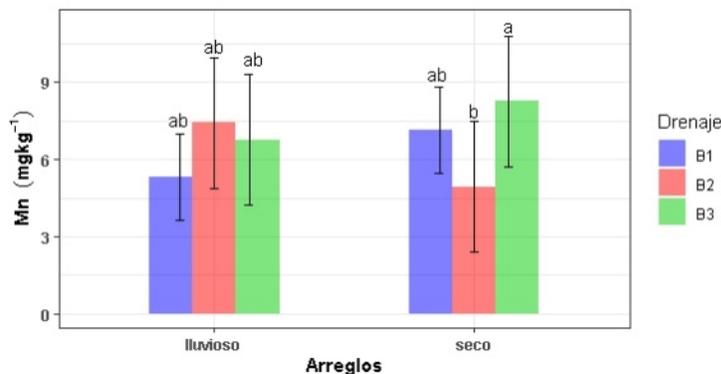
### 2.4.13 Manganeso

La concentración de Mn en el suelo fue afectada muy significativamente por el factor arreglo ( $P \leq 0.001$ ) y significativamente por la interacción TxD ( $P \leq 0.1$ ) (Tabla 1-3). El valor del Mn en el suelo fue significativamente mayor en el arreglo P, con un valor medio de

10.08 mg kg<sup>-1</sup>, que en el resto de los arreglos que no fueron diferentes entre sí y fluctuaron entre 5.17 y 7.04 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 1-17). Por otro lado, la concentración de Mn en el suelo fue afectada muy significativamente por el factor arreglo ( $P \leq 0.001$ ) y significativamente por la interacción TxD ( $P \leq 0.1$ ) (Tabla 1-2). En el tiempo lluvioso no se presentaron diferencias significativas del Mn en el suelo en función del drenaje (5.31-7.44 mg kg<sup>-1</sup>), pero si en el tiempo seco (Figura 1-18). En este último la concentración de Mn en el suelo fue mayor en las parcelas con l pobremente drenaje (8.27<sup>a</sup> mg kg<sup>-1</sup>) que en las moderadamente drenadas (4.94<sup>b</sup> mg kg<sup>-1</sup>); aquellas parcelas con buen drenaje presentaron un valor intermedio y no fueron diferente de las anteriores (7.15<sup>ab</sup> mg kg<sup>-1</sup>).



**Figura 2-17:** Concentración de manganeso (mg kg<sup>-1</sup>) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

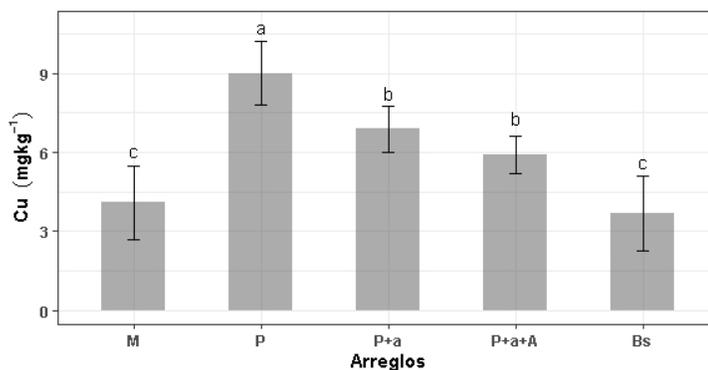


**Figura 2-18:** Concentración de manganeso (mg kg<sup>-1</sup>) en el suelo en función de la interacción tiempo (lluvioso y seco) x drenaje (D1: bien, D2: moderado y D3: pobre). Cada

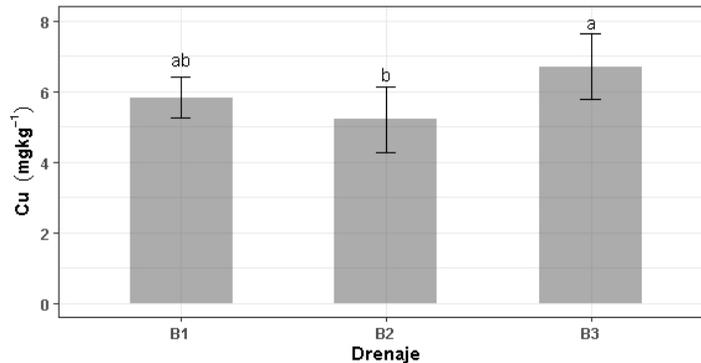
valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

## 2.4.14 Cobre

La concentración de cobre en el suelo fue afectada significativamente por los factores arreglo ( $P \leq 0.001$ ), tiempo ( $P \leq 0.05$ ) y drenaje ( $P \leq 0.01$ ) (Tabla 1-3). Por ejemplo, para el factor arreglo se detectó el siguiente orden decreciente: P ( $9.00^a$  mg kg<sup>-1</sup>) > P+a = P+a+A ( $6.88^b$  y  $5.92^b$  mg kg<sup>-1</sup>) > Bs = M ( $4.08^c$  y  $3.67^c$  mg kg<sup>-1</sup>) (Figura 1-19). En cuanto al drenaje se encontró que el contenido de Cu presentó diferencias significativas a favor de las parcelas pobremente drenadas ( $6.70^a$  mg kg<sup>-1</sup>) con respecto a las moderadamente drenadas ( $5.20^b$  mg kg<sup>-1</sup>); las parcelas bien drenadas presentaron un valor intermedio ( $5.83^{ab}$  mg kg<sup>-1</sup>) que no significativamente diferente de las anteriores (Figura 1-20). Por otro lado, la concentración de cobre en el suelo fue significativamente mayor en el tiempo lluvioso ( $6.29$  mg kg<sup>-1</sup>) que en el tiempo seco ( $5.52$  mg kg<sup>-1</sup>).



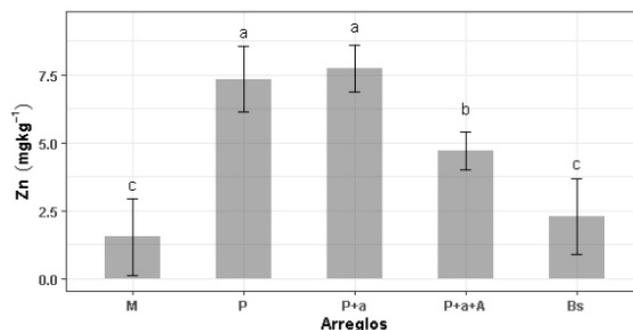
**Figura 2-19:** Concentración de cobre (mg kg<sup>-1</sup>) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).



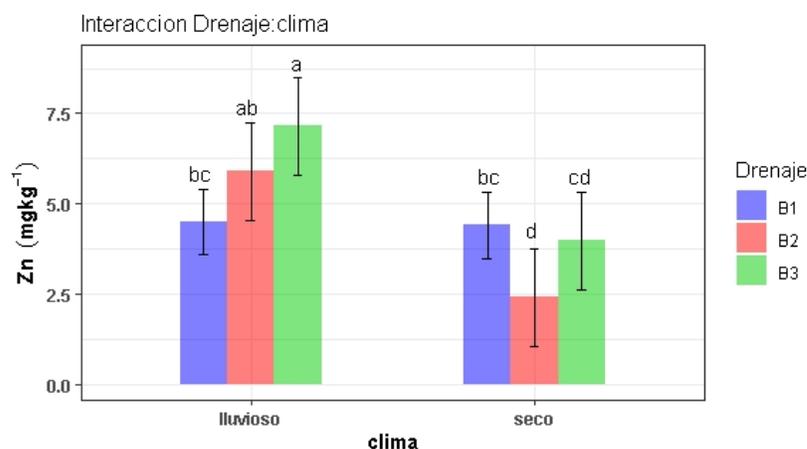
**Figura 2-20:** Concentración de cobre (mg kg<sup>-1</sup>) en el suelo en función del drenaje (D1: bien, D2: moderado y D3: pobre). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

#### 2.4.15 Zinc

La concentración de zinc en el suelo se vio afectada muy significativamente ( $P \leq 0.001$ ) por el factor arreglo y la interacción TxD (Tabla 1-3). Así, el valor de Zn en el suelo tuvo el siguiente orden decreciente: P+a = P (7.75<sup>a</sup> y 7.33<sup>a</sup> mg kg<sup>-1</sup>) > P+a+A (4.69<sup>b</sup> mg kg<sup>-1</sup>) > Bs = M (2.28<sup>c</sup> y 1.53<sup>c</sup> mg kg<sup>-1</sup>) (Figura 1-21). Por su parte, en el tiempo lluvioso el contenido de Zn en el suelo fue mayor en el drenaje pobre (7.15<sup>a</sup> mg kg<sup>-1</sup>) que en el drenaje bueno (4.48<sup>bc</sup> mg kg<sup>-1</sup>); en suelo moderadamente drenado presentó un valor intermedio (5.90<sup>ab</sup> mg kg<sup>-1</sup>) que no fue significativamente diferente de los anteriores. En contraste, en el tiempo seco el contenido de Zn en el suelo fue mayor en el drenaje bueno (4.40<sup>bc</sup> mg kg<sup>-1</sup>) que en el drenaje moderado (2.40<sup>d</sup> mg kg<sup>-1</sup>); el suelo con drenaje pobre presentó un valor intermedio (3.98<sup>cd</sup> mg kg<sup>-1</sup>) que no fue significativamente diferente de los anteriores (Figura 1-22).



**Figura 2-21:** Concentración de zinc ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

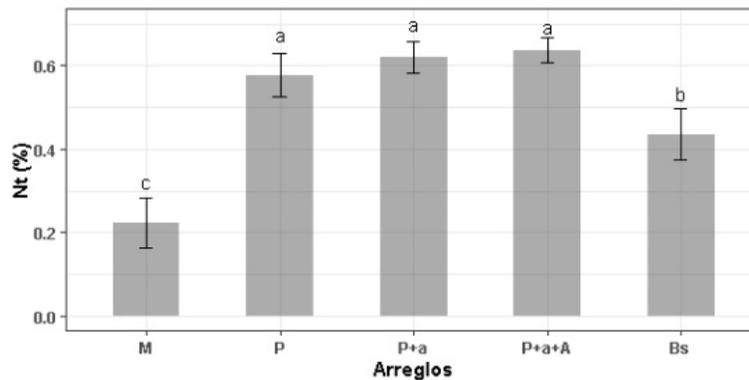


**Figura 2-22:** Concentración de zinc ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción tiempo (lluvioso y seco) x drenaje (D1: bien, D2: moderado y D3: pobre). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

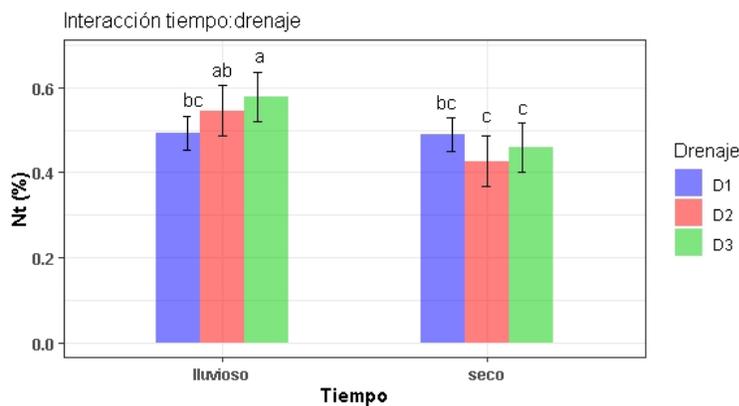
### 2.4.16 Nitrógeno total

Hubo diferencias altamente significativas ( $P \leq 0.001$ ) en el valor de Nitrógeno total (Nt) en el suelo por el factor arreglos (Tabla 1-3). Así, el valor del Nt tuvo el siguiente orden decreciente  $P+a+A = P+a = P$  (0.637a, 0.621a y 0.578a, respectivamente) > Bs (0.435b %) > M (0.233c %) (Figura 1-23).

También se detectó una interacción TxD significativa ( $P \leq 0.05$ ) (Tabla 1-3). En términos generales, la concentración de Nt en el suelo fue mayor en el tiempo lluvioso que en el seco, cuando las parcelas tuvieron buen drenaje no hubo diferencias entre el tiempo seco y lluvioso, pero cuando las parcelas estuvieron en los drenajes moderado y pobre el contenido de Nt fue significativamente mayor en el tiempo lluvioso que en el húmedo (Figura 1-24).



**Figura 2-23:** Concentración Valor del nitrógeno total (%) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

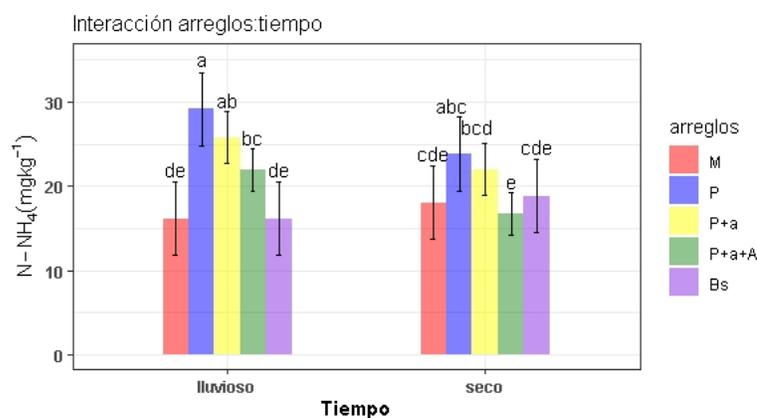


**Figura 2-24:** Concentración Valor del nitrógeno total (%) en el suelo en función de la interacción tiempo (lluvioso y seco) x drenaje (D1: bien, D2: moderado y D3: pobre). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las

barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

### 2.4.17 Amonio

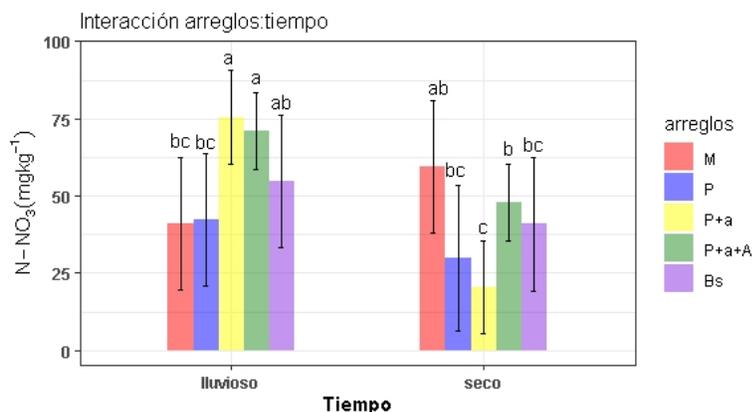
Se detectó una interacción significativa ( $P \leq 0.05$ ) (Tabla 1-3). El contenido de Amonio,  $\text{NH}_4^+$  en el suelo fue diferente en el tiempo lluvioso y seco, cuando el SSP P+a+A estuvo en tiempo lluvioso fue significativamente mayor que en el tiempo seco (21.9bc Vs 16.7e  $\text{mg kg}^{-1}$ ), el resto de los arreglos no presentaron diferencias significativas en el tiempo lluvioso y seco (Figura 1-25).



**Figura 2-25:** Contenido de amonio ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción arreglos x tiempo (AxT). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

### 2.4.18 Nitrato

Además, se detectó una interacción muy significativa AxT ( $P \leq 0.001$ ) (Tabla 1-3). En general, el contenido de nitratos,  $\text{NO}_3^-$  en el suelo presento diferencias en el tiempo lluvioso y seco, cuando el SSP P+a y P+a+A estuvo en el tiempo lluvioso fue significativamente mayor que en el tiempo lluvioso (75.3a y 71a  $\text{mg Kg}^{-1}$  vs. 20.5b y 47.9c), el resto de los valores no presentó diferencias significativas (59.5-30  $\text{mg Kg}^{-1}$ ) (Figura 1-26).

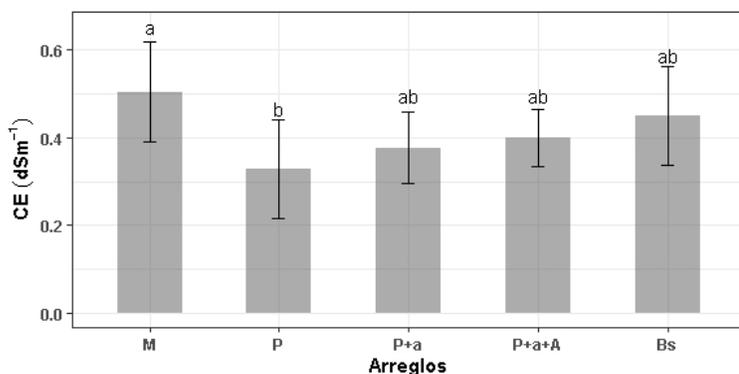


**Figura 2-26:** Contenido de nitrato ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción arreglos x tiempo (AxT). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque de restauración secundaria (Bs). Cada valor representa el promedio de de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

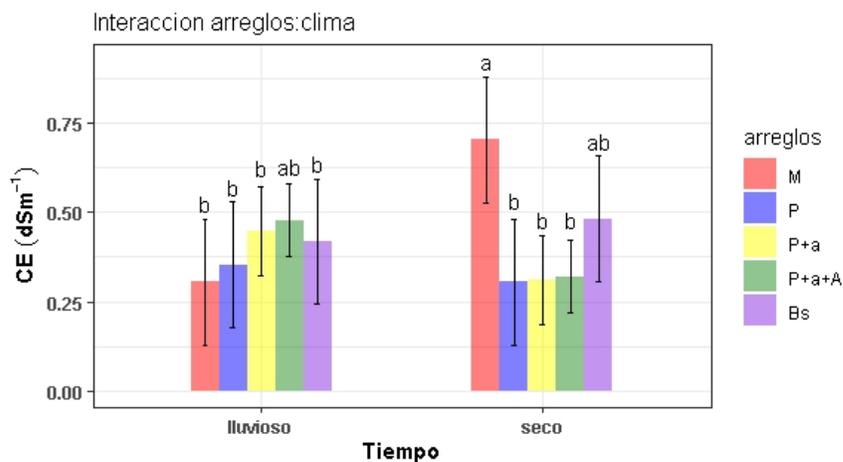
#### 2.4.19 Conductividad eléctrica

La Conductividad eléctrica fue afectada significativamente por el factor arreglos ( $P \leq 0.05$ ) (Tabla 1-3). Se observó que en el sistema agrario M la CE fue significativamente mayor y a su vez presentó diferencias significativas con la P ( $0.504a$  vs.  $0.329b$   $\text{dS m}^{-1}$ ), pero no con el resto de los valores ( $0.450$ - $0.378$   $\text{dS m}^{-1}$ ) (Figura 1-27).

También se detectó una interacción muy significativa ( $P \leq 0.001$ ) (Tabla 2-2). Se evidenció que la CE fue diferente en el tiempo seco y lluvioso, cuando el arreglo M estuvo en el tiempo seco fue significativamente mayor que en el tiempo lluvioso ( $0.703a$  vs.  $0.305b$   $\text{dSm}^{-1}$ ), a su vez presentó diferencias significativas con el SSP P+a, P+a+A y la P ( $0.319b$ ,  $0.309$  b y  $0.305b$   $\text{dSm}^{-1}$ ), y no presentó diferencias con el resto de los valores ( $0.482$ - $0.305$   $\text{dSm}^{-1}$ ) (Figura 1-28).



**Figura 2-27:** Conductividad eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ )



**Figura 2-28:** Conductividad eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción arreglos x tiempo (AxT). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

## 2.5 Discusión

Los resultados confirman la hipótesis que los indicadores químicos de salud del suelo pueden mejorarse por el uso y adopción de prácticas de manejo propias de cada cultivo a través del establecimiento de SSP en comparación a lo que ocurre en sistemas agrarios tales como el cultivo de maíz y la pastura; y que tal efecto, puede estar condicionado por el tiempo y por el gradiente de drenaje. En particular se encontró que los suelos de los SSP presentaron mejores contenidos de MOS, Nt, N-NO<sub>3</sub>, Ca, Mg, K, P, B y mayores valores de CICE. Los incrementos en estos indicadores pueden estar asociados al mayor aporte de hojarasca que generan estos sistemas y el reciclaje asociado a la descomposición de este material, tal como lo demostró Martínez et al. (2013). Por ejemplo, estos autores reportaron que los SSP P+a y P+a+A aportaron anualmente 2877 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de hojarasca foliar, 1608 y 1595 kg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> de hojarasca (base seca), respectivamente.

Los SSP tienen como ventaja que tanto los árboles como los arbustos actúan como agentes de fertilización (Bordron et al. 2019). Estos absorben nutrientes en profundidad, lo llevan a su dosel y cuando cae la hojarasca (hojas, flores, frutos), aportan materia orgánica y los nutrientes contenidos en ella (Zhu et al. 2021). La tasa de descomposición de esta hojarasca en los ecosistemas de bosque seco tropical es bastante rápida y permite que los nutrientes sean liberados relativamente rápido (< 1 año) (Sierra y Nygren 2006). Lo anterior puede ser comprobado al comparar los contenidos de MOS en los arreglos bajo estudio (Figura 1-4) en los cuales los SSP tienen valores 3.8-4.0 veces más que lo que presenta el suelo del sistema maíz y 8-12 % (en términos relativos) más que la MOS del sistema pastura. Asimismo, los SSP tienen en su suelo en promedio 2.7 veces más Nt que los que presenta el suelo del maíz, pero estos no fueron diferentes a los que presenta la pastura. Las diferencias están asociadas a que los SSP tienen arbustos y arboles de tipo leguminosa que pueden movilizar altas cantidades de N desde la atmósfera (vía fijación biológica de N<sub>2</sub>) al dosel vegetal y luego al suelo (Martínez et al., 2014). En contraste, el cultivo de maíz y sus prácticas asociadas producen una disminución del contenido de MOS y el Nt asociado a ella, lo cual no es recuperado o nivelado con los aportes de nitrógeno vía fertilizantes (Tiessen, Cuevas, y Chacon 1994; Sellan et al. 2020).

Lo anterior también se detectó con los indicadores concentración de  $\text{NO}_3$  y  $\text{NH}_4$  del suelo. Es bien conocido que los microorganismos del suelo realizan los procesos de amonificación y nitrificación; la amonificación es realizada por hongos y bacterias, mientras que la nitrificación ocurre por acción bacteriana liberando así  $\text{NH}_4$  y  $\text{NO}_3$ , respectivamente. Es posible que en la pastura al tener un pH más bajo (5.47) y presencia de aluminio se permita la amonificación y se limite la nitrificación. Por el contrario, en los SSP con pH de 5.9-6.2 y sin presencia de aluminio se permiten ambos procesos (amonificación y nitrificación) (Norton y Ouyang 2019). Durante el tiempo lluvioso los SSP tuvieron valores de nitratos fueron 71.0 y 75.3  $\text{mg kg}^{-1}$ , mientras que los arreglos maíz y pastura presentaron valores más bajos de nitratos 41.2 y 42.3  $\text{mg kg}^{-1}$ , los SSP mantienen la humedad del suelo, lo cual afecta las tasas de nitrificación, la disponibilidad del sustrato amonio y del oxígeno por difusión, a diferencia de los arreglos pastura y maíz, sin cobertura, pueden presentar más estrés hídrico, lo cual es soportado en los resultados de Yang, Chen, y Yang (2019).

En general, en el arreglo SSP (P+a+A) y el Bs los contenidos de fósforo, calcio, potasio y manganeso en el suelo presentaron valores más altos que los otros arreglos, siendo menor el sistema agrario maíz, mientras que el SSP P+a y P presentaron valores intermedios. En el caso del fosfato en los SSP multiestrato el promedio de 34.8  $\text{mg kg}^{-1}$  que fue superior a los sistemas maíz y pastura en 53 y 73 %, respectivamente. La MOS es una fuente de fosfato del suelo, y de los otros nutrientes. La posible explicación para este comportamiento es que en el SSP y el Bs existe mayor diversidad de especies vegetales y hay mayor oportunidad para que las raíces de los árboles extraigan nutrientes de más profundidad lo lleven al dosel vegetal (Contreras, 2014), posteriormente lo aporten como hojarasca y finalmente mediante la actividad microbial liberen estos nutrientes. En el caso particular del P es liberado por la acción de las enzimas fosfatasas de los microorganismos, lo cual se discutirá en el capítulo 2 de esta tesis. Resultados comparables de incremento de nutrientes en el SSP multiestrato (P+a+A) fueron reportados por Martínez et al. (2014) y otros (Chen et al., 2020; Chetelat, Gaillardet, y Chen 2021). Según Grandy et al. (2013) el reciclaje de la vegetación que puede ocasionar una concentración relativamente alta de boro en la solución del suelo, tal como se encontró en el presente estudio. Vale la pena mencionar que los arreglos M y P por el contrario presentan raíces menos profundas y el reciclaje a través de la hojarasca es mucho menor (Jia et al. 2020). También llama la atención que, a pesar de las aplicaciones de fertilizante fosfórico y enmiendas orgánicas,

las concentraciones de nutrientes tienden a ser más bajas, lo cual demuestra la baja sostenibilidad en la calidad/salud de suelo asociada a este sistema y por extensión al arreglo P. Por otro lado, es necesario resaltar que en el arreglo P se presentó un bajo contenido de aluminio que podría estar interfiriendo con la disponibilidad del P (Figura 1-2).

En el caso de los micronutrientes Fe, Mn, Cu, Zn se encontró que una menor disponibilidad en el suelo de los arreglos M y Bs. En el caso del arreglo M esto puede ser explicado por los bajos aportes de MO que restringen las posibilidades de reciclaje y por la continua remoción de los granos de cosecha (Miner et al. 2018; Acevedo et al. 2004). En el caso del Bs, por el contrario, hay un aporte de MO y un reciclaje activo pero el pH del suelo es más alto (7.02), lo cual puede insolubilizar estos micronutrientes y precipitarlos como hidróxidos (Dhaliwal et al. 2019; Mao et al. 2017). En contraste, en el arreglo P el pH es más bajo (5.47, fuertemente ácido) y, por ende, la solubilidad de estos micronutrientes es mayor. Adicionalmente, Sayer et al. (2020) estudiaron por más de 15 años el ciclo de nutrientes en el bosque seco tropical, sugieren que el ciclo de los micronutrientes como el Zn y el Mn esta más influenciado por procesos biológicos que por procesos químicos o físicos, vía descomposición de hojarasca, aumentos de Mn en el suelo podrían explicar una mayor degradación fúngica de la hojarasca del bosque, lo que significaría que al estar disminuido el Mn en el Bs y en el M, puede haber una disminución de procesos biológicos, en el primero podría implicar que el restablecimiento de los procesos biológicos conlleva más años de restauración.

Es bien sabido que cuando hay mayor disponibilidad de P, tal como ocurre en el P+a+A y el Bs, se disminuye la disponibilidad de micronutrientes (Roshinus et al. 2021). Queda aún por explicar porque en el suelo en los SSP la disponibilidad de estos micronutrientes es menor, pero es claro que no se constituye en factores limitantes para el crecimiento vegetal (Kaba, Yamoah, y Acquaye, 2021). En estudios de descomposición de hojarasca en cultivos de aguacate Bernal, (2018) encontró que hubo una inmovilización de estos, es decir, hubo una tendencia a quedar atrapados en la MO.

Los SSP tienden a generar una mayor concentración de nutrientes en el suelo comparado con lo que hace la pastura y muy particularmente con el arreglo maíz. Sobresalen los contenidos de MOS, Nt, P, K, B, Mg, Ca y los niveles de CICE. Esto puede ser el resultado

del mayor reciclaje que ocurre en los SSP que en los monocultivos. Los árboles y arbustos pueden extraer nutrientes de mayor profundidad translocarlos a su dosel y transferirlos a la superficie del suelo vía caída de hojarasca (Martínez-Atencia, 2020). Allí los microorganismos a través de los procesos de descomposición liberan los nutrientes para ser absorbidos por las plantas (árboles, arbustos y pastura) dejando el suelo con una mejor biodisponibilidad de nutrientes (Chen et al., 2021). Los árboles y arbustos leguminosas pueden tener bacterias fijadoras de nitrógeno asociadas a su raíz y con ello permiten la captura de N desde la atmosfera, el cual empieza a recircular entre las plantas, animales y el componente orgánico del suelo. Por lo anterior, estos ecosistemas se acercan más al concepto de sostenibilidad que los sistemas agrarios, en términos prácticos no requieren aplicaciones de insumo externos (enmiendas orgánicas o minerales como fertilizantes), de ahí que sean una muy buena alternativa para el manejo de los suelos tropicales.

## Bibliografía

- A.O.A.C. 1990. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 15<sup>th</sup> Ed. Kenneth Helrich Editor. Arlington, Virginia. USA. 771 p.
- Acevedo, O., Ortiz, E., Cruz, M., y Cruz, E. (2004). Role of Iron Oxides in Soils. En: *Terra Latinoamericana*, 22(4), 485–497
- Ballesteros-Correa, J., Morelo-García, L., y Pérez-Torres, J. (2019). Composition and vegetal structure of fragments of dry tropical forest in landscapes of extensive livestock farming under silvopastoral and conventional management in Córdoba, Colombia. En: *Revista Caldasia*, 41(1), 224–234. doi:10.15446/caldas.v41n1.71320
- Barragán-Hernández, W. A., y Cajas-Girón, Y. S. (2019). Cambios bromatológicos y estructurales en *Megathyrus maximus* bajo cuatro arreglos silvopastoriles. En: *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20(2), 231-244
- Bernal, J. A. (2018). *Composition and removal of nutrients by the harvested fruit of avocado cv. Hass in Antioquia*. 71(2), 8511–8516. <https://doi.org/10.15446/rfna.v71n2.71929>.
- Bordron, B., Robin, A., Oliveira, I. R., Guillemot, J., Laclau, J. P., Jourdan, C., Nouvellon, Y., Abreu-Junior, C. H., Trivelin, P. C. O., Gonçalves, J. L. M., Plassard, C., y Bouillet, J. P. (2019). Fertilization increases the functional specialization of fine roots in deep soil layers for young *Eucalyptus grandis* trees. En: *Forest Ecology and Management Journal*, 431(November 2017), 6–16. doi:10.1016/j.foreco.2018.03.018
- Box, George E., Hunter, J. Stuart y Hunter, William G. Statistics for Experimenters. Design, Innovation, and Discovery. Wiley Series in Probability and Statistics. Second Edition. 2005.
- Buitrago-Guillen., M.E., Ospina-Daza, L.A., y Narváez-Solarte, W., 2018. Sistemas silvopastoriles: alternativa en la mitigación y adaptación de la producción bovina al cambio climático. *Bol.Cient.Mus.Hist. Nat.U.de Caldas*, 22 (1): 31-42. DOI: 10.17151/bccm.2018.22.1.2

- Brevik, E. C., Pereg, L., Steffan, J. J., y Burgess, L. C. (2018). Soil ecosystem services and human health. En: *Current Opinion in Environmental Science and Health Journal*, 5, 87–92. doi:10.1016/j.coesh.2018.07.003
- Busse Matt, Giardina Christian P., Morris Dave M., Page-Dumroese Debbie S. (2019). *Developments in Soil Science*. Book series. Volume 36. Pages 109-130. Jaramillo, V. J., and Murray-Tortarolo, G. N. Chapter 7. Tropical dry forest soils: global change and local-scale consequences for soil biogeochemical processes. doi:10.1016/B978-0-444-63998-1.00007-0
- Cajas-Giron YS, Sinclair FL. (2001). Characterization of multistrata silvopastoral systems on seasonally dry pastures in the Caribbean Region of Colombia. En: *Agroforestry Systems Journal*, 53(2):215–25. doi:10.1023/A:1013384706085
- Chaturvedi, R. K., Raghubanshi, A. S., y Singh, J. S. (2012). Effect of grazing and harvesting on diversity, recruitment and carbon accumulation of juvenile trees in tropical dry forests. En: *Forest Ecology and Management Journal*, 284, 152–162. doi:10.1016/j.foreco.2012.07.053
- Chen J., Feng K., Hannula S., Kuzyakov Y., Li Y., Xu H. (2021). Interkingdom plant-microbial ecological networks under selective and clear cutting of tropical rainforest. *Forest Ecology and Management*, 491:119182, 1-12 DOI:10.1016/j.foreco.2021.119182
- Chen, J., van Groenigen, K. J., Hungate, B. A., Terrer, C., van Groenigen, J. W., Maestre, F. T., Ying, S. C., Luo, Y., Jørgensen, U., Sinsabaugh, R. L., Olesen, J. E., y Elsgaard, L. (2020). Long-term nitrogen loading alleviates phosphorus limitation in terrestrial ecosystems. En: *Global Change Biology*, 26(9), 5077–5086. doi:10.1111/gcb.152181
- Chetelat, B., Gaillardet, J., y Chen, J. Bin. (2021). Dynamic of boron in forest ecosystems traced by its isotopes: A modeling approach. En: *Chemical Geology Journal*, 560(November 2020). doi DOI:10.1016/j.chemgeo.2020.119994
- Cornell Soil Health Laboratory Comprehensive Assessment of Soil Health Standard Operating Procedures. February 2016. Schindelbeck R, Moebius-Clune, B., Kurtz, K.S. and Van E.
- Contreras José (2014). Distribución y densidad de raíces finas de especies vegetales dentro del sistema silvopastoril de múltiples estratos y una pradera de solo gramínea ubicado en el valle medio del sinú -C. I. Turipaná. Universidad de Córdoba. Tesis maestría
- Cubillos, A. M., Vallejo, V. E., Arbeli, Z., Terán, W., Dick, R. P., Molina, C. H., Molina, E., y Roldan, F. (2016). Effect of the conversion of conventional pasture to intensive silvopastoral systems on edaphic bacterial and ammonia oxidizer communities in Colombia. *European Journal of Soil Biology*, 72(40), 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.12.003>

- Deklerck, V., De Mil, T., Ilondea, B. A., Nsenga, L., De Caluwé, C., Van den Bulcke, J., Van Acker, J., Beeckman, H., y Hubau, W. (2019). Rate of forest recovery after fire exclusion on anthropogenic savannas in the Democratic Republic of Congo. En: *Biological Conservation Journal*, 233(February), 118–130. doi:10.1016/j.biocon.2019.02.027
- Dhaliwal, S. S., Naresh, R. K., Mandal, A., Singh, R., y Dhaliwal, M. K. (2019). Environmental and Sustainability Indicators Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review. En: *Environmental and Sustainability Indicators Journal*, 1-2(September), 100007. doi:10.1016/j.indic.2019.100007
- Espírito-Santo, M. M., Sevilha, A. C., Anaya, F. C., Barbosa, R., Fernandes, G. W., Sanchez-Azofeifa, G. A., Scariot, A., Noronha, S. E. de, y Sampaio, C. A. (2009). Sustainability of tropical dry forests: Two case studies in southeastern and central Brazil. En: *Forest Ecology and Management Journal*, 258(6), 922–930. doi:10.1016/j.foreco.2009.01.022
- FAO and PNUMA (2020). Los estado de los bosques del mundo 2020: Los bosques, la biodiversidad y las personas. <https://www.fao.org/3/ca8642es/ca8642es.pdf>
- Forest Survey of India (2019). Ministry of Environment Forest and Climate Change. In *India State of Forest Report: Vol. II*. <https://fsi.nic.in/forest-report-2021>
- Gamarra, C., Díaz Lezcano, M. I., Vera de Ortíz, M., Galeano, M. D. P., y Cabrera Cardús, A. J. N. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. En: *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(46), 4–26. doi:10.29298/rmcf.v9i46.134
- Grandy, A. S., Salam, D. S., Wickings, K., McDaniel, M. D., Culman, S. W., y Snapp, S. S. (2013). Soil respiration and litter decomposition responses to nitrogen fertilization rate in no-till corn systems. En: *Agriculture, Ecosystems and Environment Journal*, 179, 35–40. doi:10.1016/j.agee.2013.04.020
- Holdridge L R. (1971). *Forest environments in tropical life zones; a pilot study* (1st ed.). Oxford,: Pergamon Press. <https://searchworks.stanford.edu/view/609670>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2009). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras de Córdoba*. 502 pages.
- Jia, Q., Xu, R., Chang, S., Zhang, C., Liu, Y., Shi, W., Peng, Z., y Hou, F. (2020). Planting practices with nutrient strategies to improves productivity of rain- fed corn and resource use efficiency in semi-arid regions. En: *Agricultural Water Management Journal*, 228 (September 2019), 105879. doi:10.1016/j.agwat.2019.105879

- Lawson, John. Design and Analysis of Experiments with R. Brigham Young University. Provo, Utah, USA. CRC Press. Taylor y Francis Group. 2015
- Linares, J. (2006) Evaluación de algunas propiedades del suelo como indicadores de sostenibilidad para pastoreo rotacional en silvopastoreo en un endocuepo del valle medio del río Sinú Colombia. Maestría. Universidad Nacional De Colombia - Sede Palmira Universidad de Córdoba.
- Mao, Q., Lu, X., Zhou, K., Chen, H., Zhu, X., Mori, T., y Mo, J. (2017). Effects of long-term nitrogen and phosphorus additions on soil acidification in an N-rich tropical forest. En: *Geoderma Journal*, 285, 57–63. doi:10.1016/j.geoderma.2016.09.017
- Martínez, D. C (2013) Producción y descomposición de hojarasca en sistemas silvopastoriles de estratos múltiples y su efecto sobre propiedades bioorgánicas del suelo en el valle medio del Río Sinú Producción y descomposición de hojarasca en sistemas silvopastoriles de estratos. Universidad Nacional de Colombia. Tesis de doctorado
- Martínez-Atencia J, Loaiza-Usuga JC, Osorio-Vega NW, Correa-Londoño G, Casamitjana-Causa M. (2020). Leaf Litter Decomposition in Diverse Silvopastoral Systems in a Neotropical Environment. En: *Journal of Sustainable Forestry*. 39(7):710–29. doi:10.1080/10549811.2020.1723112
- Martínez, J., Cajas, Y. S., León, J. D., y Osorio, N. W. (2014). Silvopastoral systems enhance soil quality in grasslands of Colombia. En: *Applied and Environmental Soil Science Journal*, 2014. doi :10.1155/2014/359736
- Miner, G. L., Delgado, J. A., Ippolito, J. A., Barbarick, K. A., Stewart, C. E., Manter, D. K., Del, S. J., Halvorson, A. D., Floyd, B. A., y Adamo, R. E. D. (2018). Field Crops Research Influence of long-term nitrogen fertilization on crop and soil micronutrients in a no-till maize cropping system. En: *Field Crops Research*, 228 (September), 170–182. doi:10.1016/j.fcr.2018.08.017
- Miranda, G. (2018). Sucesión secundaria e influencia de características del paisaje en las zonas de vida de Bosque seco y Bosque húmedo tropical del occidente medio Antioqueño (Colombia). Universidad nacional de Colombia. Tesis de maestría.
- Moebius-Clune, B.N., D.J. Moebius-Clune, B.K. Gugino, O.J. Idowu, R.R. Schindelbeck, A.J. Ristow, H.M. van Es, J.E. Thies, H. A. Shayler, M. B. McBride, D.W. Wolfe, and G.S. Abawi, 2016. Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework Manual, Edition 3.1, Cornell University, Geneva, NY.

- Morales, V. J. 1971. Informe del reconocimiento detallado de los suelos del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Turipaná. Municipio de Cereté (Córdoba). Ministerio de Agricultura. Programa Nacional de Suelos - ICA. 218 p.
- Murgueitio, E. (2003). Impacto ambiental de la ganadería de leche en Colombia y alternativas de solución. En: *Livestock Research for Rural Development*, 15(10).
- Murphy, P. G., and Lugo, A. E. (1986). Ecology of tropical dry forest. En: *Annual Review of Ecology and Systematics*. Vol. 17, November 2003, 67–88. doi:10.1146/annurev.es.17.110186.000435
- Norton, J., and Ouyang, Y. (2019). Controls and adaptive management of nitrification in agricultural soils. En: *Frontiers in Microbiology*. Volumen 10, Agosto 30 de 2019). <https://research.amanote.com/publication/mqJN4nMBKQvf0BhiUQ6g/controls-and-adaptive-management-of-nitrification-in-agricultural-soils>
- Ocampo, L. (2022). *Evaluación integral de la salud del suelo en sistemas pastoriles y silvopastoriles en el trópico seco*. Universidad Nacional de Colombia. Tesis de doctorado.
- Pizano, C., y García, H. (2014). El Bosque Seco Tropical en Colombia. In C. Pizano y H. García (Eds.), *Biblioteca Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt 2014* (Primera ed). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Humboldt.
- Portillo-Quintero, C. A., y Sánchez-Azofeifa, G. A. (2010). Extent and conservation of tropical dry forests in the Americas. En: *Biological Conservation*, 143(1), 144-155. <https://www.semanticscholar.org/paper/Extent-and-conservation-of-tropical-dry-forests-in-Portillo-Quintero-Sánchez%E2%80%90Azofeifa/6d001bc2f4e92d449a0ea0ca39450a4a15bae2c4>
- Roshinus, A., Princely, N., Palmer, B., y Yerima, K. (2021). Characterization of agroforestry systems and their effectiveness in soil fertility enhancement in the south-west region of Cameroon. En: *Current Research in Environmental Sustainability*, 3, 100024. doi:10.1016/j.crsust.2020.100024. [https://www.researchgate.net/publication/348600991\\_Characterization\\_of\\_agroforestry\\_systems\\_and\\_their\\_effectiveness\\_in\\_soil\\_fertility\\_enhancement\\_in\\_the\\_south-west\\_region\\_of\\_Cameroon](https://www.researchgate.net/publication/348600991_Characterization_of_agroforestry_systems_and_their_effectiveness_in_soil_fertility_enhancement_in_the_south-west_region_of_Cameroon).
- Sadeghian, S., Rivera, J. M., y Gómez, M. E. (2000). Agroforestería para la Producción Animal en Latinoamérica Impacto de sistemas de ganadería sobre las características físicas, químicas y biológicas de suelos en los Andes de Colombia. *Agroforestería Para La Producción Animal En Latinoamérica*, 77–95.

- Sánchez, M. (1998). Sistemas agroforestales para intensificar de manera sostenible la producción animal en Latinoamérica tropical. *Agroforestería Para La Producción Animal En Latinamerica*, 1–12.
- Sánchez-Romero, R., Balvanera, P., Castillo, A., Mora, F., García-Barrios, L. E., y González-Esquivel, C. E. (2021). Management strategies, silvopastoral practices and socioecological drivers in traditional livestock systems in tropical dry forests: An integrated analysis. En: *Forest Ecology and Management Journal*, 479(August 2020), 118506. <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/7108076>
- Sayer, E. J., Rodtassana, C., Sheldrake, M., Bréchet, L. M., Ashford, O. S., Lopez-Sangil, L., Kerdraon-Byrne, D., Castro, B., Turner, B. L., Wright, S. J., y Tanner, E. V. J. (2020). Academic Press Inc. Revisiting nutrient cycling by litterfall—Insights from 15 years of litter manipulation in old-growth lowland tropical forest
- Sellan, G., Thompson, J., Majalap, N., Robert, R., y Brearley, F. Q. (2020). Impact of soil nitrogen availability and pH on tropical heath forest organic matter decomposition and decomposer activity. En: *Pedobiologia*, 80(June 2019), 150645. doi:10.1016/j.pedobi.2020.150645
- Sadeghian, S., Rivera, J. M., y Gómez, M. E. (2000). Agroforestería para la Producción Animal en Latinoamérica Impacto de sistemas de ganadería sobre las características físicas, químicas y biológicas de suelos en los Andes de Colombia. *Agroforestería Para La Producción Animal En Latinoamérica*, 77–95.
- Sierra, J., and Nygren, P. (2006). Transfer of N fixed by a legume tree to the associated grass in a tropical silvopastoral system. En: *Soil Biology and Biochemistry*, 38(7), 1893-1903. [https://www.researchgate.net/publication/248447734\\_Transfer\\_of\\_N\\_fixed\\_by\\_a\\_legume\\_tree\\_to\\_the\\_associated\\_grass\\_in\\_a\\_tropical\\_silvopastoral\\_system](https://www.researchgate.net/publication/248447734_Transfer_of_N_fixed_by_a_legume_tree_to_the_associated_grass_in_a_tropical_silvopastoral_system)
- Soil Survey Laboratory Methods Manual. Burt, R. Soil Survey Investigations Report No. 42 Version 4.0. November 2004. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service.
- Tiessen, H., Cuevas, E., and Chacon, P. (1994). The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. In *Nature*. Vol. 371, Issue 6500, pp. 783–785. [https://www.researchgate.net/publication/232782372\\_The\\_role\\_of\\_soil\\_organic\\_matter\\_in\\_sustaining\\_soil\\_fertility/link/609d39ee458515c2658c4048/download](https://www.researchgate.net/publication/232782372_The_role_of_soil_organic_matter_in_sustaining_soil_fertility/link/609d39ee458515c2658c4048/download).
- Tweiten, M. A., Hotchkiss, S. C., Vitousek, P. M., Kellner, J. R., Chadwick, O. A., and Asner, G. P. (2014). Resilience against exotic species invasion in a tropical montane forest. En: *Journal of Vegetation Science*, 25(3), 734–749. <https://escholarship.org/content/qt4447z261/qt4447z261>

- USDA-NRCS. (2008). Soil Quality Physical Indicators: Selecting Dynamic Soil Properties to Assess Soil Function. Soil Quality Technical Note No. 10
- Yang, X., Chen, X., y Yang, X. (2019). Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China. En: *Soil and Tillage Research*, 187(June 2018), 85–91.  
[https://www.researchgate.net/publication/332121102\\_Effect\\_of\\_organic\\_matter\\_on\\_phosphorus\\_adsorption\\_and\\_desorption\\_in\\_a\\_black\\_soil\\_from\\_Northeast\\_China](https://www.researchgate.net/publication/332121102_Effect_of_organic_matter_on_phosphorus_adsorption_and_desorption_in_a_black_soil_from_Northeast_China)
- Zhu, X., Zou, X., Lu, E., Deng, Y., Luo, Y., Chen, H., y Liu, W. (2021). Litterfall biomass and nutrient cycling in karst and nearby non-karst forests in tropical China: A 10-year comparison. En: *Science of the Total Environment*, 758, 143619.  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33221014/>

# 3. Indicadores biológicos de la salud del suelo en sistemas silvopastoriles en comparación con otros sistemas agrarios en un bosque seco tropical de Colombia

## 3.1 Resumen

Uno de los aspectos críticos en la agricultura tropical es la degradación de los suelos asociada a los sistemas de monocultivo tanto de cultivos agrícolas como de pasturas. Alternativamente se han desarrollado sistemas silvopastoriles (SSP) que están orientados a sostener la calidad del suelo mientras se producen. Desafortunadamente, existen pocos estudios que soporten los beneficios que estos sistemas pueden tener en la salud del suelo. Por tanto, se estableció un estudio con el objetivo de evaluar el efecto sobre la salud del suelo sometido a diferentes usos y manejo medida a través de indicadores biológicos de la salud del suelo. Para tal fin se usaron los siguientes arreglos que tienen al menos 19 años de establecidos: (i) cultivo intensivo de maíz, (ii) una pastura mixta *M. maximum* y *D. aristatum* (P), (iii) SSP con *M. máximus* + *D. aristatum* y arbustos de totumo (*Crescentia cujete*) y *L. leucocephala* (P+a), (iv) SSP multiestrato con *M. máximus* + *D. aristatum*, *C. cujete* + *L. leucocephala* y árboles (*Guazuma ulmifolia*, *Cassia grandis*, *Albizia saman*) (P+a+A) y (v) como referencia se incluyó un arreglo forestal constituido por un bosque secundario (Bs). Las evaluaciones se hicieron en dos tiempos contrastantes (seco y lluvioso) en suelos del Valle medio del río Sinú que presentaban un gradiente de drenaje. Los indicadores usados fueron: materia orgánica del suelo (MOS), fosfatasa, catalasa, carbón activo oxidable, respiración microbiana medida como CO<sub>2</sub>, pH y P. Aunque hubo efectos individuales e interacciones de los arreglos, el tiempo y el drenaje se puede afirmar que los suelos cultivados con maíz y con el Bs presentaron los indicadores biológicos de salud del suelo más bajos. Por otro lado, los SSP y la P presentaron un comportamiento similar en sus indicadores biológicos, excepto en el C-activo oxidable el cual fue

significativamente mayor en los SSP. Por lo anterior, se puede afirmar que el establecimiento de SSP y una pastura pueden mejorar la salud del suelo en comparación a lo que ocurre en el monocultivo de maíz y el Bs.

**Palabras Claves:** fertilidad del suelo, sistema silvopastoril, sistemas agrícolas, bosque de restauración secundario.

### 3.2 Introducción

Uno de los problemas de los suelos tropicales es la degradación cuando se someten a una ganadería extensiva, ineficiente, sin prácticas de manejo y a los monocultivos tradicionales (Edwards et al., 2019; Angerer, Fox y Wolfe, 2015). Desafortunadamente, en muchos casos el establecimiento de fincas ganaderas se ha hecho a expensas de la destrucción del bosque tropical (Laurance, Sayer y Cassman, 2014; Murphy y Lugo, 1986). En Colombia la ganadería representa un importante renglón económico. Sin embargo, enfrenta diversos problemas como la baja producción de forraje (Vallejo et al., 2012; Vazquez et al., 2020), la degradación de suelos, ganando cada vez más espacios en áreas bajo uso en ganadería extensiva y semi-intensiva, tal como ocurre en el departamento de Córdoba (Ballesteros-Correa, Morelo-García, y Pérez-Torres, 2019; Barragán Hernández, Mahecha-Ledesma, y Cajas-Girón, 2016). Por otro lado, en los monocultivos las prácticas tradicionales de mecanización y fertilización degradan el suelo a través de la pérdida de materia orgánica, el deterioro de propiedades físicas y presumiblemente la afectación de la biodiversidad del suelo (Murgueitio y Calle, 1998; Delgadillo-Vargas, García-Ruiz, y Forero-Álvarez, 2016; Yang, Wang, Li, Qiu, y Liu, 2014).

La producción ganadera sostenible en el marco de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) promueve el establecimiento de los sistemas silvopastoriles (SSP) con múltiples beneficios que generan un mejor aprovechamiento del suelo (Sánchez, 1998), absorben nutrientes a mayor profundidad que son llevados al dosel (Bordron et al., 2019) y aportados en forma de hojarasca (Montagnini, 2011; Murgueitio y Calle, 1998). Una vez depositada la hojarasca sobre el suelo, los microorganismos se encargan de descomponerla y liberar los nutrientes (Song et al., 2017; Tang et al., 2019). De esta manera, los microorganismos del suelo desempeñan funciones importantes en los procesos del ecosistema (Wardle et al., 2004; Kardol et al., 2007; Van der Heijden et al., 2008; Zhang, Cao, Han, y Jiang, 2013), y son esenciales para mantener su integridad del ecosistema, promueven la salud del suelo

y la fertilidad (Muscolo et al., 2014; Zhu et al., 2020; Moebius-Clune et al., 2016). Por tanto, la medición de los procesos biológicos del suelo como la biomasa microbial y su actividad enzimática brinda información relativa del estado de los ecosistemas y particularmente del funcionamiento del suelo (Utobo y Tewari, 2015). Desafortunadamente, no se conoce muy bien las poblaciones microbiales en grupos funcionales y sus actividades enzimáticas en SSP del bosque seco tropical (bs-T) (Alfaia et al., 2000). Estos temas están generando gran atención ya que son la base del diagnóstico de la calidad del suelo y siempre deben incluir un conjunto de atributos ecológicamente relevantes para la calidad del ecosistema (Tang et al., 2019). Entre los índices que han llamado la atención están los índices del análisis de diversidad alpha Shannon, Inverso de Simpson y Chao1, indican la riqueza y la diversidad de las comunidades microbianas del suelo, así como el índice del potencial bioquímico de fertilidad del suelo (Mw), estos índices son importantes indicadores de la fertilidad del suelo. Los anteriores índices no se han evaluado en estos suelos al cambiar su uso y manejo.

La hipótesis de este estudio es que la salud del suelo mejora con el establecimiento de SSP, esto se refleja en indicadores biológicos de salud del suelo, en comparación a lo que ocurre en sistemas agrarios de monocultivo de maíz y una pastura. Tal efecto puede ser condicionado por el tiempo (seco o lluvioso) y por el gradiente de drenaje. Así, se estableció un estudio cuyo objetivo fue evaluar el cambio en la salud del suelo medido en indicadores biológicos en parcelas experimentales con SSP y un bosque de restauración secundaria en comparación a lo que ocurre en un monocultivo de maíz y una pastura mixta *M. maximum* y *D. aristatum*. Para tal fin se usaron los siguientes arreglos: (i) cultivo intensivo de maíz, (ii) una pastura mixta *M. maximum* y *D. aristatum* (P), (iii) SSP con *M. máximus* + *D. aristatum* y arbustos de totumo (*Crescentia cujete*) y *L. leucocephala* (P+a), (iv) SSP multiestrato con *M. máximus* + *D. aristatum*, *C. cujete* + *L. leucocephala* y árboles (*Guazuma ulmifolia*, *Cassia grandis*, *Albizia saman*) (P+a+A) y (v) como referencia se incluyó un arreglo forestal constituido por un bosque secundario (Bs). Las evaluaciones se hicieron en dos tiempos contrastantes (seco y lluvioso) en suelos del Valle medio del río Sinú que presentaban un gradiente de drenaje.

### 3.3 Materiales y métodos

#### 3.3.1 Localización

El estudio se realizó en el Centro de Investigación-Turipaná (Agrosavia, 08°51'N, 75°49'O, 18 m de altitud) ubicado en el municipio de Cereté (Córdoba, Colombia). Este tiene un clima cálido seco, con un período de lluvias de mayo a noviembre y un período seco de diciembre a abril. La precipitación media anual es de 1380 mm, la temperatura promedio de 28°C, humedad relativa de 81% y una evapotranspiración potencial de 1240 mm año<sup>-1</sup> (Estación climatológica Agrosavia-C.I. Turipaná). Según Holdridge (1971) la zona de vida ecológica se clasifica como un bosque seco tropical (Bs-T).

#### 3.3.2 Sistemas silvopastoriles

Los tratamientos consistieron en cinco arreglos: (i) cultivo de maíz (*Zea mays*) (M), (ii) pastura mixta de pastos guinea (*Megathyrsus maximus*) cv. Mombasa y Angleton (*Dichanthum aristatum*) (P) sin fertilización, (iii) arreglo de SSP compuesto por los pastos + totumo (*Crescentia cujete*) + leucaena (*Leucaena leucocephala*) (P+a), (iv) arreglo de SSP multiestrato compuesto por los mismos pastos y arbustos forrajeros + arboles leguminosos de guácimo (*Guazuma ulmifolia*), caña fistula (*Cassia grandis*) y campano (*Albizia saman*) (P+a+A); (v) Bosque secundario (Bs) de restauración natural, establecido con fines de conservación del suelo.

La parcela del cultivo de maíz ha tenido un manejo tradicional durante 25 años en la zona con dos pases de rastra pesada y un pase de rastra liviana o pulidor, irrigación y tuvo aplicaciones al momento de la siembra de fosfato diamónico (DAP) a razón de 100 kg ha<sup>-1</sup>, cloruro de potasio (KCl) 50 kg ha<sup>-1</sup> y Vicor 10 kg ha<sup>-1</sup>; a los 15 días de emergido se adicionó urea 100 kg ha<sup>-1</sup> y KCl 50 kg ha<sup>-1</sup>; a los 25 días de emergido se aplicó nuevamente urea 100 kg ha<sup>-1</sup>. Por otro lado, los SSP tienen tamaño de parcela de 2 ha (100 m x 200 m), con una densidad de arbustos 300 ha<sup>-1</sup> sembrados a una distancia de 4 m x 4 m y arboles inicialmente establecidos a 8 m x 8 m y luego de cuatro años se hizo una entresaca y quedaron a 16 m x 16 m, para una densidad de 11 árboles ha<sup>-1</sup>. Estas parcelas experimentales fueron establecidas en 1998 (Cajas-Giron y Sinclair, 2001; Barragán-Hernández y Cajas-Girón, 2019; Martínez-Atencia et al., 2020).

En la pastura y en los arreglos de los SSP (P+a y P+a+A), desde su establecimiento, ha habido un pastoreo rotacional de bovinos en franjas de 0.4 ha, con periodos de ocupación de 2 días y 28 días de descanso. El mantenimiento de las parcelas correspondió a controles manuales de maleza después de cada pastoreo y a mantenimiento de canales de drenaje. Los bloques se distribuyeron según el drenaje natural (bueno -D1: > 61 mm/hora, moderado-D2: 13 - 60 mm/hora y pobre-D3: < 12 mm/hora). Clasificación teniendo en cuenta la velocidad de infiltración básica del suelo (Madríñan, 1997) (Tabla 2-1). Las parcelas de bosque secundario (de 2 ha) fueron manejadas sin adición de fertilizantes ni riego, no ha habido intervención humana en 20 años.

**Tabla 3-1.** Clasificación de la velocidad de infiltración básica del suelo

CLASE	VALOR (mm/hora)
Muy lenta	< 2
Lenta	3-5
Moderadamente lenta	6-12
Moderada	13-30
Moderadamente rápida	31-60
Rápida	61-100
Muy rápida	101-200
Extremadamente rápida	> 200

Fuente: Madríñan, R. Manual de prácticas de laboratorio de física de suelos. Universidad Nacional de Colombia- Sede Palmira. 1997.

### 3.3.3 Muestreo

En todos los tratamientos, se tomaron muestras de suelo en el horizonte A (0-10 cm). En los tratamientos M, P y Bs, se tomaron 20 submuestras al azar de 50 g de suelo por sitio. En el arreglo SSP "P+a" se tomaron al azar 20 submuestras (50 g cada una) de la pastura y por separado se escogieron al azar 20 arbustos y alrededor de ellos 50 g en cada sitio (30-40 cm desde el tallo). En el SSP P+a+A se hizo lo mismo que en el SSP P+a y adicionalmente se escogieron al azar 20 árboles y se tomaron 50 g por sitio (1-2 m desde

el tallo). En cada caso las submuestras se mezclaron, homogenizaron y se tomó finalmente 1 kg de suelo para el análisis de suelo. El muestreo se repitió en dos época secas y dos lluviosas.

### 3.3.4 Análisis de laboratorio

Las muestras de suelo tanto para la actividad biológica como para las densidades microbianas fueron almacenadas en viales plásticos, preservadas y transportadas en nevera al laboratorio de Biotecnología Ambiental del Suelo de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, allí las muestras se liofilizaron para posteriores análisis. Para los análisis de producción de CO<sub>2</sub> y C-activo oxidable, las muestras fueron secadas en un horno a 40°C por 48 h y luego se pasaron por una malla de 2 mm.

## 3.4 Actividad microbiana

Se incluyeron algunas actividades enzimáticas como herramientas para asignar la sostenibilidad del suelo, tales como fosfatasa y catalasa, dado que son sensibles a cambios generados por el manejo del suelo, son relacionadas a otras propiedades del suelo y proporcionan información sobre el entendimiento de los procesos ecosistémicos, tales como el ciclo de nutrientes entre otros (Trasar et al., 2003).

### 3.4.1 Fosfatasa alcalina

Los ensayos de fosfatasa se realizaron de acuerdo al método de Peláez, Mejía y Planas (2004) y García et al. (2003). Se adicionaron 700 µL p-nitrophenil fosfato 10 mM a tubos de vidrio que tenía 100 ± 2 mg de suelo liofolizado cada uno, después de homogenizar con vortex se incubaron a 25 °C. Las reacciones fueron detenidas a diferentes intervalos de tiempo por adición de 250 µL de CaCl<sub>2</sub> 1 M y 500 µL NaOH 2 M. Se extrajeron 100 µL de sobrenadante y se transfirieron a tubos con 2 mL de agua. El p-nitrofelonato fue cuantificado por la lectura de absorbancia en un Perkin Elmer lambda a 405 nm. La actividad de la fosfatasa fue expresada como µmol de p-nitrophenol liberado por minuto por g de suelo lioilizado. (ver Ecuación 2.1).

$$AE = \frac{C \times V}{P_m \times G \times T} \quad (3.1)$$

Donde:

AE = actividad de la fosfomonoesterasa (µmoles de p-nitrofenol liberado g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>);

C= Cantidad de p-nitrofenol de la muestra ( $\mu\text{g}$ );

V= Factor de dilución en caso de que sea necesario diluir la muestra;

Pm = Peso molecular del p-nitrofenol;

G= Factor relativo al peso de suelo seco utilizado

T= Factor relativo al tiempo de incubación (1 hora)

### 3.4.2 Catalasa

La actividad de la catalasa se determinó por medición de la tasa de descomposición del  $\text{H}_2\text{O}_2$  por 20 minutos a  $37^\circ\text{C}$  usando el método de titulación con  $\text{KMnO}_4$   $0.1 \text{ mol L}^{-1}$  García et al. 2003; Johnson y Temple, 1964). Se pesan 0.5 g de una muestra de suelo en un Erlenmeyer de 125 mL, con 40 mL de agua destilada en un agitador rotatorio. A esto se le añadieron 5 mL de solución de  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 0.3 % y se agitó durante 20 minutos. A continuación, se estabilizó el peróxido restante mediante la adición de 5 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  3 N, el contenido del matraz se filtró a través de papel filtro No. 597 y se colectó en Erlenmeyer de 50 mL, se tomó una alícuota de 25 mL y se tituló con  $\text{KMnO}_4$  0.1 N. Todas las valoraciones se corrigieron por un blanco. Los valores de valoración del filtrado de la suspensión de suelo se restaron de la cantidad de permanganato necesaria para valorar el peróxido inicial y se calcularon en mL de 0.1 N  $\text{KMnO}_4$ . (ver Ecuación 2.2)

$$E = \frac{[BG - (S - B)] * N * 0.5 * V * T}{G} \quad (3.2)$$

Donde:

AE = actividad de la catalasa (mmoles  $\text{H}_2\text{O}_2$  consumidos  $\text{g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )

BG = cantidad de permanganato (mL) gastados en la valoración del blanco sin suelo y con  $\text{H}_2\text{O}_2$

S = cantidad de permanganato (mL) gastados en la valoración de las muestras

B = cantidad de permanganato (mL) gastados en la valoración del control correspondiente a cada muestra de suelo

N = normalidad exacta del permanganato potásico

0.5 = valor constante que procede del cálculo para conocer los mg de  $\text{H}_2\text{O}_2$  que reaccionan con el permanganato [ $\text{PM H}_2\text{O}_2$  (34) /valencia (2)] y del cálculo para obtener la cantidad de  $\text{H}_2\text{O}_2$  en mmoles ( $1/\text{PM H}_2\text{O}_2$ )

V = Factor de dilución 50/25 mL

G = Factor relativo a la cantidad de suelo utilizado (suelo seco que hay en 0.5 g de suelo húmedo)

T = Factor de tiempo (6, ya que la incubación dura 10 minutos)

### 3.4.3 Carbono activo oxidable

El análisis se basó en el método propuesto Weil et al. (2003). Se transfirieron 2.5 g de suelo seco a un tubo de centrifuga de polipropileno de 50 mL. A cada tubo, se le añadieron 18 mL de agua desionizada y 2 mL de solución de  $\text{KMnO}_4$  0.2 M, posteriormente el tubo se agitó durante exactamente 2 min a 240 oscilaciones por minuto. Los tubos se retiraron del agitador y se dejaron reposar durante exactamente 10 minutos. Los tiempos de agitación y sedimentación son muy importantes con este método, por lo que se procesaron en lotes de 10 muestras o menos. Después de 10 min, 0.5 mL del sobrenadante se transfirieron a un segundo tubo de centrifuga de 50 mL y se mezclaron con 49.5 mL de agua desionizada. Luego se midió la absorbancia de la muestra se leyó en un espectrofotómetro Perkin Elmer lambda 25 a 550 nm; previamente se realizó una línea de calibración con estándares internos con  $\text{KMnO}_4$  con cuatro concentraciones 0.05, 0.1, 0.1, 0.15 y 0.2 M. Finalmente, El C-activo oxidable con permanganato se determinó con la formula de Weil et al. (2003). (ver Ecuación 2.3)

$$\text{C – activo oxidable (mg kg}^{-1}\text{suelo) = } [0.02 \text{ mol L}^{-1} - (a + b \times \text{Abs})] \times 9\,000 \text{ mg C mol}^{-1} \times \left( \frac{0.02 \text{ L}}{0.0025 \text{ Kg}} \right) \quad (3.3)$$

Donde:

0.02 mol L<sup>-1</sup> es la concentración inicial de  $\text{KMnO}_4$

a = es el intercepto

b = es la pendiente de la línea estándar

Abs = es la absorbancia de la muestra desconocida

9 000 es la cantidad de C oxidado por 1 mol de  $\text{KMnO}_4$  pasando de  $\text{Mn}^{+7}$  a  $\text{Mn}^{+4}$

0.02 L volumen de la solución de  $\text{KMnO}_4$  que reacciona

0.0025 kg de la masa de suelo usada en la reacción

### 3.4.4 Producción de $\text{CO}_2$

Se pesaron 50 g de una muestra de suelo se llevaron a un frasco de vidrio con cierre hermético y capacidad de 500 mL. La muestra se humedeció a capacidad de campo. En

el centro del frasco se ubicó un pequeño trípode de alambre de hierro, calibre de 2 mm, con el fin de colocar encima un frasco de vidrio de 30 mL, para que no tuviera contacto con el suelo, a este frasco se le adicionaron 10 mL de NaOH 0.5 M, con una macropipeta de 1 a 10 mL. El frasco de vidrio se cerró en forma hermética, evitando cualquier intercambio de aire con la atmosfera. Los frascos y sus contenidos se incubaron por 24 horas a temperatura ambiente (27-28°C). Luego de ese tiempo, se retiraron los frascos de vidrio de 30 mL y a cada uno se le adicionó 10 mL cloruro de bario 0.5 M, a fin de precipitar todo el CO<sub>2</sub> absorbido, usando fenolftaleína al 0.2% como indicador. Luego, se valoró con una solución de HCl 0.5 M lentamente y con agitación hasta que la solución viró a rosado. El volumen de HCl gastado se registró. Paralelamente, se montaron 3 blancos con solo NaOH al 0.5 M. (ver Ecuación 2.4)

$$C - \text{CO}_2 \text{ desprendido} = \frac{[(B-S) \times M \times 6]}{G \times T} \quad (3.4)$$

Donde:

B = Volumen de HCl utilizado para titular el blanco (mL)

S = Volumen de HCl utilizado para titular la muestra (mL)

M = Molaridad del HCl

6 = Factor de conversión, considerando que 1 mL de NaOH 1 M equivale a 6 mg de C-CO<sub>2</sub>

G = Factor relativo a la cantidad de suelo (g) utilizada en el ensayo (en este caso, suelo seco en 50 g de suelo húmedo)

T = Factor relativo al tiempo de incubación, en días.

### 3.4.5 Aislamiento y conteo de grupos funcionales

Para la recuperación de los grupos funcionales se tomó un gramo de suelo (por triplicado) en base seca de cada muestra, se suspendió en 9 mL de agua peptonada estéril en Erlenmeyer con agitación constante por media hora, luego se realizaron las diluciones 10<sup>-2</sup>, 10<sup>-3</sup>, 10<sup>-4</sup> y 10<sup>-5</sup>. Luego, se transfirió 0.1 mL de la respectiva dilución a cajas de Petri que contenían el medio selectivo, posteriormente las cajas de Petri se almacenaron por 8 días a 28°C, al final se realizaron los recuentos en placa. Los valores se expresaron como Número de microorganismos por g de peso seco teniendo en cuenta la humedad del suelo.

- *Medios selectivos*

Los medios fueron aforados a 1 L con agua destilada y esterilizados en autoclave (120 °C, 30 min, 0.1 MPa). A continuación, se presentan las siguientes composiciones por litro.

- Microorganismos Celulolíticos usando el método descrito por Lednická et al, (2000): 5 g carboximetil celulosa, 1g  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 50 mL de solución salina 0.85 % y Agar Agar 15 g. Para la revelación de los halos claros de actividad celulolítica se utilizó rojo congo al 0.1 % en agua por media hora, se removió y adicionó NaCl 1 M.
- Microorganismos fijadores de nitrógeno de vida libre, el medio descrito por Dobereiner y Day (1976): 0.4 g  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , 0.1 g  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , 0.2 g  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 0.1 g NaCl, 0.02 g  $\text{CaCl}_2$ , 0.01  $\text{FeCl}_2$ , 0.002 g  $\text{MoO}_4\text{Na} \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ , 5 g ácido málico, azul de bromotimol (solución alcohólica 0.5%) Agar Agar 15 g y finalmente se adicionaron 100 mg de benomil  $\text{L}^{-1}$  al medio de cultivo cuando el medio de cultivo alcanzó 45 °C.
- Microorganismos proteolíticos, se utilizó el medio de Bizuye et al. (2014) adicionando leche y los constituyentes del método Wood (1980) modificado por Andrade: 5 g caseína, 0.1 g extracto de levadura, 1.5 g  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , 0.5 g  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y 50 mL de solución salina 0.85 %. Adicionalmente, se adicionaron 10 g leche descremada al medio de cultivo. El medio inoculado se incubó 3 días a temperatura ambiente y finalmente se adiciono HCl 0.1 % para evidenciar lo halos.
- Microorganismos Solubilizadores de fósforo, medio descrito por Osorio y Habte (2001): 1.0 g NaCl, 0.2 g  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 0.4 g  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 1.0 g  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 10 g Glucosa y Agar Agar 15 g, roca fosfórica no acidulada, azul de bromotimol 5mL  $\text{L}^{-1}$  y 100 mg de benomil en (solución alcohólica al 0.5%), cuando el medio alcanzo 45 °C se adicionaron 100 mg de benomil por  $\text{L}^{-1}$  para el conteo de bacterias y 100 mg de sulfato de estreptomicina el medio a 45 °C para el conteo de los hongos.

### 3.4.6 Biodiversidad taxonómica

- *Muestreo y extracción de DNA*

Se obtuvieron muestras de cada uno de los arreglos: M, P, SPP: P+a, P+a+A y Bs recolectados en el Centro de investigación de Turipaná en Montería (Córdoba). La

extracción de DNA se realizó usando el kit de aislamiento de DNA del suelo Powermax® (laboratorios MO BIO), de acuerdo con las instrucciones del fabricante, el DNA se cuantificó usando el ensayo fluorescente PicoGreen® y la calidad del DNA se evaluó mediante gel de electroforesis (1% de agarosa).

- *Amplificación y secuenciación masiva*

Se El ADN genómico fue amplificado usando el set de primers universales 341F Y 805R (Takahashi et al., 2014), los cuales amplifican las regiones V3 y V4 del gen 16S rRNA generando un producto de 464 pb. Los amplificados fueron secuenciados en la plataforma Illumina MiSeq, con metodología paired end. Los primers permitieron multiplexar las secuencias en librerías cada análisis en la plataforma.

- *Análisis de secuencias del gen 16S rRNA y asignación taxonómica*

Se ingresaron las secuencias forward y reverse al programa QIIME2 v 2021.4 (Boyle et al., 2019), dentro del programa QIIME, dejando una precisión de 99% en las secuencias. Luego se hizo remoción de las secuencias quiméricas como parte del proceso del algoritmo DADA2 (Callahan et al., 2016). Las unidades taxonómicas operativas, OTUs obtenidas de este proceso, son generadas por agrupación de secuencias únicas y definidas como variantes de la secuencia de amplicones, en inglés ASVs, y detectan cambios de un nucleótido, por lo que su asignación taxonómica es del 100%. Los ASVs se asignan teniendo como referencia la base de datos SILVA 128 (Myer et al., 2020).

- *Cálculos de diversidad*

Dentro del proceso pipeline del QIIME2 se realiza el cálculo de las métricas de la diversidad alfa, esta fue calculada usando estimadores no paramétricos tales como Chao1, diversidad Shannon fueron obtenidas según (Kim et al., 2017).

### 3.4.7 Análisis estadísticos

El muestreo se realizó bajo un diseño experimental de bloques al azar, desbalanceado, asimétrico, y con efectos fijos. Se consideraron como factores de muestreo el arreglo seleccionado según el uso del suelo correspondiente (M, P, P+a, P+a+A y Bs) representó un tratamiento (para un total de cinco) y tres condiciones de drenaje (bueno, regular, pobre), cada uno tuvo 3 réplicas por muestreo. Los muestreos se hicieron en dos épocas secas y dos lluviosas, para un total de 96 unidades experimentales (Tabla 2-2).

**Tabla 3-2:** Número de muestras colectadas en cada una de las combinaciones de arreglos y drenajes para un tiempo de muestreo.

Drenaje	Arreglo				
	M	P	P+a	P+a+A	Bs
Bueno	3	1	2	3	3
Moderado	0	1	2	3	0
Pobre	0	1	2	3	0

A los residuales de los modelos se les hizo un diagnóstico de análisis de homogeneidad de la varianza, independencia, normalidad y detección de valores influyentes. Los datos fueron sometidos a análisis de varianza y a la prueba de comparación de medias de Tukey. En ambos casos se empleó un nivel de significancia ( $P \leq 0.05$ ). Los análisis se realizaron en el software libre R (3.6.5), R-Studio versión (1.4.0). A continuación, se describe el modelo lineal utilizado para los índices químicos (ver Ecuación 2.5)

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{i,j} + (\alpha\gamma)_{i,k} + (\beta\gamma)_{j,k} + (\alpha\beta\gamma)_{i,j,k} + E_{ijk} \quad (3.5)$$

Donde,

$Y_{ijk}$  : valor de la respuesta en la i-ésima observación del arreglo i, del nivel j-ésimo drenaje j, del k-ésimo tiempo k.

$\mu$ : media global

$\alpha_i$ : efecto del arreglo i (i = M, P, P+a, P+a+A y Bs)

$\beta_j$  : efecto del i-ésimo drenaje j (j = bueno, moderado y pobre)

$\gamma_k$  : efecto del k-ésimo tiempo k (k = 1º muestreo t: seco, 2º muestreo t: seco, 1º muestreo t: lluvioso,

2º muestreo t: lluvioso).

$(\alpha\beta)_{i,j}$  : interacción del i-ésimo arreglo con el j-ésimo drenaje

$(\alpha\gamma)_{i,k}$  : interacción del i-ésimo arreglo con el k-ésimo tiempo

$(\beta\gamma)_{j,k}$  : interacción del j-ésimo drenaje con el k-ésimo tiempo

$(\alpha\beta\gamma)_{i,j,k}$  : interacción del i-ésimo arreglo con el j-ésimo drenaje y el k-ésimo tiempo

$E_{ijk}$ : error de la i-ésimo arreglo del j-ésimo drenaje y del k-ésimo tiempo

### 3.5 Resultados

La tabla 2-3 presenta la significancia en el análisis de varianza de los factores arreglo, tiempo, drenaje y sus interacciones sobre los indicadores biológicos del suelo estudiados. Se observa que el tiempo tiene un efecto significativo en todas las variables. Mientras que los arreglos y el drenaje solo en algunos. En general, los niveles de significancia ( $P$ ) fueron  $\leq 0.05$ , excepto para la interacción AxT y AxD para el  $\text{CO}_2$ . Vale la pena resaltar que hubo significancia en la interacción triple AxTxD para los MSP-Hongos. Es necesario tener en cuenta que como el diseño experimental fue desbalanceado, en las interacciones AxD el modelo es incompleto.

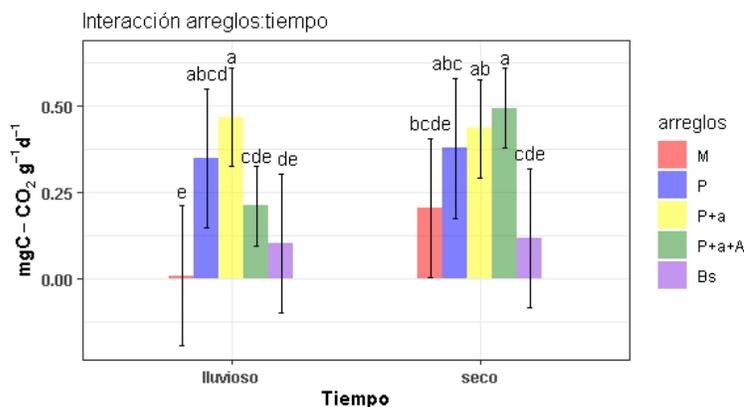






### 3.5.1 Respiración (CO<sub>2</sub>)

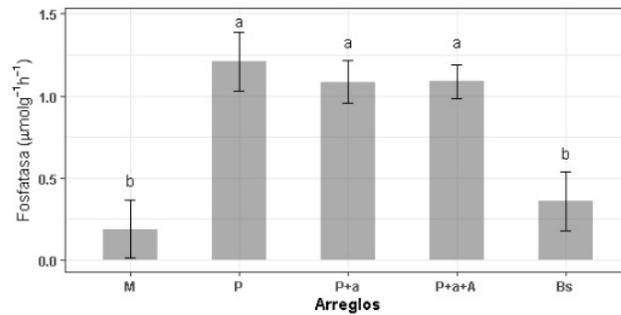
Se detectó una interacción significativa ( $P \leq 0.05$ ) por el factor arreglo y la interacción (AxT) (Tabla 2-2). El contenido de CO<sub>2</sub> en el suelo fue diferente en el tiempo lluvioso y seco, cuando el SSP (P+a+A) estuvo en el tiempo seco fue significativamente mayor que en el tiempo lluvioso (0.493<sup>a</sup> vs. 0.209<sup>cde</sup> mg C- CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>), el resto de los arreglos no presentaron diferencias significativas (Figura 2-1).



**Figura 3-1:** Contenido de C-CO<sub>2</sub> (mg g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>) en función de la interacción arreglos x tiempo (AxT). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados con dos tiempos (lluvioso y seco). Cada valor representa el promedio de de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

### 3.5.2 Fosfatasa alcalina

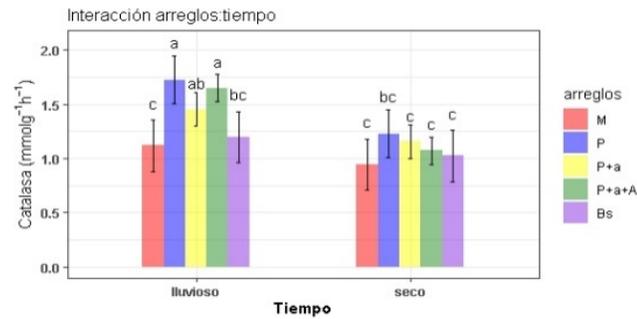
La actividad de la enzima fosfatasa en el suelo fue afectada significativamente por el factor arreglos ( $P \leq 0.001$ ) (Tabla 2-2). Se observó que los arreglos P, P+a+A y P+a (1.213<sup>a</sup>, 1.089<sup>a</sup> y 1.087<sup>a</sup> ( $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ), respectivamente) la actividad de la fosfatasa fue significativamente mayor que en los arreglos Bs y M (0.359<sup>b</sup> y 0.189<sup>b</sup>  $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ , respectivamente). Por otro lado, la actividad fosfatasa presentó diferencias significativas ( $P \leq 0.01$ ) en función del tiempo: en el tiempo lluvioso tuvo una actividad ligeramente mayor (0.857<sup>a</sup>  $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) que la que se observó en el tiempo seco (0.718<sup>b</sup>  $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) (Figura 2-2).



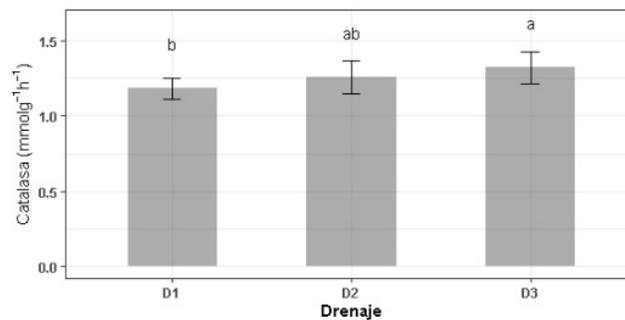
**Figura 3-2:** Actividad fosfatasa ( $\mu\text{mol g}^{-1}\text{h}^{-1}$ ) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

#### Catalasa

Se detectó una interacción significativa entre los factores “arreglo x tiempo” (AxT) ( $P \leq 0.01$ ) (Tabla 2-2). La actividad de la catalasa fue diferente en el tiempo lluvioso y seco, cuando el SSP P+a, P+a+A y la P estuvieron en el tiempo lluvioso tuvieron una actividad de la catalasa significativamente mayor que en el tiempo seco ( $1.724^a$ ,  $1.649^a$  y  $1.449^{ab}$  vs.  $1.226^{bc}$ ,  $1.073^c$  y  $1.154^c$   $\text{mmol g}^{-1}\text{h}^{-1}$ , respectivamente). Los arreglos Bs y M no presentaron diferencias significativas ( $0.946$ - $1.194$ ) en el tiempo lluvioso y seco (Figura 2-3). También se vio afectada de manera significativa ( $P \leq 0.05$ ) la actividad catalasa en función del factor drenaje (Tabla -2). La actividad catalasa fue significativamente mayor en las parcelas pobremente drenadas ( $1.32$   $\text{mmol g}^{-1}\text{h}^{-1}$ ) con respecto a las bien drenadas ( $1.18$   $\text{mmol g}^{-1}\text{h}^{-1}$ ) y las parcelas moderadamente drenadas presentaron un valor intermedio ( $1.26$   $\text{mmol g}^{-1}\text{h}^{-1}$ ) que no fue significativamente diferente de las anteriores (Figura 2-4).



**Figura 3-3:** Actividad catalasa ( $\text{mmol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción arreglos x tiempo (AxT). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados en dos tiempos (lluvioso y seco). Cada valor representa el promedio de de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

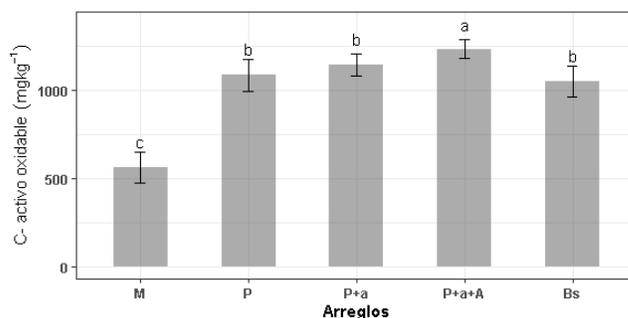


**Figura 3-4:** Actividad catalasa ( $\text{mmol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) en el suelo en función del drenaje (D1: bien, D2: moderado y D3: pobre). Cada valor representa el promedio de de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

### 3.5.3 C- activo oxidable

Hubo diferencias significativas ( $P \leq 0.001$ ) en el valor del C- activo oxidable del suelo por el factor “Arreglo” y diferencias significativas ( $P \leq 0.1$ ) por el factor “Tiempo” (Tabla 2-2). Así, el valor de C-activo oxidable tuvo el siguiente orden decreciente P+a+A ( $1\ 232^a \text{ mg kg}^{-1}$ ) > P+a = P = Bs ( $1\ 142^b$ ,  $1\ 083^b$ ,  $1\ 047^b \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente) > M ( $562 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Figura

2-5). En cuanto al tiempo, el carbono activo oxidable fue significativamente mayor en tiempo lluvioso ( $1\ 034\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ ) que en el tiempo seco ( $992\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ ).



**Figura 3-5:** C- activo oxidable ( $\text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ ) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

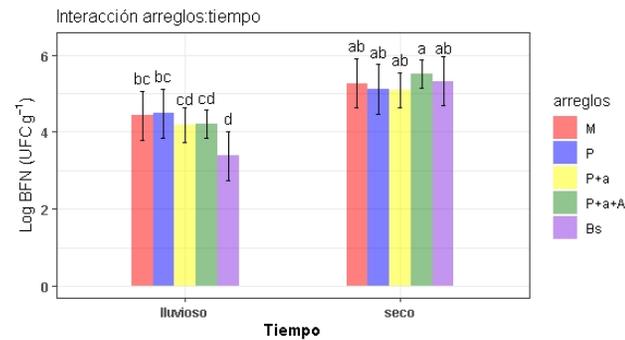
### 3.5.4 Grupos Funcionales

- *Microorganismos celulolíticos*

La densidad de los microorganismos celulolíticos en el suelo se vio afectada de manera significativa ( $P \leq 0.001$ ) por el factor tiempo (Tabla 2-2). La cantidad de microorganismos celulolíticos fue significativamente mayor en el tiempo lluvioso ( $10^{5.89}\ \text{UFC}\ \text{g}^{-1}$ ) que en el tiempo seco ( $10^{5.54}\ \text{UFC}\ \text{g}^{-1}$ ).

- *Bacterias fijadoras de nitrógeno*

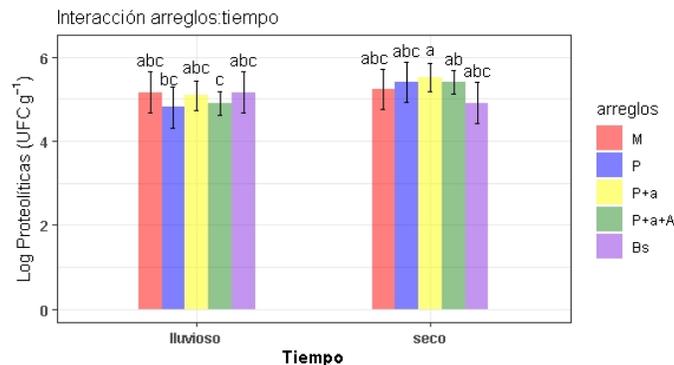
Se detectó una interacción significativa ( $P \leq 0.05$ ) AxT (Tabla 2-2) en la biomasa de BFN del suelo. Se evidenció que la densidad de las bacterias fijadoras de nitrógeno fue diferente en el tiempo lluvioso y seco, cuando los arreglos SSP P+a+A y P+a, y P, Bs y M ( $10^{5.52ab}$ ,  $10^{5.09a}$ ,  $10^{5.11ab}$ ,  $10^{5.32ab}$  y  $10^{5.27ab}\ \text{UFC}\ \text{g}^{-1}$ , respectivamente) estuvieron en tiempo seco fueron significativamente mayores que en el tiempo lluvioso ( $10^{4.20cd}$ ,  $10^{4.19cd}$ ,  $10^{4.48bc}$ ,  $10^{3.38d}$  y  $10^{4.42bc}\ \text{UFC}\ \text{g}^{-1}$ , respectivamente), pero estos fueron diferentes entre si (Figura 2-6).



**Figura 3-6:** Logaritmo del número de Bacterias fijadoras de nitrógeno (log UFC g<sup>-1</sup>) en el suelo en función de la interacción arreglos x tiempo (AxT). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados en dos tiempos (lluvioso y seco). Cada valor representa el promedio de de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

- *Microorganismos proteolíticos*

Se detecto una interacción significativa ( $P \leq 0.05$ ) AxT (Tabla 2-2) en la densidad de los microorganismos proteolíticos del suelo. Se observó que los proteolíticos fueron diferentes en su biomasa en el tiempo lluvioso y seco, cuando el SSP P+a+A estuvo en tiempo seco ( $10^{5.40ab}$  UFC g<sup>-1</sup>) fue significativamente mayor que en el tiempo lluvioso ( $10^{4.91c}$  UFC g<sup>-1</sup>) y no presentó diferencias con el resto de los valores ( $10^{4.81}$ - $10^{5.51}$  UFC g<sup>-1</sup>) (Figura 2-7).

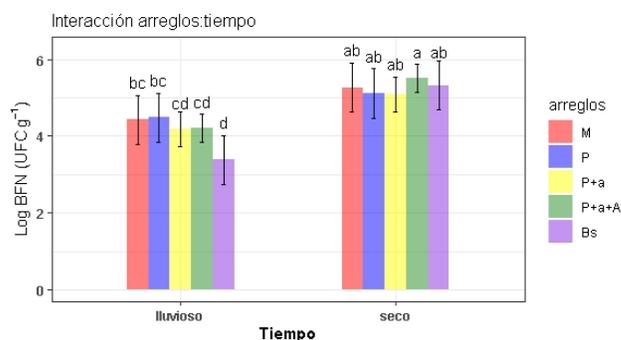


**Figura 3-7:** Logaritmo del número de Proteolíticos (log UFC g<sup>-1</sup>) en el suelo en función de la interacción arreglos x tiempo (AxT). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto +

árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados en dos tiempos (lluvioso y seco). Cada valor representa el promedio de de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

▪ *Microorganismos solubilizadores de P: Bacterias*

Se detectó una interacción significativa ( $P \leq 0.05$ ) AxT (Tabla 2-2). La densidad de bacterias solubilizadoras de fósforo en el suelo fue diferente en el tiempo lluvioso y seco, cuando el SSP P+a+A estuvo en tiempo seco fue significativamente menor que en el tiempo lluvioso ( $10^{4.62a}$  vs.  $10^{3.13b}$  UFC  $g^{-1}$ ), a su vez en el tiempo lluvioso se presentaron diferencias significativas entre el SSP P+a+A y la P ( $10^{1.13b}$  vs.  $10^{5.02a}$  UFC  $g^{-1}$ ), el resto de los arreglos no presentaron diferencias significativas con el resto de los valores ( $10^{3.78}$  -  $10^{4.80}$  UFC  $g^{-1}$ ) (Figura 2-8).

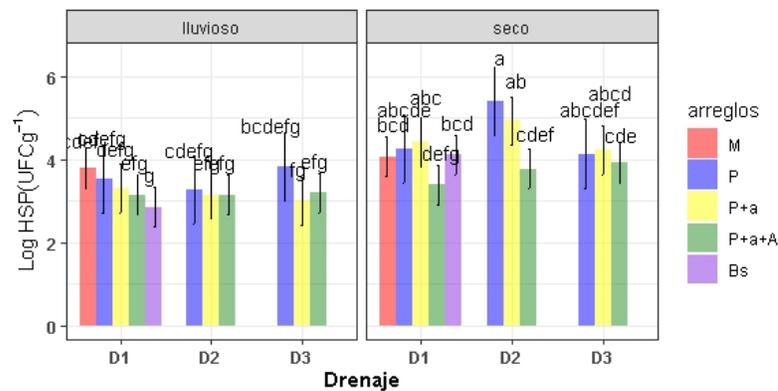


**Figura 3-8:** Logaritmo del número de Bacterias solubilizadoras de fósforo (log UFC  $g^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción arreglos x tiempo (AxT). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados en dos tiempos (lluvioso y seco). Cada valor representa el promedio de de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

▪ *Microorganismos solubilizadores de P: Hongos solubilizadores de P*

La densidad de hongos solubilizadores de P en el suelo fue afectada de manera significativa ( $P \leq 0.001$ ) por los factores arreglos y tiempo, así como por las interacciones AxT y la interacción AxTxD (Tabla 2-2). En la interacción se observa que el arreglo bosque secundario presentó el valor más bajo en tiempo lluvioso ( $10^{2.85}$  UFC  $g^{-1}$ ), seguido del SSP

P+a y P+a+A ( $10^{3.0}$  y  $10^{3.15}$  UFC  $g^{-1}$ ), el M presentó valores intermedios ( $10^{3.79}$ - $10^{4.06}$   $g^{-1}$ ) (Figura 2-9). En el tiempo seco se detectó que las parcelas bien drenadas en orden decreciente fueron, el SSP P+a > P > Bs > el SSP P+a+A ( $10^{4.42}$  >  $10^{4.25}$  >  $10^{4.12}$  >  $10^{3.39}$   $g^{-1}$ , respectivamente), presentaron diferencias significativas, en las moderadamente drenadas se presentaron los valores más altos en los arreglos P, SSP P+a ( $10^{5.39}$ ,  $10^{4.93}$   $g^{-1}$ ), seguidos del SSP P+a+A ( $10^{3.39}$   $g^{-1}$ ), presentaron diferencias significativas, y tuvieron un comportamiento similar a las pobremente drenadas, el SSP P+a, P ( $10^{4.23}$ ,  $10^{4.14}$   $g^{-1}$ ) seguido del SSP P+a+A ( $10^{3.92}$   $g^{-1}$ ). En el tiempo lluvioso no se presentaron diferencias significativas ( $10^{3.15}$ - $10^{3.84}$   $g^{-1}$ ).



**Figura 3-9:** Logaritmo del número de Hongos solubilizadores de P (HSP) ( $\log$  UFC  $g^{-1}$ ) en el suelo en función de la interacción arreglos x drenaje x tiempo (AxTxD). Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs) combinados en tres niveles de drenaje: bueno (B1), moderado (B2) y pobre (B3) y dos tiempos (lluvioso y seco). Cada valor representa el promedio de de tres repeticiones y 4 tiempos (2 lluviosos y 2 secos). Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

### 3.5.5 Índice del potencial bioquímico de la fertilidad del suelo (Mw)

Las actividades enzimáticas de catalasa alcalina y fosfatasa se escogieron por su amplia ocurrencia y su papel significativo en la transformación de la MOS. En este trabajo estas dos actividades enzimáticas resultaron ser significativamente diferentes en función de los

arreglos silvopastoriles, agrícola y forestal. La fosfatasa alcalina (EC 3.1.3.1) es responsable de la mineralización del P orgánico y la catalasa (EC 1.11.1.6) se considera como un indicador de actividad microbiana aeróbica, se ha relacionado al número de microorganismos aerobios y a la fertilidad del suelo (Kompała-Bąba et al., 2021; Trasar-Cepeda et al., 1999). Teniendo como base estas actividades enzimáticas y el contenido de carbono del suelo se calculó este índice propuesto por (Kompała-Bąba et al., 2021) (ver Ecuación 2.6).

$$Mw = (Actividad Fosfatasa alcalina + Actividad Catalasa) \times COS \quad (3.6)$$

**Tabla 3-4:** Índice del potencial bioquímico de la fertilidad del suelo calculado con la actividad catalasa y fosfatasa alcalina en función de los arreglos (0-10 cm): Pastura, Pastura+arbustos (P+a), Pastura + arbustos (P+a+A), (Maíz) y Bosque secundario (Bs), en la CI Turipaná del Valle del río Sinú (Córdoba) (Kompała-Bąba et al., 2021).

Arreglo	Mw
Maíz	1.90 <sup>b</sup>
Bosque secundario	5.56 <sup>b</sup>
Pastura	15.40 <sup>a</sup>
SSP P+a	15.39 <sup>a</sup>
SSP P+a+A	15.27 <sup>a</sup>

Este índice permite valorar el potencial bioquímico en relación con los procesos que ocurren en el suelo como las transformaciones de P y la actividad microbiana aeróbica del suelo. Ese índice presentó los valores significativamente más bajos en el arreglo M, seguido del Bs (1.90b y 5.56b); los valores significativamente más altos se encontraron en los arreglos P, SSP P+a y SSP P+a+A (15.40<sup>a</sup>, 15.39<sup>a</sup> y 15.27<sup>a</sup>). Resultados similares han sido observados en Costa Rica donde se encontró que la actividad enzimática fue mayor en una pastura comparada con el bosque (seco tropical) y los sistemas agrícolas (Acosta-Martínez et al., 2007)

### 3.5.6 Análisis microbiológico por secuenciamiento profundo

Se realizó un análisis exploratorio del estudio metataxonómico a cada uno de los arreglos (M, SSP P+a, P+a+A, P y Bs). La secuenciación masiva arrojó un total de (P) 103 192, (M) 103 380, (Bs) 88 061, (P+a) 106 483 y (P+a+A) 89 270 lecturas crudas para la región

variable V1-V3 del gen ribosomal 16S rRNA. El número final de ASVs fue mayor en el SSP P+a (1 503), seguido de la P (1 439), M (1 409), (1 322) Bs y 1 257 en el SSP P+a+A. El mayor número de ASVs indica que hay mayor diversidad microbiana. Además, las curvas de rarefacción para las cinco muestras de suelo alcanzaron el Plateau, demostrando que se tomó gran parte de la diversidad microbiana en el muestreo.

El 100% de las lecturas fueron asignadas al dominio Bacteria. Las regiones para cada muestra coinciden en que los 10 *Phylum* más abundantes son *Actinobacteriota*, *Proteobacteria*, *Verrucomicrobiota*, *Acidobacteriota*, *Planctomycetota*, *Firmicutes*, *Chloroflexi*, *Myxococcota*, *Bacteroidota* y *Nitrospirota* (Figura 2-10), variando ligeramente su abundancia en cada arreglo. El 35 % de los ASVs fueron clasificados en el nivel de género, el 65 % restante se pudo asignar a nivel de *Phylum*. Los géneros y las familias fueron semejantes para los arreglos, pero diferentes en su abundancia.

Las familias más abundantes: *Gaiellales*, *Chthoniobacterales*, *Xanthobacteraceae*, *Tepidisphaerales*, *Bacillaceae*, *Solirubrobacterales*, *Vicinamibacterales*, *Genmatales*, *Rhizobiales* y *Sphingomonadales*. En la pastura los 10 géneros más abundantes (en orden descendente) fueron *Candidatus Udeaobacter* (género desconocido), *Gaiella*, *Bacillus*, *Streptomyces* y *Candidatus Solibacter* (género desconocido) y *Acidothermus*; en el arreglo del maíz: *Gaiella*, *Bacillus*, *Nocardiodides*, *Solirubrobacter*, *Candidatus Udeaobater* (género desconocido), *Solirubrobacter*; en el Bosque secundario: *Gaiella*, *Bacillus*, *Solirubrobacter*; *Streptomyces* y *MND1* (género desconocido); en el arreglo SSP P+a: *Candidatus Udeaobater* (género desconocido), *Gaiella*, *Bacillus*, *ArDumBino63-1*(género desconocido), y *RB41* (género desconocido); en el arreglo SSP P+a+A: *Gaiella*, *Candidatus Udeaobater* (género desconocido), *Bacillus*, *Nocardiodides* y *Streptomyces*. Las familias correspondientes fueron *Chthoniobacteriaceae*, *Gaillaceae*, *Bacillaceae*, *Solirubrobacteriaceae*, *Streptomiceae* y *Nocardiodaceae* (Figura 2-11).

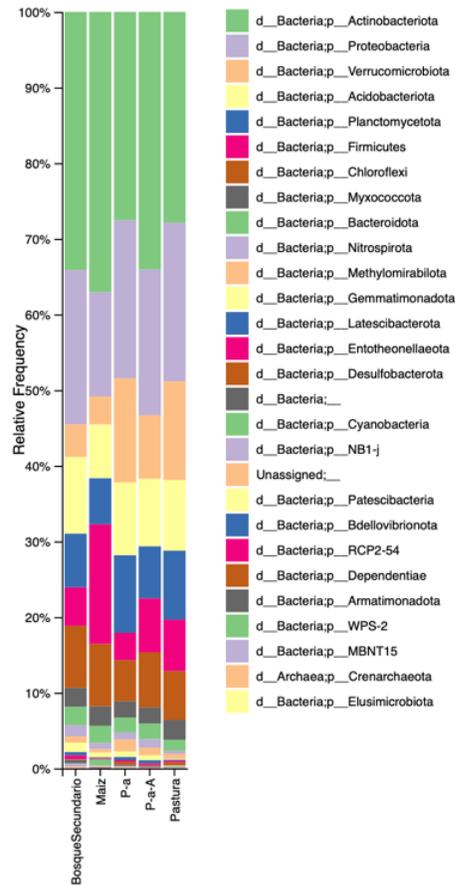
### 3.5.7 Índices de biodiversidad

Los índices de biodiversidad calculados Chao1, Inverso de Simpson y Shannon se muestran en la Tabla 2-5. El índice de Chao1 estima la riqueza de la comunidad microbiana y los índices Inverso de Simpson y Shannon se determinan para estimar su biodiversidad (Teng y Zhou, 2018). Se observa que estos índices de riqueza fueron más altos en la P y

el Bs (2786.0 y 2375.0, respectivamente), con valores intermedios en el SSP P+a (1403.0); los valores más bajos en riqueza microbiana se detectaron en los arreglos M (967.0) y en el SSP P+a+A (699.2). Por otro lado, la biodiversidad-Shannon fue mayor en el arreglo M (4.970329), con valores intermedios en el Bs y el SSP P+a (4.959787 y 4.959828, respectivamente), y los valores más bajos en la P (4.943475), y el SSP P+a+A (4.925380). El comportamiento fue similar con el Índice Inverso de Simpson.

**Tabla 3-5:** Análisis exploratorio de la biodiversidad del suelo en función de los arreglos (0-10 cm): Pastura, Pastura+arbustos (P+a), Pastura + arbustos (P+a+A), (Maíz) y Bosque secundario (Bs), en la CI Turipaná del Valle del río Sinú (Córdoba).

Arreglo	Inverso de Simpson	Shannon	Chao1
Maíz	127.1456	4.943475	2786.0
Bosque secundario	125.5681	4.959787	967.0
Pastura	123.4610	4.943475	2375.0
SSP P+a	126.2477	4.959828	1403.0
SSP P+a+A	121.2837	4.925380	699.2



**Figura 3-10:** Abundancias relativas a nivel de Phylum del suelo en función de los arreglos (0-10 cm): Pastura, Pastura+arbustos (P+a), Pastura + arbustos (P+a+A), (Maíz) y Bosque secundario (Bs), en la CI Turipaná del Valle del río Sinú (Córdoba).



**Figura 3-11:** Abundancias relativas de *Phylum*, *Orden*, *Clase*, *Familia* y *Género*, del suelo en función de los arreglos (0-10 cm): Pastura, Pastura+arbustos (P+a), Pastura + arbustos (P+a+A), (Maíz) y Bosque secundario (Bs), en la CI Turipaná del Valle del río Sinú (Córdoba).

### 3.6 Discusión

Los resultados confirman la hipótesis de los indicadores biológicos de salud del suelo pueden ser afectados por el establecimiento de SSP, en comparación a lo que ocurre en el sistema agrario de monocultivo de maíz. Además, tal efecto puede estar condicionado por el estado del tiempo del año (seco, lluvioso) y por el gradiente de drenaje. En particular se encontró que los suelos de los SSP presentaron mayores contenidos de C-activo oxidable corroborando este análisis como un indicador sensible de cambios en el manejo del suelo, tal y como se observó en el cultivo de maíz, donde se presentó en valor más

bajo (Figura 2-5) (Culman et al., 2012). En cuanto a la actividad microbiana, se detectaron mayores actividades enzimáticas en la fosfatasa alcalina y la catalasa en los SSP P+a y SSP P+a+A que, en el monocultivo de maíz, el mismo comportamiento se presentó con la respiración microbiana determinada como producción de CO<sub>2</sub>.

Al considerar las propiedades fisicoquímicas del suelo en función de los arreglos (Tabla 2-6), es claro que los arreglos M y Bs presentan los valores más bajos en las variables MOS, Nt, P, relación C: N, actividades fosfatasa y catalasa, respiración microbiana, carbono activo y potencial *Mw* excepto el pH, que fue más bajo en la pastura.

**Tabla 3-6:** Valores promedio de propiedades del suelo en función de los arreglos (0-10 cm): Pastura, Pastura+arbustos (P+a), Pastura + arbustos (P+a+A), Cultivo (Maíz) y Bosque secundario (Bs), Turipaná (Córdoba). Cada valor representa el promedio de 4 repeticiones. Promedios con letra minúsculas diferentes, en cada arreglo, son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Comparaciones horizontales. Fuente: Ocampo (2022).

	M	P	SSP (P+a)	SSP (P+a+A)	Bs
MOS (%)	2.83 <sup>d</sup>	10.0 <sup>b</sup>	11.1 <sup>a</sup>	10.82 <sup>ab</sup>	6.62 <sup>c</sup>
Nt (%)	0.223 <sub>c</sub>	0.57 <sup>a</sup>	0.62 <sup>b</sup>	0.637 <sup>b</sup>	0.435 <sup>c</sup>
pH	6.07 <sup>bc</sup>	5.47 <sup>d</sup>	5.86 <sup>c</sup>	6.18 <sup>b</sup>	7.02 <sup>a</sup>
P (mg kg <sup>-1</sup> )	22.8 <sup>c</sup>	20.8 <sup>c</sup>	26.5 <sup>bc</sup>	34.8 <sup>ab</sup>	42.8 <sup>a</sup>
C: N	7.82 <sup>c</sup>	10.1 <sup>ab</sup>	10.4 <sup>a</sup>	9.85 <sup>ab</sup>	8.95 <sup>bc</sup>
Arcilla (%)	32.8 <sup>c</sup>	53.0 <sup>ab</sup>	51.5 <sup>b</sup>	55.4 <sup>a</sup>	38.2 <sup>c</sup>
Limo (%)	48.1 <sup>a</sup>	27.2 <sup>b</sup>	25.0 <sup>b</sup>	24.9 <sup>b</sup>	45.9 <sup>a</sup>
Arena (%)	17.8 <sup>bc</sup>	19.8 <sup>abc</sup>	23.5 <sup>a</sup>	19.6 <sup>b</sup>	14.7 <sup>c</sup>

### 3.6.1 Componentes principales y clúster jerárquico

Se realizó un análisis multivariado exploratorio por componentes principales con las variables fisicoquímicas y biológicas del suelo (Figura 12). Se encontró un CP1 que permite explicar el 53.5 % de la variabilidad y está conformado principalmente por las variables: Mw (Mw\_1) 0.363; Limo (L.) 0.354, actividad fosfatasa (Fosfatasa) componente de 0.354; materia orgánica (M.O) 0.347; materia orgánica (M.O) 0.334; nitrógeno total (N) 0.342; arcilla (Ar.) 0.321; carbón activo oxidable (Carbon.Activo) 0.301; Inverso de Simpson (InvSimson\_1) 0.241; actividad enzimática catalasa (Catalasa) 0.233 y respiración microbiana medida como CO<sub>2</sub> (mgCO<sub>2</sub>gd) 0.226 (Figura 2-12).

El segundo componente principal explica el 15.0 % de la variabilidad total, y lo conforman variables relacionadas con fósforo (P), pH, y el índice de biodiversidad Chao1, con valores de correlación 0.643, 0.621 y 0.205, respectivamente (Figura 2-12). Este componente principal 2 permite observar la relación que hay entre el pH y la concentración del macronutriente P. En otras palabras, se puede afirmar que la disponibilidad de P en el suelo se relaciona más al pH que a la presencia de microorganismos solubilizadores de fósforo.

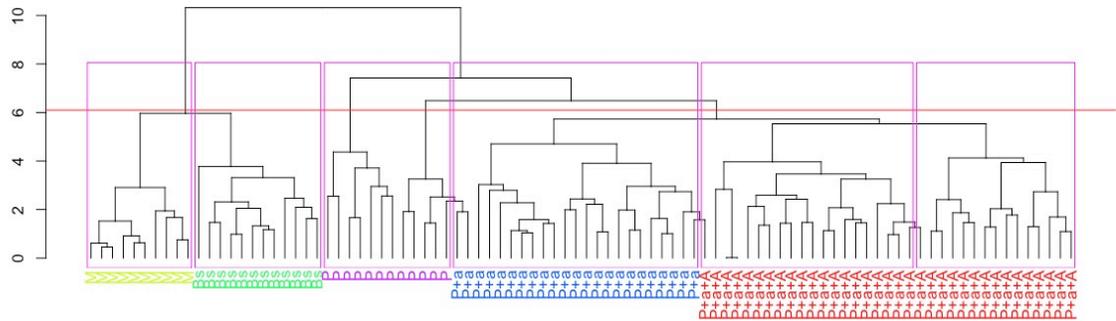
De esta manera, el pH y la concentración de Pi en el suelo se relacionaron con el índice bioquímico de fertilidad del suelo Mw, que explica la actividad de la fosfatasa alcalina y la actividad oxidoreductasa de la catalasa del suelo en relación con el %COS, esto implica la liberación de P inorgánico al suelo proveniente de descomposición microbiana de residuos de cosecha, hojarasca, el estiércol de animales. Así mismo, estas variables se relacionaron con las fracciones de N que sirve como reserva de este nutriente en el suelo, el tamaño de las partículas, índices de biodiversidad, la actividad microbiana medida a través de la respiración del suelo, y el carbono orgánico lábil utilizado por los microorganismos del suelo, este es el impulsor más reactivo y dinámico de la mineralización de C dentro de la reserva de C orgánico del suelo (SOC). El C orgánico lábil medido por COXP se ha asociado directamente con la mineralización de C y N del suelo y puede promover la productividad de las plantas debido a su influencia positiva en las actividades del suelo y la disponibilidad de nutrientes (Neupane et al., 2021).



Parámetros biológicos como las densidades microbianas de los diferentes grupos funcionales (bacterias fijadoras de nitrógeno, microorganismos celulolíticos, microorganismos proteolíticos, microorganismos solubilizadores de P) no fue significativamente asociada a los arreglos, ni explicaron este fenómeno, por lo que se puede decir no inciden en el cambio en la vegetación. Por tanto, la abundancia de los grupos funcionales no parecen ser un buen indicador del funcionamiento del suelo al cambiar su uso y manejo (maíz, SSP, Bs). Mientras que la actividad enzimática de la catalasa y la fosfatasa parecen ser más sensibles a estos cambios. De igual manera, los índices de biodiversidad Inverso Simpson y Chao1, la producción de CO<sub>2</sub> y el C-activo oxidable también reflejan sensiblemente los cambios en el uso del suelo, así como el pH y el P.

Al realizar el análisis por clúster jerárquico donde se incluyeron las siguientes variables Mw, fosfatasa, materia orgánica, arcilla, arena, nitrógeno total, índices de biodiversidad inverso de Simpson, Chao, respiración microbiana medida por producción de CO<sub>2</sub>, carbono activo oxidable, catalasa, pH y P, mediante agrupación jerárquica, distancia Euclidea, se agrupó a una distancia de 5.9 (Figura 2-13). Los arreglos presentaron 6 grandes grupos en función de la biología del suelo, los cuales se caracterizan por su afinidad intragrupal y por sus diferencias intergrupales, y a su vez, coincidieron con las diferentes coberturas evaluadas en los arreglos. El primer grupo corresponde al maíz, el cual presentó los valores más bajos en la biología del suelo con respecto a los otros arreglos evaluados, por ejemplo, en variables como fosfatasa (0.189<sup>b</sup> μmol g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) y MOS (2.83 %) (Ocampo, 2022). Este comportamiento podría estar relacionado al hecho de que la actividad biológica se concentra en la capa superior, el manejo del suelo del sistema maíz parece debilitar su fertilidad química y biológica y la recuperación de las funciones del suelo (Niemi et al., 2014). De esta manera, al disminuir la MOS, se puede reducir la tasa de transformación de nutrientes y su disponibilidad en la solución del suelo puede ser reducida (Tiessen et al., 1994; Dotaniya et al., 2018). Este grupo tiene características semejantes, el grupo del Bs, definido por la fosfatasa (0.359<sup>b</sup> μmol g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) y MOS (6.62<sup>c</sup> %), aunque los procesos de sucesión influyen significativamente procesos del suelo como la actividad microbiana y la acumulación de C, en 25 años aún presentan disminución en sus propiedades biológicas en comparación con bosques originales (Sokołowska et al., 2020). Sin embargo, Cortés-Calderón et al (2021), al realizar una trayectoria de recuperación a largo plazo de

los servicios ecosistémicos, encontró que en dos décadas se han restablecido algunos bienes y servicios del suelo, entre ellos el almacenamiento de carbono. En este grupo del Bs, el pH estuvo por encima de 7, lo que podría favorecer la actividad microbiana sobre el grupo maíz.



**Figura 3-13:** Clúster jerárquico de las variables biológicas de los arreglos (M, Bs, P, SSP P+a, P+a+A).

El grupo de la Pastura, con valores de fosfatasa ( $1.213^a \mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) MOS ( $10.0^b \%$ ), presentó menor actividad microbiana que los grupos del SSP, esto concuerda con lo revisado por (Rosero et al., 2019). El SSP P+a, con valores de actividad fosfatasa de  $1.087^a \mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$  y MOS de  $11.1^a \%$ , tuvo los menores valores de las variables biológicas. El arreglo SSP P+a+A tuvo dos grupos, fosfatasa ( $1.089^a \mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ), MOS ( $10.82^{ab} \%$ ) (Figura 2-13). Este último sistema se aparta del resto de los grupos y las características de sus variables forma dos grupos semejantes.

De esta manera, en la Figura 2-13 se agrupan hacia la izquierda el grupo del M, seguido del Bs, con valores intermedios de fosfatasa y MOS; hacia el centro se ubica el grupo Pastura, y hacia la derecha los SSP. Por tanto, la biología del suelo de los arreglos maíz, bosque secundario, pastura y SS P+a, son más semejantes entre sí, pero se diferencian del arreglo P+a+A, el cual presenta una biología del suelo diferente, con valores que tienden a ser más altos en todas las variables. Entonces, esto sugiere que un suelo más saludable dependa de diversos consorcios microbianos que cumplen funciones fundamentales en la descomposición y transformación de la MOS y mediación del ciclo de nutrientes, lo cual a su vez dependerá de su capacidad enzimática que se asocia con la

proliferación de las comunidades microbianas del suelo, esenciales en la entrega de servicios ecosistémicos del suelo (Dotaniya et al., 2018; Kompała-Bąba et al., 2021).

En resumen, el arreglo SSP P+a+A se considera que presenta un mejor funcionamiento del suelo en relación con la dinámica de la MOS y a sus contenidos enzimáticos particularmente importantes en los ciclos de nutrientes. Es de anotar que se realizó un presuntivo en la cantidad de grupos del clúster. Se sugiere un confirmativo de estos grupos a futuro.

La diversidad alfa de la comunidad microbiana tuvo una tendencia de mayor riqueza de especies en los arreglos P y el Bs. Los índices de biodiversidad Shannon e Inverso de Simpson la tendencia fue mayor hacia el M y el SSP. Sin embargo, es de resaltar que se trata de un análisis exploratorio del microbioma de los diferentes arreglos (Figura 2-11). La participación de las enzimas de los microorganismos en la adquisición de nutrientes y la participación en los ciclos de los nutrientes está asociada a comunidades microbianas que dependen entre otros de las propiedades químicas y físicas del suelo y las condiciones ambientales o los procesos del suelo. El microbioma es una parte integral de casi todos los procesos del suelo, por lo que sugiere, en la medida de lo posible profundizar más en el estudio la biodiversidad del suelo ya que este análisis es muy promisorio para detectar la sensibilidad de los grupos microbianos al manejo y uso del suelo.

En conjunto como parámetros básicos para medir la salud del suelo resultó de mucha utilidad el carbono activo oxidable como un indicador de disponibilidad de C orgánico del suelo. Además, es importante ampliar el conocimiento de más actividades enzimáticas ya que dan idea sobre la función bioquímica del suelo en la descomposición de los desechos orgánicos, la formación de la MOS, el ciclo de los nutrientes y una indicación temprana de la trayectoria del suelo sujeto a cambios en el uso y manejo agrícola.

## Bibliografía

- Acosta-Martínez, V., Cruz, L., Sotomayor-Ramírez, D., y Pérez-Alegría, L. (2007). Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. *Applied Soil Ecology*, 35(1), 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.05.012>
- Alfaia, S. S., Guiraud, G., Jacquín, F., Muraoka, T., y Ribeiro, G. a. (2000). Efficiency of nitrogen-15-labelled fertilizers for rice and rye-grass cultivated in an Ultisol of Brazilian Amazonia. *Biology and Fertility of Soils*, 31(3–4), 329–333. <https://doi.org/10.1007/s003740050664>
- Angerer, J. P., Fox, W. E., & Wolfe, J. E. (2015). Land Degradation in Rangeland Ecosystems. In *Biological and Environmental Hazards, Risks, and Disasters* (pp. 277–311). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394847-2.00017-6>
- Ballesteros-Correa, J., Morelo-García, L., y Pérez-Torres, J. (2019). Composition and vegetal structure of fragments of dry tropical forest in landscapes of extensive livestock farming under silvopastoral and conventional management in Córdoba, Colombia. *Caldasia*, 41(1), 224–234. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v41n1.71320>
- Barragán Hernández, W., Mahecha-Ledesma, L., y Cajas-Girón, Y. (2016). Efecto de sistemas silvopastoriles en la producción y composición de la leche bajo condiciones del valle medio del río Sinú, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*, 8(2), 187. <https://doi.org/10.24188/recia.v8.n2.2016.186>
- Bizuye, A., Sago, A., Admasu, G., Getachew, H., Kas- sa, P. & Amsaya, M. (2014). Isolation, optimization and characterization of protease producing bacteria from soil and water in Gondar town, North West Ethiopia. *International Journal of Bacteriology, Viro-logy and Immunology*, 1(3), 020-024.
- Bolyen, E., Rideout, J. R., Dillon, M. R., Bokulich, N. A., Abnet, C. C., Al-Ghalith, G. A., Alexander, H., Alm, E. J., Arumugam, M., Asnicar, F., Bai, Y., Bisanz, J. E., Bittinger, K., Brejnrod, A., Brislawn, C. J., Brown, C. T., Callahan, B. J., Caraballo-Rodríguez,

- A. M., Chase, J., ... Caporaso, J. G. (2019). Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2. *Nature Biotechnology*, 37(8), 852–857. <https://doi.org/10.1038/s41587-019-0209-9>
- Bordron, B., Robin, A., Oliveira, I. R., Guillemot, J., Laclau, J. P., Jourdan, C., Nouvellon Y., Abreu-Junior C., Trivelin P., Gonçalves J., Plassard C., Bouillet J. J. (2019). Fertilization increases the functional specialization of fine roots in deep soil layers for young *Eucalyptus grandis* trees. *Forest Ecology and Management*, 431(November 2017), 6–16. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.018>
- Callahan, B. J., McMurdie, P. J., Rosen, M. J., Han, A. W., Johnson, A. J. A., y Holmes, S. P. (2016). DADA2: high-resolution sample inference from Illumina amplicon data. *Nature Methods*, 13(7), 581. <https://doi.org/10.1038/nmeth.3869>
- Cortés-Calderón, S., Mora, F., Arreola-Villa, F., y Balvanera, P. (2021). Ecosystem services supply and interactions along secondary tropical dry forests succession. *Forest Ecology and Management*, 482(August 2020). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118858>
- Culman, S. W., Snapp, S. S., Freeman, M. A., Schipanski, M. E., Beniston, J., Lal, R., Drinkwater, L. E., Franzluebbers, A. J., Glover, J. D., Grandy, A. S., Lee, J., Six, J., Maul, J. E., Mirksy, S. B., Spargo, J. T., y Wander, M. M. (2012). Permanganate Oxidizable Carbon Reflects a Processed Soil Fraction that is Sensitive to Management. *Soil Science Society of America Journal*, 76(2), 494–504. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0286>
- Day J. and Döbereiner J. Physiological aspects of N<sub>2</sub>-fixation by a *Spirillum* from *Digitaria* roots. *Soil Biology and Biochemistry* (1976) 8(1). [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(76\)90020-1](https://doi.org/10.1016/0038-0717(76)90020-1)
- Delgadillo-Vargas, O., Garcia-Ruiz, R., y Forero-Álvarez, J. (2016). Fertilizing techniques and nutrient balances in the agriculture industrialization transition: The case of sugarcane in the Cauca river valley (Colombia), 1943-2010. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 218, 150–162. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.11.003>
- Dotaniya, M. L., Aparna, K., Dotaniya, C. K., Singh, M., y Regar, K. L. (2018). Role of soil enzymes in sustainable crop production. In *Enzymes in Food Biotechnology: Production, Applications, and Future Prospects*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813280-7.00033-5>
- Edwards J., Santos-Medellín C., Nguyen B., Kilmer., Liechty Z., Veliz E., Ni Ji., Phillips

- G. and Sundaresan V. Soil domestication by rice cultivation results in plant-soil feedback through shifts in soil microbiota. *Genome Biology* (2019) 20:221 <https://doi.org/10.1186/s13059-019-1825-x>
- Hernandez, T., & Garcia, C. (2003). Estimación de la respiración microbiana del suelo. In Garcia C., Gil, F. Hernández, T. & Trasar C. (Eds.), *Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos del suelo: Medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana* (1st ed., pp. 311–346). Mundi-Prensa Barcelona.
- IGAC. (2009). Estudio general de suelos y zonificación de tierras de Córdoba. 502.
- Johnson, J. L., y Temple, K. L. (1964). Some Variables Affecting the Measurement of “Catalase Activity” in Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 28(2), 207–209. <https://doi.org/10.2136/sssaj1964.03615995002800020024x>
- Kim, B. R., Shin, J., Guevarra, R. B., Lee, J. H., Kim, D. W., Seol, K. H., Lee, J. H., Kim, H. B., y Isaacson, R. E. (2017). Deciphering diversity indices for a better understanding of microbial communities. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 27(12), 2089–2093. <https://doi.org/10.4014/jmb.1709.09027>
- Kompała, A., Bierza, W., Sierka, E., Błońska, A., Besenyei, L., y Woźniak, G. (2021). The role of plants and soil properties in the enzyme activities of substrates on hard coal mine spoil heaps. *Scientific Reports*, 11(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84673-0>
- Laurance, W. F., Sayer, J., & Cassman, K. G. (2014). Agricultural expansion and its impacts on tropical nature. In *Trends in Ecology and Evolution* (Vol. 29, Issue 2, pp. 107–116). <https://doi.org/10.1016/j.tree.2013.12.001>
- Lednická D, Mergaert J, Cnockaert M, Swings J. (2000) Isolation and identification of cellulolytic bacteria involved in the degradation of natural cellulosic fibres. *Systematic and Applied Microbiology* 23(2) 292-299
- Martínez-Atencia, J., Loaiza-Usuga, J. C., Osorio-Vega, N. W., Correa-Londoño, G., y Casamitjana-Causa, M. (2020). Leaf Litter Decomposition in Diverse Silvopastoral Systems in a Neotropical Environment. *Journal of Sustainable Forestry*, 39(7), 710–729. <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1723112>
- Moebius-Clune, B.N., D.J. Moebius-Clune, B.K. Gugino, O.J. Idowu, R.R. Schindelbeck, A.J. Ristow, H.M. van Es, J.E. Thies, H. A. Shayler, M. B. McBride, D.W. Wolfe and GSA. Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework Manual. Geneva, NY.; 2016 sep. <https://soilhealth.cals.cornell.edu/training-manual/>.

- Montagnini, M. (2011). Restoration of degraded pastures using agrosilvopastoral systems with native trees in the neotropics. In *Agroforestry as a Tool for Landscape Restoration* (pp. 55–68). <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84891315151ypartnerID=40ymd5=c2959cf4dfabbc5c4b1be8b7d6decdbf>
- Morales, V. J. 1971. Informe del reconocimiento detallado de los suelos del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Turipaná. Municipio de Cereté (Córdoba). Ministerio de Agricultura. Programa Nacional de Suelos - ICA. 218 p.
- Murgueitio, E., y Calle, Z. (1998). Diversidad biológica en sistemas de ganadería bovina en Colombia. Fao, Murgueitio, E. y Calle, Z. 1998. Diversidad Biológica En Sistemas De Ganadería Bovina En Colombia. En: Conferencia Electrónica De La Fao Sobre Agroforestería Para La Producción Animal En Latinoamérica, 27–46.
- Murphy, P. G., & Lugo, A. E. (1986). Ecology of tropical dry forest. *Annual Review of Ecology and Systematics*. Vol. 17, (November 2003), 67–88. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.17.110186.000435>
- Muscolo, A., Panuccio, M. R., Mallamaci, C., y Sidari, M. (2014). Biological indicators to assess short-term soil quality changes in forest ecosystems. *Ecological Indicators*, 45, 416–423. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.04.047>
- Myer, P. R., McDanel, T. G., Kuehn, L. A., Dedonder, K. D., Apley, M. D., Capik, S. F., Lubbers, B. V., Harhay, G. P., Harhay, D. M., Keele, J. W., Henniger, M. T., Clemmons, B. A., y Smith, T. P. L. (2020). Classification of 16S rRNA reads is improved using a niche-specific database constructed by near-full length sequencing. *PLoS ONE*, 15(7 July), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235498>
- Nannipieri, P., Trasar-Cepeda, C., y Dick, R. P. (2018). Soil enzyme activity: a brief history and biochemistry as a basis for appropriate interpretations and meta-analysis. *Biology and Fertility of Soils*, 54(1), 11–19. <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1245-6>
- Neupane, A., Bulbul, I., Wang, Z., Lehman, R. M., Nafziger, E., y Marzano, S. Y. L. (2021). Long term crop rotation effect on subsequent soybean yield explained by soil and root-associated microbiomes and soil health indicators. *Scientific Reports*, 11(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88784-6>
- Niemi, R. M., Pöyry, J., Heiskanen, I., Uotinen, V., Nieminen, M., Erkoma, K., y Wallenius, K. (2014). Variability of soil enzyme activities and vegetation succession following boreal forest surface soil transfer to an artificial hill. *Nature Conservation*, 8(September), 1–25. <https://doi.org/10.3897/natureconservation.8.6369>

- Ocampo, L. (2022). *Evaluación integral de la salud del suelo en sistemas pastoriles y silvopastoriles en el trópico seco*. Universidad Nacional de Colombia.
- Osorio N, Habte M. Synergistic influence of an arbuscular mycorrhizal fungus and a P solubilizing fungus on growth and P uptake of *Leucaena leucocephala* in an oxisolArid Land Research and Management (2001) 15(3) 263-274. <https://doi.org/10.1080/15324980152119810>
- Peláez, C., Mejía, A., y Planas, A. (2004). Development of a solid phase kinetic assay for determination of enzyme activities during composting. *Process Biochemistry*, 39(8), 971–975. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00208-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00208-5)
- Rosero, J., Vélez, J., Burbano, H., y Ordóñez, H. (2019). Cuantificación de la respiración y biomasa microbiana en Andisoles del sur de Colombia. *Agro Sur*, 47(3), 15–25. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2019.v47n3-03>
- Sánchez, M. (1998). Sistemas agroforestales para intensificar de manera sostenible la producción animal en Latinoamérica tropical. *Agroforestería Para La Producción Animal En Latinamerica*, 1–12. <http://www.fao.org/waicent/faoinfo/agricult/aga/AGAP/FRG/AGROFOR1/Sanchez1.pdf>
- Sokołowska, J., Józefowska, A., Woźnica, K., y Zaleski, T. (2020). Succession from meadow to mature forest: Impacts on soil biological, chemical and physical properties—Evidence from the Pieniny Mountains, Poland. *Catena*, 189(January). <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104503>
- Takahashi, S., Tomita, J., Nishioka, K., Hisada, T., y Nishijima, M. (2014). Development of a prokaryotic universal primer for simultaneous analysis of Bacteria and Archaea using next-generation sequencing. *PLoS ONE*, 9(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105592>
- Tang, J., Zhang, J., Ren, L., Zhou, Y., Gao, J., Luo, L., Yang, Y., Peng, Q., Huang, H., y Chen, A. (2019). Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review on heavy metal pollution. *Journal of Environmental Management*, 242(November 2018), 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.061>
- Teng, Y., y Zhou, Q. (2018). Re, Y., y Zhou, Q. (2018). Response of soil enzymes, functional bacterial groups, and microbial communities exposed to sudan I-IV. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 166(June), 328–335. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.09.102> sponse of soil e. *Ecotoxicology and*

Environmental Safety, 166 (June), 328–335.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.09.102>

- Tiessen H, Cuevas E, Chacon (1994). The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. *Nature* 371 385-385. <https://doi.org/10.1038/371783a0>
- Trasar-Cepeda, C., Camiña, F., Leirós, M. C., & Gil-Sotres, F. (1999). An improved method to measure catalase activity in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(3), 483–485. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(98\)00153-9](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(98)00153-9)
- Trasar, Gil, & Leiros. (2003). Determinación de la actividad Fosfatasa del suelo. In C. Garcia, F. Gil, T. Hernández, & C. Trasar (Eds.). *Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana*. pp. 51–76).
- Trasar, C., Gil, F., & Leiros De la Peña, C. (2003). Determinación de la actividad Catalasa del suelo. In C. Garcia, F. Gil, T. Hernández, & C. Trasar (Eds.), *Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana (2003)*. Mundi-Prensa Barcelona.
- Utobo, E. B., y Tewari, L. (2015). Soil enzymes as bioindicators of soil ecosystem status. *Applied Ecology and Environmental Research*, 13(1), 147–169. [https://doi.org/10.15666/aeer/1301\\_147169](https://doi.org/10.15666/aeer/1301_147169)
- Vallejo, V. E., Arbeli, Z., Terán, W., Lorenz, N., Dick, R. P., y Roldan, F. (2012). Effect of land management and *Prosopis juliflora* (Sw.) DC trees on soil microbial community and enzymatic activities in intensive silvopastoral systems of Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 150, 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.01.022>
- Vazquez, E., Teutscherova, N., Lojka, B., Arango, J., y Pulleman, M. (2020). Pasture diversification affects soil macrofauna and soil biophysical properties in tropical (silvo)pastoral systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 302(December 2019), 107083. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107083>
- Yang, L., Wang, L. G., Li, H., Qiu, J. J., y Liu, H. Y. (2014). Impacts of fertilization alternatives and crop straw incorporation on N<sub>2</sub>O emissions from a spring maize field in northeastern China. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(4), 881–892. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60496-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60496-7)
- Zhang, Y., Cao, C., Han, X., y Jiang, S. (2013). Soil nutrient and microbiological property recoveries via native shrub and semi-shrub plantations on moving sand dunes in Northeast China. *Ecological Engineering*, 53, 1–5.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.01.012>

Zhu, Z., Bai, Y., Lv, M., Tian, G., Zhang, X., Li, L., Jiang, Y., y Ge, S. (2020). Soil Fertility , Microbial Biomass , and Microbial Functional Diversity Responses to Four Years Fertilization in an Apple Orchard in North China. Horticultural Plant Journal, 6(July), 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2020.06.003>



## 4. Indicadores físicos de la salud del suelo en sistemas silvopastoriles en comparación con otros sistemas agrarios en un bosque seco tropical de Colombia

### 4.1 Resumen

Una de las principales causas de deforestación es la conversión de la selva tropical en pastos extensivos para el pastoreo del ganado, degradación de la tierra, y pérdida de la biodiversidad. Los sistemas silvopastoriles (SSP) que están orientados a incrementar la producción mientras sostienen la calidad del suelo, además de alcanzar otros beneficios. Desafortunadamente, existen pocos estudios que soporten los beneficios que estos sistemas pueden tener en la salud del suelo. Por tanto, se estableció un estudio con el objetivo de evaluar el efecto del uso del suelo sometido a diferentes usos y manejo sobre indicadores físicos de la salud del suelo. Para tal fin se usaron los siguientes arreglos que tienen al menos 19 años de establecidos: (i) cultivo intensivo de maíz, (ii) una pastura mixta *Megathyrus. maximum* y *Dichanthium aristatum* (P), (iii) SSP con *M. máximus* + *D. aristatum* y arbustos forrajeros *Crescentia cujete* (totumo) y *Leucaena leucocephala* (acacia forrajera) (P+a), (iv) SSP multiestrato con *M. máximus* + *D. aristatum*, *C. cujete* + *L. leucocephala* y árboles forrajeros *Guazuma ulmifolia* (guásimo), *Cassia grandis* (caña fistula), *Albizia saman* (campano) (P+a+A) y (v) como referencia se incluyó un arreglo forestal constituido por un bosque secundario (Bs). Las evaluaciones se hicieron en dos tiempos contrastantes (seco y lluvioso) en suelos del Valle medio del río Sinú que presentaban un gradiente de drenaje. En general, el suelo cultivado con M presentó un deterioro en las condiciones físicas (mayor densidad real y aparente, menor porosidad total, menor tamaño y estabilidad de agregados y menor diámetro equivalente que el resto de los arreglos); el suelo del M fue seguido en estos indicadores por el Bs. Se encontró

que los suelos de los SSP, con respecto a los de la pastura, presentaron valores similares en los indicadores físicos. Por lo anterior, se puede concluir que el establecimiento de SSP y la pastura mejoraron el valor de los indicadores físicos de la salud del suelo en comparación a lo que ocurre en el monocultivo de maíz. En general, el suelo del bosque de restauración presentó valores bajos a medios.

**Palabras Claves:** Densidad aparente, Distribución y tamaño de agregados del suelo y física del suelo

## 4.2 Introducción

Una de las principales causas de deforestación es la conversión de la selva tropical en pasturas de pastoreo extensivo del ganado para la responder al crecimiento demográfico y a la seguridad alimentarias (Vazquez et al. 2020). En América Latina y el Caribe la superficie ocupada por pastos aumentó de 458,4 Mha en 1961 a 550,1 Mha en 2007. Colombia es un ejemplo representativo dentro del contexto regional, donde entre 1960 y 1995 los pastizales se duplicaron de 14,6 a 35,5 Mha, mientras que los bosques naturales y la agricultura disminuyeron de 94,6 a 72,4 M ha (Murgueitio et al. 2011). Por siglos se ha tenido una ganadería simplificada, basada en el monocultivo de gramíneas con pocos árboles en contra de la dinámica natural de la mayoría de los ecosistemas tropicales que implicó reemplazar las gramíneas nativas por gramíneas africanas con requerimientos de grandes cantidades de luz solar (Murgueitio and Calle 1998). Este modelo ganadero ha sido una ganadería extractiva, lo cual continúa siendo un generador de la degradación ambiental. Actualmente, emergen otros impulsores de deforestación en menor escala como los cultivos ilícitos y minería ilegal (FCDS, 2016), a esto se suman otros efectos como la degradación de la tierra y la pérdida de biodiversidad, la labranza del suelo y la aplicación de agroquímicos contribuyen al deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que finalmente conduce a la degradación del ecosistema (Vides-Borrell et al. 2019). En cuanto a las propiedades físicas se ha evidenciado que la conversión del bosque seco tropical a pasturas y agricultura reduce las tasas de infiltración al tiempo que aumenta la erosión tempranamente y a largo plazo con el aumento de cultivos se producen pérdidas de más del 50 % del COS y el Nt y el 66% del P (Busse et al 2019). La forma y la estabilidad de la estructura juegan un papel importante en la aireación, el almacenamiento de agua y nutrientes, la penetración, el desarrollo de las raíces, la actividad biológica del suelo y la

formación de agregados (David and LÓPEZ 2017). La agregación y los cambios de estructura por efecto del establecimiento de SSP, no son bien conocidos. Por la falta de aire en la labranza se disminuye la degradación de la materia orgánica mejorando la estructura del suelo, y propiedades como la porosidad, la aireación y la infiltración, mejora la fertilidad y la resistencia a la compactación y a la erosión (Cubillos et al. 2016).

La investigación en ganadería se ha enfocado en pastos que mejoren la productividad sembrados como monocultivos mejorados ignorando el hecho de que la mayoría de los mecanismos que sostienen una alta productividad natural en los ecosistemas tropicales son vinculado a los árboles (Murgueitio et al. 2011). Se han realizado estudios sobre los efectos de la deforestación sobre las propiedades del suelo. Lal (1996) evidenció cambios drásticos en las propiedades físicas e hidrológicas del suelo, los cuales habían sido extremadamente favorables bajo el sistema boscoso antes de la tala. La densidad aparente y la resistencia a la penetración como indicadores de la compactación se incrementaron significativamente y al igual que la infiltración. De igual manera, Pinzón y Amezcuita, (1991) encontraron compactación en los suelos por el pisoteo animal. Estos cambios reducen el volumen de los poros de mayor diámetro, causando cambios en el contenido de humedad y en el intercambio de gases entre el suelo y la atmósfera e impidiendo el desarrollo de las raíces (Weil y Brady 2017), lo cual tiene un efecto significativo en la productividad (Al-Shammary et al. 2018).

Esta situación se refleja en el departamento de Córdoba donde el principal uso de la tierra es agricultura y ganadería extensiva, siendo esta región uno de los centros ganaderos más importantes de Colombia. Allí se presenta una baja sostenibilidad en las actividades ganaderas convencionales, disminución de la productividad, degradación del suelo y problemas ambientales (Martínez et al. 2014). En respuesta a estos problemas se han establecido SSP, son sistemas de producción ganadera que integran árboles, alta densidad de arbustos y pastos, no requieren labranza ni insumos químicos, los arboles y arbustos aumentan la biomasa aérea y de raíces, proporcionando grandes entradas de material orgánico y nutrientes al suelo (Cajas-Giron y Sinclair 2001). El sistema de raíces puede movilizar agua y nutrientes desde la profundidad.

La hipótesis de este estudio es que el establecimiento de SSP multiestrato en el Bs-T junto con el uso y prácticas de manejo propias de cada cultivo favorecen los indicadores físicos de la salud del suelo en el horizonte superior en comparación a lo que ocurre en sistemas

agrarios como el cultivo de maíz, la pastura y un bosque secundario. Este efecto puede ser condicionado por el gradiente de drenaje.

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del uso del suelo sometido a diferentes usos y manejos sobre indicadores físicos de la salud del suelo. Para tal fin se usaron los siguientes arreglos: i) cultivo intensivo de maíz (*Zea mays*) (M) ii) pastura mixta con gramíneas *Megathyrsus maximum* cv. Mombasa y *Dichanthium aristatum* (Angleton) (P) iii) SSP pastura mixta con gramíneas *M. maximum*, y *D. aristatum* + arbustos forrajeros *Leucaena leucocephala*, *Crescentia cujete* (P+a), iv) SSP multiestrato compuesto por pastura mixta con gramíneas *M. maximum* y *D. aristatum* + *L. leucocephala* y *C. cujete* + árboles forrajeros *Guazuma ulmifolia* (guásimo), *Cassia grandis* (cañafístula) y *Albizia saman* (campano) (P+a+A) y v) como referencia se incluyó un arreglo forestal constituido por un bosque secundario. Las evaluaciones se hicieron en suelos del Valle medio del río Sinú que presentaban un gradiente de drenaje.

## 4.3 Materiales y métodos

### 4.3.1 Localización

El estudio se realizó en el Centro de Investigación-Turipaná (Agrosavia, 08°51'N, 75°49'O, 18 m de altitud) ubicado en el municipio de Cereté (Córdoba, Colombia). Figura 1-1. Este tiene un clima cálido seco, con un período de lluvias de mayo a noviembre y un período seco de diciembre a abril. La precipitación media anual es de 1380 mm, la temperatura promedio de 28°C, humedad relativa de 81% y una evapotranspiración potencial de 1240 mm año<sup>-1</sup> (Estación climatológica Agrosavia-C.I. Turipaná). Según Holdridge (1971) la zona de vida ecológica se clasifica como un bosque seco tropical (Bs-T).

### 4.3.2 Sistemas silvopastoriles

Los tratamientos consistieron en cinco arreglos: (i) cultivo de maíz (*Zea mays*) (M), (ii) pastura mixta de pastos guinea (*Megathyrsus maximus*) cv. Mombasa y Angleton (*Dichanthium aristatum*) (P) sin fertilización, (iii) arreglo de SSP compuesto por los pastos + totumo (*Crescentia cujete*) + leucaena (*Leucaena leucocephala*) (P+a), (iv) arreglo de SSP multiestrato compuesto por los mismos pastos y arbustos forrajeros + árboles leguminosos

de guácimo (*Guazuma ulmifolia*), caña fistula (*Cassia grandis*) y campano (*Albizia saman*) (P+a+A); (v) Bosque secundario (Bs) de restauración natural, establecido con fines de conservación del suelo.

La parcela del cultivo de maíz ha tenido un manejo tradicional durante 25 años en la zona con dos pases de rastra pesada y un pase de rastra liviana o pulidor, irrigación y tuvo aplicaciones al momento de la siembra de fosfato diamónico (DAP) a razón de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$ , cloruro de potasio (KCl)  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  y Vicor  $10 \text{ kg ha}^{-1}$ ; a los 15 días de emergido se adicionó urea  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  y KCl  $50 \text{ kg ha}^{-1}$ ; a los 25 días de emergido se aplicó nuevamente urea  $100 \text{ kg ha}^{-1}$ . Por otro lado, los SSP tienen tamaño de parcela de 2 ha ( $100 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ ), con una densidad de arbustos  $300 \text{ ha}^{-1}$  sembrados a una distancia de  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  y arboles inicialmente establecidos a  $8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$  y luego de cuatro años se hizo una entresaca y quedaron a  $16 \text{ m} \times 16 \text{ m}$ , para una densidad de 11 árboles  $\text{ha}^{-1}$ . Estas parcelas experimentales fueron establecidas en 1998 (Cajas-Giron y Sinclair, 2001; Barragán-Hernández y Cajas-Girón, 2019; Martínez-Atencia et al., 2020).

En la pastura y en los arreglos de los SSP (P+a y P+a+A), desde su establecimiento, ha habido un pastoreo rotacional de bovinos en franjas de 0.4 ha, con periodos de ocupación de 2 días y 28 días de descanso. El mantenimiento de las parcelas correspondió a controles manuales de maleza después de cada pastoreo y a mantenimiento de canales de drenaje. Los bloques se distribuyeron según el drenaje natural (bueno -D1:  $> 61 \text{ mm/hora}$ , moderado-D2:  $13 - 60 \text{ mm/hora}$  y pobre-D3:  $< 12 \text{ mm/hora}$ ). Clasificación teniendo en cuenta la velocidad de infiltración básica del suelo (Madriñan, 1997) (Tabla 1-1). Las parcelas de bosque secundario (de 2 ha) fueron manejadas sin adición de fertilizantes ni riego, no ha habido intervención humana en 20 años.

**Tabla 4-1.** Clasificación de la velocidad de infiltración básica del suelo

CLASE	VALOR (mm/hora)
Muy lenta	$< 2$
Lenta	3-5
Moderadamente lenta	6-12
Moderada	13-30

Moderadamente rápida	31-60
Rápida	61-100
Muy rápida	101-200
Extremadamente rápida	> 200

Fuente: Madriñan, R. Manual de prácticas de laboratorio de física de suelos. Universidad Nacional de Colombia- Sede Palmira. 1997.

### 4.3.3 Muestreo

En todos los tratamientos, se tomaron muestras de suelo en el horizonte A (0-10 cm). En los tratamientos M, P y Bs, se tomaron 20 submuestras al azar de 50 g de suelo por sitio. En el arreglo SSP "P+a" se tomaron al azar 20 submuestras (50 g cada una) de la pastura y por separado se escogieron al azar 20 arbustos y alrededor de ellos 50 g en cada sitio (30-40 cm desde el tallo). En el SSP P+a+A se hizo lo mismo que en el SSP P+a y adicionalmente se escogieron al azar 20 árboles y se tomaron 50 g por sitio (1-2 m desde el tallo). En cada caso las submuestras se mezclaron, homogenizaron y se tomó finalmente 1 kg de suelo para el análisis de suelo. El muestreo se repitió en dos épocas secas y dos lluviosas.

### 4.3.4 Variables

Las variables físicas determinadas fueron densidad aparente (Dap) usando el método del terrón parafinado (Blake and Hartge, 1986) la densidad real (Dr) se midió con el método del picnómetro (Blake and Hartge, 1986) la estabilidad de los agregados (4-6 mm) al agua se hizo con un solo tamiz de 600 µm de apertura y agitado en agua (Kemper y Rosenau, 1986). La porosidad total (Pt) se determinó con base en la Ecuación 3.1)

$$Pt = [1 - (Dap/Dr)] \times 100 \quad (4.1)$$

la proporción de microporos (mp) se calculó a partir del contenido volumétrico a capacidad de campo (Klute, 1986) y los macroporos (Mp) por diferencia entre  $Mp = Pt - mp$ . Para determinar diámetro ponderado medio (DPM) y el diámetro para tal fin las muestras de suelo se adicionaron sobre un juego de tamices (10, 6, 4, 3, 2, 1.5 mm) y se agitó a 150 rpm por 5 minutos; el DPM se determinó a partir de la siguiente en la Ecuación 3.2)

$$DPM = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i. \quad (4.2)$$

Donde  $\bar{x}_i$ : el diámetro medio de clase de tamaño,  $w_i$ .: % agregados por clase. El Diámetro equivalente ( $D_x$ ), para este caso  $D_{50}$ , se hizo a partir de la de la siguiente en la Ecuación 3.3)

$$D \frac{[x-P_i]}{[P_{i+1}-P_i]} = \frac{\log\left(\frac{D_x}{d_i}\right)}{\log\left(\frac{d_{i+1}}{d_i}\right)} \quad (4.3)$$

Donde  $P_i$ : es el porcentaje que pasa asociado al diámetro de la partícula ( $x=50$ ), debe cumplirse que  $P_i \leq x \leq P_{i+1}$ ,  $d_i$  y  $d_{i+1}$ : son los diámetros correspondientes a los porcentajes que pasan por  $P_i$  y  $P_{i+1}$  (Bardet 1997).

### 4.3.5 Análisis estadístico

El muestreo se realizó bajo un diseño experimental de bloques al azar, desbalanceado, asimétrico, y con efectos fijos. Cada arreglo seleccionado en el uso del suelo correspondiente (M, P, P+a, P+a+A y Bs) representó un tratamiento (para un total de cinco), cada uno tuvo 3 réplicas por muestreo. El muestreo se realizó una sola vez, dentro de cada parcela se tomaron seis lecturas y con ellas se tomó un valor medio; para un total de 15 unidades experimentales.

A los residuales de los modelos se les hizo un diagnóstico de análisis de homogeneidad de la varianza, independencia, normalidad y detección de valores influyentes. Los datos fueron sometidos a análisis de varianza y a la prueba de comparación de medias de Tukey. En ambos casos se empleó un nivel de significancia ( $P \leq 0.05$ ). Los análisis se realizaron en el software libre R (3.6.5), R-Studio versión (1.4.0). A continuación, se describe el modelo lineal utilizado expresado para los índices físicos en la siguiente en la Ecuación 3.4)

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{i,j} + (E_{ijk}) \quad (4.4)$$

Donde,

$Y_{ij}$ : valor de la respuesta en la  $i$ -ésima observación del arreglo  $i$ , del nivel  $j$ -ésimo drenaje  $j$

$\mu$ : media global

$\alpha_i$ : efecto del arreglo  $i$

$\beta_j$ : efecto del  $i$ -ésimo drenaje  $j$

$(\alpha\beta)_{i,j}$ : Efecto de la interacción del  $i$ -ésimo arreglo del  $j$ -ésimo drenaje

$E_{ijk}$ : error de la i-ésimo arreglo del j-ésimo drenaje y de la k-ésima réplica

## 4.4 Resultados

La tabla 3-1 presenta la significancia en el análisis de varianza de los factores arreglo y drenaje y su interacción sobre los indicadores físicos del suelo estudiados. Se observa que los arreglos tienen un efecto significativo en prácticamente todas las variables. Mientras que el factor drenaje solo en uno. En general, los niveles de significancia (P) fueron altamente significativos  $\leq 0.01$ , excepto en la densidad aparente y la macroporosidad en los cuales presento una significancia  $P \leq 0.05$ .

A continuación, solo se presentarán las figuras correspondientes a los factores individuales y a su interacción significativas.

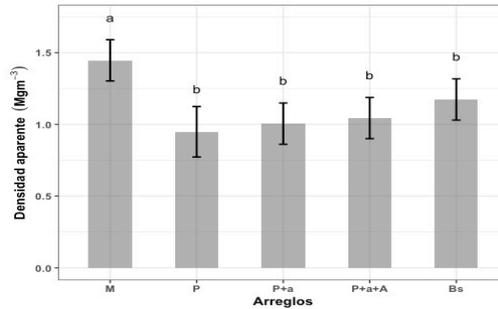
**Tabla 4-2:** Niveles de significancia en el análisis de varianza de los factores y sus interacciones sobre indicadores físicos de la salud del suelo en el Valle medio del río Sinú, Colombia. ‡, \*, \*\*, \*\*\*, indican que *P* es ≤0.1, 0.05, 0.01 y 0.001, respectivamente.

Factor	Densidad aparente	Densidad real	EAA	Porosidad total	Microporosidad	Macroporosidad	Tamaño de agregados mm (%)							DMP	D <sub>50</sub>
							>10	8	5	3.5	2.5	1.75	0.75		
Arreglo (A)	***	NS	**	***	**	NS	**		*	NS	NS	**	**	**	**
Drenaje (D)										*					
AxD								‡							



#### 4.4.1 Densidad aparente ( $\text{Mg m}^{-3}$ )

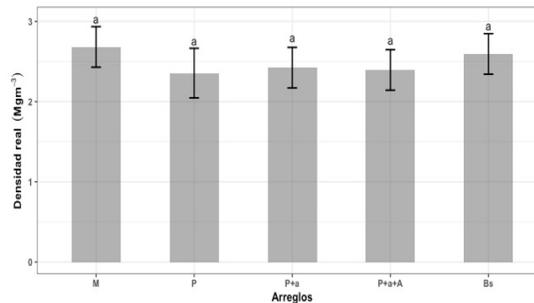
La densidad aparente en el suelo fue afectada significativamente ( $P < 0.05$ ) por el factor arreglos (Tabla 3-1). Se observó que en el sistema agrario M la densidad aparente del suelo fue significativamente mayor ( $1.45 \text{ Mg m}^{-3}$ ) que en el resto de los arreglos que no fueron diferentes entre sí y fluctuaron entre  $0.95\text{-}1.17 \text{ Mg m}^{-3}$  (Figura 3-1).



**Figura 4-1:** Densidad aparente ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) en el suelo en función del factor arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de seis datos por parcela y tres repeticiones por arreglo. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

#### 4.4.2 Densidad real ( $\text{Mg m}^{-3}$ )

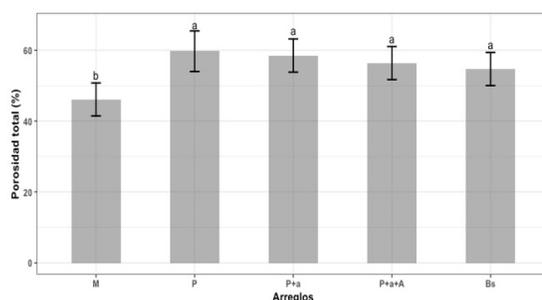
La densidad real en el suelo no fue afectada significativamente ( $P > 0.05$ ) por el factor arreglos (Tabla 3-1). Los valores de la Densidad real fluctuaron entre  $2.36$  y  $2.68 \text{ Mg m}^{-3}$  (Figura 3-2).



**Figura 4-2:** Densidad real ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) en el suelo en función del factor arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de seis datos por parcela y tres repeticiones por arreglo. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

#### 4.4.3 Porosidad total (%)

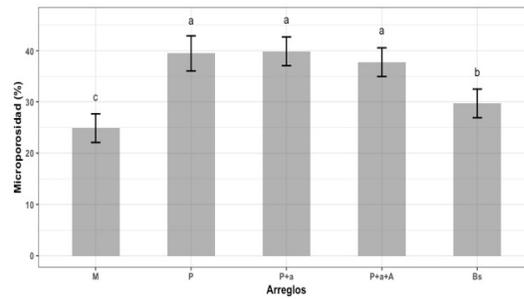
La porosidad total en el suelo fue afectada significativamente ( $P < 0.05$ ) por el factor arreglos (Tabla 3-1). La porosidad total fue significativamente más baja en el suelo del sistema agrario M, con un valor medio de (46.1 %<sup>b</sup>), mientras que en el resto de los arreglos no fueron diferentes entre sí y fluctuaron entre 54.7 y 59.7 %<sup>a</sup> (Figura 3-3).



**Figura 4-3:** Porosidad total (%) en el suelo en función del factor arreglos. Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de seis datos por parcela y tres repeticiones por arreglo. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

#### 4.4.4 Microporosidad (%)

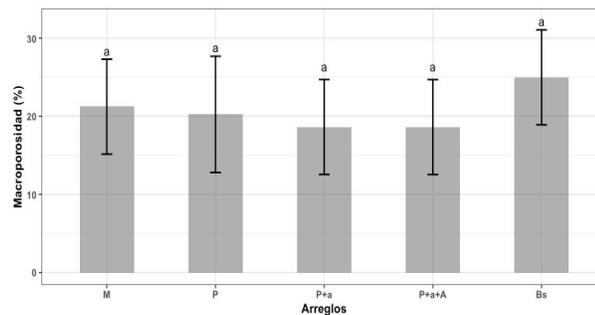
La microporosidad en el suelo fue afectada significativamente ( $P < 0.05$ ) por el factor arreglos (Tabla 3-1). El valor de la microporosidad del suelo tuvo el siguiente orden decreciente: SSP P+a (39.9<sup>a</sup> %) > P (39.5<sup>a</sup> %) SSP P+a+A (37.8<sup>a</sup> %) > Bs (29.7<sup>b</sup> %) > M (24.9<sup>c</sup> %) (Figura 3-4).



**Figura 4-4:** Microporosidad (%) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

#### 4.4.5 Macroporosidad (%)

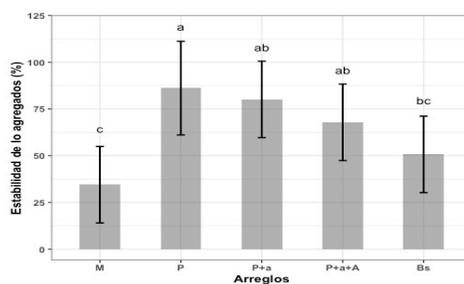
La macroporosidad en el suelo no fue afectada significativamente ( $P > 0.05$ ) por el factor arreglos (Tabla 3-1). Los valores de la macroporosidad del suelo fluctuaron entre 18.6 y 25.0 % (Figura 3-5).



**Figura 4-5:** Macroporosidad (%) en el suelo en función de los arreglos: Los arreglos son: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

#### 4.4.6 Estabilidad de los agregados al agua (%)

La estabilidad de los agregados en el suelo fue afectada significativamente ( $P < 0.05$ ) por el factor arreglos (Tabla 3-1). Se observó que el valor más bajo de estabilidad e los agregados al agua se halló en el sistema agrario M (34.5<sup>b</sup> %), el cual fue diferente al resto de los arreglos excepto del Bs (50.7<sup>bc</sup> %); este último a su vez fue diferente del sistema de P (86.2<sup>a</sup> %), el valor más alto, pero no del SSP P+a y P+a+A (80.1<sup>ab</sup> y 67.9<sup>ab</sup> %) (Figura 3-6).



**Figura 4-6:** Estabilidad de los agregados al agua (%) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

#### 4.4.7 Diámetro equivalente del tamaño de agregados, $D_{50}$ (%)

El diámetro equivalente del tamaño de agregados (mm) en el suelo fue afectado significativamente ( $P < 0.05$ ) por el factor arreglos (Tabla 3-1). Se observa en la tabla 3-3, los valores para el  $D_{50}$ , su comportamiento en agregados superficiales fue significativamente menor en el sistema agrario M (5.18<sup>ab</sup> mm), y a su vez fue significativamente diferente con los arreglos del SSP P+a y P+a+A, (7.86 y 7.36<sup>a</sup> mm, respectivamente), pero este no fué diferente de los arreglos otros arreglos (6.78- y 5.95<sup>ab</sup> mm) (Figura 3-7).

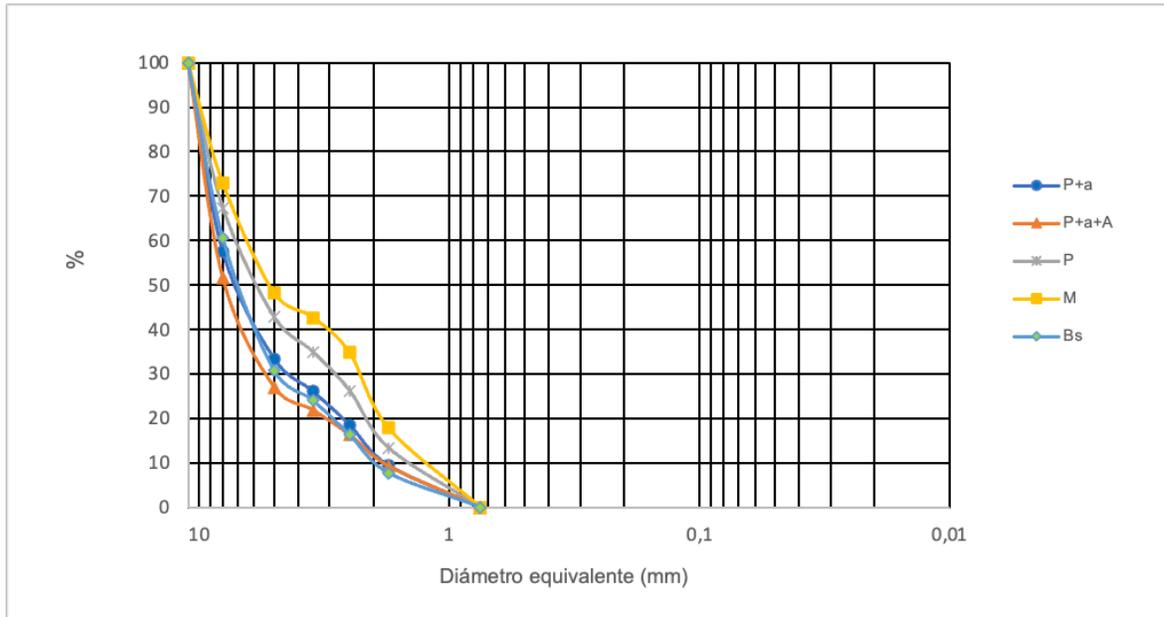


Figura 4-7: Valor del diámetro equivalente (D50) asociado en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones.

#### 4.4.8 Diámetro ponderado medio de agregados (DPM, mm)

El diámetro promedio de poros en el suelo fue afectado significativamente ( $P < 0.05$ ) por el factor arreglos (Tabla 3-1). Se observó que en el sistema agrario M el DPM del suelo fue significativamente menor (5.75 mm) que en el resto de los arreglos que no fueron diferentes entre sí y fluctuaron entre 7.45-7.96 mm (Figura 3-8).

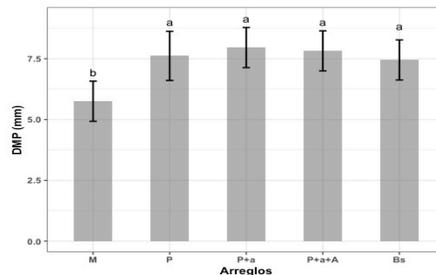


Figura 4-8: Diámetro ponderado medio (DPM, mm) en el suelo en función de los arreglos: sistema agrario cultivo de maíz (M), sistema agrario pastura (P), SSP pastura + arbustos (P+a), SSP pastura + arbusto + árboles (P+a+A) y sistema forestal de bosque

secundario (Bs). Cada valor representa el promedio de tres repeticiones. Las barras indican el error estándar. Promedios con letras minúsculas diferentes son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

## 4.5 Discusión

Los resultados confirman la hipótesis que los indicadores físicos de salud del suelo pueden mejorarse por el uso y adopción de prácticas de manejo de cada cultivo a través del establecimiento de SSP en comparación a lo que ocurre en el sistema del cultivo de maíz; sin embargo, tal efecto no fue en general afectado por el gradiente de drenaje. En particular se encontró que los suelos de los SSP, la pastura y el bosque secundario presentaron mejores indicadores físicos como la densidad aparente, porosidad total, estabilidad de los agregados al agua y porcentajes mayores de DMP y diámetro  $D_{50}$  que el cultivo de maíz.

El incremento en el valor de estos indicadores puede estar asociado a diferentes causas, entre ellas: (i) al contenido de materia orgánica (ver Figura 2-2, capítulo 2), debido a que las partículas elementales del suelo (arcilla, limo y arena se enlazan con la MOS y otros agentes aglomerantes) (Tisdall y Oades, 1982), facilitando el arreglo entre los espacios porosos y las partículas *sólidas* y esto se relaciona a las propiedades funcionales del suelo de infiltración y almacenamiento del agua y de intercambio gaseoso. La MOS de los SSP se encontró en mayor contenido que en el sistema agrario M. El contenido de MOS estuvo asociado a los aportes de hojarasca en los sistemas multiestrato (Martínez-Atencia et al. 2020b), para el caso de la pastura se han documentado buenas propiedades físicas y químicas en el Bs-T (Acosta-Martínez et al. 2007) y en el bosque secundario puede asociarse a la preservación de este bosque de generación natural, por más de 20 años.

(ii) La degradación de la estructura del suelo a causa del uso y manejo agrícola a las prácticas de manejo del suelo, como el uso sostenible de los SSP y de conservación del suelo como en el caso del bosque secundario en comparación a lo que ocurre el sistema agrario M. En este último se realiza una labranza convencional con 2 pases de rastra pesada y un pase de rastra liviana o pulidor lo cual, aparentemente mejora la porosidad del suelo. Sin embargo, fracciona los agregados del suelo, deja mayor área expuesta del suelo a la descomposición, lo cual altera la estructura, disminuye la estabilidad estructural y la MO (Pieri, 1992).

(iii) debido a presencia de hojarasca que se ha venido produciendo en los SSP a lo largo de los años también ayuda a proteger la estructura de los suelos amortiguando el impacto de la gota de lluvia y el pisoteo animal en comparación a lo que ocurre en el sistema agrario M donde el suelo esta sin cobertura.

(iv) la actividad microbiana, la cual produce polisacáridos y exopolisacáridos bacterianos y la producción de glomalina por parte de los hongos (micorrizas) del suelo que mejora la estabilidad de los agregados del suelo, lo cual se evidenció en el SSP a través de las actividades microbiana medida como producción de CO<sub>2</sub> y actividades enzimáticas de la catalasa y la fosfatasa, indicadores biológicos que tuvieron valores muy superiores a los observados en el sistema M (ver Figuras en capítulos anteriores). Esto también se vio asociado con una mayor disponibilidad de carbono activo en el SSP. Así, la estabilidad de los agregados al agua estuvo por encima del 65% en el sistema de la P y en el SSP, mientras que en el maíz presentó los valores más bajos (Figura 3-6), en este se observó un aumento de microagregados estables al agua a expensas de los macroagregados (Vidal et al., 1981). Esta diferencia indica una pérdida de la estabilidad estructural, este suelo es más *susceptible* a sufrir daños estructurales dado que sus agregados se desintegran fácilmente bajo el efecto de la lluvia o de la labranza. En este trabajo se evidencio un efecto combinado en el sistema agrario de pérdida de materia orgánica disminución de la porosidad total y aumento de la densidad aparente. Lo anterior conlleva perdidas de suelo por erosión (Pulido Moncada et al. 2015). Los suelos con buena estructura favorecen el flujo de aire, de agua y de nutrientes a través de los espacios porosos, y ofrecen una resistencia natural a los embates del uso agrícola intensivo y del impacto de la lluvia y del viento.

Los procesos de degradación del suelo son complejos, dinámicos e interactuantes (FAO, 2015), al presentarse la ruptura de agregados en el suelo pueden ocurrir procesos simultáneos de sellado, encostramiento y/o compactación. Además, la perdida de MOS produce una degradación física y química ya que se pierde el COS del suelo y, por ende, el suelo pierde los nutrientes que resultan del proceso de descomposición de la MOS, así como la capacidad de retener agua al perderse las arcillas por procesos de remoción. De igual manera, se presenta degradación biológica al existir una pérdida de la actividad biológica (Kögel-Knabner y Amelung 2013). Por efectos mecánicos de labranza puede

ocurrir la fragmentación de los agregados, al romperse los agregados liberan CO<sub>2</sub> y pueden adicionalmente, producir contaminación, degradación física y pérdida de la productividad (Lozano; Lobo; Pla, 2000; Gabriels et al. 2004).

Muchos de los procesos en el suelo son altamente sensibles al cambio de la estructura el suelo, en especial las funciones de almacenamiento y filtración del agua, el soporte y estabilidad física del suelo. Así, una buena estructura definida como una arquitectura bien organizada de los agregados del suelo crea un sistema de poros estable y continuó que es esencial para asegurar la agricultura sostenible (David y López 2017) En resumen, las propiedades físicas del suelo influyen profundamente el funcionamiento de los suelos en el ecosistema y determinan como ellos deben ser manejados (Grzywna y Ciosmak, 2021). Esto puede ser manifiesto a pesar la natural susceptibilidad del suelo de erosionarse (Debido a su baja pegajosidad y plasticidad, los suelos con limo y arena fina pueden ser altamente susceptibles a la erosión tanto por el viento como por el agua. Los suelos limosos son fácilmente lavados por el agua que fluye en un proceso llamado *piping*). Por lo anterior, el manejo convencional del sistema M se expresa como un suelo “enfermo” o, por lo menos, sistémicamente disfuncional, en el cual pierde capacidad de infiltrar y retener agua y aireación para raíces y microorganismos que lo habitan. Esto se manifiesta en el tamaño de los agregados (DPM y D<sub>50</sub>), lo cual fueron afectados por el uso y manejo del suelo. La distribución de tamaño de agregados tiene relación con la intensidad de uso de la labranza (Pinzón y Amezcuita 1991). En la Figura 3-8 se observa el comportamiento de la distribución de tamaño de agregados. Para el arreglo maíz bajo cultivo intensivo el D<sub>50</sub> (5.18 mm) ha disminuido entre 2.2 y 2.7 mm respecto al SSP, 1.6 mm más que en el bosque secundario y 0.7 mm que en la P. El tamaño de los agregados influye bastante en la respuesta de los cultivos a los escenarios que ese tamaño de agregados produce en las condiciones del suelo. Esto pudo ser confirmado experimentalmente (ver capítulo 4) ya que el tamaño de agregados y la densidad aparente afectaron el desarrollo de las plantas del pasto guinea. Al contrario, el suelo bajo el sistema silvopastoril presenta una mejor funcionalidad dentro del ecosistema. Tal como Amezcuita (1994) afirmaba: el suelo bajo condiciones naturales es estructurado, es decir depende de su estructura, mientras que el suelo mal manejado pierde su estructura y, por ende, su funcionamiento físico depende más de la textura (suelo texturado) y así es más propenso a la degradación.

## Bibliografía

- Acosta-Martínez, Verónica, Leo Cruz, David Sotomayor-Ramírez, and Luis Pérez-Alegría. 2007. "Enzyme Activities as Affected by Soil Properties and Land Use in a Tropical Watershed." *Applied Soil Ecology* 35(1):35–45. doi: 10.1016/j.apsoil.2006.05.012.
- Al-Shammary, Ahmed Abed Gatea, Abbas Z. Kouzani, Akif Kaynak, Sui Yang Khoo, Michael Norton, and Will Gates. 2018. "Soil Bulk Density Estimation Methods: A Review." *Pedosphere* 28(4):581–96. doi: 10.1016/S1002-0160(18)60034-7.
- Bardet, Jean-Pierre. 1997. "Gran Size Distribución." Pp. 8–21 in *Experimental Soil Mechanics*, edited by Horton M. et al (ed). New Jersey: Prentice-Hall.
- Barragán Hernández, Wilson, Liliana Mahecha-Ledesma, and Yasmin Cajas-Girón. 2016. "Efecto de Sistemas Silvopastoriles En La Producción y Composición de La Leche Bajo Condiciones Del Valle Medio Del Rio Sinú, Colombia." *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA* 8(2):187. doi: 10.24188/recia.v8.n2.2016.186.
- Blake, G. R., and Hartge K.H. 1986. "Bulk Density." Pp. 363–75 in *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*. Vol. Agron. Mon. no. 9, edited by C. A. et al Black. Madison: ASA-SSSA.
- Blake G.R, and Hartge GR. 1986. "Particle Density." Pp. 377–82 in *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, edited by C. A. Black. Madison.
- Cajas-Giron, Y. S., and F. L. Sinclair. 2001. "Characterization of Multistrata Silvopastoral Systems on Seasonally Dry Pastures in the Caribbean Region of Colombia." *Agroforestry Systems* 53(2):215–25. doi: 10.1023/A:1013384706085.
- Cubillos, Ana María, Victoria E. Vallejo, Ziv Arbeli, Wilson Terán, Richard P. Dick, Carlos H. Molina, Enrique Molina, and Fabio Roldan. 2016. "Effect of the Conversion of Conventional Pasture to Intensive Silvopastoral Systems on Edaphic Bacterial and Ammonia Oxidizer Communities in Colombia." *European Journal of Soil Biology* 72(40):42–50. doi: 10.1016/j.ejsobi.2015.12.003.

- David, Moret-Fernández, and MaríaVictoria LÓPEZ. 2017. "Determination of Soil Aggregate Porosity from Modified Water Saturation Method." *Pedosphere* 0160. doi: 10.1016/s1002-0160(17)60427-2.
- Gabriels, Donald M., GianCarlo Ghirardi, Donald R. Nielsen, Idefonso Pla Sentis, Edward L. Skidmore, Unesco., International Atomic Energy Agency., and Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics. 2004. *College on Soil Physics: 3-21 March 2003*. Abdus Salam ICTP.
- Jaramillo, Víctor J., and Guillermo N. Murray-Tortarolo. 2019. "Tropical Dry Forest Soils: Global Change and Local-Scale Consequences for Soil Biogeochemical Processes." 2:109–30. doi: 10.1016/b978-0-444-63998-1.00007-0.
- Kemper W. D., and Rosenau R. C. 1986. "Aggregate Stability and Size Distribution." Pp. 425–42 in *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Vol. Agron Mon. no. 9, edited by Black C. A. et al. Madison: SSA-SSSA.
- Kögel-Knabner, I., and W. Amelung. 2013. "Dynamics, Chemistry, and Preservation of Organic Matter in Soils." Pp. 157–215 in *Treatise on Geochemistry: Second Edition*. Vol. 12.
- Martínez, Judith, Yasmín S. Cajas, Juan D. León, and Nelson W. Osorio. 2014. "Silvopastoral Systems Enhance Soil Quality in Grasslands of Colombia." *Applied and Environmental Soil Science* 2014. doi: 10.1155/2014/359736.
- Martínez-Atencia, Judith, Juan C. Loaiza-Usuga, Nelson W. Osorio-Vega, Guillermo Correa-Londoño, and Maria Casamitjana-Causa. 2020a. "Leaf Litter Decomposition in Diverse Silvopastoral Systems in a Neotropical Environment." *Journal of Sustainable Forestry* 39(7):710–29. doi: 10.1080/10549811.2020.1723112.
- Martínez-Atencia, Judith, Juan C. Loaiza-Usuga, Nelson W. Osorio-Vega, Guillermo Correa-Londoño, and Maria Casamitjana-Causa. 2020b. "Leaf Litter Decomposition in Diverse Silvopastoral Systems in a Neotropical Environment." *Journal of Sustainable Forestry* 39(7):710–29. doi: 10.1080/10549811.2020.1723112.
- Murgueitio, Enrique, and Zoraida Calle. 1998. "Diversidad Biológica En Sistemas de Ganadería Bovina En Colombia." *Fao* (Murgueitio, E. y Calle, Z. 1998. Diversidad Biológica En Sistemas De Ganadería Bovina En Colombia. En: Conferencia Electrónica De La Fao Sobre Agroforestería Para La Producción Animal En Latinoamérica):27–46.
- Murgueitio, Enrique, Zoraida Calle, Fernando Uribe, Alicia Calle, and Baldomero Solorio. 2011. "Native Trees and Shrubs for the Productive Rehabilitation of Tropical Cattle

- Ranching Lands.” *Forest Ecology and Management* 261(10):1654–63. doi: 10.1016/j.foreco.2010.09.027.
- Pieri, C. J. M. G. 1992. “Fertility of Soils: A Future for Farming in the West African Savannah.”
- Pinzon, A., and E. Amezquita. 1991. “Compactación de Suelos Por El Pisoteo Animal En Pastoreo En El Pie de Monte Amazonico Colombiano.” *Pasturas Tropicales* 12:2.
- Pulido Moncada, Mansonia, Donald Gabriels, Wim Cornelis, and Deyanira Lobo. 2015. “Comparing Aggregate Stability Tests for Soil Physical Quality Indicators.” *Land Degradation and Development* 26(8):843–52. doi: 10.1002/ldr.2225.
- Tisdall, J. M., and J. M. Oades. 1982. “Organic Matter and Water-Stable Aggregates in Soils.” *Journal of Soil Science* 33(2):141—163. doi: 10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x.
- Vazquez, Eduardo, Nikola Teutscherova, Bohdan Lojka, Jacobo Arango, and Mirjam Pulleman. 2020. “Pasture Diversification Affects Soil Macrofauna and Soil Biophysical Properties in Tropical (Silvo)Pastoral Systems.” *Agriculture, Ecosystems and Environment* 302(December 2019):107083. doi: 10.1016/j.agee.2020.107083.
- Vides-Borrell, Eric, Luciana Porter-Bolland, Bruce G. Ferguson, Pierre Gasselin, Raúl Vaca, Javier Valle-Mora, and Rémy Vandame. 2019. “Polycultures, Pastures and Monocultures: Effects of Land Use Intensity on Wild Bee Diversity in Tropical Landscapes of Southeastern Mexico.” *Biological Conservation* 236(December 2018):269–80. doi: 10.1016/j.biocon.2019.04.025.
- Weil, Raymond, and Nyle Brady. 2017. *The Nature and Properties of Soils. 15th Edition.*



## 5. Efectos de la densidad aparente y el tamaño medio de los agregados de suelos de bosque seco tropical sobre el crecimiento radicular de pastos guinea

### 5.1 Resumen

La importancia de las propiedades físicas del suelo en la funcionalidad de los ecosistemas terrestres influye de manera apreciable en la calidad del agua, el control climático y hábitat para organismos, entre otros. De esta manera proporcionan más funciones ecosistémicas que solamente el aporte nutricional para la producción agrícola. Actualmente, el suelo está sometido a presión de manejo para la producción de alimentos, energía y materia prima y estos ha llevado a un deterioro físico del suelo y, así a la degradación. Este trabajo presenta la evaluación de los efectos de dos atributos físicos: la densidad aparente y el tamaño de agregados de suelo (proveniente de pasturas del bosque seco tropical) sobre el crecimiento del pasto guinea (*Megathyrsus maximum*) cv. Mombasa. Para tal fin, se realizaron dos experimentos separados bajo condiciones de invernadero, estableciendo valores crecientes de cada variable a través de ejercer fuerzas mecánicas (densidad aparente: 0.93-1.80 Mg m<sup>-3</sup>) y tamizaje (tamaño medio de agregados: 0.125-7.15 mm) y luego se sembraron semillas del pasto y se dejaron crecer por 30 días. Se encontraron dos modelos funcionales que relacionan la biomasa de las raíces del pasto con el valor de la densidad aparente y con el tamaño medio de agregados del suelo; los mejores resultados se obtuvieron con valores de ~1.0 Mg m<sup>-3</sup> y ~1.5-2.0 mm, respectivamente. Estos parámetros pueden ser usados como indicadores físicos para la posterior elaboración del diagnóstico global de la salud del suelo en estos ecosistemas.

**Palabras clave:** salud del suelo, calidad del suelo, indicadores, pasto Guinea.

## 5.2 Introducción

El suelo desempeña un papel destacado en la regulación y el aprovisionamiento de los servicios ecosistémicos (Vereecken et al., 2016; (Labrière, et al., 2015; Martínez, Cajas, León, y Osorio, 2014; Tarrasón, et al., 2016). La estructura del suelo controla muchos procesos, atributos estructurales del suelo como la densidad aparente y el tamaño de agregados pueden evaluar algunas funciones del suelo como productividad del suelo (Chataway, Barber, y Callow, 2010; Karlen, Wienhold, Kang, Zobeck, y Andrews, 2011; Andrews, Carroll, y Ronald, 2014), y propiedades que se correlacionan con su función, como la aireación, capacidad de infiltración, penetración de las raíces. Además, la estructura del suelo también refleja la susceptibilidad a la erosión entre otros (Angers, 1992; Veum et al., 2017, Rabot et al., 2018). El concepto de salud del suelo ha surgido para integrar las funciones del suelo que permitan la toma de decisiones dirigidas al manejo sostenible de los suelos y al mantenimiento de sus servicios ecosistémicos (Blum, 2005; Ussiri y Lal, 2005; Burneo, 2013; Osman, 2013). Desafortunadamente, a nivel global las intervenciones humanas han provocado la degradación de las tierras a través de la deforestación y explotación de bosques (574 Mha), sobrepastoreo (679 Mha), manejo impropio de suelos agrícolas (552 Mha), sobreexplotación de la vegetación para usos domésticos (133 Mha) y actividades industriales (23 Mha). En América latina la deforestación alcanza (100 Mha), el sobrepastoreo (68 Mha), el manejo de cultivos (64 Mha), la explotación de la vegetación, y actividades bioindustriales (12 Mha) (Mekuria et al., 2018; (Raju, et al., 2013).

En Colombia 45 Mha presentan algún grado de degradación de suelos por erosión, 18.5 Mha de estas se encuentran en clima seco, 1.79 Mha de uso agrícola, 2.99 Mha de bosques fragmentados con pastos y cultivos (IDEAM, 2015). El mal manejo de las pasturas para la ganadería (Liu, et al., 2019, Barragán-Hernández y Cajas-Girón, 2019; Andrade, et al., 2015), las grandes extensiones de áreas con monocultivos que limitan la producción de biomasa, disminuyen la biodiversidad (Vides-Borrell et al., 2019; Paredes et al., 2018), la baja eficiencia y rentabilidad, así como el deterioro del medio ambiente entre otros (López-vigoa et al., 2017). Lo anterior ha conllevado a un deterioro de propiedades físicas del suelo. Una alternativa para mejorar el manejo de pasturas ha sido el

establecimiento de sistemas silvopastoriles (SSP) (Gerber y Haan, 2006; Martínez et al., 2014).

Los SSP son una mezcla heterogénea de especies arbustivas, arbóreas o maderables, en compañía de un componente herbáceo, generalmente asociado a gramíneas (Barragán-Hernández y Cajas-Girón, 2019) suelo y animales. Entre las gramíneas (Poaceae) que se han empleado en SSP están las del género *Megathyrsus*, el cual se caracteriza por su gran producción y calidad del forraje (Fortes et al., 2016), dependiendo del cultivar, tienen la habilidad para tolerar condiciones limitadas de luz por cambios en su fisiología, y mejorar la calidad nutritiva (Silveira et al., 2017). Adicionalmente, los árboles promueven una fuente de alimento extra para los animales (Murgueitio, 2003) traen nutrientes de mayor profundidad al suelo, regulan el microclima del ecosistema, proveen sombra para el ganado, que pueden reducir el estrés por calor, redundar en el bienestar animal y aumentar el consumo de alimento (Montagnini, 2011; Kambashi, et., 2014; Chará et al., 2018). Estos sistemas son considerados como un sistema de referencia en la evaluación de la salud del suelo en el bosque seco tropical, debido a que además mejorar el uso del suelo, contribuyen a la rehabilitación de suelos degradados mediante el aporte de materia orgánica a través de la participación de hojarasca, tallos y raíces finas (Martínez, Cajas, León, y Osorio, 2014).

A pesar de los beneficios descritos de sistemas silvopastoriles, estos ecosistemas han sido poco estudiados en sus propiedades físicas (Martínez, Cajas, León, y Osorio, 2014). No se conocen las relaciones funcionales entre los atributos sobre el desempeño de del componente herbáceo, el cual es parte fundamental de su éxito y adopción en el sistema silvopastoril (Santiago-Hernández et al., 2016). Lo anterior, es esencial para el desarrollo de indicadores del suelo útiles en el diagnóstico del deterioro del suelo y el monitoreo de los cambios en el sistema cuando se establecen los programas de restauración como los sistemas silvopastoriles.

La hipótesis de este estudio es que los efectos de los atributos físicos estructurales como la densidad aparente y el tamaño medio de los agregados sobre el crecimiento de pasto guinea se pueden modelar, y sirven como indicadores de la salud del suelo dado que pueden representan funciones del suelo. Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue establecer modelos funcionales entre la densidad aparente del suelo y el tamaño de los

agregados provenientes de pasturas del bosque seco tropical sobre la biomasa radicular del pasto Guínea (*Megathyrsus maximum*) cv. Mombasa.

## 5.3 Materiales y métodos

### 5.3.1 Localización

El muestreo de suelo se realizó en el Centro de Investigación-Turipaná (AGROSAVIA, 08°51'N, 75°49'O, 18 m de altitud) ubicada en el municipio de Cereté (Córdoba -Colombia). Esta zona presenta un período de lluvias de mayo a noviembre y un período seco de diciembre a abril. La precipitación media anual es de 1380 mm, la temperatura promedio de 28°C, humedad relativa de 81% y una evapotranspiración potencial de 1240 mm año<sup>-1</sup> (Estación climatológica AGROSAVIA-C.I. Turipaná). Según Holdridge (1971) la zona se clasifica ecológicamente como bosque seco tropical (bs-T). El análisis de suelo, hechos en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, presentó las siguientes características físico-químicas: arena 22%, limo 26%, 52% arcilla (Bouyoucos), textura arcillosa, pH 5.8 (agua, 1:1), MO 8.2% (Walkley y Black); Ca 17.4, Mg 9.7, K 1.04 cmolc kg<sup>-1</sup>, (acetato de amonio 1 M), CICE 28.1 (suma de cationes de intercambio), P 14 mg kg<sup>-1</sup> (Bray II), S 12 mg kg<sup>-1</sup> (fosfato de calcio 0.008 M); Fe 184, Mn 9, Cu 6 y Zn 4 mg kg<sup>-1</sup> (Olsen-EDTA) y B 0.8 mg kg<sup>-1</sup> (agua caliente). Detalles de los métodos pueden ser obtenidos en USDA (2004).

### 5.3.2 Muestreo

Se tomaron muestras superficiales del horizonte A (0-10 cm) de un Aquic Dystrudept de una parcela cubierta con la gramínea *Megathyrsus maximum* (Jacq.) B.K. Simon y S.W.L. Jacobs sin árboles. Posteriormente, el suelo se secó por 7 días al aire en el invernadero y luego se pasó por una malla de 5 mm para el estudio de densidad aparente. Las muestras de suelo se transfirieron a recipientes de acrílico en el invernadero de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín (6°15'N, 75°34'O, 1491 m de altitud, temperatura ambiente 21 - 22 °C y humedad relativa 67 %) donde se sometieron a los tratamientos.

### 5.3.3 Plantas

Se utilizaron semillas certificadas de pasto Guinea (*Megathyrsus máximus*) cv. Mombasa. Las semillas se germinaron en cámara húmeda durante 2 días, de allí se tomaron 16 semillas para la siembra directa a 1 cm de profundidad en materos de acrílico de 20x15 cm. Tres días después se ralearon 12 plántulas. Las plantas se dejaron crecer por un periodo de 30 días, durante el cual permanecieron en el invernadero a la luz del día, y recibieron agua cada dos días aproximadamente para mantener el suelo a capacidad de campo.

### 5.3.4 Tratamientos con densidad aparente

Se generaron nueve tratamientos de densidad aparente: 0.93 (control), 0.95, 1.03, 1.06, 1.08, 1.20, 1.4, 1.6 y 1.8 Mg m<sup>-3</sup>, para las cinco primeras densidades cada 200 g de suelo recibieron golpes con un peso constante (2.27 kg desde una altura de 12.5 cm), hasta ajustar 800 g por matero; para las siguientes densidades la presión sobre el suelo se ejerció con una prensa hidráulica. Esto correspondió a la aplicación de las siguientes presiones (lbf m<sup>-2</sup>): 0 (control), 8.43x10<sup>-3</sup>, 1.686x10<sup>-3</sup>, 5.058x10<sup>-2</sup>, 10.116x10<sup>-2</sup>, 2.27x10<sup>5</sup>, 8.00x10<sup>5</sup>, 1.33x10<sup>6</sup>, 1.60x10<sup>6</sup> y 2.40x10<sup>6</sup>, respectivamente. Cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones, para un total de 36 unidades experimentales.

### 5.3.5 Tratamientos con el tamaño de agregados

El suelo se pasó por una serie de tamices con el fin de obtener muestras entre dos tamaños de apertura de tamiz (mm) y se expresó en función del valor medio (mm), así: 8.0-6.3: 7.15 mm, 6.3-5.0: 5.65 mm, 4.76-3.0: 3.88 mm, 3.0-2.0: 2.5 mm, 2.0-1.0: 1.5 mm, 1.0-0.5: 0.75 mm, 0.5-0.25: 0.375 mm, ≤0.25 mm: 0.125 mm. En cada tamaño medio se obtuvieron 800 g de suelo, con los cuales se llenaron materos plásticos. Esto representó ocho tratamientos y cada uno tuvo cuatro repeticiones, para un total de 32 unidades experimentales.

### 5.3.6 Variables

Cada ocho días se midió la altura (mm) desde la superficie del suelo hasta el extremo de la hoja más alta. Treinta días después de la siembra se hizo un corte de las cuatro plantas a una altura de 10 cm de la superficie el material vegetal se secó en estufa (60°C, 2 d) y se pesó en balanza analítica, considerándose como la biomasa aérea seca joven

(g/planta). Igualmente, se removió del suelo la biomasa radicular (g/planta), la cual se recolectó con tamices para separar del suelo, el material radical se secó y pesó como se indicó.

### 5.3.7 Análisis estadísticos

Cada experimento tuvo un diseño completamente al azar, balanceado y con efectos fijos. Los datos de cada variable se sometieron a un análisis de homogeneidad de la varianza, independencia del error, independencia de las medias entre sí, de tal manera que se comprobó que no hubo relación de las medias y las varianzas y se convalidaron los supuestos asociados, con errores experimentales aleatorios, independientes y normalmente distribuidos. Posteriormente, los datos fueron sometidos a análisis de varianza y a la prueba de separación de medias de Tukey. En ambos casos se empleó un nivel de significancia ( $P \leq 0.05$ ). Los análisis se realizaron el software libre R versión 3.6.5 y R estudio 1.4.0. Se describe el modelo lineal utilizado para los parámetros biométricos expresado en la Ecuación 4.1)

$$Y_{ij} = \mu_i + \tau_i + EExp_{ij} \quad (5.1)$$

Donde,

$Y_{ij}$ : valor de la respuesta en la j-ésima observación del i-ésimo tratamiento.

$\mu$ : media global

$\tau_i$ : efecto del i-ésimo tratamiento

$EExp_{ij}$ : error experimental de la i-ésima unidad experimental de la j-ésima observación

### 5.3.8 Desarrollo de los modelos funcionales

Teniendo en cuenta la base de datos obtenida en los ensayos del efecto de las propiedades físicas del suelo se empleó la metodología de Andrews, Karlen y Cambardella (2004) y Wienhold, Karlen, Andrews, y Stott, (2009). Esta consiste en la toma de datos del atributo que represente una función del suelo, se toman los resultados y a través de un software, en este caso el software curve expert, se corre la información con el fin de encontrar el mejor modelo que se ajuste a la función del suelo. En este trabajo se corrió el programa para los datos de biomasa radicular de los atributos físicos evaluados (Andrews, Karlen, y Cambardella, 2004; Wienhold, Karlen, Andrews, y Stott, 2009).

## 5.4 Resultados

### 5.4.1 Densidad aparente

Los resultados indican que hubo diferencias altamente significativas ( $P \leq 0,001$ ) en los parámetros biométricos en función de la variación de la densidad aparente (Tabla 4-1), particularmente cuando los valores fueron mayores de 1.08 Mg m<sup>-3</sup>. Cuando la densidad aparente tuvo valores de 0.93 a 1.08 Mg m<sup>-3</sup> la altura de las plantas fluctuó entre 578.8 y 609.7 mm, sin presentar diferencias significativas entre sí (Figura 4-1A). Sin embargo, valores de densidad aparente mayores generan una reducción significativa en la altura de las plantas, alcanzando valores intermedios con 1.20 Mg m<sup>-3</sup> (449.8 mm) y con 1.40 y 1.60 los valores fueron aun significativamente menores (307.6 y 207.4 mm, respectivamente) pero no difirieron entre sí. Con el valor de densidad aparente más alto (1.80 M m<sup>-3</sup>) las plantas exhibieron un crecimiento muy limitado (20 mm).

La biomasa seca aérea presentó un comportamiento similar (Figura 4-1B). En las densidades aparentes de 0.93, 1.02 y 1.08 Mg m<sup>-3</sup>, la biomasa seca aérea varió significativamente de 1.15 a 1.48 g/planta, sin presentar diferencias significativas entre sí (Tabla 4-1). En la densidad aparente de 1.20 Mg m<sup>-3</sup> la biomasa aérea seca disminuyó a un valor de 0.69 g/planta. No obstante, en mayores densidades aparentes (1.40, 1.60 y 1.80 Mg m<sup>-3</sup>) la biomasa aérea seca disminuyó de manera significativa obteniéndose valores de 0.25, 0.04 y 0.0 g/planta, respectivamente.

Por otro lado, la biomasa radicular tuvo un desempeño diferente en comparación a las anteriores variables y fue más sensible que las otras variables (Tabla 4-1, Figura 4-1C). Por ejemplo, en la densidad aparente 0.93 Mg m<sup>-3</sup> la biomasa radicular presentó un valor de 0.24 g/planta y cuando las densidades tuvieron valores de 0.97, 1.02, 1.06 y 1.08 Mg m<sup>-3</sup>, la biomasa radicular estuvo en un rango de 0.32 a 0.45 g/planta, sin que se presentaran diferencias significativas entre ellas. Con el aumento de la densidad aparente de 1.2 hasta 1.6 Mg m<sup>-3</sup> se evidenció una disminución significativa en la biomasa radicular con valores 0.19, 0.04 y 0.02 g/planta, respectivamente. Con la densidad más alta (1.8 Mg m<sup>-3</sup>) no se observó crecimiento de la biomasa radicular.

**Tabla 5-1:** Parámetros biométricos de *Megathyrsus maximum* cv. Mombasa en función de la variación de la densidad aparente. Cada valor es el promedio de cuatro repeticiones. Promedios con letras minúsculas son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

Da (Mgm <sup>-3</sup> )	Altura (mm)	Biomasa aérea (g/planta)	Biomasa radicular (g/planta)
0.93	609.7 <sup>a</sup>	1.14 <sup>b</sup>	0.24 <sup>bc</sup>
0.97	578.8 <sup>a</sup>	1.93 <sup>a</sup>	0.45 <sup>a</sup>
1.02	592.5 <sup>a</sup>	1.48 <sup>b</sup>	0.43 <sup>a</sup>
1.06	600.3 <sup>a</sup>	1.55 <sup>ab</sup>	0.38 <sup>ab</sup>
1.08	598.1 <sup>a</sup>	1.33 <sup>b</sup>	0.33 <sup>abc</sup>
1.20	449.8 <sup>b</sup>	0.69 <sup>c</sup>	0.19 <sup>cd</sup>
1.40	307.6 <sup>c</sup>	0.25 <sup>d</sup>	0.04 <sup>de</sup>
1.60	207.4 <sup>cd</sup>	0.04 <sup>d</sup>	0.02 <sup>de</sup>
1.80	20.0 <sup>d</sup>	0.0 <sup>d</sup>	0.0 <sup>e</sup>

### 5.4.2 Tamaño de agregados

Los resultados muestran que hubo diferencias altamente significativas ( $P \leq 0.001$ ) en los parámetros biométricos en función del tamaño medio de agregados (Tabla 2). En general, hubo una tendencia a disminuir la altura de las plantas con el incremento del tamaño medio de agregados. Por ejemplo, con los tamaños más bajos de 0.125, 0.375, 0.750 y 1.50 mm las alturas variaron entre 416.5- 479.6 mm, respectivamente, sin diferencias significativas entre sí. Cuando el tamaño de agregados aumentó a 2.50, 3.88 y 5.65 mm, los valores de la altura disminuyeron al rango de 398.0-375.9 mm, sin diferencias significativas entre ellos. Con el tamaño de agregados más grande (7.15 mm) se restringió el crecimiento de la planta y la altura fue de sólo 324.5 mm.

La biomasa aérea seca mostró un desempeño más o menos similar. En este caso con los tamaños de agregados 0.125 y 0.375 mm la biomasa aérea seca tuvo el mismo valor (0.99 g/planta). Con los tamaños intermedios de 0.75 a 3.88 mm se alcanzaron los valores de biomasa seca aérea más altos (1.04-1.20 g/planta), sin diferencias significativas entre

estos valores. Al aumentar el tamaño de los agregados a valores medios de 5.65 y 7.15 mm, la biomasa aérea seca disminuyó significativamente a valores de 0.42 y 0.24 g/planta, respectivamente.

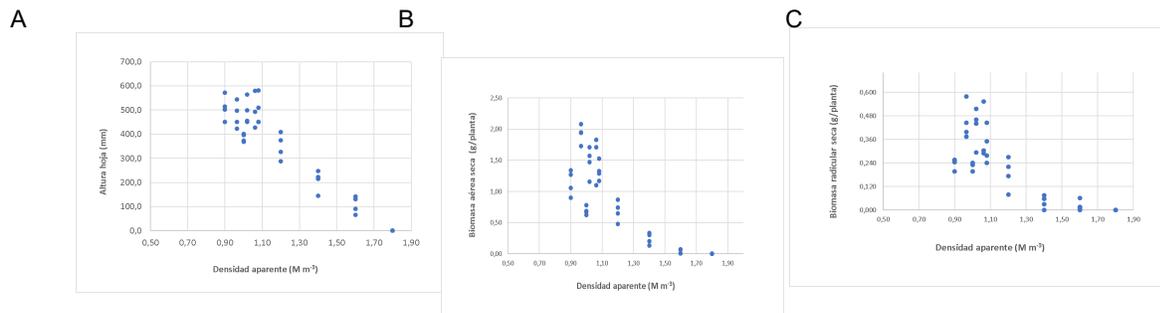
Por su parte, la biomasa radicular presentó un comportamiento que fue más sensible a los cambios del tamaño de agregados que las otras variables (al igual que con la densidad aparente). Con los tamaños de agregados más bajos y los más altos se presentó un pobre crecimiento y a valores intermedios se observaron mejores desempeños de las plantas. Por ejemplo, con los tamaños de 0.125 mm el valor de la variable fue de 0.32 g/planta, con los valores de 0.75 a 3.88 aumentó significativamente la biomasa radicular a valores de 0.62 a 0.76 g/planta (sin diferencias significativas entre ellos). Con el tamaño agregado de 5.65 mm la biomasa disminuyó significativamente hasta valores de 0.21 g/planta, que no difiere con el obtenido al menor tamaño (0.125 mm). Con el tamaño de agregados más grande (7.15 mm) se obtuvo el valor más bajo de la biomasa seca radicular (0.11 g/planta).

**Tabla 5-2:** Parámetros biométricos de *Megathyrsus maximum* cv. Mombasa en función de la variación del tamaño medio de agregado. Cada valor es el promedio de cuatro repeticiones. Promedios con letras minúsculas son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0,05$ ).

Tamaño medio de agregado (mm)	Altura (mm)	Biomasa aérea seca (g/planta)	Biomasa radicular seca (g/planta)
0.125	479.62 <sup>a</sup>	0.99 <sup>b</sup>	0.32 <sup>c</sup>
0.375	418.75 <sup>ab</sup>	0.99 <sup>b</sup>	0.56 <sup>b</sup>
0.750	422.64 <sup>ab</sup>	1.20 <sup>a</sup>	0.64 <sup>ab</sup>
1.50	416.51 <sup>ab</sup>	1.12 <sup>ab</sup>	0.76 <sup>a</sup>
2.50	397.95 <sup>b</sup>	1.04 <sup>ab</sup>	0.74 <sup>a</sup>
3.88	384.73 <sup>bc</sup>	1.18 <sup>ab</sup>	0.62 <sup>ab</sup>
5.65	375.88 <sup>bc</sup>	0.42 <sup>c</sup>	0.21 <sup>cd</sup>
7.15	324.48 <sup>c</sup>	0.24 <sup>c</sup>	0.11 <sup>d</sup>

### 5.4.3 Modelos funcionales de la biomasa seca radicular y los indicadores físicos del suelo

La tendencia de los parámetros biométricos al efecto de la densidad aparente se muestra en la figura 4-1, la cual refleja una relación “menos en mejor”, particularmente con la función de productividad de biomasa aérea seca y la altura. Por otro lado, la biomasa seca radicular (g/planta) presenta un pico máximo alrededor de 1.0 Mg m<sup>-3</sup>, por debajo y por encima de este valor la biomasa radicular seca tiende a disminuir su valor (Figura 4-1).



**Figura 5-1:** Altura (A) y biomasa seca aérea (B) y radicular (C) de pasto guinea (*Megathyrus maximum* cv. Mombasa) en función de la densidad aparente de un Inceptisol de bosque seco tropical de Colombia.

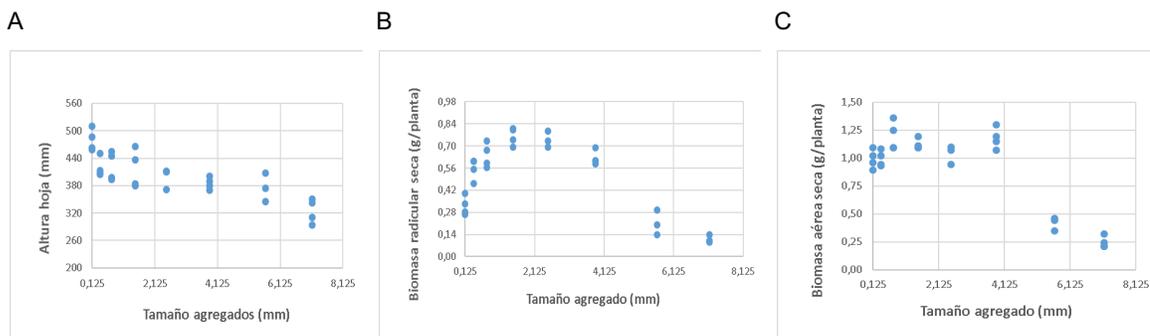
El crecimiento del pasto guinea en función del tamaño medio de los agregados tuvo un comportamiento similar a los efectos observados con los cambios en la densidad aparente. Así, Las variables biomasa aérea seca y altura tienden aumentar su valor con los agregados de tamaños menores y, por el contrario, cuando aumentan el tamaño medio de los agregados por encima de 2.0 mm se disminuyen los valores de estas variables, con una tendencia de “menos es mejor”. Por su parte, la biomasa radicular seca también presentó una tendencia de “pico máximo” alrededor del tamaño de agregados de 1.5-2.0 mm; con los valores extremos de tamaño de agregados disminuyó su valor (Figura 4-2).

A continuación, se presentan el modelo funcional de la biomasa radicular de *Megathyrus maximum* cv. Mombasa en función de la densidad aparente (Figura 4-3). Se usó esta variable para la modelación, dado que fue la más sensible a los cambios del atributo físico del suelo. Este representó la relación del indicador de la planta con la función del suelo, el

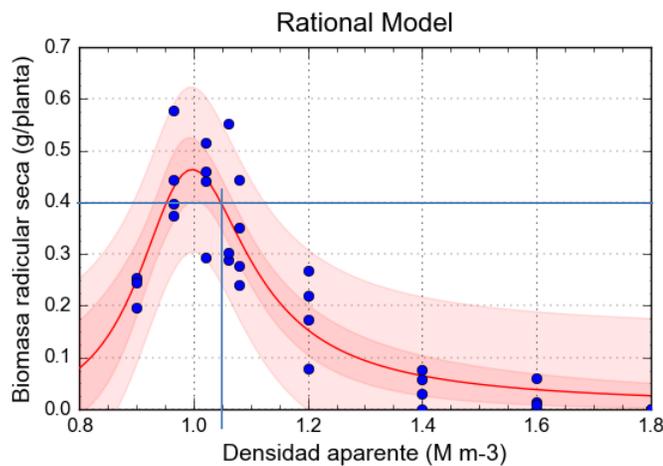
mejor modelo que se ajustó a la variabilidad fue un *modelo racional* expresado en la (Ecuación 4.2)

$$Y = \frac{a + b}{1 - cx + dx^2} \tag{5.2}$$

Con coeficiente de correlación (r) fue de 0.926, el coeficiente de determinación (r<sup>2</sup>) 0.857 y un valor AICC=-181.45. Los parámetros a, b, c y d son considerados parámetros de localidad, sitio específico dependientes del tipo de suelo y del clima (Linn y Doran, 1984). El modelo muestra un comportamiento de “punto óptimo” (Figura 4-3).



**Figura 5-2:** Altura (A) y biomasa seca aérea (B) y radicular (C) de pasto guinea (*Megathyrsus maximum* cv. Mombasa) en función del tamaño medio de agregados de un Inceptisol de bosque seco tropical de Colombia.



Ecuación 4.3.

$$Y = \frac{-0.007722 + 0.014432X}{1 - 2.007037X + 1.021519X^2}$$

(5.3)

Donde,

Y= biomasa radicular seca (g/planta)

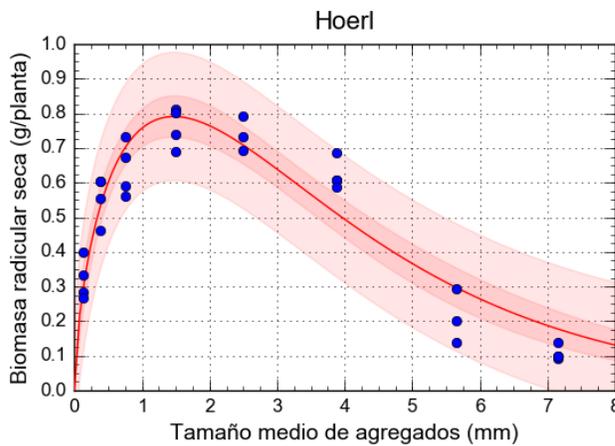
X= densidad aparente (Mg m<sup>-3</sup>)

**Figura 5-3:** Modelo funcional de biomasa radicular seca del pasto Mombasa en función de la densidad aparente de un Inceptisol de bosque seco tropical de Colombia.

Por otro lado, la biomasa radicular y el tamaño medio de agregados tuvo el modelo de *Hoerl* como el mejor, con un comportamiento de “punto óptimo”. El modelo tuvo un coeficiente de correlación ( $r$ ) 0.938, un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) 0.88 y un AICC=-146.27 (Figura 4-4). El modelo fue de la forma en la Ecuación 4.4

$$Y = a \times b^x \times x^c \quad (5.4)$$

Los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $c$  son también considerados parámetros de localidad, sitio específico dependientes del tipo de suelo y clima.



Ecuación 4.5.

$$Y = 1.182043 \times 0.640640^x \times X^{0.656118} \quad (5.5)$$

Donde,

$Y$ = biomasa radicular seca (g/planta)

$X$ = tamaño medio de agregados (mm)

**Figura 5-4:** . Modelo funcional de biomasa radicular seca del pasto Mombasa en función del tamaño de agregados de un Inceptisol de bosque seco tropical de Colombia.

## 5.5 Discusión

Los resultados obtenidos soportan la hipótesis de que los efectos de los atributos físicos estructurales como la densidad aparente y el tamaño medio de los agregados sobre el crecimiento de pasto guinea se pueden modelar, y sirven como indicadores de la salud del suelo dado que pueden representar funciones del suelo.

El aumento de la densidad aparente por fuerza mecánica representó una compactación que condujo a una disminución de todos los valores biométricos de la planta; la biomasa radicular seca (g/planta) fue más sensible a los cambios en la densidad aparente. Esta última presentó un pico máximo, en la densidad aparente alrededor de  $\sim 1.0 \text{ Mg m}^{-3}$ , a diferencia de la biomasa aérea seca (g/planta) y la altura (mm), la cuales alcanzaron su valor más alto a una densidad aparente de  $0.93 \text{ Mg m}^{-3}$ . Por encima de la densidad aparente mayor de 1.0, la biomasa radicular disminuyó progresivamente. Dicha compactación disminuye reduce la porosidad total del suelo y así disminuye la infiltración, la capacidad de retención de agua, la aireación del suelo, la captación de nutrientes, el desarrollo y profundidad de las raíces, como ha sido reportado por Hargreaves et al., 2019. Debido a lo anterior, el movimiento y disponibilidad del agua, así como el drenaje y la penetración de las raíces, fueron influenciadas de manera negativa por el aumento en la densidad aparente (Moebius-Clune et al., 2016).

Las partículas comprimidas reducen el espacio poroso para el movimiento del agua. En un suelo poroso, los espacios porosos permiten el flujo de aire, agua y el crecimiento de las raíces, lo cual tiene efectos sobre el transporte difusivo y de flujo masa desde el suelo hasta las raíces, la transformación de nutrientes y su posterior absorción (Lipiec y Stepniewski, 1995). Lo anterior está particularmente influenciado por alteración del estado de aireación del suelo, factor importante que influye en el potencial redox que a su vez afecta la actividad microbial, disponibilidad y absorción de nutrientes, particularmente de N, Mn y Fe).

Es importante aclarar que los efectos de la compactación sobre las funciones del suelo varían según el tipo de suelo. En suelos arenosos, debido a sus partículas de suelo más grandes y el tamaño de poro más grande, son menos susceptibles a la compactación, incluso cuando están húmedos. En contraste, los suelos franco arcillosos limosos, con partículas más pequeñas y poros de menor tamaño, por lo tanto, son más susceptibles a compactarse, especialmente cuando están húmedos (Horn et al., 1995). Se considera que en los suelos arcillosos densidades aparentes de  $\geq 1.4 \text{ Mg m}^{-3}$  limitan el crecimiento de raíces (Hargreaves et al., 2019; Fulton, Wells y Smith, 2002). Este nivel crítico de densidad aparente está por encima de los hallazgos de este estudio ya que crecimiento de raíces se reduce en 10% con valores de densidad aparente de  $1.05\text{-}1.13 \text{ Mg m}^{-3}$  y en 20% con valores de  $1.07\text{-}1.16 \text{ Mg m}^{-3}$ . Estos cambios en la producción de biomasa radicular del 10

y 20% están asociados a cambios relativamente pequeños de densidad aparente, lo cual confirma la sensibilidad de este parámetro biométrico. Varios autores (Pellant, M., P. Shaver, D.A. Pyke, 2005; Reinhart et al., 2015) sugieren que si bien la productividad en biomasa es un parámetro útil, insisten que deberían considerarse medidas funcionales intrínsecas al suelo mismo tales como la infiltración, la conductividad hidráulica, la aireación, el intercambio de gases, entre otras. Por su parte, (Rabot et al., 2018) soportan que los cambios en el suelo y su estructura deberían concentrarse más en los cambios en el espacio poroso (“perspectiva del poro”) que en los cambios en la matriz sólida del mismo. Por ejemplo, en este estudio la porosidad total en [Porosidad (%) =  $1 - D_a/D_r$ , donde  $D_a$ =densidad aparente ( $Mg\ m^{-3}$ ) y  $D_r$ = densidad real de partículas con valor medio=  $2.65\ Mg\ m^{-3}$ ] disminuyó del 66.04% con la densidad aparente más baja a un valor 32.08% con la densidad más alta. Ya que el valor de densidad aparente más adecuado fue de  $1.0\ Mg\ m^{-3}$ , la porosidad total fue de 62.3% que puede usarse como indicador de referencia.

El tamaño de agregados en el rango de los meso-agregados (0,125 mm- 2,0 mm) presentó los valores más altos de biomasa área seca (g/planta) y altura (mm) (comportamiento “menos es mejor”), mientras que con la biomasa radicular ocurrió un comportamiento de “punto óptimo” el cual se presentó entre ~1.5-2.0 mm. En general, esto concuerda con Dexter (1989), quien dice que existe una relación inversa entre el tamaño de los agregados y la densidad aparente. Así, al disminuir el tamaño del agregado la fracción de poro en ese tamaño se elimina (< 1 mm) e inhibe el crecimiento vegetal y afecta otras funciones del suelo. Esto fue evidente en este trabajo dado el reducido crecimiento de la biomasa radicular en los agregados de menor tamaño (0.125 mm). Se espera que bajo tales condiciones hubo un aumento en la densidad aparente que presumiblemente aumenta la resistencia mecánica al crecimiento radicular. Igualmente, al aumentar el tamaño de agregados (7.15 mm) se redujo la biomasa radicular seca (g/planta), lo cual puede conducir a pérdidas de agua y temperaturas más altas que a su vez pudo producir estrés hídrico (Daniel, 2002). En el rango de los macroagregados > 2.0 mm se disminuyeron todos los parámetros biométricos en proporción al aumento en el tamaño de los agregados, esto se debió probablemente a la elevada macroporosidad en dicho rango. Se puede concluir que para *Megathyrus maximum* se presenta una probabilidad para disminuir su producción y particularmente su biomasa radicular si hay en el tamaño del agregado del suelo en un gran porcentaje < 0.375 mm y > 3.88 mm. De otro lado, según Braunack y Dexter, (1989), la información de los efectos del tamaño a agregados en las propiedades físicas del suelo

permitirá el diseño de semilleros con óptimas condiciones físicas para el brote y la germinación, con una producción eficiente de semilleros para diferentes cultivos y varios ambientes (Hosseini et al., 2015; Braunack y Dexter, 1989).

Se estima que el impedimento mecánico para el crecimiento radicular es más crítico que el abastecimiento de oxígeno, las raíces crean huecos y espacios porosos para aire y agua actuando como válvulas biológicas (Braunack y Dexter, 1989). Además, proveen exudados para pegar las partículas del suelo formando y estabilizando macroagregados y suministrando nutrientes para los microorganismos. De esta manera, si existen restricciones para el crecimiento de las raíces disminuye la oportunidad de que el suelo se mantenga resiliente.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo, en el cual se encuentran los valores de densidad aparente y del tamaño medio de agregados asociados a puntos óptimos deben ser validados en condiciones de campo. Esto permitiría posteriormente su implementación como indicadores de salud del suelo, ya que valores cercanos y alejados a los puntos máximos se espera que den contrastes en el crecimiento de raíces y de las plantas en general. Igualmente, este escenario podría permitir evaluar el impacto del cambio de estas variables sobre la actividad microbiana del suelo y sobre la disponibilidad de nutrientes (Liao et al., 2018; Fox et al., 2018 y Gupta y Germida, 2015). Así mismo, el monitoreo de estas variables y las funciones ecosistémicas del suelo permitirá conocer el grado en que un suelo está deteriorado y como algunas prácticas de uso y manejo de este (p.e., sistemas silvopastoriles, labranza mínima, fertilización orgánica) podría revertir integralmente los procesos degradativos de la salud del suelo.

## 5.6 Conclusiones

Se puede concluir que los cambios en la densidad aparente y el tamaño medio de agregados tuvieron un impacto significativo en el desempeño del pasto *Megathyrus máximus* cv. Mombasa, particularmente en el crecimiento radicular, el cual resultó ser muy sensible a tales cambios. Con esta variable los modelos funcionales obtenidos fueron del comportamiento “punto óptimo”, los cuales están alrededor de  $\sim 1.0 \text{ Mg m}^{-3}\text{y}$  en el rango  $\sim 1.5\text{-}2.0 \text{ mm}$ , respectivamente.

## Bibliografía

- Andrade, B. O., Koch, C., Boldrini, I. I., and Vélez-Martin, E. (2015). Natureza y Conservação Essays and Perspectives Grassland degradation and restoration: a conceptual framework of stages and thresholds illustrated by southern Brazilian grasslands. *Natureza y Conservação*, 13(2), 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.ncon.2015.08.002>
- Andrews, S. S., Carroll, C. R., y Ronald, C. (2014). DESIGNING A SOIL QUALITY ASSESSMENT TOOL FOR SUSTAINABLE MANAGEMENT. 11(6), 1573–1585.
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., and Cambardella, C. a. (2004). The Soil Management Assessment Framework: A Quantitative Soil Quality Evaluation Method. *Soil Science Society of America Journal*. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0029>
- Angers, D. A. (1992). Changes in Soil Aggregation and Organic Carbon under Corn and Alfalfa. *SOIL SCI. SOC. AM. J.*, 56(JULY-AUGUST), 1244–1249. <https://doi.org/10.1094/Phyto-77-309>
- Amézquita E; Rao M; Rivera M; Corrales I. y Bernal J (2013). Sistemas agropastoriles: Un enfoque integrado para el manejo sostenible de Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) de Colombia. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), 288 p. -- (Documento de Trabajo CIAT No. 223) ISBN 978-958-694-117-4

- Barragán-Hernández, W. A., y Cajas-Girón, Y. S. (2019). Cambios bromatológicos y estructurales en *Megathyrus maximum* bajo cuatro arreglos silvopastoriles. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20(2), 231–244. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol20\\_num2\\_art:1458](https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num2_art:1458)
- Braunack, M. V., and Dexter, A. R. (1989). Soil aggregation in the seedbed: A review. I. Properties of aggregates and beds of aggregates. *Soil and Tillage Research*, 14(3), 259–279. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(89\)90013-5](https://doi.org/10.1016/0167-1987(89)90013-5)
- Chará, J., Reyes, E., Peri, P., Otte, J., Arce, E., and Schneider, F. (2018). Silvopastoral Systems and their Contribution to Improved Resource Use and Sustainable Development Goals: Evidence from Latin America. Retrieved from [http://www.livestockdialogue.org/fileadmin/templates/res\\_livestock/docs/2018\\_Ulaanbataar/Silvopastoral\\_Systems\\_and\\_their\\_contribution\\_to\\_improved\\_resource\\_use\\_and\\_SDG.pdf](http://www.livestockdialogue.org/fileadmin/templates/res_livestock/docs/2018_Ulaanbataar/Silvopastoral_Systems_and_their_contribution_to_improved_resource_use_and_SDG.pdf)
- Chataway, R. G., Barber, D. G., and Callow, M. N. (2010). Increasing milk production from forage: Production systems and extension service preferences of the northern Australian dairy industry. *Animal Production Science*, 50(7), 705–713. <https://doi.org/10.1071/AN09228>
- Daniel, J. (2002). Introducción a la ciencia del suelo. *Introducción a La Ciencia Del Suelo*, 619.
- de Paul Obade, V., and Lal, R. (2016). A standardized soil quality index for diverse field conditions. *Science of The Total Environment*, 541, 424–434. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.096>
- Fortes, D., Valenciaga, D., García, C. R., García, M., Cruz, A. M., y Romero, A. (2016). Evaluation of three varieties of *Megathyrus maximum* in the dry period. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 50(1), 131–137.
- Fox, A., Ikoyi, I., Torres-Sallan, G., Lanigan, G., Schmalenberger, A., Wakelin, S., y Creamer, R. (2018). The influence of aggregate size fraction and horizon position on microbial community composition. *Applied Soil Ecology*, 127(March), 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.02.023>
- Fulton, J. P., Wells, L. G., y Smith, T. D. (2002). A mechanical system for soil reconstruction. *Applied Engineering in Agriculture*, 18(5), 517–524.
- Gupta, V. V. S. R., y Germida, J. J. (2015). Soil aggregation: Influence on microbial biomass and implications for biological processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 80, A3–A9. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.09.002>

- Hargreaves, P. R., Baker, K. L., Graceson, A., Bonnett, S., Ball, B. C., y Cloy, J. M. (2019). Soil compaction effects on grassland silage yields and soil structure under different levels of compaction over three years. *European Journal of Agronomy*, (May), 125916. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125916>
- Hosseini, F., Mosaddeghi, M. R., Hajabbasi, M. A., y Sabzalian, M. R. (2015). Influence of tall fescue endophyte infection on structural stability as quantified by high energy moisture characteristic in a range of soils. *Geoderma*, 249–250, 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.013>
- IDEAM, U. D. C. . (2015). Síntesis del estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia - 2015. IDEAM - MADS.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. (2013). Capítulo 4 Propiedades de los Suelos. Retrieved from [www.igac.gov.co](http://www.igac.gov.co)
- Kambashi, B., Boudry, C., Picron, P., y Bindelle, J. (2014). Forage plants as an alternative feed resource for sustainable pig production in the tropics: A review. *Animal*, 8(8), 1298–1311. <https://doi.org/10.1017/S1751731114000561>
- Karlen, D. L., Wienhold, B. J., Kang, S., Zobeck, T. M., y Andrews, S. S. (2011). Indices for Soil Management Decisions. 39–50. <https://doi.org/10.2136/2011.soilmanagement.c3>
- Labrière, N., Locatelli, B., Laumonier, Y., Freycon, V., y Bernoux, M. (2015). Soil erosion in the humid tropics: A systematic quantitative review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 203, 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.027>
- Liao, H., Zhang, Y., Zuo, Q., Du, B., Chen, W., Wei, D., y Huang, Q. (2018). Contrasting responses of bacterial and fungal communities to aggregate-size fractions and long-term fertilizations in soils of northeastern China. *Science of the Total Environment*, 635, 784–792. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.168>
- Linn, D. M., y Doran, J. W. (1984). Effect of Water-Filled Pore Space on Carbon Dioxide and Nitrous Oxide Production in Tilled and Nontilled Soils1. *Soil Science Society of America Journal*, 48(6), 1267. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800060013x>
- Lipiec, J., y St e pniewski, W. (1995). Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. *Soil and Tillage Research*, 35(1–2), 37–52. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(95\)00474-7](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00474-7)
- Liu, Y., Zhang, Z., Tong, L., Khalifa, M., y Wang, Q. (2019). Assessing the effects of climate variation and human activities on grassland degradation and restoration across the globe. *Ecological Indicators*, 106(June), 105504.

- <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105504>
- López-vigoa, O., Sánchez-santana, T., Iglesias-gómez, J. M., Lamela-lópez, L., Socapérez, M., Arece-garcía, J., y De, 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), 83–95.
- Martínez, J., Cajas, Y. S., León, J. D., y Osorio, N. W. (2014). Silvopastoral systems enhance soil quality in grasslands of Colombia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/359736>
- Mekuria, W., Wondie, M., Amare, T., Wubet, A., Feyisa, T., y Yitaferu, B. (2018). Restoration of degraded landscapes for ecosystem services in North-Western Ethiopia. (February). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00764>
- Moebius-Clune, B.N., D.J. Moebius-Clune, B.K. Gugino, O.J. Idowu, R.R. Schindelbeck, A.J. Ristow, H.M. van Es, J.E. Thies, H. A. Shayler, M. B. McBride, D.W. Wolfe, and G. S. A. (2016). *Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework Manual*. <https://doi.org/10.1080/00461520.2015.1125787>
- Montagnini, M. (2011). Restoration of degraded pastures using agrosilvopastoral systems with native trees in the neotropics. In *Agroforestry as a Tool for Landscape Restoration* (pp. 55–68). Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84891315151partnerID=40ymd5=c2959cf4dfabbc5c4b1be8b7d6decbbf>
- Murgueitio, E. (2003). Murgueitio E 2003: Impacto ambiental de la ganadería de leche en Colombia y alternativas de solución. *Livestock Research for Rural Development*, 15(10). Retrieved from <http://www.lrrd.org/lrrd15/10/murg1510.htm>
- Murgueitio R, E. (1992). Sistemas sostenibles de doble propósito como alternativa para la economía campesina. *Livestock Research for Rural Development*, 4(3), 1–11. Retrieved from <http://www.lrrd.org/lrrd4/3/enrique1.htm>
- Osman, K. T. (2013). Soils: Principles, properties and management. *Soils: Principles, Properties and Management*, 9789400756, 1–271. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2>
- Paredes, S. S., Stritzler, N. P., Bono, A., y Distel, R. A. (2018). Perennial warm-season grass monocultures and mixtures: Biomass production and soil improvement in semiarid and shallow soil conditions. *Journal of Arid Environments*, 154(March), 82–88. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.02.008>
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., y Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, Vol. 314, pp. 122–137.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>

- Raju, S. S. V, Nagre, P. K., Bharathi, N., y Naik, P. (2013). Productivity and soil fertility status as influenced by integrated use of bio-fertilizers, organic manures and inorganic fertilizers in onion. *Ecology, Environment and Conservation*, 19(1), 221–224. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84877997050partnerID=40ymd5=c7d6456f8b84c3255563fb7aca02b147>
- Reinhart, K. O., Nichols, K. A., Petersen, M., y Vermeire, L. T. (2015). Soil aggregate stability was an uncertain predictor of ecosystem functioning in a temperate and semiarid grassland. *Ecosphere*, 6(11), 1–16. <https://doi.org/10.1890/ES15-00056.1>
- Santiago-Hernández, F., López-Ortiz, S., Ávila-Reséndiz, C., Jarillo-Rodríguez, J., Pérez-Hernández, P., y de Dios Guerrero-Rodríguez, J. (2016). Physiological and production responses of four grasses from the genera *Urochloa* and *Megathyrus* to shade from *Melia azedarach* L. *Agroforestry Systems*, 90(2), 339–349. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9858-y>
- Silveira, O., Dos Santos, A. C., Rodrigues, M. O. D., Rodrigues, M. O. D., y Alencar, N. M. (2017). Productive efficiency of mombasa grass in silvopastoral system under pasture deferment and nitrogen fertilizer. *Semina: Ciências Agrárias*, 38(5), 3307–3318. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n5p3307>
- Tarrasón, D., Ravera, F., Reed, M. S., Dougill, A. J., y Gonzalez, L. (2016). Land degradation assessment through an ecosystem services lens: Integrating knowledge and methods in pastoral semi-arid systems. *Journal of Arid Environments*, 124, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.08.002>
- USDA-NRCS. (2008). Soil Quality Physical Indicators: Selecting Dynamic Soil Properties to Assess Soil Function. Soil Quality Technical Note No. 10
- Ussiri, D. A. N., y Lal, R. (2005). Carbon sequestration in reclaimed minesoils. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24(3), 151–165. <https://doi.org/10.1080/07352680591002147>
- Veum, K. S., Sudduth, K. A., Kremer, R. J., y Kitchen, N. R. (2017). Geoderma Sensor data fusion for soil health assessment. *Geoderma*, 305(September 2016), 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.031>
- Vides-Borrell, E., Porter-Bolland, L., Ferguson, B. G., Gasselin, P., Vaca, R., Valle-Mora, J., y Vandame, R. (2019). Polycultures, pastures and monocultures: Effects of land use intensity on wild bee diversity in tropical landscapes of southeastern Mexico. *Biological Conservation*, 236 (December 2018), 269–280.

<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.04.025>

Wienhold, B. J., Karlen, D. L., Andrews, S. S., y Stott, D. E. (2009). Protocol for indicator scoring in the soil management assessment framework (SMAF). *Renewable Agriculture and Food Systems*, 24(4), 260–266.  
<https://doi.org/10.1017/S1742170509990093>



## 6. Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

Los resultados confirman la hipótesis de que la salud del suelo medida a través de indicadores químicos, físicos y biológicos del de salud del suelo pueden mejorarse por el uso y adopción de prácticas de manejo propias de cada cultivo a través del establecimiento de SSP en comparación a lo que ocurre en sistemas agrarios tales como el cultivo de maíz y la pastura; y que tal efecto, puede estar condicionado por el tiempo y por el gradiente de drenaje.

Se encontró que los suelos de los SSP presentaron mejores contenidos de MOS, Nt, N-NO<sub>3</sub>, Ca, Mg, K, P, B y mayores valores de CICE, C-activo oxidable corroborando este análisis como un indicador sensible de cambios en el manejo del suelo, tal y como se observó en el cultivo de maíz, donde se presentó en valor más bajo (Figura 2-5). En cuanto a la actividad microbiana, se detectaron mayores actividades enzimáticas en la fosfatasa alcalina y la catalasa en los SSP P+a y SSP P+a+A que, en el monocultivo de maíz, el mismo comportamiento se presentó con la respiración microbiana determinada como producción de CO<sub>2</sub>.

Desde la óptica de la física del suelo presentaron mejores indicadores físicos como la densidad aparente, porosidad total, estabilidad de los agregados al agua y porcentajes mayores de DMP y diámetro D<sub>50</sub>. El tamaño de los agregados influye bastante en la respuesta de los cultivos a los escenarios que ese tamaño de agregados produce en las condiciones del suelo. Esto pudo ser confirmado experimentalmente (ver capítulo 4) ya que el tamaño de agregados y la densidad aparente afectaron el desarrollo de las plantas del pasto guinea. Al contrario, el suelo bajo el sistema silvopastoril presenta una mejor funcionalidad dentro del ecosistema. Tal como Amezcuita afirmaba Amézquita y colaboradores (2013): el suelo bajo condiciones naturales es estructurado, es decir

depende de su estructura, mientras que el suelo mal manejado pierde su estructura y, por ende, su funcionamiento físico depende más de la textura (suelo texturado) y así es más propenso a la degradación.

Los incrementos en estos indicadores pueden estar asociados al mayor aporte de hojarasca que generan estos sistemas y el reciclaje asociado a la descomposición de este material, tal como lo demostró Martínez et al. (2014). Esto puede ser el resultado del mayor reciclaje que ocurre en los SSP que en los monocultivos. Los árboles y arbustos pueden extraer nutrientes de mayor profundidad translocarlos a su dosel y transferirlos a la superficie del suelo vía caída de hojarasca. Allí los microorganismos a través de los procesos de descomposición, liberan los nutrientes para ser absorbidos por las plantas (árboles, arbustos y pastura) dejando el suelo con una mejor biodisponibilidad de nutrientes. Por lo anterior, estos ecosistemas se acercan más al concepto de sostenibilidad que los sistemas agrarios, en términos prácticos no requieren aplicaciones de insumo externos (enmiendas orgánicas o minerales como fertilizantes), de ahí que sean una muy buena alternativa para el manejo de los suelos tropicales.

## 6.2 Recomendaciones

- Establecer Sistemas silvopastoriles en el Bs-T dado mejoren las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo.
- Para la cuantificación de la salud del suelo se establecen indicadores fáciles de medir y económicos, que requiere un laboratorio básico de suelos. Se espera que sean de gran utilidad para agricultores y demás profesionales del suelo, ya que revisten gran importancia en la evaluación de la salud del suelo Lo cual garantiza el cuidado de este valioso recurso.
- Se espera que este trabajo contribuya a la regulación de los suelos en Colombia, lo cual ha sido una necesidad ya planteada desde el 2015 por la FAO.
- Se plantea la necesidad de evaluar el suelo desde el punto de vista biológico, así como el desarrollo de las diversas enzimas del suelo, importantes para definir la

actividad microbiana del suelo, lo cual mejora las propiedades físicas y químicas del suelo, así como el entendimiento de la participación de los microorganismos del suelo en el ciclo de los nutrientes que da cuenta de los servicios ecosistémicos del suelo y sus funciones.

- Es importante mencionar que cuando sea posible conviene evaluar la biodiversidad del suelo por tanto permite conocer las comunidades microbianas, su diversidad y su función, lo cual constituye también un indicador de la salud del suelo, a escala computacional.



