



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Indicadores de calidad del suelo para el monitoreo de la sostenibilidad de los Sistemas Silvopastoriles Intensivos (SSPI) en la Ecorregión Cafetera, Colombia.

Nelly Victoria Giraldo Sánchez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Palmira, Colombia

2020

Indicadores de calidad del suelo para el monitoreo de la sostenibilidad de los Sistemas Silvopastoriles Intensivos (SSPI) en la Ecorregión Cafetera, Colombia.

Nelly Victoria Giraldo Sánchez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias Agrarias

Directora:

Doctora, Elena Velásquez Ibáñez

Línea de Investigación:

Suelos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Palmira, Colombia

2020

Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo incondicional de la Fundación Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV), por proporcionar los datos utilizados en este estudio y especialmente a Julián Chará y Enrique Murgueitio por incentivar la formación de investigadores.

A la doctora Elena Velásquez por revisar y aportar con elementos metodológicos y analíticos al estudio. Igualmente, al doctor Patrick Lavelle, por sus valiosos aportes al documento.

A Lina Paola Giraldo por la motivación, el apoyo constante y por tomarse el tiempo de revisar y corregir el trabajo.

Finalmente, agradezco a Ingrid Tatiana Arcila y Gustavo Giraldo por la ayuda en campo para la recolección de datos.

Resumen

La deforestación para sumar nuevas áreas a la producción ganadera ha causado pérdida de coberturas vegetales y degradación del suelo. La implementación de sistemas silvopastoriles integrando arreglos y prácticas ambientales sostenibles para la conservación del suelo es una alternativa, en la que se enmarca este estudio que comparó sistemas silvopastoriles intensivos (SSPI) con *Tithonia diversifolia*, *Leucaena leucocephala* y pasturas tradicionales (Pt), en fincas ganaderas de la ecorregión Cafetera. Se establecieron 12 parcelas de 3000m² para evaluar variables físicas (densidad aparente, densidad real, porosidad total, humedad volumétrica, resistencia tangencial al corte, resistencia a la penetración y conductividad hidráulica); variables químicas (pH, bases intercambiables -Ca, Mg, K-, materia orgánica -Mo- y P extraíble) y macrofauna edáfica como variable biológica. El estudio de calidad del suelo se hizo a través de Análisis de Componentes Principales (ACP) y Co-inercias, se construyó un Indicador General de Calidad del Suelo (IGCS) para los SSPI y se propuso un protocolo para evaluar sostenibilidad de los SSPI partiendo del IGCS. Los SSPI presentaron las mejores condiciones de calidad en comparación con las Pt, la calidad estuvo determinada por los bajos niveles de compactación, características estructurales óptimas, porosidad, contenido de humedad, materia orgánica, fósforo disponible y, riqueza y abundancia de grupos taxonómicos. El IGCS para SSPI con *Tithonia diversifolia* (0.6 a 1.0) y *Leucaena leucocephala* (0.4 a 0.8) y valores bajos para *Brachiaria* (0.1 a 0.4).

Palabras clave: Sistemas silvopastoriles, indicadores de calidad del suelo, ganadería sostenible, *Tithonia diversifolia*, *Leucaena leucocephala*.

Abstract

Deforestation to add new areas to livestock production has caused loss of plant cover and soil degradation. This study tested the value for soil conservation in sylvopastoral systems. We compared intensive sylvopastoral systems (SSPI) enriched with *Tithonia diversifolia* or *Leucaena leucocephala* and traditional pastures (Pt) in farms of the Colombian Eje Cafetero. In twelve 3000 m² plots we evaluated physical variables (bulk density, real density, total porosity, volumetric humidity, tangential shear resistance, resistance to penetration and hydraulic conductivity); chemical variables (pH, exchangeable bases -Ca, Mg, K-, organic matter -Mo- and P removable) and edaphic macrofauna as a biological attribute. Soil quality of the different land use systems were compared using Principal Component (PCA) and Co-inertia analyses; a General Soil Quality Indicator (IGCS) was elaborated and a protocol was proposed to evaluate the sustainability of the SSPI based on of the IGCS. The SSPIs presented the best quality conditions compared to the Pt. The main improvement in soil quality was a reduced soil compaction, better overall soil structural characteristics (porosities, moisture content), increased organic matter, available phosphorus and higher richness and abundance of macroinvertebrate communities. The highest IGCS values were measured in SSPI with *Tithonia diversifolia* (0.6 a 1.0) and *Leucaena leucocephala* (0.4 to 0.8), the lowest values in Brachiaria (0.1 and 0.4).

Keywords:

Sylvopastoral systems, General Soil Quality Indicator, sustainable livestock, *Tithonia diversifolia*, *Leucaena leucocephala*.

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras.....	XI
Lista de tablas	XIV
Introducción.....	1
Planteamiento del problema	5
1. Justificación	7
1.1 Hipótesis.....	9
1.2 Objetivos.....	9
1.2.1 Objetivo general.....	9
1.2.2 Objetivos específicos	9
2. Marco de referencia	11
2.1 El Suelo	11
2.2 Sistemas silvopastoriles.....	11
2.2.1 Sistema silvopastoril intensivo (SSPI)	12
2.2.2 Calidad del suelo en los sistemas silvopastoriles	12
2.3 Definición de indicadores de calidad del suelo.....	13
2.3.1 Indicadores físicos	15
2.3.2 Indicadores químicos	15
2.3.3 Indicadores biológicos.....	16
2.4 Modelos de evaluación de la calidad del suelo a través de indicadores	18
3. Metodología	19
3.1 Sitio de estudio	19
3.1.1 Tipo de suelos en la región de estudio	22
3.2 Construcción del indicador de calidad del suelo.....	23
3.2.1 Subindicador físico.....	23
3.2.2 Subindicador biológico	25
3.2.3 Subindicador químico.....	26
3.3 Diseño metodológico	28
3.3.1 Ubicación del área de estudio	28
3.4 Evaluaciones	28
3.4.1 Parámetros biológicos (Macrofauna del suelo).....	28
3.4.2 Parámetros físicos	29
3.4.3 Parámetros químicos	30

3.5	Análisis de datos	31
3.5.1	Análisis estadístico	32
3.6	Cálculo de indicadores	32
4.	Resultados	35
4.1	Evaluación de la calidad del suelo bajo coberturas de pasturas mejoradas con <i>Tithonia diversifolia</i> y <i>Leucaena leucocephala</i> en la ecorregión cafetera	35
4.1.1	Parámetros físicos	35
4.1.2	Análisis multivariado de los parámetros físicos	40
4.1.3	Parámetros químicos	46
4.1.4	Análisis multivariado de los parámetros químicos	48
4.1.5	Macrofauna edáfica	50
4.1.6	Análisis multivariado de la macrofauna edáfica.....	51
4.1.7	Análisis de coinercia entre variables físicas, químicas y biológicas.....	53
4.2	Indicador general de calidad del suelo para Sistemas Silvopastoriles Intensivos-SSPI	56
4.2.1	Subindicador de los parámetros físicos del suelo	59
4.2.2	Subindicador de los parámetros químicos del suelo	59
4.2.3	Subindicador del parámetro biológico del suelo	60
4.2.4	Análisis multivariado de los subindicadores	60
4.3	Protocolo de seguimiento de la sostenibilidad de los sistemas silvopastoriles intensivos.....	63
5.	Discusión.....	68
6.	Conclusiones y recomendaciones	71
6.1	Conclusiones.....	71
6.2	Recomendaciones.....	72
	Anexo 1: Figuras del análisis de componentes principales.	73
	Anexo 2: Densidad de macrofauna por m² por sistema ganadero.	77
	Anexo 3. Boxplot de los subindicadores para cada grupo de variables del suelo. ..	85
	Bibliografía	89

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. a. Sistemas silvopastoriles intensivos con <i>Leucaena</i> (<i>Leucaena leucocephala</i>) y b. pasturas tradicionales. Finca San Diego. Montenegro (Q)	20
Figura 2. Sistemas silvopastoriles intensivos con Botón de oro (<i>Tithonia diversifolia</i>) y b. pasturas tradicionales. Fincas La Esperanza y Llanitos, Pereira (R)	20
Figura 3. Ubicación espacial del área de estudio.....	22
Figura 4. Distribución de la toma de muestras en la parcela objeto de estudio.....	29
Figura 5. Mini-simulador de lluvia modelo CIAT.....	30
Figura 6. Diagrama de pasos para la creación de indicadores de calidad del suelo	33
Figura 7. Variables volumétricas. Círculo de correlaciones.....	41
Figura 8. Variables mecánicas. Círculo de correlaciones.....	43
Figura 9. Círculo de correlaciones. Variables estructurales.	45
Figura 10. Círculo de correlaciones de los parámetros químicos.....	49
Figura 11. Círculo de correlaciones de la macrofauna edáfica.	52
Figura 12. Círculo de correlaciones de los grupos de SubIndicadores del suelo.	61
Figura 13. Análisis de componentes principales (ACP) de los valores del indicador general del suelo.	63
Figura 14. Esquema propuesto para la construcción del protocolo.....	64
Figura 16. Análisis de componentes principales (ACP) de las variables volumétricas con respecto a las fincas.....	73
Figura 15. Análisis de componentes principales (ACP) de las variables volumétricas con respecto a las coberturas.	73
Figura 18. Análisis de componentes principales (ACP) de las variables mecánicas con respecto a las fincas.....	73
Figura 17. Análisis de componentes principales (ACP) de las variables mecánicas con respecto a las coberturas.	73
Figura 19. Análisis de componentes principales (ACP) de las variables estructurales con respecto a las fincas.....	74
Figura 20. Análisis de componentes principales (ACP) de las variables estructurales con respecto a las coberturas.	74
Figura 21. Análisis de componentes principales (ACP). Efecto de los niveles altitudinales sobre la calidad química del suelo.....	74
Figura 22. Análisis de componentes principales (ACP). Efecto de las coberturas sobre la calidad química del suelo.	74

Figura 23. Análisis de componentes principales. Efecto de la antigüedad en la calidad química del suelo.	74
Figura 24. Análisis de componentes principales (ACP). Efecto de las rotaciones en la calidad química del suelo.	74
Figura 25. Análisis de componentes principales. Efecto de la periodicidad de fertilización en la calidad química del suelo.	75
Figura 26. Riqueza de macrofauna edáfica en los sistemas ganaderos.	81
Figura 27. Densidad de macrofauna edáfica #individuos/m ² en los sistemas ganaderos.	82
Figura 28. Análisis de componentes principales (ACP). Efecto de los sistemas ganaderos en la población de macrofauna edáfica.	83
Figura 29. Análisis de componentes principales (ACP). Impacto de la vegetación sobre la calidad biológica del suelo.	83
Figura 30. Análisis de componentes principales (ACP). Efecto de la antigüedad de establecimiento de los sistemas en la macrofauna edáfica.	83
Figura 31. Análisis de componentes principales (ACP). Macrofauna edáfica en las fincas ganaderas.	83
Figura 32. Análisis de componentes principales (ACP). Efecto del sistema de rotación sobre la macrofauna edáfica.	84
Figura 33. Distribución de los valores del subindicador de las variables mecánicas del suelo, con respecto a los sistemas ganaderos evaluados.	85
Figura 34. Distribución de los valores del subindicador de las variables mecánicas del suelo, con respecto a las coberturas.	85
Figura 35. Distribución de los valores del subindicador de las variables mecánicas con respecto a los niveles altitudinales de las fincas.	85
Figura 36. Distribución de los valores del subindicador de las variables mecánicas con respecto a la antigüedad (años) de los sistemas.	85
Figura 37. Distribución de los valores del subindicador de las variables mecánicas con respecto al sistema de rotación.	85
Figura 38. Distribución de los valores del subindicador de las variables estructurales del suelo, con respecto a las coberturas.	85
Figura 39. Distribución de los valores del subindicador de las variables estructurales del suelo, con respecto a los sistemas ganaderos.	86
Figura 40. Distribución de los valores del subindicador de las variables estructurales con respecto a los niveles altitudinales de las fincas.	86
Figura 41. Distribución de los valores del subindicador de las variables estructurales con respecto al sistema de rotación.	86
Figura 42. Distribución de los valores del subindicador de las variables estructurales con respecto a la antigüedad (años) de los sistemas.	86
Figura 43. Distribución de los valores del subindicador de las variables volumétricas del suelo, con respecto a los sistemas ganaderos.	86
Figura 44. Distribución de los valores del subindicador de las variables volumétricas del suelo, con respecto a las coberturas.	86

Figura 45. Distribución de los valores del subindicador de las variables volumétricas con respecto a los niveles altitudinales de las fincas.....	86
Figura 46. Distribución de los valores del subindicador de las variables volumétricas con respecto a la antigüedad (años) de los sistemas.	86
Figura 47. Distribución de los valores del subindicador de las variables químicas del suelo, con respecto a los sistemas ganaderos evaluados.	87
Figura 48. Distribución de los valores del subindicador de las variables volumétricas con respecto al sistema de rotación.	87
Figura 49. Distribución de los valores del subindicador de las variables químicas con respecto a las coberturas.	87
Figura 50. Distribución de los valores del subindicador de las variables químicas con respecto a los niveles altitudinales de las fincas.....	87
Figura 51. Distribución de los valores del subindicador de las variables biológicas del suelo, con respecto a los sistemas ganaderos evaluados.	87
Figura 52. Distribución de los valores del subindicador de las variables químicas con respecto a la antigüedad de los sistemas.	87
Figura 53. Distribución de los valores del subindicador de las variables biológicas del suelo, con respecto a las coberturas.	87
Figura 54. Distribución de los valores del subindicador de las variables biológicas del suelo, con respecto a los niveles altitudinales de las fincas.....	87
Figura 55. Distribución de los valores del subindicador de las variables biológicas del suelo, con respecto al sistema de rotación.	88
Figura 56. Distribución de los valores del subindicador de las variables biológicas del suelo, con respecto a la antigüedad de los sistemas.	88
Figura 57. Distribución de los valores del subindicador de las variables biológicas del suelo, con respecto a la fertilización.	88

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos propuestos para el monitoreo de los cambios que ocurren en el suelo.	16
Tabla 2 Ubicación de las fincas ganaderas en la ecorregión Cafetera	21
Tabla 3. Características de manejo de los sistemas	31
Tabla 4. Clases texturales de los sistemas ganaderos objeto de estudio.....	36
Tabla 5. Valores promedio y rangos para las variables físicas del suelo medidas en sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en fincas ganaderas del Eje Cafetero.	37
Tabla 6. Análisis multivariado de los grupos de variables físicas. Aporte en porcentaje de la variabilidad de los datos explicados en los factores 1 y 2; P-value: grado de significancia estadística observada en los sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en fincas ganaderas del Eje Cafetero.....	46
Tabla 7. Valores promedio y rangos para las variables químicas del suelo medidas en sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en fincas ganaderas del Eje Cafetero.	47
Tabla 8. Análisis multivariado de las variables químicas. Aporte en porcentaje de la variabilidad de los datos explicados en los factores 1 y 2; P-value: grado de significancia estadística observada en los sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en fincas ganaderas del Eje Cafetero.....	50
Tabla 9. Análisis multivariado de la macrofauna edáfica. Aporte en porcentaje de la variabilidad de los datos explicados en los factores 1 y 2; P-value: grado de significancia estadística observada en los sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en fincas ganaderas del Eje Cafetero.....	52
Tabla 10. Análisis multivariado para la evaluación de la calidad del suelo en sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en fincas ganaderas del Eje Cafetero.	53
Tabla 11. Coinercia entre los diferentes grupos de variables físicas, químicas y biológicas medidas en sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en fincas ganaderas del Eje Cafetero.	55
Tabla 12. Agrupación de variables para los sistemas silvopastoriles, según el análisis de coinercia realizado en el Eje Cafetero.	55
Tabla 13. Aporte de cada variable en los factores 1 y 2 del Análisis de Componentes Principales (ACP), realizado para sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en el Eje Cafetero.	57
Tabla 14. Valores promedio de los subindicadores por grupo de variables para sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en el Eje Cafetero.	58

Tabla 15. Aporte de los subIndicadores y el porcentaje de Inercia total en el análisis de componentes principales (ACP) en sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en el Eje Cafetero.	61
Tabla 16. Valores del índice general de la calidad del suelo-IGCS, para cada cobertura en sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en el Eje Cafetero.....	62
Tabla 17. Grupo mínimo de variables para la evaluación de la calidad del suelo en sistemas silvopastoriles intensivos.	65
Tabla 18. Metodologías para la evaluación de las variables.	66
Tabla 19. Valores índices de referencia para la calificación de la calidad del suelo en sistemas silvopastoriles intensivos.	67
Tabla 20. Densidad de macrofauna edáfica por metro cuadrado por sistema ganadero. 77	

Introducción

El crecimiento de la población humana e incremento del consumo per-cápita en el mundo ha generado serios impactos en el medio ambiente. Algunos de los indicadores de dicho crecimiento tienen que ver con el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, la deforestación, pérdida de la biodiversidad, la desertificación del suelo, la contaminación y pérdida de los recursos hídricos (Myers & Kent, 2004 citado por McAlpine, Etter, Fearnside, Seabrook & Laurance, 2009).

En América Latina y el Caribe, el sector pecuario representa el 46% del Producto Interno Bruto-PIB agrícola, con un crecimiento de 3.7% anual; particularmente, la ganadería bovina ha aumentado gracias a la demanda mundial de productos de origen animal, lo que ha conllevado a ser una de las regiones de mayor explotación, alrededor del 78% del aumento mundial que corresponde al 19% en la producción de carnes tanto bovina como avícola (Molina & Díaz, 2017).

Según Rodríguez, Llano, & Fonseca, 2018 y FEDEGAN, 2019 en Colombia la ganadería es el reglón productivo que abarca mayor área geográfica (31 millones de hectáreas), representa el 77% de la frontera agropecuaria y el 27% del área continental; contribuye en el PIB nacional, agropecuario y pecuario con el 1.6, 24.8 y el 48.7% respectivamente, cifras altamente significativas para una sola actividad. De acuerdo con el Ministerio de Agricultura, 2009 en Vergara, 2010 y FEDEGAN, 2019 “concentra más de tres veces el valor de la producción del café, más de cinco veces la producción de flores y cerca de seis veces la producción de arroz”. Los departamentos que concentran la mayor producción ganadera son Antioquia, Cundinamarca y Boyacá donde se registra el 38.2 % de la producción. En los departamentos del eje cafetero se ha generado un aumento en la producción ganadera en los últimos años, en parte por la crisis cafetera, esto ha hecho que en la actualidad la ganadería en esta región represente el 3.4 % de la producción nacional (DANE, 2015).

El incremento de la ganadería en el país, significa un desafío ambiental referente a las tasas de deforestación para la ampliación de nuevas áreas productivas, lo que ha desencadenado problemas de degradación de ecosistemas naturales. Colombia aprecia una tasa promedio de deforestación por encima de 200.000 Ha/año, tan sólo en el periodo 2016-2017 se perdieron 219.973 Ha de bosques y las cifras siguen aumentando, ejemplo de ello, para el último año (2018) sólo en la Amazonía Colombiana, región que concentra el 75% de las detecciones por deforestación, se ha perdido alrededor de 43.000 Ha de bosque; dentro de las principales causas directas de este fenómeno se encuentra la praderización y ganadería extensiva que equivale al 50% del cambio de cobertura de bosque a nivel nacional (IDEAM, 2019).

De los problemas ambientales relacionados con la producción ganadera, tiene que ver con la pérdida de biodiversidad debido a la reducción de los ecosistemas naturales de bosques, altera los ciclos biogeoquímicos del suelo y acelera la pérdida de la diversidad de organismos del suelo y de auxiliares tan importantes como los escarabajos coprófagos, por el uso de ivermectinas, además de las alteraciones de las propiedades físicas e hidrológicas del suelo (Asbakk, Hrabok, Oksanen, Nieminen, & Waller, 2006; Tovar, Noriega, & Caraballo, 2016). La disminución de la cobertura vegetal y el pisoteo del ganado contribuyen principalmente al incremento de la densidad aparente, la resistencia a la penetración debido a la compactación, generando la reducción del proceso de infiltración, aumento de la escorrentía y desencadenamiento de manera acelerada de erosión del suelo (Sadeghian, Rivera, & Gómez, 1999).

La dimensión del fenómeno de erosión es enorme, especialmente en Asia, África y Suramérica con tasas promedio de 30-40 ton suelo/ha/año comparado con la tasa de formación de suelo que se acerca a 1 ó 2 ton suelo/ha/año (Sadeghian, 2003), en Colombia particularmente, el 77.6% del suelo dedicado a la ganadería presenta erosión desde ligera hasta muy severa con tasas cercanas a 25 ton suelo/ha/año; las áreas afectadas por erosión de tipo laminar y surcos se relaciona con la pérdida del horizonte orgánico del suelo, el cuál es el que garantiza la resiliencia del suelo a los efectos del cambio climático (IDEAM; U.D.C.A, 2015).

La ganadería además, contribuye a acrecentar los impactos sobre el medio ambiente y el cambio climático con la emisión de gases efecto invernadero (CO₂, CH₄ y N₂O). En

Colombia la ganadería aporta el 44% de la emisión de gases traza debido a la fermentación entérica en el ganado, gestión de estiércol y pastizales (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELERÍA, 2018).

A pesar de los efectos adversos que tiene la ganadería tradicional sobre el medio ambiente, en las últimas décadas se han desarrollado modelos de producción que involucran arreglos y prácticas amigables con el medio ambiente y que contribuyen a la conservación y sostenibilidad del suelo, mitigación de los efectos derivados del cambio climático, rehabilitación de ecosistemas degradados e incremento de la producción (Calle et al., 2013). La agroforestería, que se entiende como un sistema que combina especies arbóreas, con especies arbustivas o herbáceas cultivadas, es uno de dichos modelos. Particularmente, sobre el suelo, los sistemas agroforestales contribuyen al mejoramiento de las propiedades físicas y químicas especialmente la estructura, porosidad y capacidad de retención de agua, además disminuyen la compactación y tienden a reducir la salinización (Reinoso, 2014).

Dentro de los sistemas agroforestales, el silvopastoreo es uno de los modelos implementados en producción ganadera. Los sistemas silvopastoriles buscan integrar especies leñosas perennes (árboles y/o arbustos) con especies forrajeras herbáceas y animales, mediante un manejo integral (Pezo & Ibrahim, 1999).

Los beneficios de la reconversión de los sistemas ganaderos convencionales a silvopastoriles se basan en su contribución al mejoramiento de los servicios ecosistémicos, al optimizar los recursos alimenticios para las especies silvestres como aves, mamíferos, reptiles e invertebrados por la estructura vegetal que conforma el sistema. Se reduce la aplicación de fertilizantes nitrogenados y químicos por la presencia de especies vegetales que mejoran los ciclos biogeoquímicos, por ejemplo, las leguminosas que fijan N_2 y se mejora la disponibilidad de nutrientes. El secuestro de carbono aumenta, se contribuye a recuperar los nutrientes y la disponibilidad del agua gracias a la presencia de árboles de raíces profundas. La cobertura de los árboles suministra mejores condiciones ambientales y de bienestar animal, además aumenta la oferta de biomasa, nutrientes y sombra, reduciendo el estrés calórico, mejorando la producción y la condición corporal de los mismo (Cuartas et al., 2014 citado por Murgueitio et al., 2014).

Los estudios realizados a la fecha, demuestran que los sistemas silvopastoriles son una alternativa de producción agropecuaria que evita en gran medida la degradación del suelo (Silberman, Anriquez, Domínguez, Kunst, & Albanesi, 2015). En América Tropical los sistemas silvopastoriles implementados con mayor frecuencia y que gracias a su estructura han disminuido los efectos negativos sobre el suelo, se han basado

en la integración de gramíneas nativas de los géneros *Axonopus* y *Paspalum* o introducidas *Cynodon*, *Megathyrsus*, *Brachiaria*, *Urochloa*, *Pennisetum*, *Dichanthium*, *Cenchrus* y *Bothriochloa*; plantas leguminosas herbáceas de los géneros *Desmodium*, *Centrosema*, *Calopogonium*, *Pueraria*, *Stylosanthes*, *Clitoria*, *Arachis*, *Teramnus*, *Macropodium*, *Zornia*, *Trifolium* y *Lotus*; en asociación con un estrato de arbustos en alta densidad (entre 10 y hasta más de 40 mil plantas ha⁻¹) destinado al ramoneo del ganado con especies como *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit., de la subfamilia Mimosoidae; *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray, de la familia Asteraceae; o *Guazuma ulmifolia* Lam., de la familia Malvaceae y una diversidad de árboles distribuidos dentro de los potreros en la periferia como cercas vivas (Murgueitio et al., 2015).

A pesar de las investigaciones realizadas acerca de los diseños y beneficios económicos y ambientales de los sistemas silvopastoriles, no se ha profundizado en la identificación y reconocimiento de indicadores de calidad del suelo, que facilite el conocimiento de las interacciones en el mismo para monitorear la sostenibilidad de dicho sistema y del control de la degradación (Mahecha, 2002; Vallejo, 2013).

La construcción de herramientas para caracterizar el aporte de los sistemas silvopastoriles al control de la degradación del suelo y la evolución de su funcionamiento en el tiempo, a través de indicadores de calidad del suelo y de protocolos de seguimiento son aportes que el presente estudio espera contribuir.

Planteamiento del problema

A través de la historia, la producción ganadera en Colombia ha jugado un papel importante en la transformación de los paisajes, especialmente en las regiones de la Amazonía y en el centro del Valle del Río Magdalena, sin embargo, desde inicios del siglo XXI, este proceso también se ha presentado en las regiones Andina y Caribe; en efecto, entre 2005 y 2009, se evidenció que el 90% del área de bosques talados en la Amazonía colombiana y el 80% de la deforestación en los Andes colombianos, se destinó a la producción de pasturas para ganado (Nelson & Durschinger, 2015).

El incremento de la producción ganadera, el cambio del uso del suelo y la adopción de prácticas de producción basadas en sistemas industrializados ejercen una presión importante sobre los ecosistemas naturales, que favorecen la emisión de gases efecto invernadero, reducen la fertilidad del suelo, disminuyen la biodiversidad (por efecto de la deforestación), incrementan los niveles de erosión y en general, degradan los servicios ecosistémicos.

Los sistemas silvopastoriles como modelo alternativo a la producción ganadera tradicional de tipo extensivo, han permitido disminuir la presión sobre los ecosistemas, proteger el suelo y las fuentes hídricas, incrementar la producción de biomasa y en consecuencia aumentar la productividad del ganado.

En Colombia, la implementación de los sistemas silvopastoriles en los últimos años se ha expandido de manera importante en varias regiones del país. El eje cafetero es una de estas regiones en donde se ha avanzado en el establecimiento de nuevas áreas con dichos sistemas basados en la asociación de diversas gramíneas con *Tithonia diversifolia* y *Leucaena leucocephala*.

Pese a la importancia ambiental, económica y social de los sistemas silvopastoriles como modelo alternativo de producción ganadera, algunos productores han identificado que ciertos sistemas silvopastoriles maduros, con tiempo de establecimiento mayor a 10 años, presentan disminución de la cobertura del suelo por pérdida de biomasa especialmente de las gramíneas, lo que podría significar un riesgo para la producción en general del sistema. En términos ecosistémicos, esta condición podría ser considerada normal dada la maduración del sistema productivo.

Adicionalmente, a la fecha no existen indicadores que permitan hacer seguimiento de los sistemas, de modo tal que permita a los productores tomar medidas tempranas que posibiliten su mantenimiento basados en observaciones del suelo. La mayoría de indicadores relacionados con la calidad del suelo, generados hasta el momento, son más amplios y abordan de manera general los servicios ecosistémicos en diferentes usos de la tierra (Lavelle et al., 2014; Velasquez & Lavelle, 2019).

Por otro lado, la información sobre indicadores de calidad del suelo en sistemas productivos ganaderos, independientemente del tipo de arreglo (convencional, silvopastoril) es insuficiente y se encuentra dispersa; esto limita los análisis al respecto de la influencia de las coberturas sobre el mejoramiento de las condiciones productivas del suelo y afecta la toma de decisiones que mitiguen el impacto de la degradación del suelo por prácticas ganaderas.

La generación de información sobre indicadores de calidad del suelo puede ser un insumo valioso para la evaluación, seguimiento, planificación y toma de medidas correctivas de los sistemas silvopastoriles en particular, por ello, para establecer un protocolo de seguimiento de la influencia de los sistemas silvopastoriles sobre la calidad del suelo, es necesario conocer: ¿Cómo se comporta el indicador de calidad del suelo para describir y hacer seguimiento del efecto de los SSPI sobre el suelo en la Ecorregión Cafetera? y ¿Cuáles podrían ser las variables más representativas que conforman los indicadores para los SSPI con *Tithonia diversifolia* y *Leucaena leucocephala*?

1. Justificación

En el país, la ganadería extensiva, representa el 67% de la producción pecuaria, de acuerdo con el Ministerio de Agricultura, 2009 en Vergara, 2010 y FEDEGAN, 2019 “concentra más de tres veces el valor de la producción del café, más de cinco veces la producción de flores y cerca de seis veces la producción de arroz”. En la Ecorregión Cafetera, la ganadería abarca el 49% de uso del suelo, a pesar que tan sólo el 4% es apto para tal actividad (Uribe et al., 2007). Lo anterior ha significado el cambio de usos del suelo de producción de cultivos como el café, frutales, forestales entre otros y la conservación de bosques, hacia el monocultivo de pastos; que ha traído consigo el agotamiento del suelo y la degradación del mismo por la presión ejercida de esta actividad económica (Vergara, 2015).

En este sentido, conocer el grado de degradación ejercido por la producción del ganado en zonas como la Ecorregión Cafetera, implica efectuar análisis del efecto de los sistemas ganaderos sobre la capacidad que posee el suelo de realizar sus funciones, pues se ha demostrado que para esta zona la degradación es alta “Los potreros con y sin árboles están influenciados principalmente por los altos porcentajes de cobertura de “malezas”, poca producción de forraje deseable para el ganado y evidencias de alta compactación producto del sobre pastoreo y pisoteo” (Vergara, 2015). Navarrete et al., (2011) sugieren que “la calidad del suelo es dinámica y puede cambiar en el corto plazo, de acuerdo con el uso y prácticas de manejo, y para conservarla es necesario implementar prácticas sustentables en el tiempo”. Caso particular es la ganadería con sistemas silvopastoriles intensivos.

Actualmente Colombia cuenta con 4.500 hectáreas plantadas en sistemas silvopastoriles intensivos (SSPI), de las más de 84.000 Ha en diferentes diseños de sistemas de producción ganadera amigables con el medio ambiente existentes (FEDEGAN, 2018). Se resalta la importancia de seguir avanzando en la implementación de esta alternativa de producción en vista de que constituye una práctica para el mejoramiento de la

producción, la sostenibilidad de la actividad ganadera y una estrategia frente al cambio climático (FEDEGAN, 2006, 2018).

La evaluación de los sistemas productivos a través de la calidad del suelo, ha sido relevante para avances en diseño, uso y manejo de sistemas, especialmente agrícolas, puesto que, en este tipo de producción se ha concentrado la mayor parte de las investigaciones sobre calidad y salud del suelo, relegando los de tipo pecuario, pese a que es uno de los reglones económicos más importante para diversos países. Un ejemplo de ello es la ganadería, en la cual los estudios se han realizado sobre comparaciones de las características de degradación asociadas a ella como la compactación, incremento de los procesos erosivos, disminución de fertilidad, contribución en la generación de gases efecto invernadero entre otras (Steinfeld et al., 2009).

Los sistemas silvopastoriles han significado una alternativa de producción ganadera que genera grandes expectativas frente a la conservación y al aporte de servicios ecosistémicos (Zuluaga et al., 2011). Sin embargo, se requiere avanzar en el establecimiento de indicadores de calidad del suelo, ya que muchas de las características y propiedades del suelo que se ven afectadas tanto positiva como negativamente por la acción de un uso y cobertura, se utilizan para conocer y monitorear la calidad del suelo, sin embargo, en los sistemas silvopastoriles y en general en los sistemas ganaderos, como se mencionó anteriormente, pocos estudios se centran en el tema.

Esto permitirá entonces, avanzar en metodologías para hacer seguimiento a la sostenibilidad del sistema, ya que aún son escasas las investigaciones que permitan evaluarlos eficientemente debido a que al ser más diversos, generan mayores interacciones y diferentes respuestas frente al manejo (Bravo et al., 2007 en Lok et al., 2007). Los indicadores de calidad como herramienta de evaluación también permitirán prevenir y resolver posibles situaciones de desbalances en los silvopastoriles, teniendo en cuenta, además, la influencia de la diversidad de condiciones edáficas en las que se estén estableciendo.

Debido a que los indicadores de calidad deben ser específicos para cada sistema de acuerdo al tipo de suelo, condiciones ambientales y condiciones agroecológicas, la evaluación de la calidad del suelo en la Ecorregión de Cafetera, aportará a investigaciones previas que han sido desarrolladas en el tema, pero no específicas para la zona. Además, contribuirá a la formulación de protocolos de seguimiento de la sostenibilidad, y permitirá a los productores, entidades gubernamentales y ONG que promueven el establecimiento de este tipo de sistemas productivos, tomar decisiones con criterios de sostenibilidad del suelo en la ganadería.

1.1 Hipótesis

La generación de un indicador integral de calidad del suelo permitirá verificar que los sistemas silvopastoriles intensivos con *Tithonia diversifolia* y *Leucaena leucocephala* generan mejor calidad del suelo que los sistemas tradicionales.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Proponer un indicador de la calidad del suelo para el diagnóstico y monitoreo de la sostenibilidad de los sistemas silvopastoriles intensivos (SSPI), compuestos con pasturas mejoradas + *Tithonia diversifolia* y pasturas mejoradas + *Leucaena leucocephala*, en la Ecorregión Cafetera.

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar los parámetros físicos, químicos y biológicos para determinar la calidad del suelo bajo coberturas de pasturas mejoradas con *Tithonia diversifolia* y *Leucaena leucocephala* en la Ecorregión cafetera
- Establecer un indicador general de la calidad del suelo para SSPI, que sean aplicables en otras regiones y que permitan el seguimiento de los sistemas evaluados.
- Establecer un protocolo de seguimiento de la sostenibilidad de los SSPI con base en el indicador de calidad del suelo.

2. Marco de referencia

2.1 El Suelo

El suelo es un cuerpo natural dinámico, considerado también como un sistema vivo, es tridimensional porque está compuesto por características físicas, químicas y biológicas, desarrolladas por diversos factores de formación a través del tiempo, que en dinámica generan los procesos vitales para el crecimiento de las plantas.

2.2 Sistemas silvopastoriles

Los sistemas silvopastoriles son modelos de agroforestería de tipo pecuaria, en el que se asocia en un mismo espacio, gramíneas, leguminosas y árboles, estructurando tres niveles de producción de biomasa, que los animales consumen generalmente a través de un sistema de rotación de potreros (Pezo & Ibrahim, 1999; Murgueitio et al., 2008; FAO, 2015).

Los sistemas silvopastoriles han sido una exitosa alternativa al sistema convencional de producción ganadera y un ejemplo de integración e intensificación natural de la producción, inicialmente desarrollada en Colombia y que se ha expandido a México y Brasil, entre otros países (Murgueitio et al., 2014).

La contribución de estos sistemas en la producción ganadera y la generación de recursos ecosistémicos se han estudiado ampliamente; el efecto de los silvopastoriles sobre las funciones estratégicas del suelo ha sido una de ellas. Se reporta que estos sistemas “protegen el suelo de la radiación directa del sol gracias a la cobertura de dosel y al aporte de hojarasca” (McNeely & Schroth 2006, citado por Murgueitio et al., 2015), al mejorar las condiciones de disponibilidad de biomasa, nutrientes en el suelo y la retención de humedad, favorecen la biota edáfica que contribuyen a recuperar servicios ambientales que se relacionan con la fertilidad. La cobertura vegetal y las condiciones microclimáticas que se generan dentro de los silvopastoriles contribuyen a recuperar “la

macrofauna edáfica, lo que se relaciona, por su actividad, con el proceso de remoción de suelo incrementando la aireación y porosidad, evita la compactación y mejora la permeabilidad y la capacidad de retención del agua” (Giraldo, Escobar, Chará, & Calle, 2011).

2.2.1 Sistema silvopastoril intensivo (SSPI)

Los sistemas silvopastoriles intensivos se caracterizan por integrar alrededor de “7000 arbustos o más por hectárea y pastos mejorados, en asociación con árboles dispersos en densidades de 30 a 50 individuos por hectárea, con un sistema ganadero basado en pastoreo rotacional racional, con alta carga instantánea, largos períodos de descanso y oferta permanente de agua en cada franja que es ocupada” (Uribe et al. 2011)

Los sistemas silvopastoriles intensivos (SSPI) son modelos adoptados por muchos ganaderos gracias a los beneficios que brindan al productor, entre estos: la oferta de biomasa para la alimentación del ganado, la sombra de árboles en potrero, mejoramiento de la producción de carne y leche en nivel de 15-20%, y la generación de servicios ecológicos (Murgueitio et al., 2008). En Colombia se ha avanzado en el establecimiento de este tipo de modelo de sistema silvopastoril en diferentes regiones del país, la ecorregión cafetera es una de ellas.

2.2.2 Calidad del suelo en los sistemas silvopastoriles

En sistemas de producción ganadera basados en diseños de varios estratos de vegetación como los silvopastoriles, se han realizado pocos estudios que muestran avances en la determinación de indicadores de calidad. Sin embargo investigaciones en Cuba, concluyeron que los indicadores más útiles y que mejor representa el grado de estabilidad del sistema suelo-planta fueron: la distribución de agregados en húmedo y en seco, la estabilidad estructural, la fitomasa subterránea, la macrofauna y la mesofauna; estas variables como indicadoras sirvieron para explicar el progreso en el tiempo de los silvopastoriles con *Leucaena leucocephala-Panicum maximum*, debido al incremento de la población del pasto base y su estabilidad productiva, así como el mejoramiento de las características edáficas” (Lok et al., 2007). Otros estudios han concluido que propiedades físicas como la resistencia a la penetración, densidad aparente, contenido de humedad y las poblaciones microbianas han sido las características más importantes a la hora de

evaluar la calidad del suelo en sistemas silvopastoriles en Brasil y Colombia (Silva, Lima, Campanha, Gilkes, & Oliveira, 2011; Vallejo, 2013).

2.3 Definición de indicadores de calidad del suelo

La calidad del suelo es un proceso complejo debido a las respuestas del suelo a las diferentes acciones antropogénicas y ambientales, por tanto, al ser un sistema vivo debido a las interrelaciones que se generan en éste, se forjan las “propiedades emergentes: fertilidad, productividad, resiliencia, inmunidad (salud), sostenibilidad del suelo, entre otras” (Sánchez de Prager, 2018), en este caso se aborda la calidad del suelo desde el punto de vista de la capacidad que posee un suelo de cumplir las funciones dependiendo de su resistencia, resiliencia y de las características físicas, químicas y biológicas (Sojka & Upchurch, 1999)

La evaluación de la calidad del suelo se consigue a través de indicadores, estos se refieren a variables que resumen información clave haciendo que un fenómeno o condición sea perceptible y que cuantifica, mide y comunica de manera comprensible la información (Cantú et al., 2007).

En el desarrollo del concepto de calidad del suelo adelantado principalmente a lo largo de los años 90's, varios investigadores han propuesto indicadores de evaluación del estado del suelo, planteando que los indicadores son un grupo mínimo de propiedades físicas, químicas y biológicas que cumplan con los criterios: 1. facilidad de medición, 2. sensibilidad a los cambios que ocurren en el suelo, 3. permitan describir los procesos del ecosistema y 4. que sean reproducibles (Doran, Coleman, Bezdicek, & Stewart, 1994). De acuerdo con este concepto, los indicadores deben ser construidos teniendo en cuenta las condiciones edafoclimáticas del ecosistema.

La evaluación de la calidad del suelo a través de los indicadores permite además, entender y revertir el deterioro en la funcionalidad ecosistémica del mismo (Navarrete et al., 2011).

Se han establecido indicadores de calidad del suelo en diferentes sistemas productivos con el fin de conocer el efecto de las coberturas sobre sus propiedades. Por ejemplo, se ha encontrado que atributos sensibles a cambios de coberturas y de uso del suelo como la estabilidad de agregados y la materia orgánica en lotes donde se han realizado

rotaciones agricultura-ganadería durante aproximadamente 30 años, con variada duración de los cultivos, mostró que la tasa de degradación anual en el periodo de producción agrícola, fue similar a la tasa de recuperación en el periodo de pasturas, para suelos Argiudoles vérticos en Argentina (Wilson et al., 2000).

Por otra parte, en suelos Haplustol típico, se evaluaron parámetros como:

el contenido de carbono orgánico, nitrógeno total, pH, conductividad eléctrica, fósforo extractable; carbono liviano; carbono de ácidos húmicos y carbono de ácidos fúlvicos, densidad aparente, cambio en el diámetro medio ponderado de agregados, espesor del horizonte superficial y profundidad del CO_3Ca , con el fin de conocer cuáles eran los indicadores que mejor representaban la calidad del suelo en sistemas de producción agrícola (maíz, trigo y soja), se encontró que los indicadores más sensibles y sencillos de medir para evaluar calidad de suelos están relacionados a la fertilidad: materia orgánica (Carbono orgánico y sus fracciones), nitrógeno total, fósforo extractable y a la susceptibilidad a la erosión: diámetro medio ponderado de agregados, profundidad del CO_3Ca y espesor del horizonte superficial (Campitelli et al., 2010).

Un estudio más reciente plantea que debido a la diversidad de suelos que se encuentran en el campo y los requisitos agronómicos de los cultivos, existe una variabilidad tanto en los parámetros del suelo como en los métodos para evaluar la calidad del mismo; aunque siempre se coincide en la identificación de la interrelación entre la producción agrícola y los parámetros específicos físicos, químicos o biológicos del suelo, en este sentido, en USA se evaluó variables físicas y químicas del suelo bajo dos coberturas maíz (*Zea mays* L.) y soya (*Glycine max* L.) y la relación entre la dinámica de la calidad del suelo y el rendimiento de los cultivos; encontraron que tanto la densidad aparente, el carbono orgánico, contenido de agua disponible y la conductividad eléctrica fueron los parámetros más significativos que influyen en su calidad (Obade, 2019).

Como muestra los ejemplos, las variables que pueden ser utilizadas como indicadores de calidad se han reunido en los parámetros del suelo: físico, químico y biológicos, los cuales deben estar estrechamente relacionados con una función específica que represente los aspectos de calidad del mismo como el desarrollo de cultivos, fertilidad natural, riesgo de erosión, riesgo de compactación y de contaminación (De la Rosa,

2008). Debido a la amplia lista de propiedades del suelo que pueden ser utilizadas como indicadores de calidad, Larson & Pierce (1994) plantearon un grupo base para evaluar los cambios que ocurren en el suelo a través del tiempo, tabla 1.

2.3.1 Indicadores físicos

El suelo es un sistema integrado por tres fases: Sólida, como eje principal del suelo, líquida, básicamente agua con sustancias disueltas llamada solución del suelo y la fase gaseosa que es la atmósfera del mismo (causante del suministro de oxígeno y remoción de dióxido de carbono de los organismos vivos en el suelo). La magnitud o proporción de los componentes de las tres fases, determinan las propiedades físicas del suelo (Valenzuela & Torrente, 2013).

Las propiedades físicas del suelo que pueden ser utilizadas como indicadores de calidad, son aquellas que reflejen la dinámica del agua en cuanto a la disposición de la misma para las plantas conforme la recibe, retiene y transfiere, además de los procesos de infiltración y movimiento del agua en el perfil. También, son aquellas propiedades que muestran limitaciones para el desarrollo de las raíces y la emergencia de las plantas (Bautista, Etchevers, del Castillo, & Gutiérrez, 2004).

2.3.2 Indicadores químicos

La química del suelo se basa en la constitución y reacciones químicas relacionadas con el suministro de nutrientes a las raíces de las plantas. La fase sólida se considera como el principal reservorio de los nutrientes en el suelo, construida por partículas inorgánicas y orgánicas que tienen cationes y aniones disueltos en la solución el suelo, para ser transportados posteriormente las raíces (Lora, 2013) .

El grupo de características químicas que se pueden evaluar como indicadoras, son aquellas relacionadas con “las relaciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la disponibilidad de agua y nutrimentos para las plantas y otros organismos, la movilidad de contaminantes y algunas propiedades físicas” (USDA & SQI, 1996; USDA, 2014).

2.3.3 Indicadores biológicos

Los organismos vivos del suelo y su actividad, es el eslabón primordial para el equilibrio entre las fases o constituyentes del suelo, por tanto, la sensibilidad a los cambios por uso o manejo del suelo, permiten que sean un excelente grupo indicador.

Estos indicadores recogen factores que pueden afectar la calidad del suelo, entre éstas se encuentran la actividad de micro y macro-organismos, la abundancia y contenido de subproductos de los mismos. La descomposición microbiana de la materia orgánica, las tasas de respiración, ergosterol y otros subproductos de los hongos, y tasas de descomposición de residuos vegetales, entre otras (USDA & SQI, 1996).

A continuación, se señala el grupo de propiedades físicas, químicas y biológicas propuestas por Larson & Pierce (1994).

Tabla 1. Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos propuestos para el monitoreo de los cambios que ocurren en el suelo.

Propiedad	Relación con la condición y función del suelo	Valores o unidades relevantes ecológicamente; comparaciones para evaluación
Físicas		
Textura	Retención y transporte de agua y compuestos químicos; erosión del suelo	% de arena, limo y arcilla; pérdida del sitio o posición del paisaje
Profundidad del suelo, suelo superficial y raíces	Estima la productividad potencial y la erosión	Cm o m
Infiltración y densidad aparente	Potencial de lavado; productividad y erosividad	minutos/2.5 cm de agua y g/cm ³
Capacidad de retención de agua	Relación con la retención de agua, transporte, y erosividad; humedad aprovechable,	% (cm ³ /cm ³), cm de humedad aprovechable/30 cm; intensidad

Propiedad	Relación con la condición y función del suelo	Valores o unidades relevantes ecológicamente; comparaciones para evaluación
	textura y materia orgánica	de precipitación
Químicas		
Materia orgánica (N y C total)	Define la fertilidad del suelo; estabilidad; erosión	Kg de C o N ha ⁻¹
pH	Define la actividad química y biológica	comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana
Conductividad eléctrica	Define la actividad vegetal y microbiana	dSm ⁻¹ ; comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana
P, N, y K extractables	Nutrientes disponibles para la planta, pérdida potencial de N; productividad e indicadores de la calidad ambiental	Kg ha ⁻¹ ; niveles suficientes para el desarrollo de los cultivos
Biológicas		
C y N de la biomasa microbiana	Potencial microbiano catalítico y depósito para el C y N, cambios tempranos de los efectos del manejo sobre la materia orgánica	Kg de N o C ha ⁻¹ relativo al C y N total o CO ₂ producidos
Respiración, contenido de humedad y temperatura	Mide la actividad microbiana; estima la actividad de la	Kg de C ha ⁻¹ d ⁻¹ relativo a la actividad de la biomasa microbiana; pérdida de C

Propiedad	Relación con la condición y función del suelo	Valores o unidades relevantes ecológicamente; comparaciones para evaluación
	biomasa	contra entrada al reservorio total de C
N potencialmente mineralizable	Productividad del suelo y suministro potencial de N	Kg de N ha ⁻¹ d ⁻¹ relativo al contenido de C y N total

Fuente:(Larson & Pierce, 1994). The Dynamics of Soil Quality as a Measure of Sustainable Management, In Defining Soil Quality for a Sustainable Environment.

2.4 Modelos de evaluación de la calidad del suelo a través de indicadores

El planteamiento de metodologías para la evaluación de la calidad del suelo ha dependido de las particularidades de los suelos y de las coberturas, puesto que no todos los parámetros del suelo tienen la misma relevancia.

A lo largo de los años, varios investigadores han propuesto metodologías para la evaluación de la calidad y la salud del suelo, planteando evaluaciones con características que pueden ser muy amplias (a nivel de paisaje) como coberturas del suelo, o en la reducción de indicadores a tan sólo la evaluación de ciertos parámetros físicos y/o químicos (Rodríguez, 2011, Pablo Cantú et al., 2007). Como también se encuentra aquellas metodologías más integrales que buscan la construcción de indicadores de sostenibilidad y de calidad del suelo (Altieri & Nicholls 2002, Velásquez, 2004).

De las herramientas o metodologías encontradas en la literatura, la propuesta por Velásquez (2004) es la más pertinente para el estudio, debido a que integra la serie de parámetros del suelo que responde al concepto y criterios de definición de los indicadores de calidad.

3. Metodología

3.1 Sitio de estudio

El estudio fue realizado en seis fincas ganaderas enmarcadas en la zona conocida como Ecorregión Cafetera, la cual se ubica

En el centro occidente colombiano y constituye una porción de la región Andina, en las coordenadas 5°28'18" N y 75°40'54" O. De acuerdo con la zonificación, el uso forestal es el principal potencial en términos de área, abarcando el 54% del territorio, los usos agrícolas representan el 21%, los sistemas agroforestales suman 20% y las áreas de vocación para la ganadería (extensiva e intensiva) configuran solo el 4% del territorio. Sin embargo, en la actualidad la producción ganadera y agrícola representan los valores más altos de uso del suelo con 49 % y 30.1 % respectivamente, del área total de la zona (Rodríguez et al., 2009).

Los predios seleccionados para el estudio, se encuentran ubicados en los municipios de Pereira (Risaralda), Montenegro, Tebaida (Quindío), Alcalá y Cartago (Valle del Cauca) tabla 2.

Las fincas fueron escogidas bajo el criterio inicial de presencia de sistemas ganaderos bajo dos coberturas de suelos: Silvopastoriles intensivos y pasturas tradicionales.

Las características de selección de los sistemas se basaron en la composición de la vegetación, el grado de cobertura del suelo, inclinación o pendiente del terreno (entre 15 y 20%), antigüedad o tiempo de establecido el sistema y manejo de los mismo.

Las pasturas tradicionales correspondieron a aquellas en donde predominaron las especies estrella africana *Cynodon plectostachyus*, pasto grama *Cynodon dactylon* y/o *Brachiaria decumbens* con presencia de las herbáceas no deseables de hoja ancha. Por otro lado, los sistemas silvopastoriles intensivos se seleccionaron con base a la

presencia de más de un estrato de vegetación, el estado de las plantas con características vigorosas, buena cobertura del suelo (>60%) y ausencia o baja presencia de plantas de hoja ancha no deseables.

En vista que los sistemas silvopastoriles intensivos que se han venido promoviendo a nivel nacional incluyen la composición de pasturas mejoradas y *Leucaena leucocephala* y/o pasturas mejoradas y *Tithonia diversifolia*, el trabajo se concentró en estos sistemas.

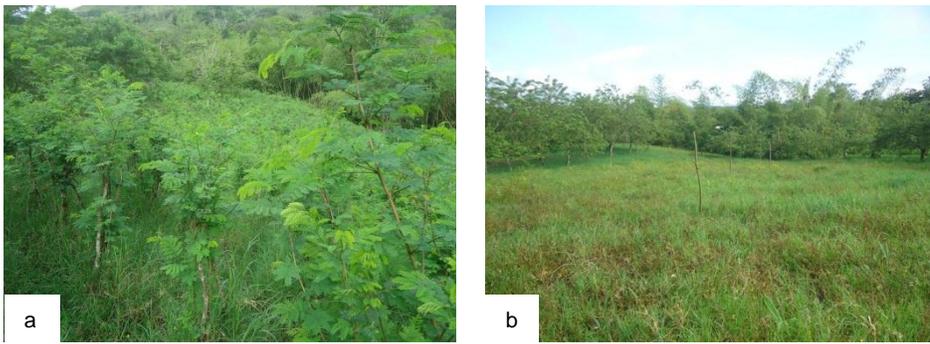


Figura 1. a. Sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena* (*Leucaena leucocephala*) y b. pasturas tradicionales. Finca San Diego. Montenegro (Q)

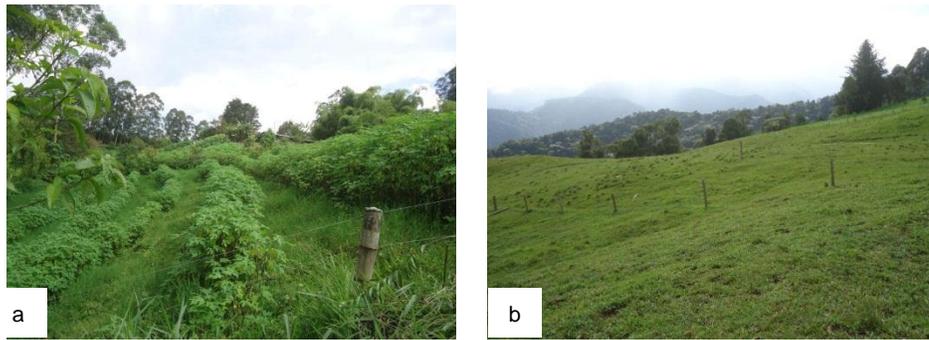


Figura 2. Sistemas silvopastoriles intensivos con Botón de oro (*Tithonia diversifolia*) y b. pasturas tradicionales. Fincas La Esperanza y Llanitos.

El botón de oro (*Tithonia diversifolia*), es una especie arbustiva que puede alcanzar alturas hasta 5 m, tiene un gran valor ecológico por ser atrayente de insectos benéficos por el potencial melífero de las flores. Esta planta se adapta muy bien a suelos ácidos, de baja fertilidad, presenta rápido crecimiento, elevada tasa de producción de biomasa, es rústica y contiene altos niveles nutricionales, características que han permitido su

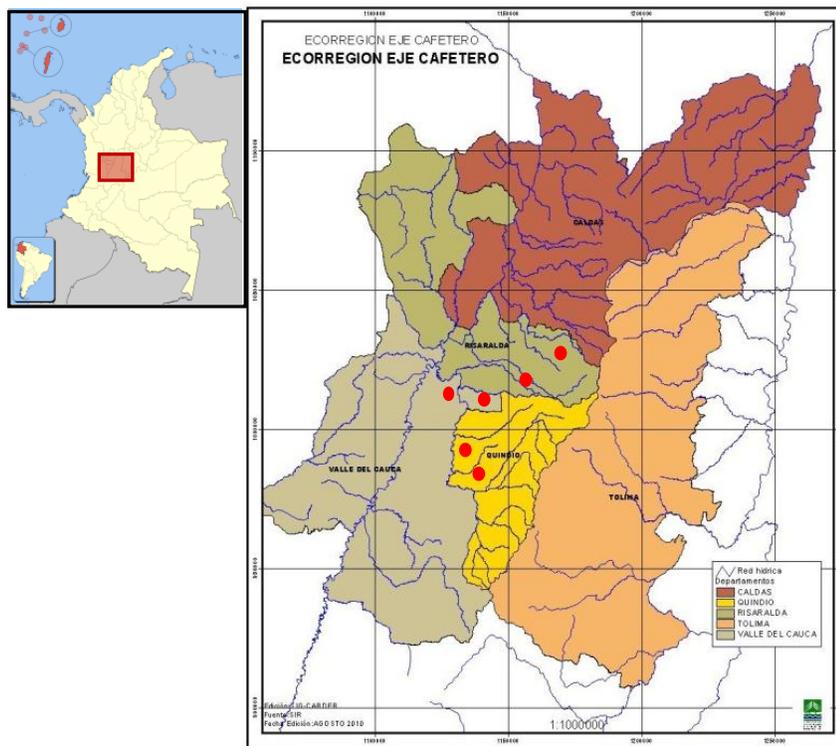
integración a los sistemas productivos (Calle & Murgueitio, 2008). *Tithonia diversifolia* es utilizada como suplemento alimenticio para el ganado tanto de engorde como lechero, debido a que contiene altos porcentajes de proteína, carbohidratos solubles y taninos, adicionalmente se le atribuye la capacidad de aportar fósforo en el suelo (Gallego, Mahecha, & Angulo, 2014).

Por otro lado, la leucaena (*Leucaena leucocephala*) es una leguminosa que ha sido manejada e integrada en las pasturas en los últimos 15 años, pues posee excelentes características nutricionales y es de rápido crecimiento (Montagnini, Somarriba, Murgueitio, Fassola, & Eibl, 2015). Además, soporta jornadas de ramoneos intensos, al consumir el forraje, los animales incrementan su producción ($\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$), gracias a la oferta de materia seca aportada por la leguminosa que puede ser 1.3 veces mayor que en un sistema convencional (Rivera, Molina, Chará, Murgueitio, & Barahona, 2017).

Tabla 2 Ubicación de las fincas ganaderas en la ecorregión Cafetera

Finca	Municipio/ Dpto	Altura (msnm)
Asturias	La Tebaida (Quindío)	1169
Llanitos	Pereira (Risaralda)	2054
Esperanza	Pereira (Risaralda)	1574
San Diego	Montenegro(Quindío)	1171
Santa Cruz	Alcalá (Valle del Cauca)	1100
Vesubio	Cartago (Valle del Cauca)	929

Figura 3. Ubicación espacial del área de estudio.



Fuente: Pineda (2014), Ecorregión Cafetera, CARDER.

Los puntos rojos referencian las fincas objeto de estudio*.

3.1.1 Tipo de suelos en la región de estudio

Según el IGAC (2013) los suelos de los municipios de Montenegro y La Tebaida, provienen de “arcillolitas y conglomerados, son profundos, bien drenados, de texturas finas, ligeramente ácidos, con fertilidad moderada y pertenecen a las familias Molic Hapludalfs, familia fina, semiactiva, isotérmica y Typic Hapludolls, familia franca fina, mezclada, activa, isotérmica”.

Los suelos de Pereira, se caracterizan por tener “unidad geomórfica de montañas de material fluviovolcánico, cubiertas por depósitos de cenizas volcánicas, pertenecientes a la familia Typic Hapludands, familia medial mezclada, isoméscica” (CARDER, 2013).

El municipio de Alcalá presenta las unidades de suelos La Estrella (LE3), Malabar (MB2 Y MB3), Mixta (MB2, MB3 y CH2) y Chinchiná (CH2); los suelos son de origen principalmente volcánico, con características de pH ligeramente ácido, texturas de

medianas a gruesas, estructuras blocosas angulares y subangulares, y buen drenaje, la fertilidad puede ir de baja a medio, estas unidades las conforman principalmente suelos de las familias Typic Melanudands, Typic Hapludands y Tipyc Argiudoll (Municipio de Alcalá Valle del Cauca, 2003),(Calle, 2001) .

El municipio de Cartago presenta diferentes relieves. En la zona plana llanuras de origen aluvial de los ríos Cauca y La Vieja y en la zona de ladera un sistema de colinas Bocabajo, con pendientes que varían entre 25 y 75%. Los suelos de la zona de ladera y plana, se formaron sobre abanicos recientes, con aportes de cenizas volcánicas y depósitos materiales aluviales, se encuentra la asociación Typic Fulvudands; Typic Argiudolls y asociación Typic Eutrudepts; Typic Hapludands; Typic Udorthents.(Alcaldía de Cartago Valle del Cauca, 2009), (IGAC, 2013)

3.2 Construcción del indicador de calidad del suelo

La construcción del indicador de la calidad del suelo para el monitoreo de los sistemas silvopastoriles, se basó en la metodología propuesta por Velásquez (2004). La cual consiste en construir un grupo de subindicadores que se combinan entre sí para conformar un indicador general (Velásquez, Lavelle, & Andrade, 2007).

Los subindicadores se refieren al conjunto de propiedades del suelo elegidas para la descripción de una cantidad de características asociadas a la calidad del suelo, en este caso los subindicadores que se conformaron partieron de las características físicas asociadas a la compactación, actividad biológica mediante la diversidad y abundancia de la macrofauna edáfica, características químicas.

3.2.1 Subindicador físico

Las propiedades del suelo evaluadas como subindicador de las propiedades físicas son la textura, contenido de humedad, resistencia a la penetración, densidad aparente, densidad real, porosidad total y estabilidad de agregados.

- **Textura**

La textura es la propiedad física que determina la distribución de las partículas minerales (Arena, Limos y Arcillas) (Jaramillo, 2002). La proporción en que se encuentren estas

partículas catalogan el suelo en clases texturales y sus propiedades, lo que permite hacer una deducción de las demás propiedades físicas, valorar y ajustar prácticas de manejo y determinar la capacidad de uso del suelo (Narro, 2004).

▪ **Contenido de humedad**

La importancia del estudio del contenido de humedad del suelo radica en el aporte al conocimiento de la dinámica de la infiltración, permeabilidad, drenaje y el escurrimiento; pues estas propiedades dependen de la distribución de los poros y la capacidad que tenga el suelo para mantener la dinámica del agua dentro del componente sólido, debido a la cobertura que presentan y al manejo que se le ha empleado.

La humedad que contiene el suelo es determinado además de la influencia del clima, por la textura, estructura, contenido de materia orgánica y la profundidad (Jaramillo, 2002). A su vez “la humedad influye en propiedades físicas como la densidad aparente, el espacio aéreo, la compactación, la penetrabilidad de las raíces, resistencia al corte, consistencia, succión total del agua, además en algunos procesos químicos, bioquímicos, microbiales y en el crecimiento de las plantas” (Forsythe, 1975).

▪ **Resistencia a la penetración**

La resistencia a la penetración es uno de los parámetros más importantes a la hora de conocer las alteraciones físico-mecánicas como resultado de la compactación y su relación con el enraizamiento. Ofrece información acerca de posibles capas endurecidas a través del perfil del suelo, que pueden limitar el crecimiento de las raíces. Esta medida puede ser usada para comparar resistencias relativas entre tipos similares de suelo (Velásquez, 2004).

▪ **Resistencia al corte**

En el desarrollo y crecimiento de las plantas influyen notablemente las propiedades mecánicas del suelo, por tanto, es necesario conocer de manera amplia la resistencia mecánica del suelo y la relación con el enraizamiento. La resistencia al corte, permite establecer la firmeza que tiene un suelo al ser partido por una fuerza externa, por tanto, ofrece información acerca de la resistencia del suelo a la emergencia de las plantas y de su desarrollo (Jaramillo, 2002).

- **Densidad aparente**

Se refiere a la relación entre la masa de las partículas sólidas del suelo y el volumen que ocupan, teniendo en cuenta el espacio poroso que entre ellas se encuentre (Narro, 2004). La densidad aparente nos indica el grado de compactación que presenta un suelo y por tanto la porosidad con la que cuenta, esto es de vital importancia porque se puede relacionar con la capacidad de retención de humedad y el contenido de materia orgánica.

- **Porosidad total**

La distribución del espacio poroso depende de la composición y arreglo de la fracción sólida del suelo (textura, estructura y materia orgánica) presentándose dos tipos de porosidades: microporosidad o porosidad textural y macroporosidad o porosidad estructural (Jaramillo, 2002). La primera es responsable de la retención de humedad y la segunda del movimiento del agua como el drenaje y la aireación, además de encargarse del desarrollo radicular, así, la porosidad total o porosidad del suelo es la suma de los macro y microporos (Rucks, García, Kaplán, Ponce de León, & Hill, 2004). La porosidad es otra forma de evaluar la calidad del suelo, ya que cuando un suelo pierde esta característica, pierde su potencialidad productiva.

3.2.2 Subindicador biológico

- **Macrofauna edáfica**

La macrofauna edáfica desempeña un papel importante en el ecosistema del suelo e influye significativamente en las propiedades físicas y químicas, especialmente en la formación de macroporos y en la transformación y distribución de la materia orgánica. Debido al papel que desempeñan y a la sensibilidad ante procesos naturales, ya que la diversidad y abundancia de las poblaciones puede variar en periodos de tiempo cortos por la alteración de la cobertura del suelo, la macrofauna se ha utilizado como indicador de la calidad del suelo (Moreira, Huising, & Bignell, 2012).

3.2.3 Subindicador químico

Las propiedades químicas evaluadas para la construcción del indicador del suelo fueron: pH, materia orgánica (Mo), bases intercambiables (Ca, Mg y K), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y P extraíble.

- **pH**

Esta característica define la fertilidad y estabilidad química del suelo. El pH, depende de varios factores, como de las prácticas de cultivo (fertilizaciones y manejo de coberturas), contenido hídrico, procesos de formación del suelo y horizontes muestreados; por esta razón permite conocer los cambios en el suelo por modificaciones de las condiciones ambientales, por ejemplo, cambios relacionados con el desequilibrio del sistema productivo afectan la actividad de los microorganismos y el desarrollo de las plantas y se verá reflejado en los niveles en el pH (Cepeda, 2007).

- **Materia orgánica**

El cúmulo de residuos orgánicos de origen animal y/o vegetal en diferentes grados de descomposición acumulado en el perfil del suelo se conoce como materia orgánica (MO), tiene un papel fundamental en la dinámica del suelo, pues regula los procesos químicos e interviene en las características físicas, esto la convierte en un indicador esencial a la hora de evaluar no sólo la productividad de los sistemas sino también la resistencia ambiental. El Carbono es uno de los elementos más importantes que conforman la MO (entre 55-60% de C en masa), en muchos casos el C encierra la mayor reserva de Carbono Orgánico del Suelo (COS), importante a la hora de evaluar la captura de gases efecto invernadero como el CO₂ y el CH₄ en el suelo (Lefèvre, Rekik, Alcantara, & Wiese, 2017).

Por otro lado, el Nitrógeno otro de los principales elementos que conforman la materia orgánica y el nutriente que más demandan las plantas, después del C. La dinámica del N en el suelo está estrechamente ligada a la vida microbiana, a la presencia de materiales orgánicos provenientes de las partes aéreas de las plantas y a la rizosfera, esta última, genera condiciones de vida y hábitats a estas comunidades microbianas a través de sus exudados radicales y algunos de estos compuestos, a su vez, constituyen señales moleculares que estimulan o inhiben procesos de su ciclaje y de otras interacciones

como las micorrizas arbusculares (Sánchez de Prager, 2018; Coskun, Britto, Shi, & Kronzucker, 2017)

Debido a la importancia del C y el N en los agroecosistemas usualmente son utilizados para evaluar la calidad del suelo asociada a los sistemas de labranza, uso y capacidad productiva (Jaramillo, 2002; Cepeda, 2007; Martínez, Fuentes, & Acevedo, 2008).

- **Bases intercambiables (Ca, Mg, K)**

Las bases intercambiables indican los cambios y condiciones de disponibilidad de los principales nutrientes en las que se encuentre el suelo de acuerdo al manejo y al uso que se esté efectuando en el mismo. Así por ejemplo: en climas moderados, el calcio constituye alrededor del 80% de las bases intercambiables, estos suelos con una saturación de calcio (mayor al 25%) se encuentran en un estado físico y nutricional satisfactorio; un suelo en el que predomina este elemento es de estructura granular y porosa, lo que es beneficioso para el suelo en cuanto a aireación y drenaje (Cepeda, 2007).

- **Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)**

En el desarrollo de los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurre en el suelo, se acumula una serie de sustancias nutritivas vitales para el crecimiento y desarrollo de las plantas. La CIC, es definida como la medida de la cantidad de cargas negativas que resulta de la interacción entre la fase líquida y sólida del suelo (coloides: partículas de arcilla, materia orgánica y los hidróxidos) resultantes de dichos procesos; es una de las propiedades más importantes porque influye en la estructura, en la actividad biológica, fertilidad y en los procesos genéticos y de formación. Los principales cationes cambiables del suelo son: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^{2+} , Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} y H^+ (Cepeda, 2007; Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo-SCCS, 2013).

- **Fósforo extraíble**

El fósforo, es el tercer elemento requerido por las plantas después del C y N. Permite conocer el equilibrio nutricional disponible para las plantas, pues éste está estrechamente relacionado con el pH y es altamente susceptible a pérdidas por erosión y drenaje (Cepeda, 2007). La mayor cantidad del fósforo de los ecosistemas terrestres se

encuentra localizado en el suelo, generalmente su contenido varía entre 100 a 3000 mg de P/kg; pero su disponibilidad está dada por el uso del suelo, debido a que las fuentes de fósforo y su distribución son críticas las plantas han desarrollado diversas estrategias para la obtención de este elemento, especialmente cuando es limitado, dentro de las alternativas que las plantas han desarrollado se incluyen las modificaciones morfológicas de la raíz, adaptaciones fisiológicas, alteraciones bioquímicas que promueven asociación con microorganismos micorrízicos y no simbiosis (Cerón & Aristizábal, 2012; Sánchez de Prager, 2018). Debido a la importancia en las plantas, su ciclo biogeoquímico y las adaptaciones que ha generados con los microorganismos del suelo, se ha utilizado ampliamente como indicador de calidad del suelo.

3.3 Diseño metodológico

3.3.1 Ubicación del área de estudio

En cada sistema evaluado (SSPI y Pastura Tradicional) se demarcó una parcela de 50 x 60m, para un total de 12 parcelas de evaluación en las seis fincas.

3.4 Evaluaciones

3.4.1 Parámetros biológicos (Macrofauna del suelo)

En cada una de las parcelas se trazaron dos transectos a lo largo del área, en los cuales se obtuvieron seis monolitos a dos profundidades (0-10 y 10-20 cm), respetando una distancia entre 10 y 15 mt desde el borde de la parcela hacia el interior para evitar el efecto de borde (figura 4).

Los monolitos se extrajeron siguiendo el método certificado NF ISO 23611 por Tropical Soil Biology and Fertility (25 x 25 x 10cm) 2011, de los monolitos se colectaron de forma manual todos los organismos presentes. Las lombrices se almacenaron en una solución de formol al 4%, mientras que las hormigas, termitas, escarabajos y otros macroatrópodos se preservaron en alcohol al 80% para su posterior conteo e identificación, la identificación en algunos casos se realizó hasta familia como sugiere Moreira et al., 2012.

La figura 4, muestra la distribución de los puntos para la toma de las muestras en cada parcela.

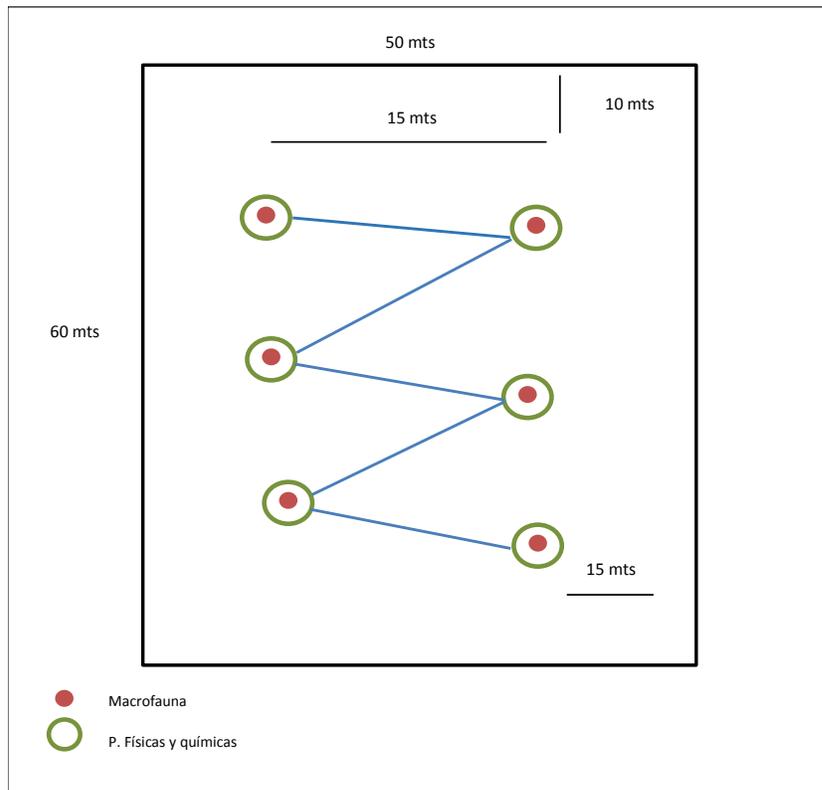


Figura 4. Distribución de la toma de muestras en la parcela objeto de estudio.

3.4.2 Parámetros físicos

En los mismos transectos y en los puntos de muestreo de la macrofauna edáfica descritos en dicha sección, se tomaron muestras de suelo de acuerdo con las metodologías particulares para cada variable física. Posteriormente fueron conducidas al laboratorio para realizar los diferentes análisis.

La textura se evaluó por el método de Bouyucos, el contenido de humedad se evaluó con base al volumen, la estabilidad de agregados se realizó con el método de Yoder, la conductividad hidráulica fue determinada a través del método de permeámetro de cabeza constante, y la densidad aparente se halló a través del método del cilindro biselado. Los análisis fueron realizados en el laboratorio de física de suelos de la Corporación Colombiana de investigación agropecuaria-Agrosavia y en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. La resistencia a la penetración se

obtuvo en campo con el penetrómetro manual Eijkelkamp y la resistencia al corte con Veleta de corte manual (Handheld).

Como parámetro complementario se evaluó la escorrentía, ésta se estimó con un mini-simulador de lluvia (figura 5), basados en el modelo y metodología planteada por Amézquita & Campo (2004). El muestreo se realizó en cada una de las parcelas seleccionadas, tres repeticiones con el simulador de lluvia, y se tomaron las muestras del volumen de escorrentía para calcular con base en ésta la lámina de escorrentía.



Figura 5. Mini-simulador de lluvia modelo CIAT.

3.4.3 Parámetros químicos

Del suelo extraído de cada uno de los seis monolitos, se obtuvo una muestra compuesta, la cual se envió al laboratorio de química de suelos de Agrosavia, para realizar todos los análisis correspondientes.

3.5 Análisis de datos

Para el análisis de los datos se tuvo en cuenta la caracterización del manejo de las parcelas, ya que este tipo de información es clave para evaluar los impactos negativos o positivos sobre las propiedades del suelo en los sistemas ganaderos.

La información de caracterización se basó en la rotación de potreros, antigüedad de establecimiento de los sistemas, tipo de cobertura del suelo, ya fuese sistema silvopastoril intensivo (SSPI) o pastura tradicional (Pt), vegetación haciendo referencia básicamente al tipo de arbusto acompañante en los sistemas silvopastoriles (*Leucaena leucocephala*) o Botón de oro (*Tithonia diversifolia*) y periodos de fertilización. La tabla 3, muestra las características de cada sistema por finca.

Tabla 3. Características de manejo de los sistemas

Finca	Cobertura	Vegetación	Antigüedad (años)	Rotación (días)	Fertilización (meses*)
Llanitos	SSPI	<i>Tithonia diversifolia</i>	3	25	2
	Pt	<i>Cynodon dactylon</i>	8	25	2
Esperanza	SSPI	<i>Tithonia diversifolia</i>	3	45	1.5
	Pt	<i>Cynodon dactylon</i>	30	45	1.5
Vesubio	SSPI	<i>Tithonia diversifolia</i>	3	25	2
	Pt	<i>Brachiaria decumbens</i>	20	25	2
San Diego	SSPI	<i>Leucaena leucocephala</i>	10	45	3
	Pt	<i>Cynodon plectostachyus</i>	15	45	3
Santa Cruz	SSPI	<i>Leucaena leucocephala</i>	10	25	3
	Pt	<i>Brachiaria decumbens</i>	18	25	3
Asturias	SSPI	<i>Leucaena leucocephala</i>	10	45	3
	Pt	<i>Cynodon dactylon</i>	12	45	3

SSPI: Sistema Silvopastoril intensivo, **Pt:** Pastura Tradicional. *Periodicidad.

Para el análisis de los datos, teniendo en cuenta las particularidades en cuanto al manejo de los sistemas en cada finca, se separaron los sistemas evaluados por antigüedad y manejo, es decir entre el tiempo de establecido el sistema y la composición del mismo.

Las variables estudiadas se agruparon por función en el suelo: químicas, biológicas y en el caso de los parámetros físicos se dividió de acuerdo con las características estructurales, volumétricas y mecánicas.

3.5.1 Análisis estadístico

Siguiendo el método descrito por Velásquez et al., (2007), los análisis estadísticos se realizaron con

Software R (Ihaka Gentleman, 1996, R-Desarrollo-Core Team, 2009) y el paquete ade4 para el análisis multivariado (Chessel et al, 2004; Dray y Dufour, 2007; Dray et al, 2007). Para la construcción del indicador se realizó un análisis de componentes principales (ACP) y el test de Montecarlo. Este indicador permite discriminar los sitios en función de la calidad del suelo con valores que van desde 0.10 a 1.00.

3.6 Cálculo de indicadores

El cálculo de los indicadores de calidad del suelo, para los sistemas silvopastoriles intensivos, se realizó empleando la metodología de construcción de indicadores propuesta por Velásquez, (2004) (Figura 6). Partiendo de los análisis estadísticos y siguiendo cuatro pasos fundamentales propuestos por (Velasquez et al., 2007).

1. Análisis de componentes principales (ACP) para cada uno de los grupos de variables o subindicadores.
2. Identificación y selección de las variables que tienen mayor peso y representan los sitios de acuerdo con su calidad.
3. Creación de los subindicadores de calidad física, química y macrofauna con rangos de valores de 0.10 a 1.00.
4. Combinación de los subindicadores en un indicador general de la calidad del suelo.

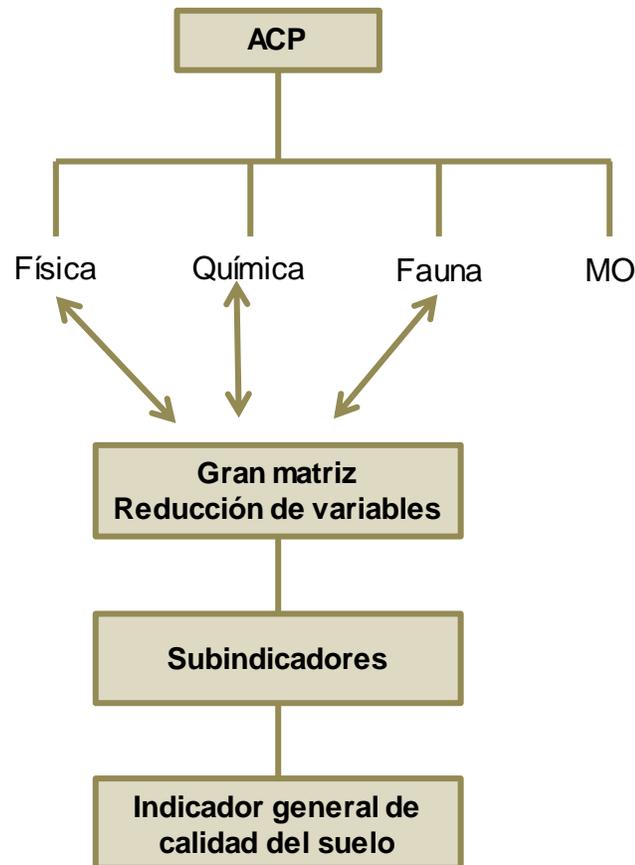


Figura 6. Diagrama de pasos para la creación de indicadores de calidad del suelo, modificado de (Velásquez, 2004)

Fuente: Velásquez, (2004). Bioindicadores de la calidad del suelo basados en las poblaciones de macrofauna y su relación con las características funcionales del suelo

Para el análisis de componentes principales (ACP) se dividieron los parámetros físicos del suelo en tres grupos de variables: 1. Volumétricas, que agrupa todas las variables relacionadas con la hidrología del suelo, 2. Mecánicas, que toma en cuenta las variables relacionadas con el óptimo desarrollo de las raíces de las plantas y 3. Estructurales, las cuales agrupa las variables de agregación, estructura y textura del suelo.

4. Resultados

4.1 Evaluación de la calidad del suelo bajo coberturas de pasturas mejoradas con *Tithonia diversifolia* y *Leucaena leucocephala* en la ecorregión cafetera

La evaluación de la calidad del suelo de sistemas ganaderos con sistemas silvopastoriles intensivos (SSPI) y pasturas tradicionales (Pt) en la ecorregión cafetera, se basó en el estudio de los datos mediante análisis multivariado de componentes principales para cada grupo de variables del suelo y análisis de coinercia para evaluar la correlación entre los grupos de variables, con ello se determinaron las variables que mejor explican el efecto de las coberturas vegetales sobre la salud y calidad del suelo.

4.1.1 Parámetros físicos

El efecto de las coberturas se evidenció en el mejoramiento de los parámetros físicos, en las fincas evaluadas, esto se da gracias al manejo de las pasturas y al tiempo de establecimiento de las mismas. En la tabla 5 se presentan los resultados de los análisis de cada variable física por sistema evaluado.

En general, la clase textural que predominó en los sistemas ganaderos fue la Franco Arenosa, normalmente denominadas texturas “Moderadamente pesadas”. Las fincas que presentaron mayor cantidad de partículas finas y que pueden influir en el movimiento del suelo, por tanto, pueden tener un mayor riesgo a degradación por erosión, fueron El Vesubio con 34 % de limo y Santa Cruz con 68 % (tabla 4).

Tabla 4. Clases texturales de los sistemas ganaderos objeto de estudio

Textura					
Finca	Sistema	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase Textural
Llanitos	SSPI	59.52	33.28	7.2	Franco Arenosa
	Pt	68.8	24	7.2	Franco Arenoso
La Esperanza	SSPI	69.52	23.28	7.2	Franco Arenoso
	Pt	65.42	22.3	7.2	Franco Arenoso
Vesubio	SSPI	62.4	21.28	16.32	Franco Arenoso
	Pt	38.96	34	27.04	Franco Arcilloso
Asturias	SSPI	58.96	26	15.04	Franco Arenoso
	Pt	66.96	22	11.04	Franco Arenoso
Santa Cruz	SSPI	48.56	34.4	17.04	Franco
	Pt	10.96	68	21.04	Franco Limoso
San Diego	SSPI	52.4	33.28	14.32	Franco
	Pt	52.4	31.28	16.32	Franco

SSPI: Sistema silvopastoril intensivo, Pt: Pastura tradicional.

La estabilidad de agregados fue moderada para todas las fincas y coberturas, teniendo en cuenta el índice de agregación mediante el diámetro ponderado medio (DPM) que oscila entre 1.5 - 3.0 mm para esta categoría. Sin embargo, los SSPI de la finca El Vesubio presentaron el valor más alto para el DPM (3.0 mm), mientras el índice de estructura (IE) fue mayor en los SSPI de la finca San Diego (91.5 %).

Los valores promedios de conductividad hidráulica (Ks) en las pasturas tradicionales (Pt) de todas las fincas, oscilaron entre 0.4 a 2.6 cm/h, lo que conlleva a tener una dinámica de movimiento del agua de lenta a moderada y en los SSPI de 0.9 a 3.5 cm/h moderadamente lenta a moderada. Las fincas que mostraron las mejores dinámicas de Ks fueron La Esperanza, San Diego y El Vesubio.

Los SSPI de la finca La Esperanza presentaron el mayor porcentaje de contenido de humedad (63.6), mientras para las Pt el valor más alto se encontró en la finca Llanitos (60.7).

Los valores para la densidad aparente, fueron similares en los sistemas evaluados. Sin embargo, la Pt de la finca Santa Cruz, presentó el valor más alto para este parámetro (1.7 g/cm³).

Las Pt y los SSPI de las fincas la Esperanza y Llanitos, presentaron los mayores niveles de porosidad total, que pueden ser considerados como excesivos, con valores entre 74.2 y 73.3, respectivamente.

En cuanto a la escorrentía, los valores más altos se presentaron en las Pt de las fincas San Diego y Santa Cruz con valores promedios de 7.6 y 6.4 mm/h.

En general los sistemas presentaron valores muy altos de resistencia a la penetración en comparación con el límite crítico para la penetración de las raíces de cultivos comerciales que es de 27 kgf/cm², alcanzando valores promedio hasta de 96.5 kgf/cm² en Pt de la finca El Vesubio.

Los Pt de las fincas San Diego y Vesubio presentaron un rango de limitación del crecimiento de las plantas muy alto (>80 Kpa), mientras en la finca Llanitos se encontró el valor más bajo (41-60 Kpa).

Tabla 5. Valores promedio y rangos para las variables físicas del suelo medidas en sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en fincas ganaderas del Eje Cafetero.

Variable	Sistema	n=número de muestras por sitio	Media	Asturias	Esperanza	Llanitos	Santa cruz	San Diego	Vesubio
			Rango						
			σ						
Índice de agregación: Diámetro ponderado medio-DPM (mm)	SSPI	n = 3	M	2.8	2.3	2.6	2.2	1.9	3.0
			R	2.2-3.4	2.22-2.58	2.56-2.69	1.7-2.8	1.7-2.0	2.5-3.4
			σ	0.7	0.2	0.07	0.4	0.2	0.3
	Pt	n = 3	M	2.7	2.5	2.7	2.9	2.8	2.9
			R	2.23-3.33	2.08-2.92	2.52-2.97	2.76-3.09	2.26-3.54	2.37-3.40
			σ	0.5	0.6	0.5	0.6	0.2	0.5
Índice de estructura-IE (%)	SSPI	n = 3	M	43.2	71.4	52.7	78.8	91.5	31.4
			R	27.8-59.3	57.5-80.0	41.2-60.9	60.9-89.1	89.31-93.7	17.4-48.8
			σ	24.5	12.1	9.43	21.4	6.3	13.1
	Pt	n = 3	M	50.9	57.6	48.6	53.1	43.1	35.4
			R	29.7-61.7	37.6-80.17	41.40-53.23	46.03-57.94	16.22-64.11	21.8-54.1
			σ	16.7	15.8	15.5	18.3	6.2	16.0
Agregados 4mm	SSPI	n = 3	M	43.4	28.9	31.9	28.5	26.6	47.6
			R	32.3-57.2	26.1-34.2	30.9-33.4	19.1-41.8	21.3-30	31.7-60.2
			σ	12.7	4.6	1.3	11.8	4.7	14.5
	Pt	n = 3	M	41.6	30.7	34.0	41.1	43	46.8
			R	32.2-56.6	20.5-38.3	30.4-36	37.5-48.2	31.7-58.8	31.1-59.4

Variable	Sistema	n=número o de muestras por sitio	Media	Asturias	Esperanza	Llanitos	Santa cruz	San Diego	Vesubio
			Rango σ						
			σ	13.1	9.2	3.1	6.1	14.1	14.4
Agregados 2mm	SSPI	n = 3	M	18.4	20.4	27.8	15.5	13.4	20.6
			R	13.1-23.7	19.7-21.0	24.2-32.6	13.3-16.7	11.1-17.9	17.3-24
			σ	5.30	0.65	4.33	1.91	3.87	3.35
	Pt	n = 3	M	17.6	25.0	28.1	22.1	19.0	19.2
			R	15.1-20.2	21.8-29.5	23.7-34.2	18.1-27	15.9-24.1	17.6-22.2
			σ	2.55	4.01	5.52	4.53	4.45	2.63
Agregados 1mm	SSPI	n = 3	M	12.1	18.1	17.5	16.4	14	13
			R	9.4-16.6	17.8-18.8	14-20	15.1-17.2	1-14.6	9-18.3
			σ	3.9	0.6	3.1	1.2	0.8	4.8
	Pt	n = 3	M	13.4	16.4	16.8	22.1	10.6	9.7
			R	11-16.9	15.1-18.6	16.3-17.8	19.9-24.2	8.5-12.5	9.5-10
			σ	3.1	1.9	0.8	2.2	2.0	0.3
Agregados 0.5mm	SSPI	n = 3	M	8.3	13.9	10.7	16.9	15.3	6.5
			R	6.8-10.5	12.5-14.7	9.6-11.3	15.8-18.2	13.9-16	3.4-9.6
			σ	1.9	1.2	0.9	1.2	1.2	3.1
	Pt	n = 3	M	10.1	10.8	9.4	9.7	8.9	7.7
			R	6.8-12	7.5-14-3	7.7-10.6	8.3-10.9	3.6-12.7	4.3-12
			σ	2.8	3.4	1.5	1.3	4.7	3.9
Agregados 0.25mm	SSPI	n = 3	M	9.7	9.4	6.1	10.5	16.2	3.6
			R	5.6-16.6	5.2-12.1	5.7-6.5	6.1-14.2	12.7-18.1	2.5-4.9
			σ	6.03	3.67	0.40	4.09	3.03	1.21
	Pt	n = 3	M	9.5	8.5	6.4	2.8	9.2	8.1
			R	3.8-15.7	4.8-11.6	3.8-7.7	1.8-3.6	1.9-13.8	4.1-13.6
			σ	5.96	3.45	2.25	0.92	6.39	4.92
Agregados < 0.25mm	SSPI	n = 3	M	10.2	9.3	5.9	12.2	14.5	8.7
			R	5.9-17.3	8.3-10.2	4.6-6.7	3.6-20.5	11.2-19	6.9-11.5
			σ	6.19	0.96	1.16	8.46	4.05	2.46
	Pt	n = 3	M	7.8	8.5	5.3	2.3	9.4	8.6
			R	3-14.7	4.8-11.4	0.8-9.5	0-4.6	3.1-13.4	5.1-11-6
			σ	6.13	3.38	4.36	2.30	5.52	3.29
Conductividad hidráulica-Ks (cm/h)	SSPI	n = 6	M	0.9	3.5	1.6	1.5	2.8	2.7
			R	0.7-1	3-3.8	0.8-2.6	0.7-2.8	2.2-3.8	1.9-4.1
			σ	0.15	0.46	0.91	1.16	0.90	1.19
	Pt	n = 6	M	1.8	2.6	2.0	2.0	2.0	0.4
			R	0.8-2.4	1.5-3.3	1.6-2.3	0.3-3.5	1.4-2.4	0.1-0.6
			σ	0.87	0.95	0.36	1.60	0.53	0.25

Variable	Sistema	n=número o de muestras por sitio	Media	Asturias	Esperanza	Llanitos	Santa cruz	San Diego	Vesubio
			Rango σ						
Humedad volumétrica-HV (%)	SSPI	n = 3	M	38.5	63.6	58.3	38.1	37.9	26.4
			R	37.7-39	62.7-64.7	56.7-60.4	28.6-44.6	35.7-41.5	24.4-29.3
			σ	0.72	1.01	1.91	8.39	3.14	2.57
	Pt	n = 3	M	36.6	60.5	60.7	17.0	35.4	31.3
			R	32.9-38.8	53-64.6	57.7-64.2	12.6-24.9	31.39.9	19.6-38.3
			σ	3.20	6.48	3.29	6.83	4.45	10.20
Densidad aparente-Da (g/cm ³)	SSPI	n = 6	M	1.3	0.6	0.7	1.3	1.2	1.2
			R	1.3-1.3	0.6-0.6	0.6-0.7	1.2-1.4	1.2-1.3	1.1-1.2
			σ	0	0.0	0.1	0.1	0.06	0.06
	Pt	n = 6	M	1.1	0.6	0.6	1.7	1.1	0.9
			R	1.1-1.1	0.5-0.6	0.6-0.7	1.6-1.8	1.1-1.2	0.5-1-1
			σ	0.00	0.06	0.06	0.10	0.06	0.35
Densidad Real- Dr (g/cm ³)	SSPI	n = 6	M	2.4	2.2	2.2	2.4	2.5	2.3
			R	2.42-2.48	2.1-2.2	2.11-2.21	2.35-2.4	2.5-2.5	2.25-2.33
			σ	0.03	0.06	0.05	0.03	0.03	0.04
	Pt	n = 6	M	2.4	2.2	2.2	2.3	2.4	2.4
			R	2.4-2.42	2.15-2.17	2.1-2.2	2.24-2.32	2.4-2.48	2.35-2.45
			σ	0.01	0.01	0.05	0.04	0.04	0.05
Porosidad (%)	SSPI	n = 3	M	46.5	73.3	69.0	45.9	50	48.9
			R	44.2-29.0	72-74.5	68.2-69.4	42.8-47.8	47.2-51.9	47.6-49.7
			σ	2.41	1.25	0.74	2.66	2.47	1.14
	Pt	n = 3	M	53.1	74.2	69.9	25.4	54.1	61.3
			R	52.5-53.8	72.7-76.3	67.6-71.3	22.3-29.2	51-56-1	51.9-77.9
			σ	0.65	1.89	2.03	3.48	2.72	14.40
Escorrentía (mm/min)	SSPI	n = 3	M	2.0	2.3	2.9	2.9	3.1	1.8
			R	1.5-2.3	1.4-3.9	1.9-3.6	1.4-4.1	2.2-3.5	0.1-4.3
			σ	0.80	1.41	0.66	1.11	1.01	1.68
	Pt	n = 3	M	2.9	3.3	3.6	8.9	3.7	1.7
			R	2.3-3.6	2.5-4.8	3.0-4.0	7.9-9.5	3.1-4.9	1.4-2.2
			σ	1.55	0.40	0.35	1.16	1.61	0.47
Resistencia a la penetración- RP (Kgf/cm ²)	SSPI	n = 6	M	73.5	79.3	61.0	76.0	82.8	73.3
			R	71-76	76-83	57-66	58-94	77.5-86	67-80
			σ	6.93	1.15	10.69	18.00	5.13	19.97
	Pt	n = 6	M	86.7	85.3	78.3	93.0	90.3	96.5
			R	81-91	83-90	72-83	91-95	87-94	96.5-98
			σ	5.13	5.20	5.69	2.00	3.51	7.37
Resistencia tangencial al	SSPI	n = 6	M	75.0	53.0	46.7	68.0	69.0	78.7
			R	73-79	47-55	43-54	62-72	59-75	74-84

Variable	Sistema	n=número de muestras por sitio	Media	Asturias	Esperanza	Llanitos	Santa cruz	San Diego	Vesubio
			Rango						
corte- RTC (Kpa)	Pt	n = 6	σ	3.46	1.53	1.15	14.05	4.51	5.03
			M	70.0	51.3	54.3	68.7	92.3	92.7
			R	59-79	50-53	53-55	54-82	88-97	85-107
			σ	10.15	5.29	6.35	5.29	8.72	12.42

SSPI: Sistema Silvopastoril Intensivo, **Pt:** Pastura tradicional, **M:** Media, **R:** rango, **σ :** Desviación estándar

4.1.2 Análisis multivariado de los parámetros físicos

Variables volumétricas

El ACP para las variables volumétricas mostró una separación de los sitios evaluados dado por los parámetros relacionados con la compactación y contenido hídrico. El primer componente explicó el 53.0% de la variación y agrupó los sistemas de acuerdo a la porosidad y el contenido de humedad, mientras que el segundo componente explicó el 24.06% y separó los sistemas evaluados de acuerdo a la escorrentía y la conductividad hidráulica (Ks). Los sistemas SSPI con *Tithonia diversifolia* presentaron mayor humedad y porosidad, por el contrario, los sistemas Pt con *Brachiaria decumbens* presentaron mayor escorrentía y menor humedad y porosidad (figura 7).

El ACP para las coberturas del suelo, separó las fincas por nivel altitudinal, agrupando *Tithonia diversifolia* de las fincas de mayor altura con diferencias altamente significativas ($P < 0.001$), respecto a las coberturas ubicadas a menores niveles altitudinales. (Anexo 1: figura 15 y 16).

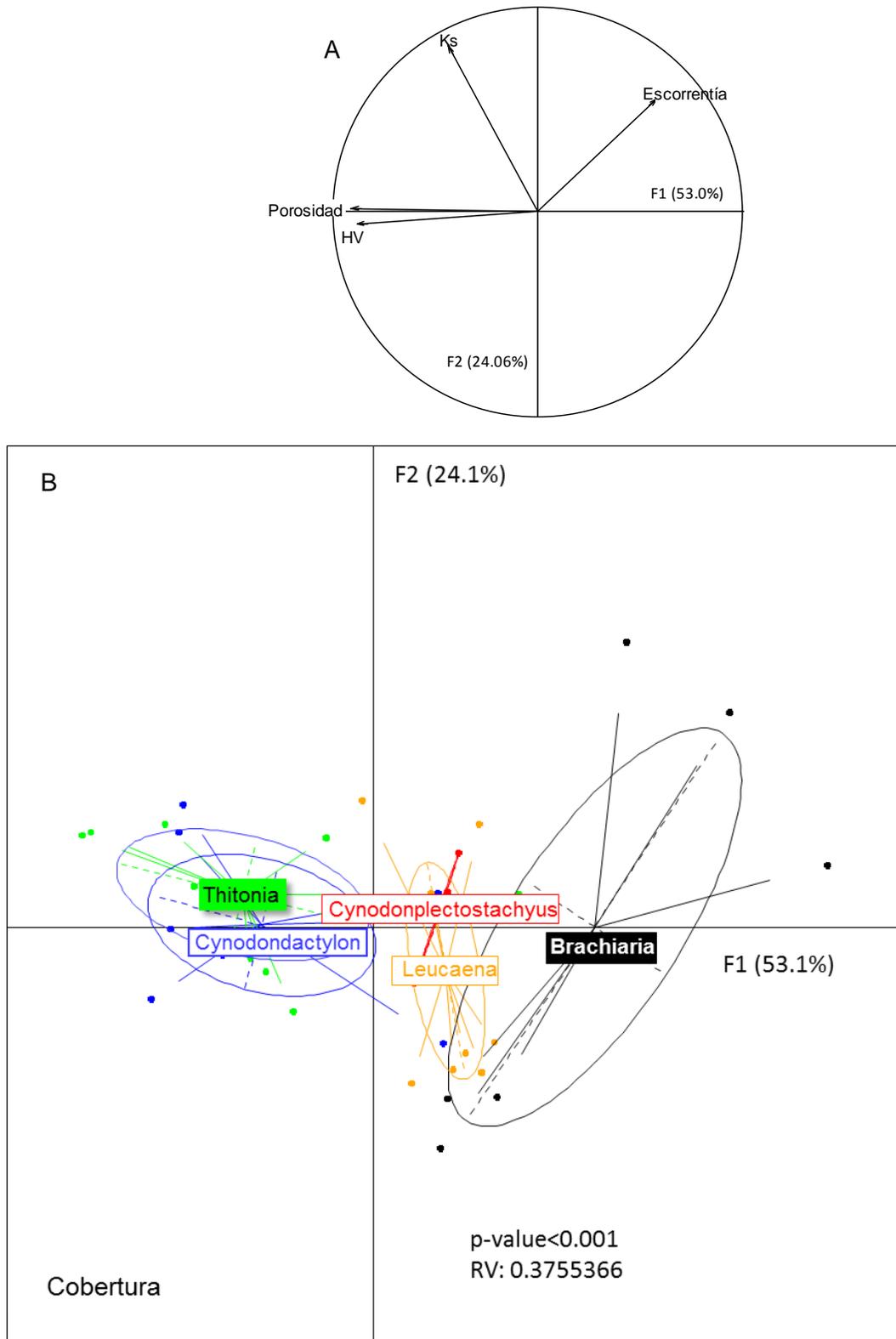


Figura 7. Variables volumétricas. A: Circulo de correlaciones. B: Distribución de los sistemas.

Variables mecánicas

Para las variables mecánicas, el ACP explicó el 64.8 % de la variabilidad total de los datos y agrupó las variables densidad real (Dr), densidad aparente (Da) y resistencia tangencial al corte (RTC), mientras que el segundo factor explicó el 20.3% de la variabilidad y se relacionó con la resistencia a la penetración (RP) (figura 8A).

Las variables mecánicas densidad aparente (Da), densidad real (Dr) y resistencia tangencial al corte (RTC), separaron las coberturas Pt de la finca El Vesubio y San Diego por las condiciones de mayor compactación del suelo, con respecto a las fincas que presentan SSPI, lo cual fue altamente significativa ($P < 0.001$).

El ACP mostró una separación clara y altamente significativa entre los SSPI y las Pt. Fue evidente que los SSPI presentaron los valores más bajos en todas estas variables que determinan la compactación del suelo, particularmente los sistemas con *Tithonia diversifolia*. Por el contrario, los sistemas Pt con *Brachiaria decumbens* y *Cynodon plectostachyus* presentaron mayor compactación del suelo (figura 8B).

Esta separación fue similar a la encontrada con el análisis de las variables volumétricas. Los sistemas con pasturas tradicionales como *Brachiaria decumbens* y *Cynodon plectostachyus* tienen menor porosidad y mayor tendencia a la compactación lo cual conlleva a una mayor escorrentía y una baja calidad física del suelo.

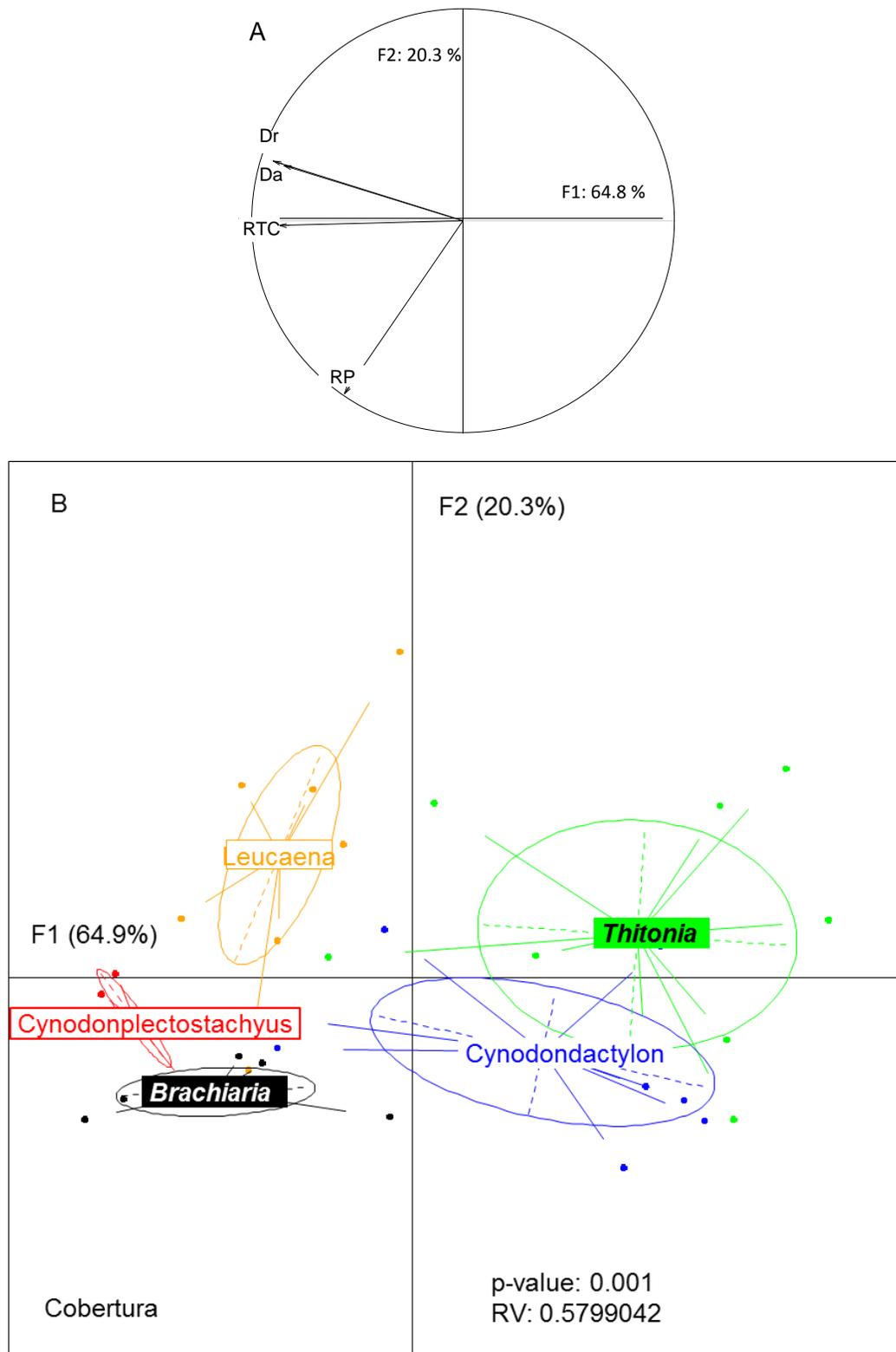


Figura 8. Variables mecánicas. A: Círculo de correlaciones. B: Distribución de los sistemas.

Variables estructurales

Con respecto a las variables estructurales del suelo, el primer factor del ACP explicó el 31.1% de la variabilidad total de los datos y el segundo el 27.4%. El primer factor agrupó los agregados de menor tamaño que tienen mayor susceptibilidad a procesos de degradación por erosión hídrica; en el segundo factor se relacionaron las características de textura, índice de estabilidad de agregados y diámetro ponderado medio de los agregados (mayor estabilidad el suelo) (*figura 9A*).

El ACP de las variables estructurales con respecto a las fincas, mostró una separación significativa ($p < 0.001$), agrupando a las fincas Llanitos y la Esperanza con respecto al índice de estabilidad, las arenas y los agregados de tamaño medio, características que dan al suelo mejores condiciones de calidad estructural; por otro lado, en las variables relacionadas con la susceptibilidad a la compactación y disminución de la porosidad se agruparon las fincas San Diego y Vesubio (*Anexo 1, figura 19*).

Por otro lado, el ACP mostró diferencias significativas entre las coberturas estudiadas ($p < 0.001$). Los SSPI con *Tithonia diversifolia* se relacionaron con las variables de agregados medianos, mientras que los sistemas con *Leucaena leucocephala* se agruparon con respecto a los agregados pequeños que favorecen la estructura del suelo. Los pastizales tradicionales con *Brachiaria* se relacionaron con los mayores porcentajes de limos y arcillas (*figura 9B*).

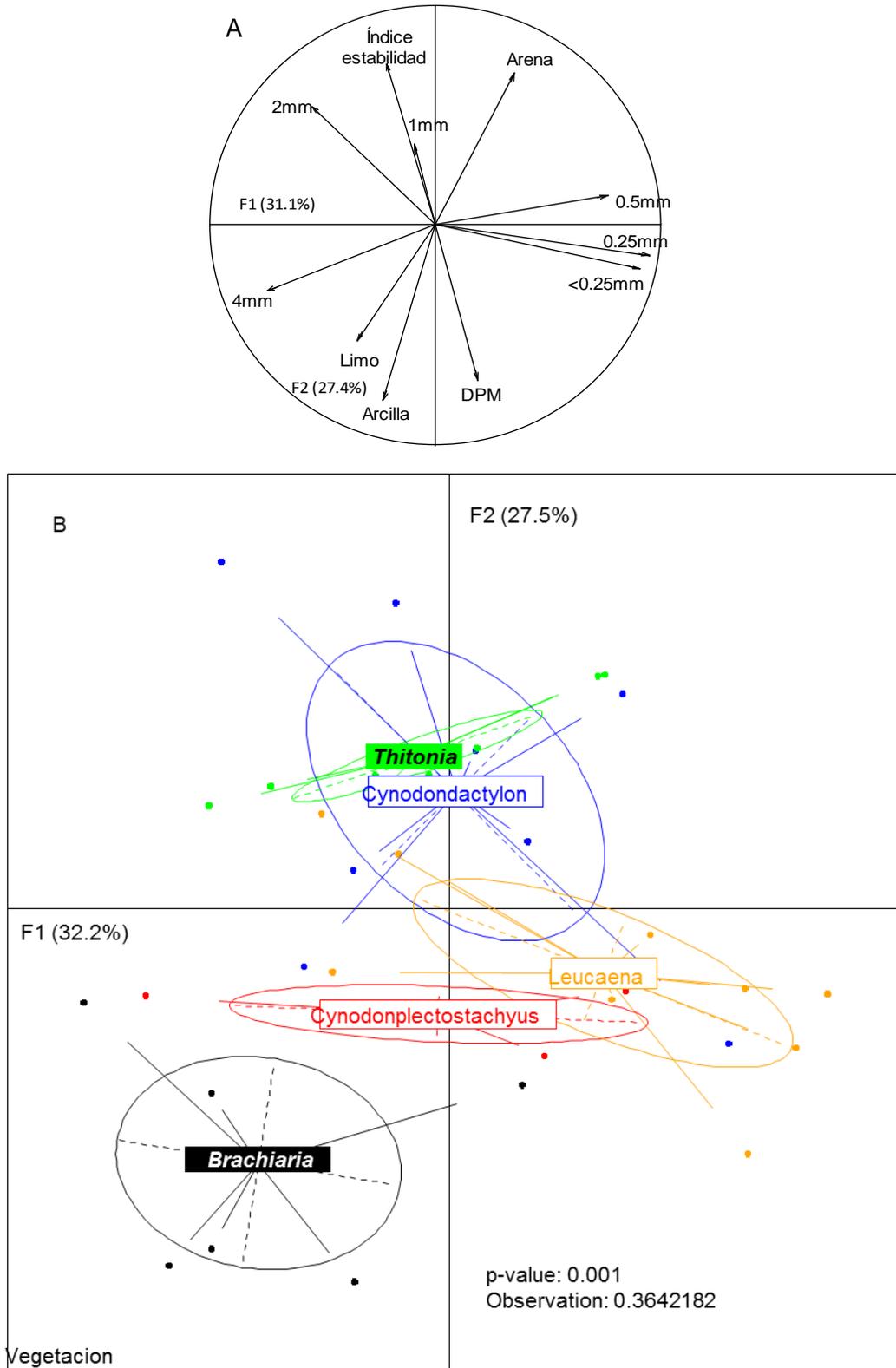


Figura 9. Círculo de correlaciones. Variables estructurales. B: Distribución de los sistemas.

Tabla 6. Análisis de Componentes Principales de los grupos de variables físicas. Aporte en porcentaje de la variabilidad de los datos explicados en los factores 1 y 2; P-value: grado de significancia estadística observada en los sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en fincas ganaderas del Eje Cafetero.

Variables físicas del suelo	Sistemas	Aporte (%)		P-value	*Rv
		F1	F2		
Estructurales	Cobertura	31.1	27.4	p < 0.001	0.36
	Finca			p < 0.001	0.4
Volumétricas	Cobertura	53	24.06	p < 0.001	0.37
	Finca			p < 0.001	0.58
Mecánicas	Cobertura	64.8	20.3	p < 0.001	0.58
	Finca			p < 0.001	0.66

*Rv: Varianza explicada en el test.

4.1.3 Parámetros químicos

Las características químicas en todos los sitios evaluados fueron muy variables. Sin embargo, se encontró que los suelos manejados bajo los SSPI, tienden a mejorar su calidad (tabla 7).

Los SSPI y Pt de la finca Llanitos, presentaron un pH ácido (5.1), en las demás fincas el pH se encuentra entre moderado y ligeramente ácido.

En cuanto a la materia orgánica, los SSPI de la finca Llanitos presentó el promedio más alto con 12.05 %.

Los niveles más altos de P, los presentó los SSPI de las fincas Asturias y San Diego, con valores promedios de 27.2 y 11.44 (mg/kg) respectivamente, estos niveles de P se clasifican como Medios.

Los promedios más altos de Ca, los presentó Pt de la finca el Vesubio con 9.7 cmol/kg y los SSPI de la finca Santa Cruz con 7.7 cmol/kg. El valor promedio más bajo lo presentó Pt de la Esperanza con 1.3 cmol/kg. Frente al Mg, los sistemas que presentaron niveles altos fueron Pt de las fincas Vesubio y Santa Cruz con 7.49 y 2.60 cmol/kg y el nivel más bajo correspondió a Pt de Esperanza 0.40 cmol/kg.

Los SSPI de la finca Asturias y San Diego, presentaron en promedio los valores más altos de K con 0.53 y 0.65 cmol/kg respectivamente, y el valor más bajo correspondió a Pt de Santa Cruz con 0.9 cmol/kg.

En cuanto a la CIC, los promedios estuvieron entre medio y bajo para todos los sistemas. El valor más alto se presentó en el Vesubio en Pt con 17.82 cmol/kg y en SSPI de Santa Cruz con 10.03 cmol/kg.

Tabla 7. Valores promedio y rangos para las variables químicas del suelo evaluadas en sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en fincas ganaderas del Eje Cafetero.

Variable	Sistema	Media	Asturias	Esperanza	Llanitos	Santa Cruz	San Diego	Vesubio
		Rango						
		σ						
pH	SSPI	M	6.10	5.60	5.11	5.90	5.81	5.54
		R	5.81-6.28	5.36-5.8	4.92-5.23	5.84-5.99	5.74-5.91	5.49-5.61
		σ	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
	Pt	M	5.82	5.47	5.15	5.95	5.83	6.09
		R	5.61-6	5.27-5.64	4.69-5.57	5.82-6.03	5.6-6.13	5.99-6.26
		σ	0.2	0.2	0.4	0.1	0.3	0.1
MO (g/100g)	SSPI	M	2.67	10.22	12.05	2.56	2.22	2.26
		R	2.6-2.75	7.94-11.48	11.67-12.25	2.12-3.07	2.1-2.29	1.83-2.67
		σ	0.1	2.0	0.3	0.5	0.1	0.4
	Pt	M	6.69	10.42	10.89	3.36	2.52	2.63
		R	2.67-13.8	9.21-11.76	9.96-11.77	3.01-3.92	1.71-3.26	2.29-3.08
		σ	6.2	1.3	0.9	0.5	0.8	0.4
P (mg/kg)	SSPI	M	27.2	4.69	6.63	3.87	11.44	9.01
		R	24.5-29.5	0.7-7.61	5.3-8.43	3.87-3.87	6.77-20.58	6.45-14.04
		σ	2.5	3.6	1.6	0.1	7.9	4.4
	Pt	M	12.6	4.53	7.81	3.87	8.25	3.87
		R	7.34-16.75	3.87-5.83	5.11-11.78	3.87-87	4.21-14.77	3.87-3.87
		σ	4.8	1.1	3.5	0.0	5.7	0.0
Ca (Cmol/kg)	SSPI	M	6.35	5.04	1.56	7.71	4.58	4.73
		R	5.64-6.97	2.26-8.97	1.43-1.68	6.12-9.09	3.5-5.15	4.35-5.03
		σ	0.7	3.5	0.1	1.5	0.9	0.3
	Pt	M	5.25	1.36	1.38	7.54	4.98	9.72
		R	4.88-5.87	0.74-2.08	0.74-2	6.91-8.21	3.76-5.74	8.5-12.06
		σ	0.5	0.7	0.6	0.7	1.1	2.0
Mg (cmol/kg)	SSPI	M	1.64	1.25	0.71	1.85	1.04	2.44
		R	1.46-1.75	0.62-2.06	0.6-0.78	1.34-2-26	1-1.07	2.39-2-52

Variable	Sistema	Media	Asturias	Esperanza	Llanitos	Santa Cruz	San Diego	Vesubio
		Rango						
		σ						
	Pt	σ	0.2	0.7	0.1	0.5	0.04	0.1
		M	1.33	0.40	0.47	2.60	1.49	7.49
		R	1.29-1.42	0.24-0.49	0.31-0.58	1.86-3.68	1.05-1.76	5.6-10.83
		σ	0.1	0.1	0.1	1.0	0.4	2.9
K (cmol/kg)	SSPI	M	0.53	0.22	0.25	0.24	0.65	0.22
		R	0.34-0.63	0.16-0.33	0.21-0.32	0.11-0.33	0.59-0.76	0.13-0.28
		σ	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Pt	M	0.12	0.21	0.23	0.9	0.57	0.34
		R	0.09-0.17	0.15-0.31	0.15-0.31	0.12-2.34	0.13-0.8	0.25-0.39
		σ	0.04	0.1	0.1	1.2	0.4	0.1
CIC	SSPI	M	8.72	6.77	3.52	10.03	6.42	7.57
		R	7.78-9.48	3.18-11.51	3.32-3.72	7.99-11.44	5.4-6.94	7.13-7.96
		σ	0.9	4.3	0.2	1.8	0.9	0.4
	Pt	M	6.85	2.59	2.82	11.25	7.19	17.82
		R	6.48-7.52	1.98-3	2.04-3.97	9.71-13.66	5.1-8.36	14.69-23.52
		σ	0.6	0.5	1.0	2.1	1.8	4.9

SSPI: Sistema Silvopastoril Intensivo, **Pt:** Pastura tradicional, **M:** Media, **R:** rango, **σ :** Desviación estándar

4.1.4 Análisis multivariado de los parámetros químicos

En el ACP, los dos factores principales explican el 69.9% de la variabilidad total de los datos. En el primer componente, que explicó el 53.8% de la variabilidad, las variables que más contribuyeron fueron el Ca, CIC y pH, y en el segundo factor el P (figura 10).

El análisis indicó que existe diferencias estadísticas ($p < 0.001$) entre los niveles altitudinales de las fincas. El ACP separó claramente las fincas de mayor altura frente a las demás, por tanto, se puede inferir que existe un efecto de las condiciones climáticas y características propias del suelo en la calidad del suelo (Anexo 1, figura 21). Cabe resaltar que la génesis y taxonomía de estos suelos que corresponden a una “unidad geomórfica de montañas de material fluviovolcánico, cubiertas por depósitos de cenizas volcánicas, pertenecientes a la familia Typic Hapludands” (CARDER, 2013), reflejan en sus propiedades intrínsecas y en su taxonomía la incidencia del material parental, por tanto, muestran características como una alta retención fosfórica, alto contenido de hierro

y aluminio activo, baja densidad aparente y contenidos de carbono orgánico considerablemente altos (Sánchez, 2013).

Con relación a la cobertura vegetal el ACP separó significativamente ($p < 0.001$) los SSPI con *Tithonia diversifolia* con mayor contenido de materia orgánica y los de *Leucaena leucocephala* con mayor contenido de fósforo, mientras que las Pt con *Brachiaria* presentaron valores bajos en estas variables (figura 10B).

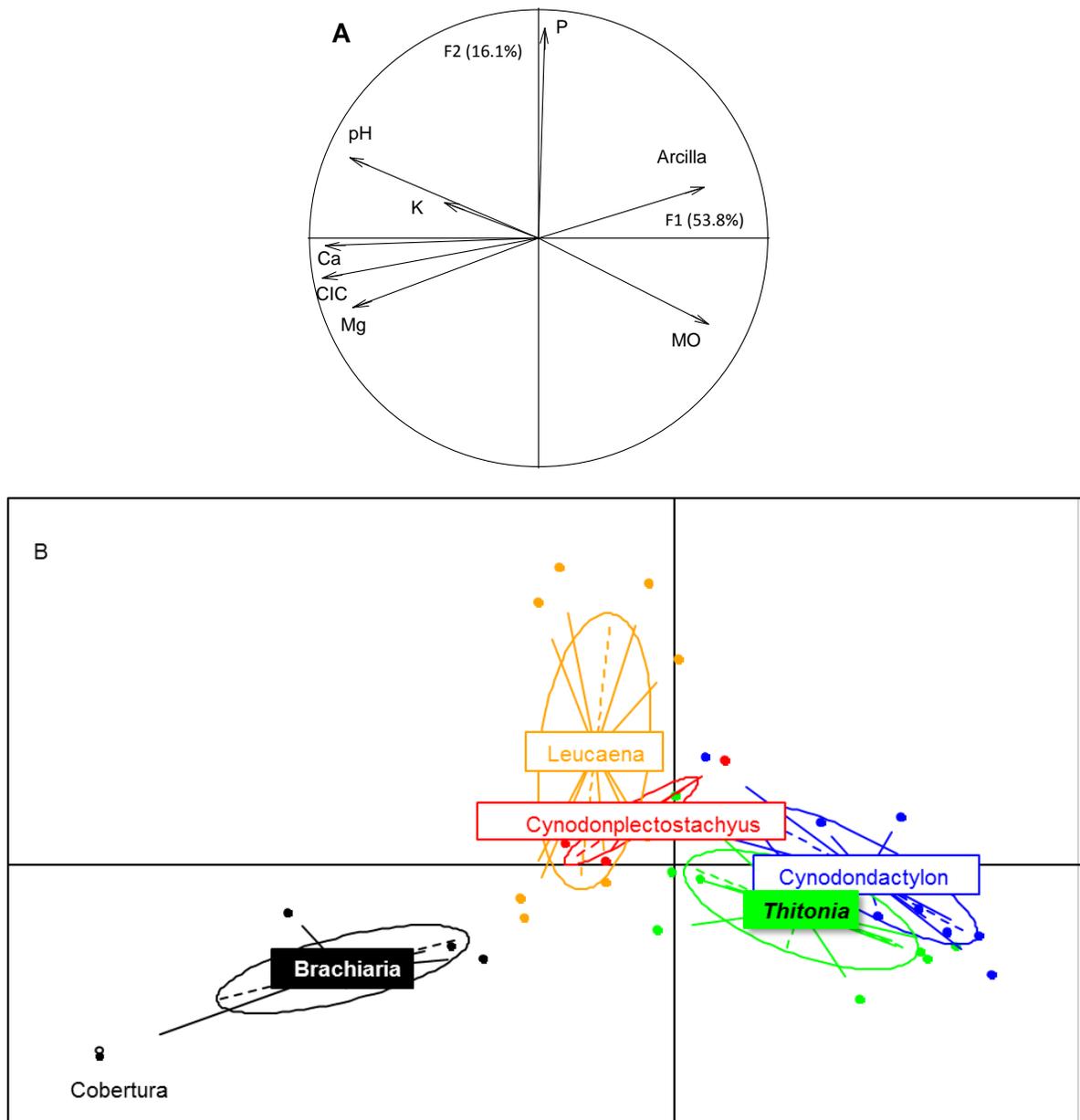


Figura 10. Círculo de correlaciones de los parámetros químicos. B: Distribución de los sistemas.

El análisis multivariado de la antigüedad de los sistemas presentó diferencias significativas ($p < 0.001$), separó los sistemas con un periodo de establecimiento de 10 años (*Leucaena leucocephala*) con respecto al fósforo y los sistemas de 3 años (*Tithonia diversifolia*) con la materia orgánica. Los suelos con *Brachiaria* que presentan una antigüedad de 20 y 18 años, se agrupan con respecto a la CIC, Mg y Ca (Anexo 1, figura 23).

Por otro lado, el ACP del sistema de rotación con respecto a las variables químicas, mostró diferencias estadísticas ($p < 0.03$) y separó los periodos de rotación de menor frecuencia hacia las variables de mejor calidad química, es decir, las rotaciones de 45 días, favoreció la fertilidad del suelo mejorando la disponibilidad de P y MO (Anexo 1, figura 24).

El ACP de la periodicidad en la fertilización de los sistemas, mostró diferencias estadísticas ($p < 0.003$) y separó los sistemas con mayor periodicidad entre 2 y 3 meses de aplicaciones con respecto al pH, P y CIC (Anexo 1, figura 25).

Tabla 8. Análisis multivariado de las variables químicas. Aporte en porcentaje de la variabilidad de los datos explicados en los factores 1 y 2; P-value: grado de significancia estadística observada en los sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en fincas ganaderas del Eje Cafetero.

Variables químicas del suelo	Sistemas	Aporte (%)		P-value	*Rv
		F1	F2		
	Cobertura	53.8	16.2	$p < 0.001$	0.07
	Altitud			$p < 0.001$	0.57
	Rotación (días)			$p < 0.03$	0.07
	Antigüedad (años)			$p < 0.001$	0.63
	Fertilización (meses)			$p < 0.003$	0.19

*Rv: Varianza explicada en el test.

4.1.5 Macrofauna edáfica

En los sistemas evaluados se colectaron 19 órdenes y 3 clases taxonómicas, correspondientes a los grandes grupos de macrofauna edáfica. El número total de individuos por metro cuadrado fue de 48.87, con densidades promedio (individuos/m²)

entre 10.90 y 765.30, las densidades altas se deben principalmente a la abundancia de hormigas (Himenóptera) y las lombrices (Oligochaeta).

Los sistemas que presentaron las densidades más altas correspondieron a los SSPI con *Leucaena leucocephala* de las fincas Asturias y Santa Cruz, y en Pt de la finca San Diego.

Los sitios que presentaron mayor densidad en número de individuos/m² correspondieron a las fincas con los SSPI con *Leucaena leucocephala*, sin embargo, como se señaló anteriormente las densidades altas se deben en gran parte a la abundancia de hormigas (Himenóptera). La figura 26 (Anexo 2), muestra en forma decreciente las densidades de macrofauna edáfica en los sistemas evaluados por finca. Las densidades promedio estuvieron en un rango de 896 y 11640 #individuos/m² (Tabla 14 del anexo 2).

En cuanto a la riqueza, entendida como el número total de grandes grupos taxonómicos presente en los sistemas evaluados, se encontró que los SSPI mostraron la mayor riqueza de grupos taxonómicos. La finca Asturias presenta el mayor número de órdenes (16) y el sistema que presentó la menor riqueza (9) fue Pt de las fincas Esperanza y Llanitos (figura 27, anexo 2).

4.1.6 Análisis multivariado de la macrofauna edáfica

El círculo de correlaciones mostró una separación de los grupos taxonómicos en función de la densidad de población de macrofauna, el primer factor que explicó el 14.6% de la variabilidad de los datos y tanto la riqueza, como los grupos taxonómicos Enchytraeida, Isópoda y Dictióptera son los que mayor aporta a este factor (figura 11).

El segundo factor explicó el 9.7% de la variabilidad de los datos, los grupos Oligochaeta, Coleóptera y Díptera son los que más aportan en este factor (figura 28).

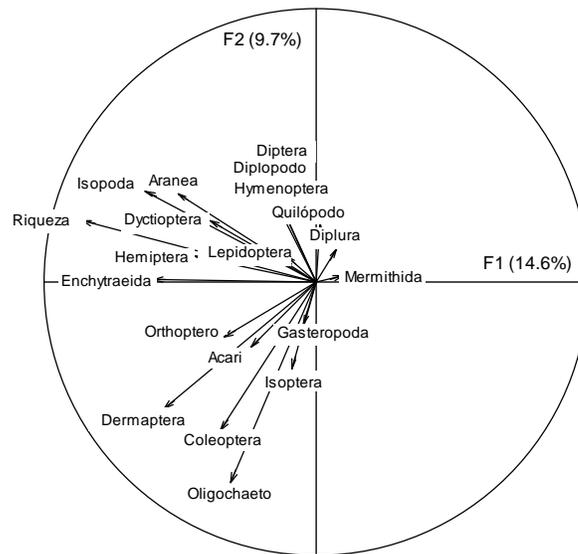


Figura 11. Círculo de correlaciones de la macrofauna edáfica.

El ACP indicó que existen diferencias significativas entre las coberturas del suelo ($p < 0.001$), separando los SSPI con *Leucaena leucocephala* con respecto a las demás coberturas. Por otro lado, los sistemas con *Tithonia diversifolia* se agrupa en relación a la riqueza de grupos taxonómicos y los Oligochaeta (Anexo 2, figuras 29 y 30). Esto muestra que los SSPI favorecen la abundancia y diversidad de las poblaciones de macrofauna del suelo, lo cual mejora la calidad física y química del suelo, esto se debe a la sinergia de las poblaciones tanto de macrofauna como de microorganismos que se genera alrededor de las raíces del sistema, lo cual permite mantener las condiciones de vida de las poblaciones, favoreciendo las características físicas y de ciclos biogeoquímicos en el suelo (Sánchez de Prager, 2018).

Por otro lado, el ACP para las fincas agrupó a las fincas en función a la riqueza y abundancia de la población de macrofauna edáfica (Anexo 2, figura 31). En cuanto a la antigüedad de los sistemas, el ACP mostró diferencias estadísticas entre el sistema de rotación y la antigüedad. Los SSPI maduros con más de 10 años de establecidos y las rotaciones con menor frecuencia (45 días), favorecieron las poblaciones y las dinámicas ecológicas de la macrofauna en el suelo (Anexo 2, figuras 32 y 33).

Tabla 9. Análisis multivariado de la macrofauna edáfica. Aporte en porcentaje de la variabilidad de los datos explicados en los factores 1 y 2; P-value: grado de significancia

estadística observada en los sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en fincas ganaderas del Eje Cafetero.

Variable		Aporte (%)		P-value	*Rv
		F1	F2		
Macrofauna edáfica	Cobertura	14.6	9.7	p < 0.01	0.027
	Vegetación			p < 0.001	0.12
	Rotación (días)			p < 0.001	0.023
	Antigüedad (años)			p < 0.001	0.16

*Rv: Varianza explicada en el test.

La tabla 10, resume los resultados encontrados con respecto a la evaluación de la calidad del suelo, teniendo en cuenta los factores de manejo, composición vegetal de los sistemas ganaderos, altitud (msnm) y sistema de rotación.

Tabla 10. Análisis multivariado para la evaluación de la calidad del suelo en sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en fincas ganaderas del Eje Cafetero.

Variables	ACP*		Vegetación		Altitud		Antigüedad		Rotación	
	Factor %		p-value**	Varianza Explicada (%)	p-value	Varianza Explicada (%)	p-value	Varianza Explicada (%)	p-value	Varianza Explicada (%)
	1	2								
Macrofauna	14.6	9.7	0.001	12.0	0.001	11.3	0.001	16.5	0.001	2.3
Química	53.8	16.2	0.001	50.7	0.001	57.4	0.001	63.8	0.003	7.4
Físicas volumétricas	53.1	24.1	0.001	37.6	0.001	58.6	0.001	63.1	0.235	3.8
Físicas mecánicas	64.9	20.3	0.001	58.0	0.001	66.4	0.001	73.2	0.463	2.2
Físicas estructurales	32.2	27.5	0.001	36.4	0.001	40.7	0.001	52.7	0.006	9.3

*p-value: Test de Montecarlo

4.1.7 Análisis de coinercia entre variables físicas, químicas y biológicas

Partiendo del análisis anterior donde se muestra que existe una separación significativa entre los grupos de variables, se realizó el análisis de coinercia, para conocer cuáles variables son las que mejor pueden representar la calidad del suelo y por tanto son elegibles en futuros trabajos. En este análisis se evaluó la relación entre las variables físicas: estructurales, volumétricas y mecánicas, las variables físicas-químicas, y químicas-macrofauna edáfica.

Entre las variables mecánicas y estructurales existe una separación significativa ($p < 0.001$), el primer factor explicó el 86.0% de la variabilidad total de los datos y separó las variables con respecto a la densidad aparente, densidad real, resistencia tangencial al corte, diámetro ponderado medio de los agregados (DPM) y los agregados de menor tamaño (0.25, <0.25 mm), estas variables son fundamentales para conocer el grado de degradación del suelo.

La coinerencia entre las variables mecánicas y volumétricas, se separaron significativamente ($p < 0.001$), el primer componente explicó el 93.1% de la variabilidad total de los datos y se agruparon las variables de porosidad, contenido de humedad volumétrica, densidad aparente y resistencia tangencial al corte.

El análisis entre las variables estructurales y volumétricas indicó que existe una separación significativa ($p < 0.001$), el primer componente explicó el 79.9% de la variabilidad de los datos y agrupó las variables de humedad volumétrica, porosidad, DPM y contenido de arcilla.

El análisis de coinerencia entre las variables físicas y químicas fue significativo, el primer factor explicó el 71.2% de la variabilidad total de los datos y mostró una agrupación de las variables porosidad, humedad volumétrica y materia orgánica.

La macrofauna edáfica con respecto a las variables estructurales y volumétricas del suelo presentaron una separación significativa ($p < 0.002$), el primer factor explicó el 60.5% para las variables estructurales y el 69.8% de la variabilidad de los datos para las variables volumétricas, la coinerencia agrupó los grupos taxonómicos Coleóptera, Dermáptera, Enchytraeida y la riqueza, con respecto al contenido de arcillas, limos, escorrentía y conductividad hidráulica (K_s).

Con respecto al análisis de coinerencia de la macrofauna con las variables químicas, se encontró que existe diferencias significativas ($p < 0.003$). El primer factor explica el 63.9% de la variabilidad de los datos y se agruparon en función de los grupos taxonómicos Dermáptera, Enchytraeida, Coleóptera y las variables químicas materia orgánica, potasio y el pH.

A continuación, se presenta la tabla resumen de los resultados de los análisis de coinerencia.

Tabla 11. Coinercia entre los diferentes grupos de variables físicas, químicas y biológicas medidas en sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en fincas ganaderas del Eje Cafetero.

Coinercia	Axes (%)		p-value	Varianza Explicada (%)
	1	2		
Mecánicas-Estructurales	86.0	8.1	0.001	43.4
Mecánicas-Volumétricas	93.2	5.8	0.001	57.8
Estructurales-Volumétricas	79.9	7.2	0.001	44.6
Física-Química	71.2	18.6	0.066	15.3
Macrofauna-Estructurales	60.5	18.8	0.002	32.6
Macrofauna-Mecánicas	67.4	16.9	0.114	18.1
Macrofauna-Volumétricas	69.8	13.9	0.002	30.4
Química-Macrofauna	63.9	16.6	0.003	30.4

La tabla 12 resume las variables que pueden ser tenidas en cuenta para la evaluación de la calidad del suelo en SSPI, en otras regiones del país.

Tabla 12. Agrupación de variables para los sistemas silvopastoriles, según el análisis de coinercia realizado en el Eje Cafetero.

Variables	variables
Físicas	Densidad aparente (Da)
	Densidad real (Dr)
	Resistencia tangencial al corte (RTC)
	Diámetro ponderado medio (DPM)
	Agregados 0.25
	Agregados <0.25 mm
	Porosidad
	Humedad volumétrica (HV)
	Densidad aparente (Da)
	Arcillas
Químicas	Materia orgánica (Mo)
	Fósforo
	pH
Macrofauna edáfica	Coleóptera
	Dermáptera
	Enchytraeida
	Oligocheata

Variables	variables
	Riqueza

4.2 Indicador general de calidad del suelo para Sistemas Silvopastoriles Intensivos-SSPI

El indicador general de calidad del suelo para los sistemas silvopastoriles, es una herramienta que permite sintetizar las evaluaciones de calidad y salud del suelo, generando parámetros comparables en el tiempo de acuerdo al manejo del sistema.

Para la construcción del indicador general de calidad del suelo y siguiendo los pasos sugeridos por Velásquez (2004), se tuvo en cuenta el análisis multivariado de componentes principales de cada una de los parámetros físicos, químicos y biológicos.

Partiendo de los resultados del ACP, se tuvieron en cuenta todas aquellas variables que fueron significativas en el aporte de los factores 1 y 2 del análisis, posteriormente, de cada grupo de variables de los parámetros evaluados se crearon subindicadores transformando los datos originales en el rango de 0.1 a 1.0 con la fórmula (1), todos aquellos valores cercanos a 1.0 corresponde a la mejor calidad del suelo:

Fórmula 1:

$$Y = 0.1 + \frac{x - b}{a - b} * 0.9$$

Dónde:

x = valor a transformar

a= valor máximo de la variable

b=valor mínimo de la variable

Con los valores transformados se creó el indicador general del suelo.

La tabla 13, muestra el aporte de cada variable en los factores 1 y 2 utilizados para la construcción de los subindicadores, el valor de cada variable se multiplicó por el peso correspondiente en los factores, tanto para el primero como para el segundo factor; se

realizó la sumatoria de los productos, para finalmente aplicar la fórmula anteriormente descrita, este proceso se realizó para cada grupo de variables, por ejemplo:

Subindicador variables mecánicas: $(0.5 \text{ (valor original de } Da) * 27.6 \text{ (aporte en el factor 1)} + 0.5 * 8.5 \text{ (aporte en el factor 2)}) + (2.2 \text{ (valor original de } Dr) * 31.0 \text{ (aporte en el factor 1)} + 2.2 * 9.8 \text{ (aporte en el factor 2)}) + \dots = 7261.2$

Subindicador químico: $(0.406 \text{ (valor original transformado de } pH) * 1565 \text{ (aporte en el factor 1)}) + (0.406 * 941 \text{ (aporte en el factor 2)}) + (0.270 \text{ (valor original transformado de } P) * 2 \text{ (aporte en el factor 1)} + 0.270 * 6425 \text{ (aporte en el factor 2)}) \dots = 1904.2$

Luego,

Subindicador variables mecánicas: $(0.1 + (7261.2 - 6660.1) / (12243.1 - 6660.1)) * 0.9 = 0.9$

Subindicador químico: $(0.1 + (1904.2 - 5020.6) / 5072.8 - 5020.6) * 0.9 = 0.4$

De esta manera se calculó el subindicador para cada grupo de variables por finca y cobertura del suelo objeto de estudio. La tabla 14 muestra los valores promedio de los subindicadores calculados.

Tabla 13. Aporte de cada variable en los factores 1 y 2 del Análisis de Componentes Principales (ACP), realizado para sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en el Eje Cafetero.

Parámetro del suelo	Variables	Aporte (%)	
		F1	F2
Estructurales	Arena	3.47	15.8
	Limo	3.45	9.07
	Arcilla	1.5	20.92
	4mm	15.82	2.94
	2mm	8.47	9.67
	1mm	0.27	4.54
	0.5mm	16.38	0.6
	0.25mm	25.2	0.62
	<0.25mm	23.05	1.31
	Diámetro medio ponderado (DPM)	0.99	16.45
	Índice estructural (IE)	1.34	18.03
Volumétricas	Conductividad hidráulica (Ks)	8.96	68.1

Parámetro del suelo	Variables	Aporte (%)	
		F1	F2
	Humedad volumétrica (HV)	36.43	0.35
	Porosidad	38.89	0.03
	Escorrentía	15.7	31.5
Mecánicas	Densidad real (Dr)	31	9.82
	Densidad aparente (Da)	27.66	8.52
	Resistencia a la penetración (RP)	12.17	81.59
	Resistencia tangencial al Corte (RTC)	29.15	0.05
Química	Arcilla	1212	379
	pH	1565	941
	MO	1277	1102
	P	2	6425
	Ca	1998	10
	Mg	1511	716
	K	387	186
	CIC	2048	240
Macrofauna	Isópoda	13.56	5.77
	Enchytraeida	12.33	0.005
	Dermáptera	10.68	11.01
	Aranea	8.87	5.4
	Dictióptera	5.19	2.63
	Coleóptera	4.3	15.03
	Oligochaeta	3.43	27.39
	Riqueza	25.35	2.58
	Hemíptera	6.72	0.49
	Ortóptero	3.94	2.05

Tabla 14. Valores promedio de los subindicadores por grupo de variables para sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en el Eje Cafetero.

Cobertura	Estructurales	Volumétricas	Mecánicas	Química	Macrofauna
<i>Thitonia diversifolia</i>	0.7	0.8	0.7	0.4	0.4
<i>Leucaena leucocephala</i>	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5
<i>Cynodon dactylon</i>	0.6	0.8	0.5	0.4	0.5
<i>Brachiaria</i>	0.3	0.3	0.3	0.8	0.4
<i>Cynodon plectostachyus</i>	0.5	0.5	0.3	0.5	0.4

4.2.1 Subindicador de los parámetros físicos del suelo

Los SSPI presentaron los valores promedio más altos del subindicador (0.7) en comparación con las Pt (0.6). Dentro de las coberturas evaluadas, teniendo en cuenta los grupos de variables mecánicas, estructurales y volumétricas del suelo, los SSPI con *Tithonia diversifolia*, la gramínea *Cynodon dactylon* presentaron los mejores rangos de calidad física del suelo, con valores promedios de 0.8, seguido de los SSPI con *Leucaena Leucocephala* con un valor de 0.7 (Anexo 3, figura 34).

Las condiciones edafo-climáticas de los niveles altitudinales, tuvieron un efecto positivo en calidad física del suelo, en este caso, aquellos sistemas ganaderos por encima de los 1500 mnsn, muestran mejores valores del subindicador. Las fincas que se ubican en estos niveles altitudinales son Llanitos y La Esperanza.

En cuanto a los parámetros de manejo, los sistemas que tuvieron una rotación de 25 días presentaron un rango más amplio de distribución de los valores de los subindicadores físicos, sin embargo, los SSPI con 45 días de rotación mostraron un promedio mayor correspondiente a 0.7 (Anexo 3, figura 35).

La distribución de los subindicadores físicos con respecto a la antigüedad de establecimiento de los sistemas ganaderos, mostró que los sistemas con 3, 8 y 30 años presentaron los mejores promedios, entre 0.8 y 0.9, cabe resaltar que estos sistemas corresponden a la finca Llanitos (Anexo 3, figura 36).

4.2.2 Subindicador de los parámetros químicos del suelo

La distribución de los datos de los subindicadores de las variables químicas mostró que Pt presenta los promedios más altos en comparación con los SSPI (Anexo 3, figura 37).

De las coberturas evaluadas, *Brachiaria* presentó los valores más altos de los subindicadores químicos, sin embargo, presenta un valor atípico dentro del rango de valores de las Pt (0.3-0.8).

Las pasturas que presentaron los valores más altos de los subindicadores químicos, fueron las Pt con *Brachiaria* ubicadas entre los 900-1100 msnm (Anexo 3, figura 38)

La distribución de los datos con respecto a la fertilización, mostró que los valores más altos del subindicador correspondió a los periodos de fertilización más espaciado (anexo

3, figura 40); de igual forma para las coberturas con una antigüedad entre 18 y 20 años (anexo 3, figura 41).

4.2.3 Subindicador del parámetro biológico del suelo

El subindicador de la macrofauna edáfica, mostró que los SSPI presentaron un promedio de 0.5 (Anexo 3, figura 42).

En cuanto a las coberturas evaluadas, los sistemas con *Leucaena leuacephala* presentaron una distribución más amplia del subindicador con un promedio de 0.5.

Las condiciones de altitud de las fincas, favorecieron las condiciones de la calidad biológica del suelo, esta condición está estrechamente relacionada con los parámetros físicos del suelo. La figura 43 en el anexo 3, indica que a mayores niveles altitudinales se presenta los mejores valores de los subindicadores.

En cuanto al manejo de los sistemas ganaderos, se identificó que aquellos sistemas con periodos de establecimiento entre 3 y 10 años, presentaron los mejores valores de los subindicadores de calidad biológica (Anexo 3, figura 44), en este caso correspondió a los SSPI con *Tithonia diversifolia* y *Leucaena leucocephala* y por otro lado, las Pt con *Cynodon dactylon*.

El sistema de rotación y fertilización, tuvo un efecto importante en las condiciones de calidad biológica del suelo. Las pasturas con rotaciones cada 45 días, presentaron una distribución más amplia de los datos de los subindicadores biológicos en comparación con los sistemas con rotaciones cada 25 días (Anexo 3, figura 45).

4.2.4 Análisis multivariado de los subindicadores

Para la construcción del indicador general de la calidad del suelo (IGCS), se realizó nuevamente el análisis de componentes principales (ACP), con el fin de conocer la contribución de cada grupo de subindicadores en los factores 1 y 2 del ACP y la inercia total en estos mismos factores (tabla 15). Los dos primeros factores del ACP, explican el 66.5% de la variabilidad total de los datos (figura 12).

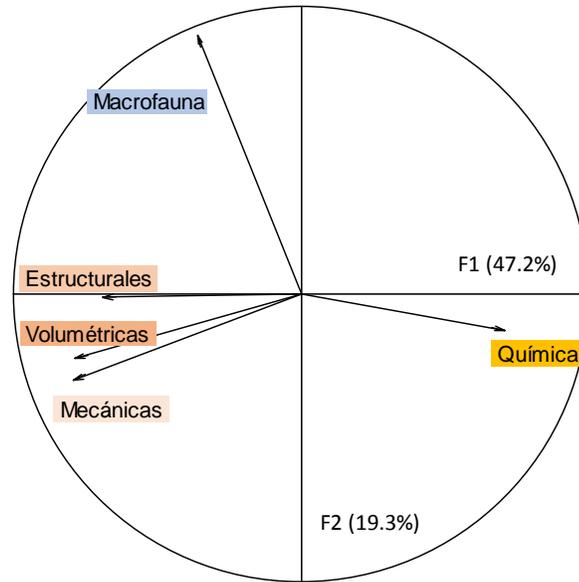


Figura 12. Círculo de correlaciones de los grupos de Subindicadores del suelo.

Tabla 15. Aporte de los subindicadores y el porcentaje de Inercia total en el análisis de componentes principales (ACP) en sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en el Eje Cafetero.

Subindicadores	Aporte de los factores		Inercia (%)	
	F1	F2	F1	F2
Estructurales	202.4	0.0075	47.2	19.3
Volumétricas	262.5	51.2		
Mecánicas	267.7	90.9		
Química	210.8	15.9		
Macrofauna	56.4	841.6		

Para construir el indicador se multiplicó el aporte de cada subindicador por la inercia total de cada uno, luego la sumatoria se dividió entre 10000 como una constante, así:

$$\text{Índice Estructural} = ((202.382 * 47.2) + (0.0075 * 19.3))/10000 = 9.5$$

$$\text{Índice Volumétrico} = ((262.574 * 47.2) + (51.274 * 19.3))/10000 = 13.4$$

$$\text{Índice Mecánico} = ((267.746 * 47.2) + (90.989 * 19.3))/10000 = 14.4$$

$$\text{Índice Químico} = ((-210.845 * 47.2) + (15.983 * 19.3))/10000 = -9.6$$

$$\text{Índice Macrofauna} = ((56.451 * 47.2) + (-841.676 * 19.3))/10000 = -13.6$$

Posteriormente, este índice se multiplicó por cada subindicador de la matriz inicial de las variables evaluadas y se calculó el Indicador General de Calidad del Suelo, con la fórmula (1) para cada cobertura y sistema ganadero (tabla 16).

Los sistemas silvopastoriles con *tithonia diversifolia* y las pasturas tradicionales con *Cynodon dactylon*, presentaron los valores más altos del IGCS, mientras que los sistemas silvopastoriles con *Leucaena leucocephala* presentaron un IGCS intermedio (Figura 13).

Tabla 16. Valores del índice general de la calidad del suelo-IGCS, para cada cobertura en sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en el Eje Cafetero.

Coberturas	IGCS rangos
<i>Tithonia diversifolia</i>	0.6-1.0
<i>Leucaena leucocephala</i>	0.4-0.8
<i>Cynodon dactylon</i>	0.6-1.0
<i>Brachiaria</i>	0.1-0.4
<i>Cynodon plectostachyus</i>	0.4-0.6

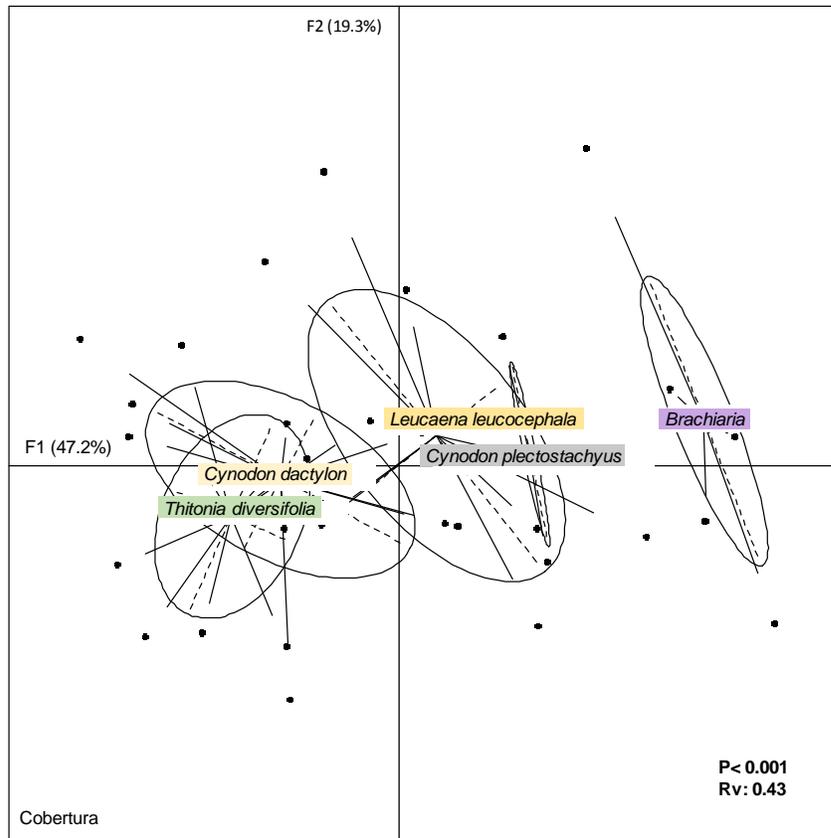


Figura 13. Análisis de componentes principales (ACP) de los valores del indicador general del suelo.

4.3 Protocolo de seguimiento de la sostenibilidad de los sistemas silvopastoriles intensivos.

Los protocolos son herramientas que guían de forma organizada los pasos a seguir y conseguir datos comparables, son muy útiles cuando se requiere hacer evaluaciones y seguimientos periódicos de un evento o efectos sobre un elemento en particular, en este caso en la calidad del suelo.

Para la evaluación de la calidad del suelo y en general de la sostenibilidad de los sistemas silvopastoriles, se requiere de una metodología sistemática que permita integrar e interpretar de manera adecuada los efectos de las coberturas y el manejo del sistema en sí.

Mediante esta propuesta se espera contribuir a unificar criterios de evaluación de la sostenibilidad de los sistemas silvopastoriles intensivos, desde la calidad del suelo ya

que esta al ser dinámica, la respuesta al uso o manejo agronómico debe ser evaluada periódicamente.

El protocolo de evaluación de la sostenibilidad de los sistemas silvopastoriles intensivos (SSPI) debe ser sencillo, de fácil lectura y comprensión (Wilson, 2017). Aborda cuatro componentes fundamentales, una primera sección en dónde se plantea la identificación y caracterización de las condiciones edafo-climáticas de la región; en la segunda sección la caracterización de los sistemas silvopastoriles a evaluar y los principales problemas en estos sistemas ganaderos con respecto al manejo. En la tercera, la metodología de evaluación de la calidad del suelo, partiendo de la revisión de información secundaria hasta las metodologías de muestreo y procesamiento de datos; se presenta también, una sección final de una escala de calificación de los indicadores obtenidos, como índices de referencia. De esta manera, se espera que el protocolo pueda ser utilizado en varias ecorregiones del país.

La figura 14, muestra el esquema propuesto para la construcción del protocolo de evaluación de la sostenibilidad de los sistemas silvopastoriles intensivos.

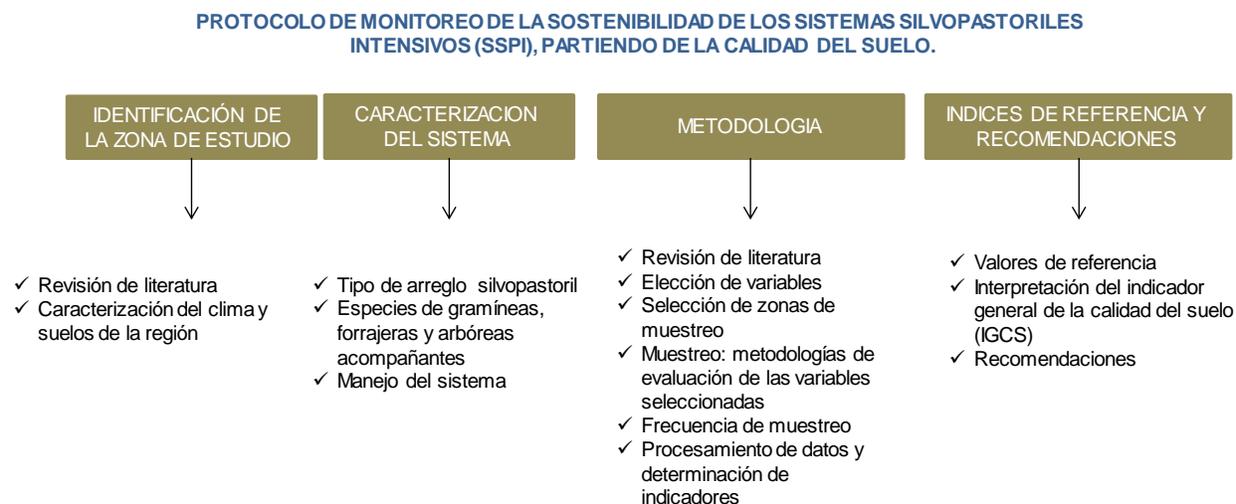


Figura 14. Esquema propuesto para la construcción del protocolo.

Identificación de la zona de estudio

La identificación y caracterización de la zona de estudio se debe realizar con ayuda de una revisión de información secundaria, que permita conocer a través de mapas,

registros institucionales de estudios previos sobre caracterización edáfica de la zona en particular aspectos como la génesis, composición mineralógica y condiciones climáticas que determina su funcionamiento.

Caracterización del sistema

Para la caracterización de los sistemas silvopastoriles a evaluar se debe tener en cuenta el tipo de arreglo silvopastoril, identificando todas las especies vegetales que lo constituye: Especies de gramíneas, forrajeras y arbóreas acompañantes. El manejo es fundamental a la hora de las evaluaciones de calidad del suelo, por ello se debe identificar lo relacionado al sistema de rotación de potreros, carga animal, antigüedad de establecido, fertilizaciones y manejo sanitario del ganado bovino.

Si es posible, es recomendable hacer un muestreo de determinación de estructura y composición de la vegetación, con el fin de contar con datos complementarios al estudio y que sirvan como base en el análisis de resultados.

Metodología de monitoreo y seguimiento de la calidad del suelo

Los SSPI al ser sistemas agroforestales diversos con relaciones complejas entre los elementos que lo conforma, teniendo en cuenta las dinámicas intrínsecas de suelo y partiendo de la revisión de la información secundaria, se establece una idea de los parámetros del suelo que son claves para entender su funcionamiento.

El grupo de variables que se propone desde este estudio para evaluar los sistemas silvopastoriles intensivos, se obtuvieron de las correlaciones entre variables y de la sencillez y facilidad de muestreo y evaluación (tabla 17). Para otras ecorregiones del país, se puede incluir las variables claves encontradas en estudios de caracterización edáfica para la zona en particular.

Tabla 17. Grupo mínimo de variables para la evaluación de la calidad del suelo en sistemas silvopastoriles intensivos.

Parámetros	Variables
Físicas-Estructurales	Arcillas
	Diámetro ponderado medio (DPM)
	Agregados 0.25 mm
	Agregados <0.25 mm

Físicas-Volumétricas	Porosidad
	Humedad volumétrica (HV)
Físicas-Mecánicas	Densidad aparente (Da)
Químicas	Materia orgánica (Mo)
	Potasio
	Fósforo
	pH
Macrofauna edáfica	Coleóptera
	Dermáptera
	Enchytraeida
	Oligocheata
	Riqueza

Para el muestreo como tal de las variables, se recomienda tener un número de muestras estadísticamente aceptable, en este caso tres es el mínimo por cada variable; cabe resaltar que entre más grande sea el número de muestras se reducirá el error, sin embargo, todo dependerá del presupuesto con el que se cuente. En la tabla 18, se muestra las metodologías para emplear en los muestreos.

Tabla 18. Metodologías para la evaluación de las variables.

Variable	Método/fórmula	Referencias
Textura	Bouyucos	IGAC, 1990
Densidad aparente (Da)	Cilindro biselado	IGAC, 1990
Estabilidad de agregados	Yoder	IGAC, 1990
Humedad volumétrica	$\Theta(\%) = \frac{W(\%)*Da}{P_w}$	IGAC, 1990
Diámetro ponderado medio (DPM)	$DPM = \sum_{i=1}^n x_i \frac{W_i}{100}$	IGAC, 1990
Macrofauna edáfica	Monolito de suelo TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility)	

Índices de referencia

Aunque las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo están estrechamente relacionadas, éstas responden a diferentes periodos de tiempo, así por ejemplo, las propiedades físicas responden a los cambios en un largo plazo, mientras que las

biológicas al ser más sensibles responderán en un periodo de tiempo más corto, las propiedades químicas son características más dinámicas pero a la vez más sensibles a las prácticas agronómicas se considera que tienen cambios a un mediano plazo, por esta razón, a la hora de definir la periodicidad de muestreo se recomienda agrupamiento de las características del suelo de acuerdo a sus dinámicas de cambios (Wilson, 2017). Sin embargo, se pueden tener un tiempo de referencia de 2 años para realizar las evaluaciones.

Los datos colectados se sistematizan creando el conglomerado en una base de datos, el cual será el insumo para la creación de los subindicadores por grupo de variables y el indicador general de la calidad del suelo. Para la creación de los subindicadores se emplea la metodología propuesta por (Velásquez, 2004).

Una vez se cuente con los indicadores de calidad del suelo, se compara con los valores de referencia, se interpreta la calidad del suelo de acuerdo con la escala de 0.1 a 1.0, teniendo en cuenta que los valores más cercanos a 1.0, representan las mejores características de calidad.

Tabla 19. Valores índices de referencia para la calificación de la calidad del suelo en sistemas silvopastoriles intensivos.

Rango	Clasificación
0.1-0.3	Calidad baja
0.4-0.6	Calidad media
0.7-1.0	Calidad alta

Finalmente, se contrasta la calidad del suelo para los sistemas silvopastoriles intensivos con el manejo agronómico, manejo de rotaciones y de capacidad de carga de los potreros, para definir si es el caso, qué elementos se deben entrar manejar para mantener la productividad y la conservación de los sistemas.

5. Discusión

Los sistemas silvopastoriles intensivos (SSPI) presentaron las mejores condiciones de calidad física, química y biológica del suelo. Los análisis multivariados de componentes principales y de Coinercia mostraron que las coberturas multiestrato tienen un efecto positivo sobre las funciones ecológicas y productivas del suelo; gracias a la integración del complejo de raíces de las diversas especies que acompañan el sistema silvopastoril y a la dinámica de la fauna del suelo, se logra mantener estas funciones (Torres et al., 2013; Sánchez de Prager, 2018).

La calidad física del suelo estuvo determinada por bajos niveles de compactación, mejores condiciones estructurales y características adecuadas de porosidad y contenido de humedad. Las mejores condiciones de la calidad química se definieron por la materia orgánica y fósforo disponible; mientras que la riqueza y abundancia de grupos taxonómicos definió la calidad biológica del suelo en los SSPI.

Dentro de los SSPI, los suelos con *Tithonia diversifolia* se agruparon con respecto al contenido de humedad, porosidad total, agregados medianos y al índice de estabilidad de agregación, estas características dan al suelo mejores condiciones de calidad estructural. Mientras que los suelos con *Leucaena leucocephala* estuvieron más relacionados con los niveles bajos de compactación y agregados pequeños que igualmente ayuda a mantener la estructura del suelo; datos similares fueron encontrados en estudios realizados en diversos sistemas silvopastoriles (Lok, Crespo, Frómeta, Torres, & Fraga, 2007; Nuñez, Benítez, Bonnín, & Paiva, 2019).

En los SSPI con *Leucaena leucocephala*, el fósforo fue determinante en la calidad del suelo, y en los sistemas con *Tithonia diversifolia* la materia orgánica, esto se debe al aporte constante de material vegetal que fortalece el reciclaje de nutrientes en el sistema, a través de la interacción hojarasca y raíces, esta dinámica hace que los sistemas silvopastoriles contribuyan a mantener y mejorar la fertilidad del suelo (Buitrago, Ospina,

& Narváez, 2018). La materia orgánica potencializa la capacidad de amortiguación en la solución del suelo, favoreciendo en encadenamiento del P en forma de humatos, de esta manera puede estar más disponible para las plantas asociadas en el sistema silvopastoril; adicional a ello, la presencia de organismos asociados a las leguminosas como las micorrizas o bacterias de la rizosfera, permiten movilizar el P a través de los aminoácidos secretados por las raíces que actúan como quelantes (Mahecha, Rosales, Molina, & Molina, 1999; Sánchez de Prager, 2018).

Especies como *Leucaena leucocephala* y *Tithonia diversifolia*, han desarrollado estrategias adaptativas para superar limitaciones nutricionales especialmente, estos mecanismos se basan en la formación rizosfera a través de asociaciones y simbiosis en el sistema radical que ha implicado en un proceso evolutivo, la modificación de la arquitectura de las raíces y formación de pelos radicales, cambios en patrones fisiológicos y metabólicos y presencia de microorganismos rizosféricos como los hongos formadores de micorrizas; estas adaptaciones han llevado a estas plantas a ser más eficientes en la absorción y solubilización de nutrientes, generando cambios que superan las condiciones nutricionales de las plantas asociadas, proyectando otras cualidades fundamentales para la productividad, salud y sostenibilidad de los agroecosistemas (Sánchez de Prager, 2018).

Los suelos que presentaron las mejores condiciones de capacidad de intercambio catiónico, se relacionaron con las condiciones intrínsecas del suelo como el contenido de arcillas, las coberturas de este tipo de suelos fueron las *Brachiaria* con una antigüedad mayor a 18 años, otro factor que pudo estar relacionado con los altos niveles de CIC, fue una probable fertilización acumulada, pues son suelos que se fertilizan con más frecuencia y es posible además, que al momento de hacer el muestreo recientemente se hayan realizado fertilizaciones.

Los sistemas silvopastoriles intensivos presentaron mayor riqueza y abundancia de macrofauna edáfica. En los análisis multivariados se evidenció que los sistemas silvopastoriles están mejorando las poblaciones de macrofauna en el suelo y por tanto la calidad biológica del mismo, se resalta que tanto la riqueza de grupos taxonómicos y los Oligochaeta son las variables determinantes en mantener esta calidad. Otros estudios concluyen que ordenes como los Coleóptera, Lepidóptera y otros grupos taxonómicos como los Chilópodos y Aranea, han sido importantes en la determinación de las

funciones ecológicas del suelo en sistemas silvopastoriles (Cabrera, 2012; Zuluaga, Giraldo, & Chará, 2011; Meneses & Reina, 2015)

Tanto la riqueza como la abundancia de grupos taxonómicos, son claves a la hora de evaluar la calidad y salud del suelo en los SSPI, pues demuestra que existen y se mantienen las funciones ecológicas de la macrofauna edáfica. La presencia de diversos organismos desde depredadores (importantes entre otras cosas para disminuir la presencia de patógenos del ganado), descomponedores, ingenieros del suelo, herbívoros entre otros, hacen posible la dinámica ecológica del suelo (Zuluaga et al., 2011).

Los análisis de coinercia entre los parámetros físicos, químicos y biológicos, mostraron que la calidad del suelo en los SSPI puede ser evaluada con un grupo mínimo de variables, porque explican de manera sencilla la función y cambios de las demás variables frente al manejo del sistema.

El manejo de las fertilizaciones incide en la dinámica de las poblaciones de macrofauna edáfica. Las pasturas con fertilizaciones intermedias (2 meses) presentaron una distribución de los subindicadores más amplia en comparación con las demás periodicidades, esto indica que la periodicidad intermedia en la aplicación de los fertilizantes es la adecuada para no afectar las poblaciones de macroorganismos del suelo.

Según el indicador general de calidad del suelo (IGSC) los sistemas silvopastoriles con *Tithonia diversifolia* y las pasturas tradicionales con *Cynodon dactylon*, presentaron los mejores índices de calidad del suelo, esta pastura tradicional es favorecida por las condiciones edafo-climáticas de la zona debido a que se encuentran en las zonas de mayor nivel altitudinal. Por otro lado, los sistemas silvopastoriles con *Leucaena leucocephala* presentaron un IGCS intermedio, esto sugiere que se debe entrar a mejorar condiciones de manejo, especialmente en relación a los periodos de descanso de los potreros.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Las características intrínsecas del suelo que provienen desde su formación como las características mineralógicas, composición química y las condiciones climáticas, determinan su funcionamiento y la respuesta al uso y manejo agronómico. Esto se ve reflejado en la agrupación de las propiedades físicas que se tuvo que hacer para la evaluación de la calidad del suelo. La respuesta del suelo frente los sistemas silvopastoriles intensivos estuvo influenciada por el contenido de arcillas y los niveles altitudinales, este tipo de condiciones en conjunto con las coberturas multiestrato de los sistemas silvopastoriles y un manejo adecuado de las rotaciones permiten mantener las condiciones de salud y calidad del suelo, particularmente de los parámetros físicos y biológicos.

Los sistemas silvopastoriles intensivos tienen un efecto positivo sobre las funciones ecológicas y productivas del suelo. Aquellos sistemas conformados por *Tithonia diversifolia* permiten mejorar la calidad del suelo de manera más rápida una vez establecido el sistema, especialmente la calidad relacionada con los parámetros físicos del suelo. Los sistemas con *Leucaena leucocephala* al ser los sistemas más antiguos han mantenido, entre otras cosas, las características de riqueza y abundancia de las poblaciones de macrofauna edáfica mejorando la calidad biológica del mismo.

El manejo de los sistemas en cuanto a rotaciones y fertilizaciones, influyen de manera importante sobre las condiciones de calidad del suelo. Los SSPI con periodos de descanso más espaciados favorecen las características, físicas, químicas y biológicas del suelo.

El indicador general de la calidad del suelo (IGCS), permitió definir rangos de valores para la evaluación de las condiciones de calidad del suelo. Las coberturas que muestran los mejores valores fueron los sistemas silvopastoriles con *Tithonia diversifolia* y las

pasturas tradicionales con *Cynodon dactylon*. El valor intermedio de los sistemas silvopastoriles con *Leucaena leucocephala* permite sugerir el empleo de acciones para mejorar el sistema, en este caso se deberá corregir las condiciones de manejo, especialmente los periodos de descanso de los potreros con las rotaciones, en aquellas fincas con periodos más cortos.

6.2 Recomendaciones

Para posibles estudios de seguimiento a los indicadores de calidad del suelo en sistemas silvopastoriles, en lo posible, se recomienda el uso de mapas de suelos, para tener claridad a cerca de las características propias de los suelos con relación a su génesis. Dentro de los factores de manejo se debe incluir la carga animal que estén manejando en los sistemas, ya que esto permitirá entender mejor los procesos de compactación.

Este estudio permitió generar información de la dinámica del suelo en sistemas ganaderos, sin embargo, es necesario que se emplee protocolos como el sugerido en este mismo documento, para el seguimiento de los sistemas con el fin de detectar posibles elementos que deban ser corregidos a tiempo. Se sugiere hacer las evaluaciones de seguimiento cada dos años.

Los productores podrían realizar seguimientos más frecuentes, con base en el muestreo de macrofauna edáfica con evaluaciones de riqueza y abundancia de grupos taxonómicos, prestando más atención a la presencia de lombrices, evaluaciones de estabilidad y cantidad de agregados, presencia de materia orgánica, contenido de humedad y densidad aparente.

Anexo 1: Figuras del análisis de componentes principales.

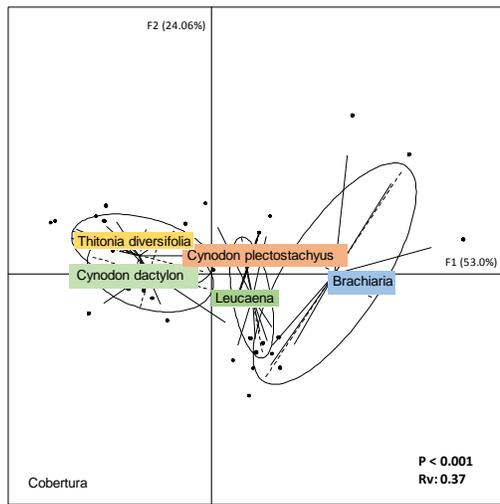


Figura 16. Análisis de componentes principales (ACP) de las variables volumétricas con respecto a las coberturas.

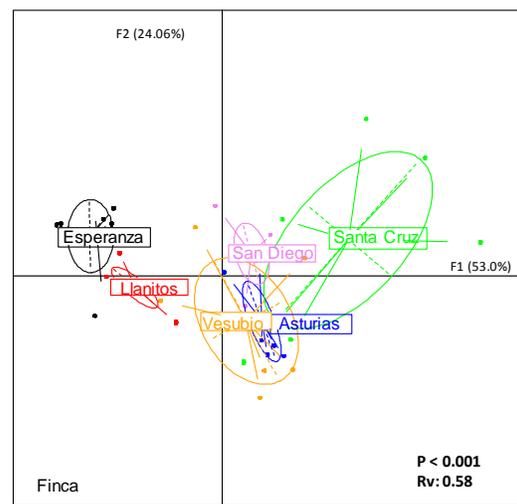


Figura 15. Análisis de componentes principales (ACP) de las variables volumétricas con respecto a las fincas.

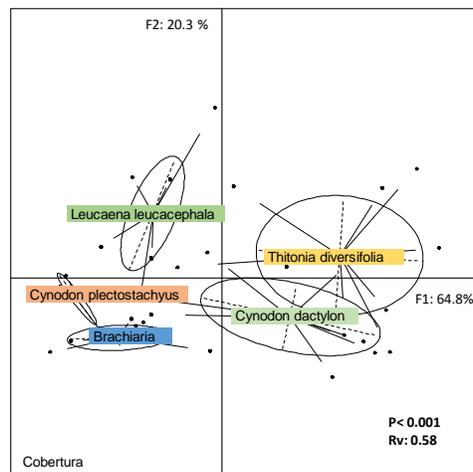


Figura 18. Análisis de componentes principales (ACP) de las variables mecánicas con respecto a las coberturas.

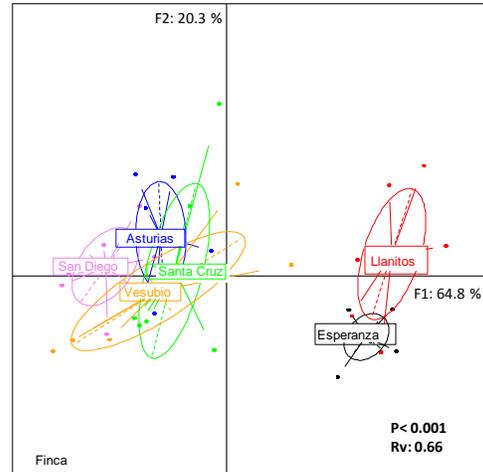


Figura 17. Análisis de componentes principales (ACP) de las variables mecánicas con respecto a las fincas.

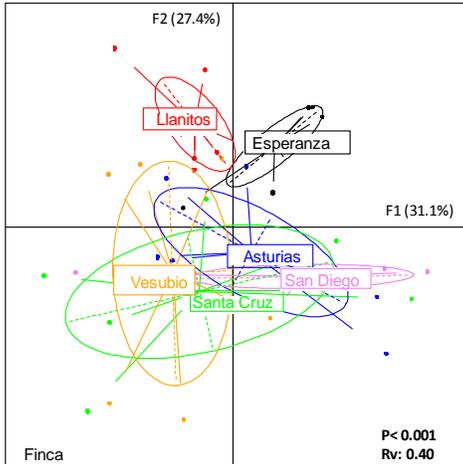


Figura 19. Análisis de componentes principales (ACP) de las variables estructurales con respecto a las fincas.

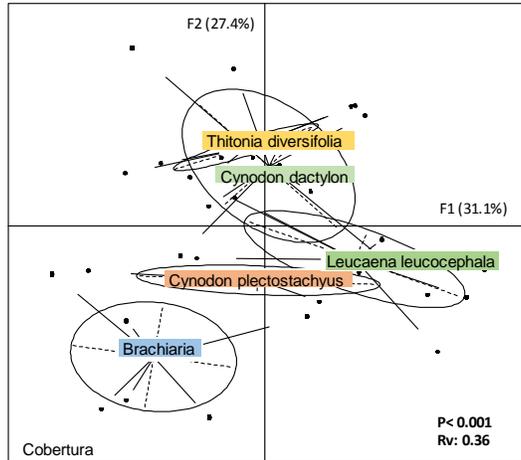


Figura 20. Análisis de componentes principales (ACP) de las variables estructurales con respecto a las coberturas.

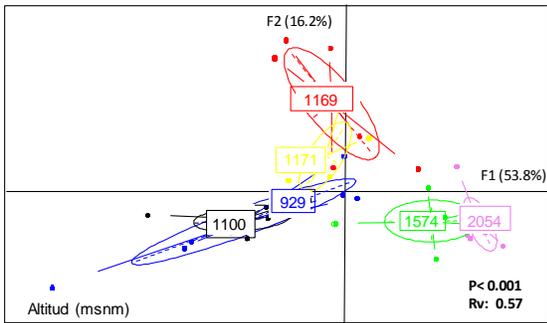


Figura 21. Análisis de componentes principales (ACP). Efecto de los niveles altitudinales sobre la calidad química del suelo.

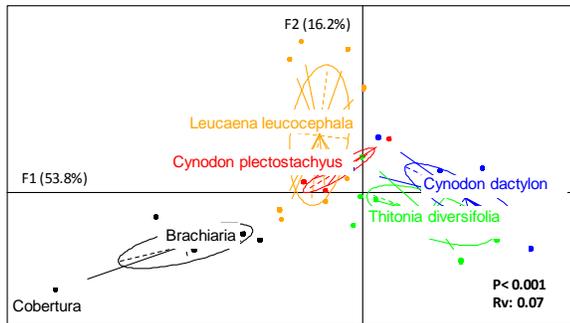


Figura 22. Análisis de componentes principales (ACP). Efecto de las coberturas sobre la calidad química del suelo.

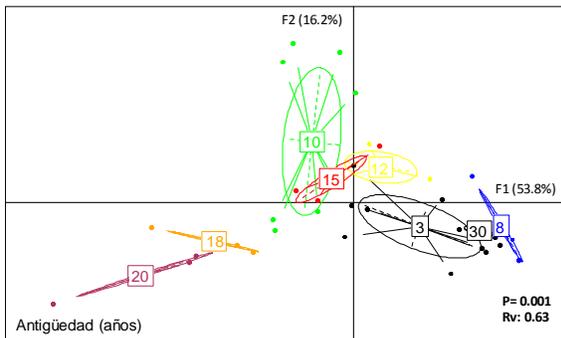


Figura 23. Análisis de componentes principales. Efecto de la antigüedad en la calidad química del suelo.

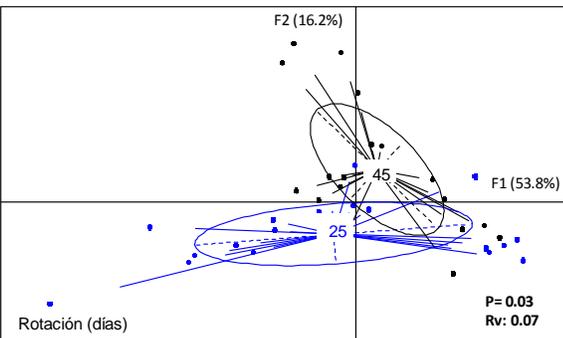


Figura 24. Análisis de componentes principales (ACP). Efecto de las rotaciones en la calidad química del suelo.

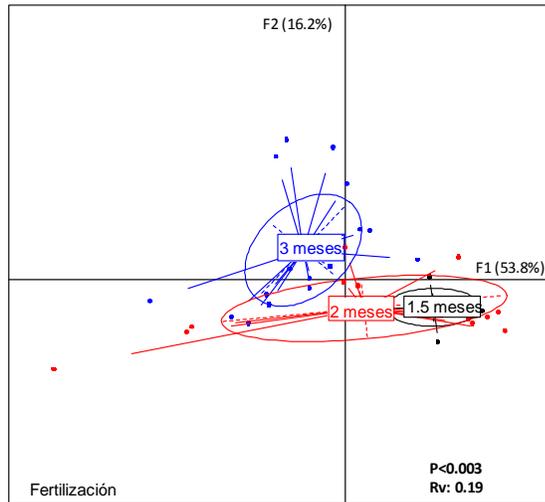


Figura 25. Análisis de componentes principales. Efecto de la periodicidad de fertilización en la calidad química del suelo.

Anexo 2: Densidad de macrofauna por m² por sistema ganadero.

Tabla 20. Densidad de macrofauna edáfica por metro cuadrado en sistemas silvopastoriles y pasturas tradicionales en el Eje Cafetero.

Variable	Media	Llanitos		Esperanza		Vesubio		San Diego		Santa Cruz		Asturias	
	Rango	SSPI	Pt	SSPI	Pt	SSPI	Pt	SSPI	Pt	SSPI	Pt	SSPI	Pt
	σ												
Isoptera	M	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.7	0.0
	R	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	32-0	0-0
	σ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.5	0
Oligochaeta	M	205.3	765.3	426.7	573.3	424.0	328.0	261.3	506.7	506.7	368.0	728.0	186.7
	R	320-48	1248-528	800-0	784-464	704-256	1232-48	464-64	864-144	1088-64	432-272	1376-272	416-48
	σ	95.2	267.4	303.2	129.8	157.7	449.5	166.5	331.4	525.9	84.7	384.4	145.5
Coleoptera	M	24.0	32.0	178.7	37.3	42.7	96.0	250.7	168.0	90.7	138.7	328.0	10.7
	R	48-0	64-0	432-48	80-0	112-0	336-16	896-16	640-0	128-16	352-0	816-48	32-0
	σ	16.8	35.1	167.9	28.0	43.7	121.0	335.7	237.3	64.7	187.5	289.0	16.5
Hymenoptera	M	781.3	274.7	554.7	2304.0	1768.0	306.7	1706.7	10904.0	8469.3	7424.0	3114.7	3413.3
	R	1856-48	1536-0	2816-0	5696-0	3200-240	592-112	5056-496	26016-3520	15824-688	16880-16	8208-336	8800-1680

Variable	Media	Llanitos		Esperanza		Vesubio		San Diego		Santa Cruz		Asturias	
	Rango	SSPI	Pt	SSPI	Pt	SSPI	Pt	SSPI	Pt	SSPI	Pt	SSPI	Pt
	σ												
	σ	841.5	618.3	1113.5	2330.3	1086.2	187.5	1763.7	9358.9	7577.0	8616.5	3812.0	2677.2
Dyctioptera	M	8.0	2.7	5.3	2.7	0.0	10.7	5.3	0.0	5.3	5.3	8.0	8.0
	R	32-0	16-0	32-0	16-0	0-0	32-0	16-0	0-0	16-0	16-0	32-0	48-0
	σ	13.4	6.5	13.1	6.5	0	13.1	8.3	0	9.2	9.2	13.4	19.6
Acari	M	5.3	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	0.0	5.3	5.3	8.0	0.0
	R	16-0	32-0	0-0	0-0	0-0	0-0	32-0	0-0	16-0	16-0	16-0	0-0
	σ	8.3	13.4	0	0	0	0	13.4	0	9.2	9.2	8.8	0
Aranea	M	32.0	2.7	10.7	16.0	2.7	5.3	8.0	0.0	5.3	0.0	5.3	2.7
	R	64-0	16-0	16-0	80-0	16-0	16-0	32-0	0-0	16-0	0-0	16-0	16-0
	σ	26.8	6.5	8.3	32	6.5	8.3	13.4	0	9.2	0	8.3	6.5
Quilópodo	M	8.0	0.0	2.7	0.0	56.0	13.3	0.0	2.7	21.3	21.3	5.3	2.7
	R	16-0	0-0	16-0	0-0	80-32	32-0	0-0	16-0	48-0	48-0	16-0	16-0
	σ	8.8	0	6.5	0	16.8	12.0	0	6.5	24.4	24.4	8.3	6.5
Diplopodo	M	13.3	0.0	5.3	8.0	5.3	106.7	5.3	2.7	16.0	21.3	56.0	45.3
	R	48-0	0-0	16-0	48-0	16-0	464-0	16-0	16-0	48-0	32-0	144-0	160-0
	σ	18.7	0	8.3	19.6	8.3	177.2	8.3	6.5	27.7	18.5	57.0	60.2
Hemiptera	M	16.0	5.3	21.3	10.7	10.7	2.7	0.0	13.3	10.7	37.3	13.3	5.3
	R	32-0	16-0	48-0	64-0	48-0	16-0	0-0	48-0	32-0	80-16	32-0	16-0
	σ	10.1	8.3	19.4	26.1	19.4	6.5	0	18.7	18.5	37.0	15.7	8.3
Dermaptera	M	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.7	0.0	10.7	0.0
	R	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	16-0	0-0	48-0	0-0
	σ	0	0	0	0	0	0	0	0	9.2	0	19.4	0
Gasteropoda	M	0.0	2.7	2.7	0.0	0.0	2.7	0.0	0.0	0.0	5.3	2.7	2.7
	R	0-0	16-0	16-0	0-0	0-0	16-0	0-0	0-0	0-0	16-0	16-0	16-0
	σ	0	6.5	6.5	0	0	6.5	0	0	0	9.2	6.5	6.5

Variable	Media	Llanitos		Esperanza		Vesubio		San Diego		Santa Cruz		Asturias	
	Rango	SSPI	Pt	SSPI	Pt	SSPI	Pt	SSPI	Pt	SSPI	Pt	SSPI	Pt
	σ												
Diptera	M	5.3	5.3	16.0	0.0	5.3	5.3	2.7	10.7	0.0	5.3	0.0	0.0
	R	32-0	16-0	48-0	0-0	16-0	16-0	16-0	32-0	0-0	16-0	0-0	0-0
	σ	13.1	8.3	20.2	0	8.3	8.3	6.5	13.1	0	9.2	0	0
Lepidoptera	M	0.0	0.0	5.3	2.7	2.7	0.0	2.7	0.0	0.0	10.7	0.0	0.0
	R	0-0	0-0	16-0	16-0	16-0	0-0	16-0	0-0	0-0	32-0	0-0	0-0
	σ	0	0	8.3	6.5	6.5	0	6.5	0	0	18.5	0	0
Enchytraeida	M	2.7	0.0	2.7	0.0	2.7	5.3	5.3	16.0	0.0	37.3	90.7	0.0
	R	16-0	0-0	16-0	0-0	16-0	32-0	32-0	48-0	0-0	112-0	448-0	0-0
	σ	6.5	0	6.5	0	6.5	13.1	13.1	24.8	0	64.7	177.8	0
Diplura	M	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3	0.0	13.3	0.0	0.0	0.0	0.0
	R	48-0	0-0	0-0	0-0	0-0	32-0	0-0	64-0	0-0	0-0	0-0	0-0
	σ	19.6	0	0	0	0	13.1	0	25.6	0	0	0	0
Orthoptero	M	0.0	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0	2.7	2.7	0.0	0.0	2.7	2.7
	R	0-0	0-0	0-0	48-0	0-0	0-0	16-0	16-0	0-0	0-0	0-0	16-0
	σ	0	0	0	19.6	0	0	6.5	6.5	0	0	6.5	6.5
Mermithida	M	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	0.0	0.0	5.3	0.0	2.7	0.0
	R	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	16-0	0-0	0-0	16-0	0-0	0-0	0-0
	σ	0	0	0	0	0	6.5	0	0	9.2	0	6.5	0
Isopoda	M	16.0	0.0	10.7	0.0	0.0	5.3	2.7	0.0	10.7	5.3	10.7	2.7
	R	48-0	0-0	32-0	0-0	0-0	32-0	16-0	0-0	32-0	16-0	0-0	16-0
	σ	20.2	0	16.5	0	0	13.1	6.5	0	18.5	9.2	19.4	6.5

σ : Desviación estándar, **SSPI**: Sistema Silvopastoril Intensivo, **Pt**: Pastura tradicional.

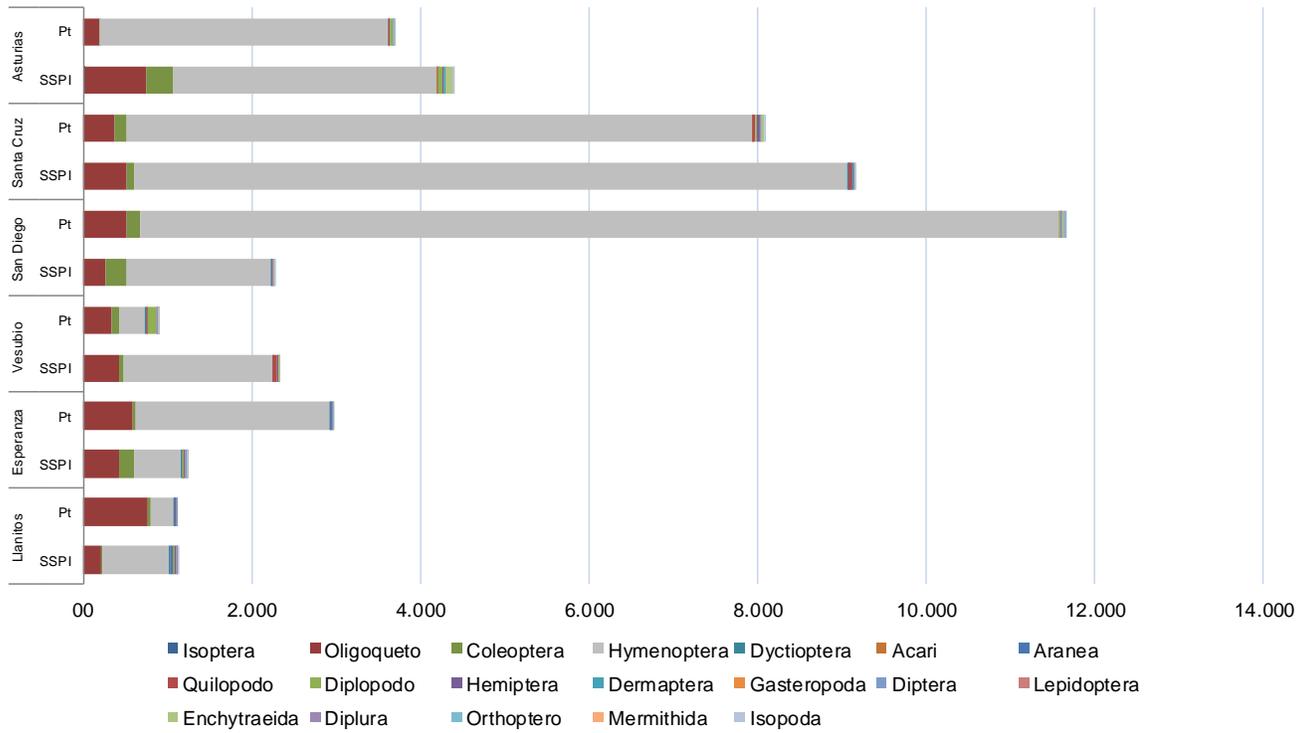


Figura 26. Densidad de macrofauna edáfica #individuos/m² en los sistemas ganaderos.

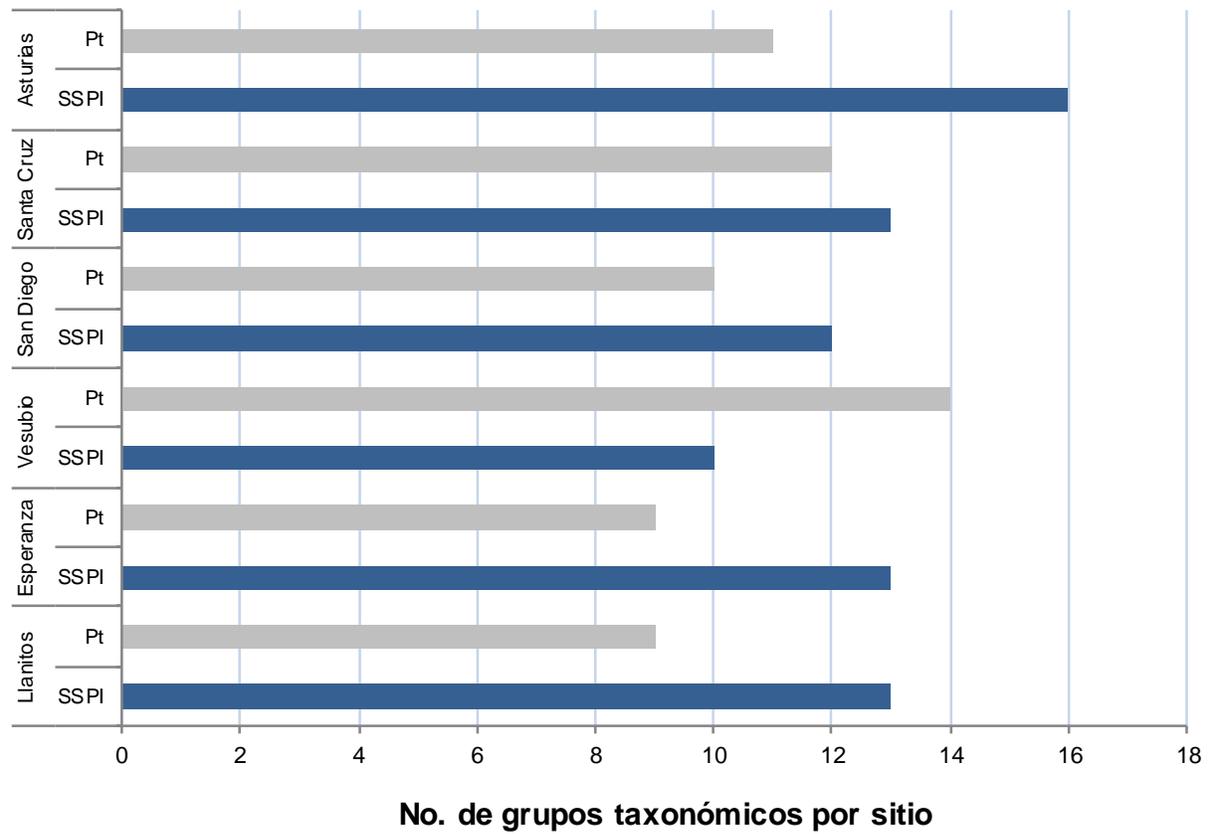


Figura 27. Riqueza de macrofauna edáfica en los sistemas ganaderos.

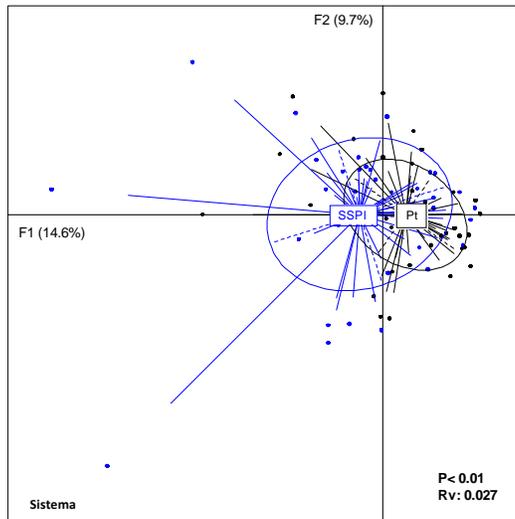


Figura 28. Análisis de componentes principales (ACP). Efecto de los sistemas ganaderos en la población de macrofauna edáfica.

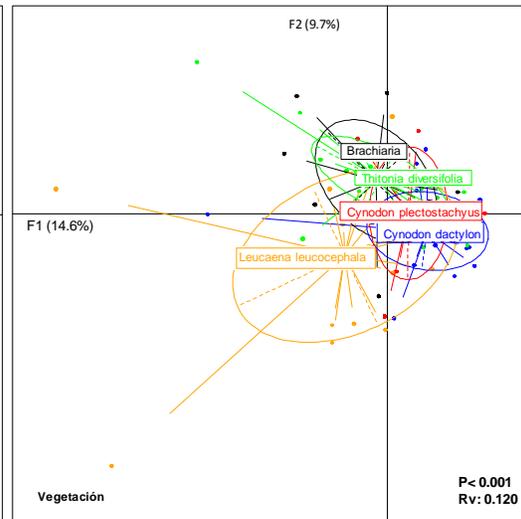


Figura 29. Análisis de componentes principales (ACP). Impacto de la vegetación sobre la calidad biológica del suelo.

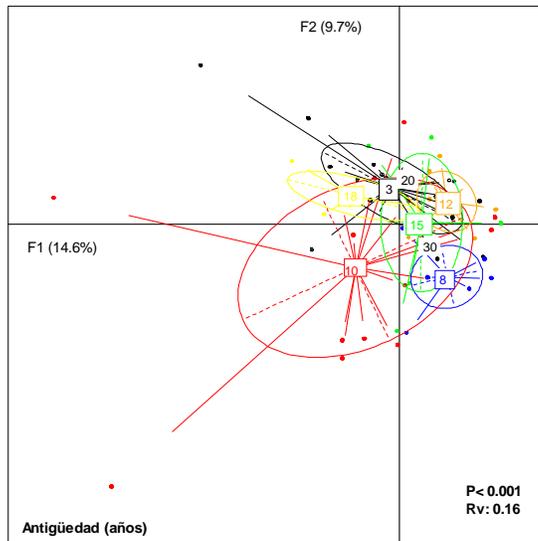


Figura 31. Análisis de componentes principales (ACP). Efecto de la antigüedad de establecimiento de los sistemas en la macrofauna edáfica.

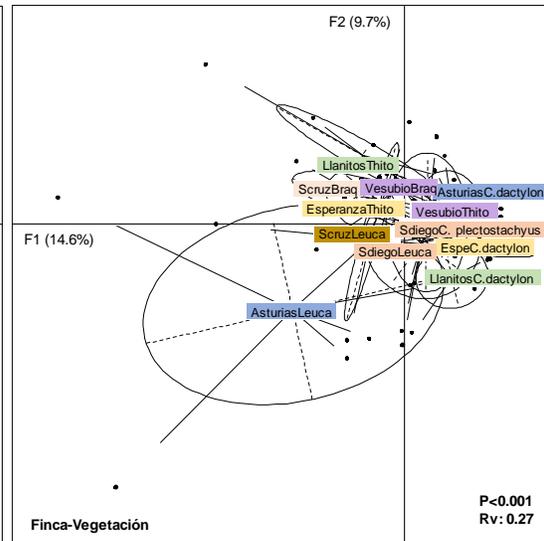


Figura 30. Análisis de componentes principales (ACP). Macrofauna edáfica en las fincas ganaderas.

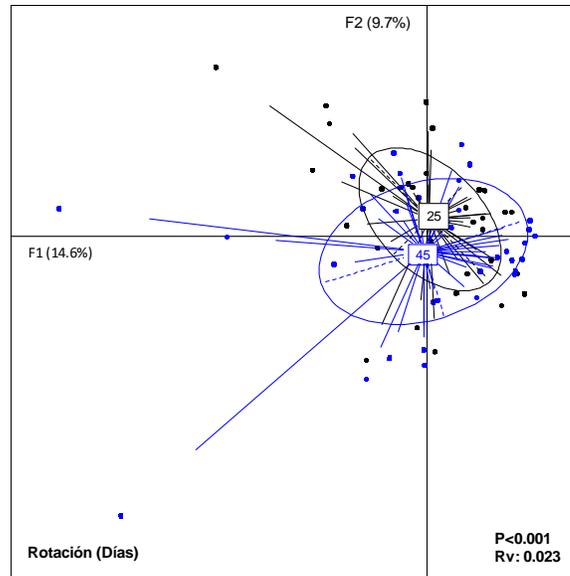


Figura 32. Análisis de componentes principales (ACP). Efecto del sistema de rotación sobre la macrofauna edáfica.

Anexo 3. Boxplot de los subindicadores para cada grupo de variables del suelo.

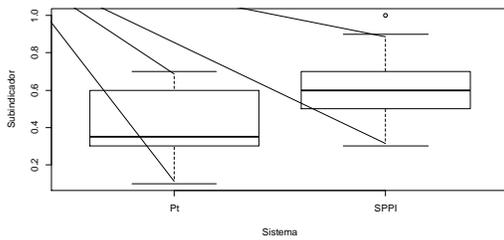


Figura 34. Distribución de los valores del subindicador de las variables mecánicas del suelo, con respecto a los sistemas ganaderos evaluados.

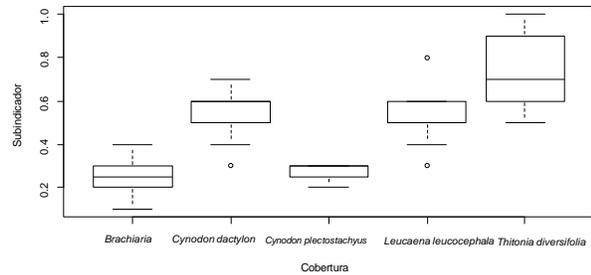


Figura 33. Distribución de los valores del subindicador de las variables mecánicas del suelo, con respecto a las coberturas.

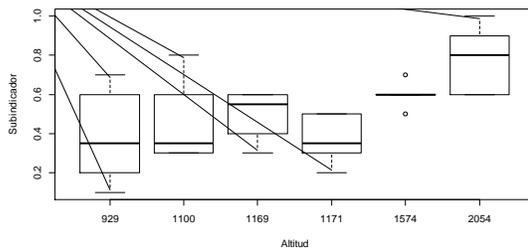


Figura 35. Distribución de los valores del subindicador de las variables mecánicas con respecto a los niveles altitudinales de las fincas.

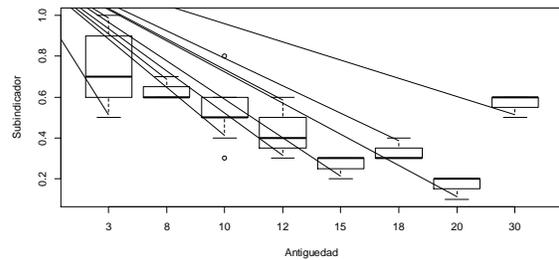


Figura 36. Distribución de los valores del subindicador de las variables mecánicas con respecto a la antigüedad (años) de los sistemas.

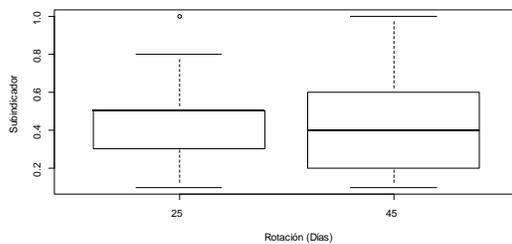


Figura 37. Distribución de los valores del subindicador de las variables mecánicas con respecto al sistema de rotación.

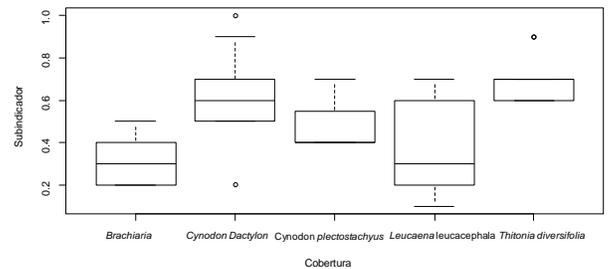


Figura 38. Distribución de los valores del subindicador de las variables estructurales del suelo, con respecto a las coberturas.

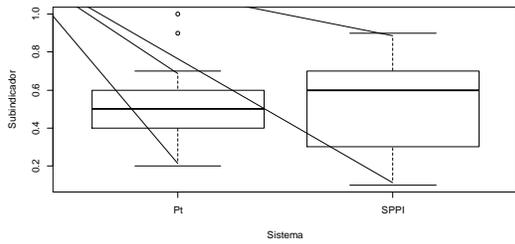


Figura 39. Distribución de los valores del subindicador de las variables estructurales del suelo, con respecto a los sistemas ganaderos.

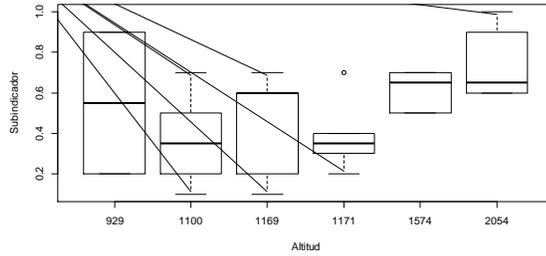


Figura 40. Distribución de los valores del subindicador de las variables estructurales con respecto a los niveles altitudinales de las fincas.

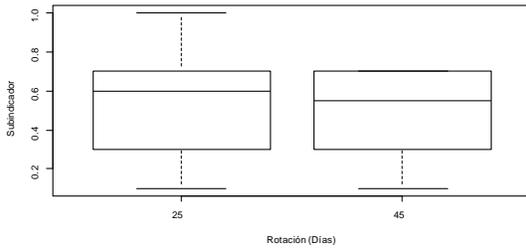


Figura 42. Distribución de los valores del subindicador de las variables estructurales con respecto al sistema de rotación.

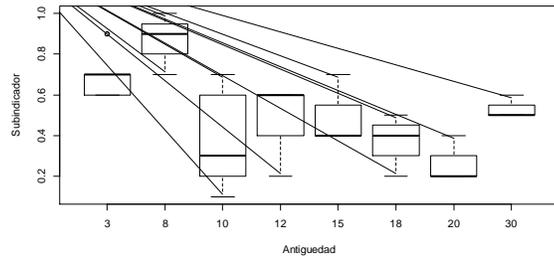


Figura 41. Distribución de los valores del subindicador de las variables estructurales con respecto a la antigüedad (años) de los sistemas.

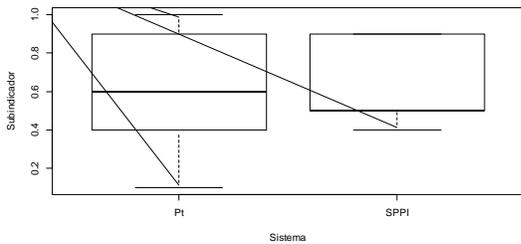


Figura 44. Distribución de los valores del subindicador de las variables volumétricas del suelo, con respecto a los sistemas ganaderos.

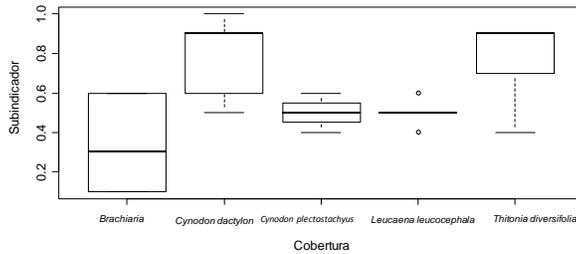


Figura 43. Distribución de los valores del subindicador de las variables volumétricas del suelo, con respecto a las coberturas.

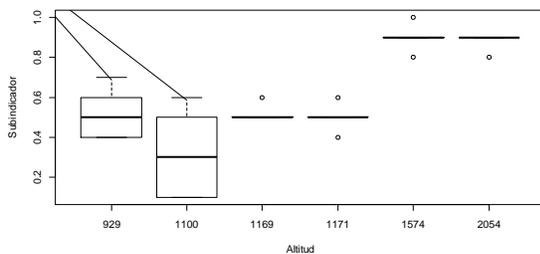


Figura 46. Distribución de los valores del subindicador de las variables volumétricas con respecto a los niveles altitudinales de las fincas.

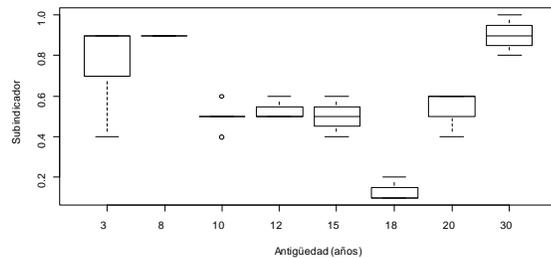


Figura 45. Distribución de los valores del subindicador de las variables volumétricas con respecto a la antigüedad (años) de los sistemas.

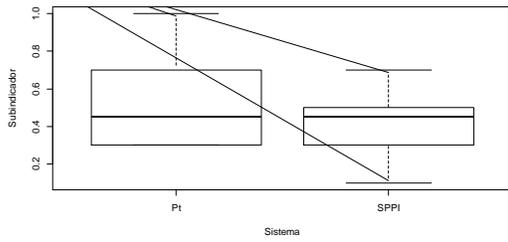


Figura 47. Distribución de los valores del subindicador de las variables químicas del suelo, con respecto a los sistemas ganaderos evaluados.

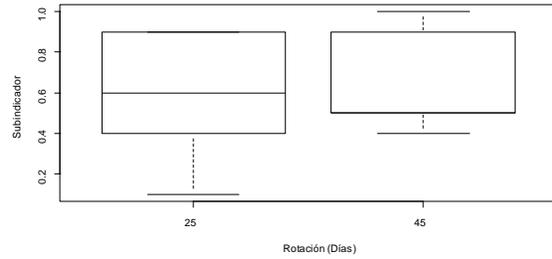


Figura 48. Distribución de los valores del subindicador de las variables volumétricas con respecto al sistema de rotación.

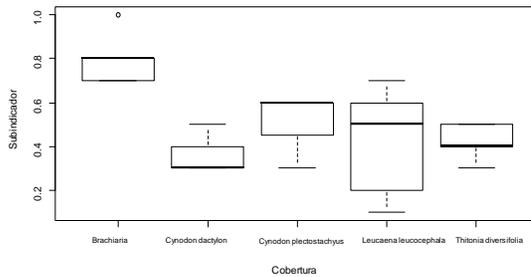


Figura 50. Distribución de los valores del subindicador de las variables químicas con respecto a las coberturas del suelo.

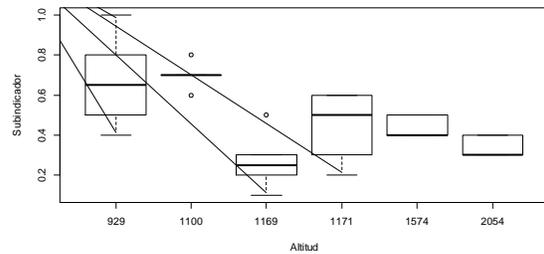


Figura 49. Distribución de los valores del subindicador de las variables químicas con respecto a los niveles altitudinales de las fincas.

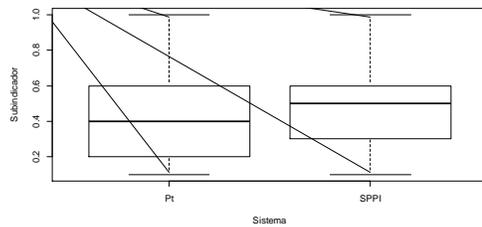


Figura 52. Distribución de los valores del subindicador de las variables biológicas del suelo, con respecto a los sistemas ganaderos evaluados.

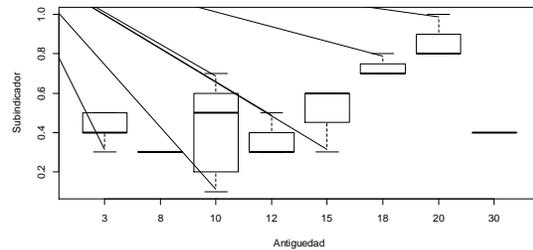


Figura 51. Distribución de los valores del subindicador de las variables químicas con respecto a la antigüedad de los sistemas.

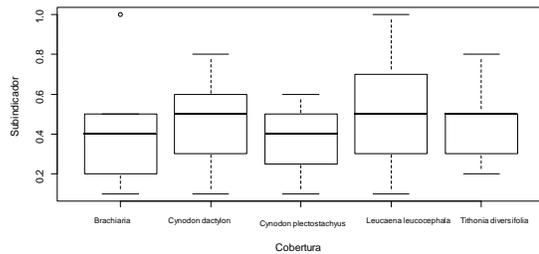


Figura 53. Distribución de los valores del subindicador de las variables biológicas del suelo, con respecto a las coberturas.

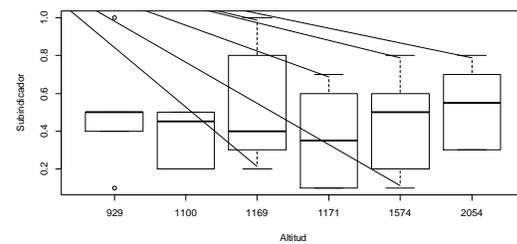


Figura 54. Distribución de los valores del subindicador de las variables biológicas del suelo, con respecto a los niveles altitudinales de las fincas.

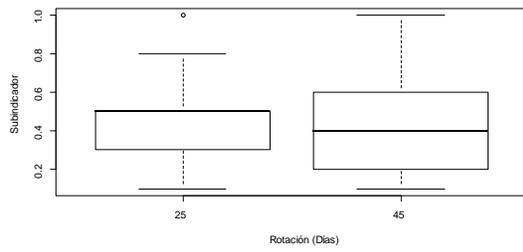


Figura 55. Distribución de los valores del subindicador de las variables biológicas del suelo, con respecto al sistema de rotación.

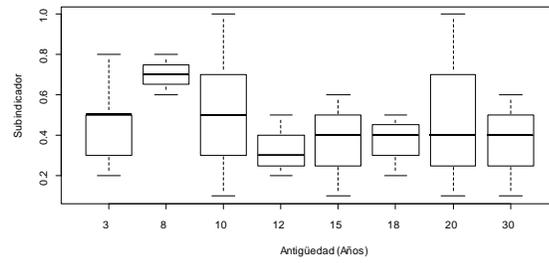


Figura 56. Distribución de los valores del subindicador de las variables biológicas del suelo, con respecto a la antigüedad de los sistemas.

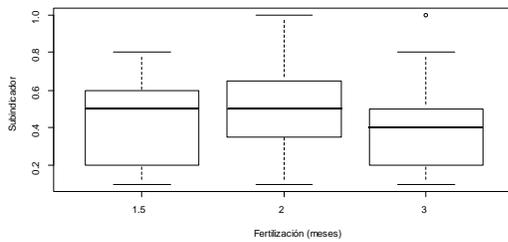


Figura 57. Distribución de los valores del subindicador de las variables biológicas del suelo, con respecto a la fertilización.

Bibliografía

- Alcaldía de Cartago Valle del Cauca. (2009). *Plan de Ordenamiento Territorial de Cartago, Valle del Cauca. Documento técnico*. Cartago. Retrieved from http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos PDF/pot_plan de ordenamiento territorial parte ii_cartago_valle_2000 - 2009.pdf
- Altieri, M., & Nicholls, C. (2002). Un metodo agroecologico rapido para la evaluacion de la sostenibilidad de cafetales. *Manejo Integrado de Plagas Y Agroecologia*, 64(64), 17–24.
- Amézquita, E., & Campo, J. M. (2004). *Manual operacional del minisimulador de lluvia CIAT*. Palmira.
- Asbakk, K., Hrabok, J. T., Oksanen, A., Nieminen, M., & Waller, P. J. (2006). Prolonged Persistence of Fecally Excreted Ivermectin from Reindeer in a Sub-Arctic Environment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 9112–9118. <http://doi.org/10.7557/2.27.3.277>
- Bautista, A., Etchevers, J., del Castillo, R., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13(2), 90–97. Retrieved from <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=149>
- Buitrago, M. E., Ospina, L. A., & Narváez, W. (2018). SISTEMAS SILVOPASTORILES : ALTERNATIVA EN LA MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN DE LA PRODUCCIÓN BOVINA AL CAMBIO CLIMÁTICO. *Boletín Científico de Museos de Historia Natural*, 22(1), 31–42. <http://doi.org/10.17151/bccm.2018.22.1.2>
- Cabrera, G. (2012). La macrofauna edáfica como indicador biológico del estado de

conservación / perturbación del suelo . *Pastos Y Forrajes*, 35(4), 349–363.

Calle, J. (Ed.). (2001). *Suelos del Eje Cafetero* (Primera). Pereira. Colombia.

Calle, Z., & Murgueitio, E. (2008). El Botón de oro: arbusto de gran utilidad para sistemas ganaderos de tierra caliente y de montaña. *Carta Fedegán*, 108, 54–63. Retrieved from http://nutriciondebovinos.com.ar/MD_upload/nutriciondebovinos_com_ar/Archivos/File/Boton_de_Oro_y_Ganaderia.pdf

Calle, Z., Murgueitio, E., Chará, J., Molina, C., Zuluaga, A., & Calle, A. (2013). A Strategy for Scaling-Up Intensive Silvopastoral Systems in Colombia. *Journal of Sustainable Forestry*, 32(7), 677–693. <http://doi.org/10.1080/10549811.2013.817338>

Campitelli, P. et al. (2011). Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Ciencia Del Suelo*, 28(2), 223–231.

CARDER. (2013). *Diagnóstico de riesgos Pereira*. Pereira. Colombia. Retrieved from <http://www.carder.gov.co/app/webroot/index.php/intradocuments/webExplorer/diagnosticos-riesgos-ambientales>

Cepeda, J. (2007). *Química de suelos* (2da ed.). México.

Cerón, L., & Aristizábal, F. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285–295.

Coskun, D., Britto, D., Shi, W., & Kronzucker, H. J. (2017). How Plant Root Exudates Shape the Nitrogen Cycle. *Trends in Plant Science*, 22(8), 661–673. <http://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.05.004>

DANE. (2015). *3er Censo Nacional Agropecuario CENSO NACIONAL AGROPECUARIO*

- DÉCIMA ENTREGA RESULTADOS-2014*. Bogotá. Retrieved from <https://www.dane.gov.co/files/CensoAgropecuario/entrega-definitiva/Boletin-10-produccion/10-Boletin.pdf>
- De la Rosa, D. (2008). *Evaluación Agro-ecológica de Suelos: para un desarrollo rural sostenible*.
- Doran, J. W., Coleman, D. C., Bezdicek, D. F., & Stewart, B. A. (1994). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Wisconsin, USA.
<http://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c3>
- FAO. (2015). *Guía metodológica para la implementación de Escuelas de Campo para Agricultores (ECA) en sistemas silvopastoriles agroecológicos*. (H. Latorre, G. Aristizabal, E. Devia, & N. González, Eds.). Bogotá. Retrieved from www.fao.org/colombia
- FEDEGAN. (2006). *Plan Estratégico de la Ganadería Colombiana 2019*. Bogotá D.C.
- FEDEGAN. (2019). Documentos de Estadística | Fedegan. Retrieved March 29, 2019, from <https://www.fedegan.org.co/estadisticas/documentos-de-estadistica>
- FEDEGAN, F. C. de G. (2018). *Ganadería Colombiana. Hoja de ruta 2018-2022*. (R. Cortés, Ed.), *Hoja De Ruta 2018 - 2022*. Bogotá, Colombia. Retrieved from http://static.fedegan.org.co.s3.amazonaws.com/publicaciones/Hoja_de_ruta_Fedegan.pdf
- Forsythe, W. (1975). *Física de suelos. Manual de laboratorio*. San José, Costa Rica.
- Gallego, L., Mahecha, L., & Angulo, J. (2014). Potencial forrajero de *Tithonia diversifolia* Helms. A Gray en la producción de vacas lecheras. *Agronomía Mesoamericana*, 25(2), 393–403.
- Giraldo, C., Escobar, F., Chará, J., & Calle, Z. (2011). The adoption of silvopastoral

systems promotes the recovery of ecological processes regulated by dung beetles in the Colombian Andes. *Insect Conservation and Diversity*, 4(2), 115–122.

<http://doi.org/10.1111/j.1752-4598.2010.00112.x>

IDEAM. (2019). *Décimo séptimo Boletín de Detecciones Tempranas de Deforestación Cuarto trimestre de 2018*. Bogotá. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/documents/24277/84382637/Detecciones+Tempranas+de+Deforestación/96e81976-195e-4d0f-8aaf-24c05c7312f8>

IDEAM; U.D.C.A. (2015). *Síntesis del estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia*. Bogotá D.C.

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA. (2018). *Segundo Reporte Bienal de Actualización Segundo Reporte Bienal de Actualización de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC)*. Bogotá. Retrieved from www.ideam.gov.co

IGAC, I. G. A. C. (2013). Cartografía básica de suelos. Retrieved April 15, 2019, from <https://geoportal.igac.gov.co/>

IGAC, I. G. A. C. (2013). *Estudio Semidetallado de suelos departamento del Quindío*. Bogotá. Retrieved from http://www.crq.gov.co/images/Info-Ciudadano/ESTUDIO_SEMIDETALLADO_DEL_QUINDIO.pdf

Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo. Facultad de ciencias. Universidad Nacional de Colombia*. Medellín, Colombia.

Larson, W., & Pierce, F. (1994). *The Dynamics of Soil Quality as a Measure of Sustainable Management, In Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*.

Lavelle, P., Rodríguez, N., Arguello, O., Bernal, J., Botero, C., Chaparro, P., ... Fonte, S. J. (2014). Soil ecosystem services and land use in the rapidly changing Orinoco

- River Basin of Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 185, 106–117.
<http://doi.org/10.1016/j.agee.2013.12.020>
- Lefèvre, C., Rekik, F., Alcantara, V., & Wiese, L. (2017). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. (L. Wiese, V. Alcantara, R. Baritz, & Vargas. R., Eds.). Roma, Italia. Retrieved from www.fao.org/publications
- Lok, S., Crespo, G., Frómeta, E., Torres, V., & Fraga, S. (2007). Estudio y selección de indicadores de sostenibilidad en pastizales silvopastoriles basados en *Leucaena leucocephala*-*Panicum maximum*. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 41(4), 371–380.
- Lora, R. (2013). Propiedades químicas del suelo. In *Ciencia del suelo, principios Básicos*. (2nd ed., pp. 77–134). Bogotá.
- Mahecha, L. (2002). El Silvopastoreo: Una alternativa de producción que disminuye el impacto ambiental de la ganadería bovina. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 15(2), 226–231.
- Mahecha, L., Rosales, M., Molina, H., & Molina, E. . (1999). Experiencias en un sistema silvopastoril de *Leucaena*. In FAO (Ed.), *Agroforestería para la Producción Animal en Latinoamérica* (pp. 325–336). Roma.
- Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). CARBONO ORGÁNICO Y PROPIEDADES DEL SUELO. *Revista Ciencia Del Suelo Y Nutrición Vegetal*, 8(1), 68–96. <http://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- McAlpine, C. A., Etter, A., Fearnside, P. M., Seabrook, L., & Laurance, W. F. (2009). Increasing world consumption of beef as a driver of regional and global change: A call for policy action based on evidence from Queensland (Australia), Colombia and Brazil. *Global Environmental Change*, 19(1), 21–33.
<http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.008>

- Meneses, E., & Reina, A. (2015). *Cuantificación de macrofauna edáfica del suelo en un sistema silvopastoril comparado con un sistema convencional en una zona de bosque seco tropical (bs-T)*. Universidad de Nariño.
- Molina, B., & Díaz, T. (2017). La ganadería y sus desafíos en América Latina y el Caribe | Agronews Castilla y León. Retrieved April 2, 2019, from <https://www.agronewscastillayleon.com/fao-la-ganaderia-y-sus-desafios-en-america-latina-y-el-caribe>
- Montagnini, F., Somarriba, E., Murgueitio, E., Fassola, H., & Eibl, B. (2015). *Sistemas agroforestales : funciones productivas, socioeconómicas y ambientales. Sistemas Agroforestales* (Primera). Colombia-Costa Rica. Retrieved from <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7124/SistemasAgroforestales.pdf?sequence=1#page=276>
- Moreira, F., Huising, E., & Bignell, D. (Eds.). (2012). *Manual de biología de suelos tropicales* (Primera). México.
- Municipio de Alcalá Valle del Cauca. (2003). *DIAGNÓSTICO MUNICIPAL. ESQUEMA DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL 2003-2011*. ALcalá. Retrieved from <http://cdim.esap.edu.co/bancomedios/Documentos PDF/eot - alcalá - valle del cauca - 2003 - 2011.pdf>
- Murgueitio, E., Barahona, R., Chará, J., Xóchitl, M., Mauricio, R., & Molina, J. J. (2015). The intensive silvopastoral systems in Latin America sustainable alternative to face climatic change in animal husbandry. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 49(4), 541–554.
- Murgueitio, E., Barahona, R., Martins, R., Xóchitl, M., Chará, J., & Solorio, F. (2014). *Intensive Silvopastoral Systems: Improving Sustainability and Efficiency in Cattle Ranching Landscapes. Case studies: Low input livestock landscapes*. Retrieved from <http://www.fao.org/nr/sustainability/sustainability-and-livestock/database/projects->

- detail/en/c/239470/
- Murgueitio, E., Cuartas, C., & Naranjo, J. (Eds.). (2008). Ganadería del futuro: Investigación para el desarrollo. In *Fundacion CIPAV* (pp. 19–40). Cali. <http://doi.org/ISBN: 978-958-9386-55-2>
- Narro, E. (2004). *Física de suelos con enfoque agrícola* (Primera). Mexico.
- Navarrete Segueda, A., Vela Correa, G., Lopez, J., & Rodriguez, M. D. L. (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *ContactoS*, 80, 29–37.
- Nelson, N., & Durschinger, L. (2015). *SUPPORTING ZERO-DEFORESTATION CATTLE IN COLOMBIA. Supported Forest Carbon*. Washington, DC, USA. Retrieved from www.tetrachintdev.com
- Nuñez, M., Benítez, E., Bonnin, J. J., & Paiva, J. (2019). Characterization of the compaction and moisture content of soils in Silvopastoral systems and natural pasture field. In J. Rivera, P. Peri, J. Chará, M. Díaz, L. Colcombet, & E. Murgueitio (Eds.), *En X CONGRESO INTERNACIONAL DE SISTEMAS SILVOPASTORILES por una producción sostenible* (pp. 81–87). Asunción, Paraguay.
- Obade, V. de P. (2019). Integrating management information with soil quality dynamics to monitor agricultural productivity. *Science of the Total Environment*, 651(2), 236–243. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.106>
- Cantú, M., Becker, A., Bedano, J., & Schiavo, H. (2007). Evaluación De La Calidad De Suelos Mediante El Uso De Indicadores E Índices Soil Quality Evaluation Using Indicators and Indices. *Ci. Suelo (Argentina)*, 25(2), 173–178.
- Pezo, D., & Ibrahim, M. (1999). Sistemas Silvopastoriles. In CATIE (Ed.), *Colección Módulos de enseñanza Agroforestal* (p. 264). Turrialba, Costa Rica. Retrieved from [http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/4025/Sistemas_silvopastoriles.pdf;jsessionid=40BE9C3176811C4DCB740A08185DB305?sequence=](http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/4025/Sistemas_silvopastoriles.pdf;jsessionid=40BE9C3176811C4DCB740A08185DB305?sequence=1)

- Pineda, A. M. (2014). Nodo regional de Cambio Climático. Ecorregión Eje Cafetero. CARDER, Corporación Autónoma Regional de Risaralda. Retrieved April 15, 2019, from <http://www.carder.gov.co/index.php/web/es/nodo-regional-de-cambio-clim-tico-de-la-ecorregi-n-eje-cafetero>
- Reinoso, M. (2014). Agroforestry: A Viable Alternative for Sustainable Agricultural Production. *Scientia Agriculturae*, 5(1), 32–39. <http://doi.org/10.15192/pscp.sa.2014.1.1.3239>
- Rivera Herrera, J. E., Molina Botero, I., Chará Orozco, J., Murgueitio Restrepo, E., & Barahona Rosales, R. (2017). Sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit: alternativa productiva en el trópico ante el cambio climático. *Pastos Y Forrajes*, 40(3), 171–183. Retrieved from <http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v40n3/pyf01317.pdf>
- Rodríguez, J. (2011). *DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE CALIDAD DEL SUELO: PARA AGROECOSISTEMAS DE LA ZONA CAFETERA DE COLOMBIA*. Universidad tecnológica de Pereira.
- Rodríguez, J., Camargo, J., Niño, J., Pineda, A., Arias, L., Echeverry, M., & Miranda, C. (Eds.). (2009). *Valoración de la Biodiversidad en la Ecorregión del Eje Cafetero*. *Valoración de la Biodiversidad en la Ecorregión del Eje Cafetero*. Pereira. Colombia.
- Rodríguez, J., Llano, M. & Fonseca, B. (2018). *ESTUDIO SECTORIAL SOBRE LA PRODUCCIÓN CÁRNICA BOVINA EN LA REGIÓN CARIBE*. Bogotá D.C. Retrieved from <https://www.contraloria.gov.co/documents/20181/996701/2018+ESD+Carne+bovina+2018+.pdf/156ff515-af06-4047-b5a1-886da96ff09d?version=1.0>
- Rosales, M., Murgueitio, E., Osorio, H., Speedy, A., & Sánchez, M. (1999). Conclusiones y evaluación de la conferencia electrónica. In M. . Sánchez & M. . Rosales (Eds.), *Agroforestería para la producción animal en América Latina* (pp. 492–505).

- Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/014/x1213s/x1213s.pdf>
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Montevideo, Uruguay.
- Sadeghian, S. (2003). Impacto de la ganadería sobre el suelo, alternativas sostenibles de manejo. *SIMPOSIO Nacional de Ganadería Ecológica*, 5 p. Retrieved from [http://www.desertificacion.gob.ar/mapas/modelos/impacto de la ganaderia sobre el suelo.pdf](http://www.desertificacion.gob.ar/mapas/modelos/impacto%20de%20la%20ganaderia%20sobre%20el%20suelo.pdf)
- Sánchez, J. A. (2013). Los Suelos de Colombia. In H. Burbano & F. Silva (Eds.), *Ciencia del suelo, principios básicos*. (2da ed., p. 580). Bogotá, Colombia.
- Sánchez de Prager, M. (2018). *Aportes de la biología del suelo a la agroecología*. (1ra ed.). Palmira, Colombia.
- Silberman, J., Anriquez, A., Domínguez, J., Kunst, C., & Albanesi, A. (2015). La cobertura arbórea en un sistema silvopastoril del Chaco y su contribución diferencial al suelo. *Ciencia Del Suelo*, 33(1), 19–29.
- Silva, G. L., Lima, H. V, Campanha, M. M., Gilkes, R. J., & Oliveira, T. S. (2011). Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. *Geoderma*, 167–168, 61–70. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.09.009>
- Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo-SCCS. (2013). *Ciencia del suelo*. (H. Burbano & F. Silva, Eds.) (2da ed.). Bogotá, Colombia.
- Sojka, R. E., & Upchurch, D. R. (1999). Reservations Regarding the Soil Quality Concept. *Soil Science Society of America Journal*, 63(5), 1039. <http://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351039x>
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & De Haan, C. (2009).

La larga sombra del ganado, problemas ambientales y opciones. (FAO, Ed.). Roma.
<http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

- Torres, C., Etchevers, J., Fuentes, M., Govaerts, B., León, F., & Herrera, J. (2013).
INFLUENCIA DE LAS RAÍCES SOBRE LA AGREGACIÓN DEL SUELO Influence of
the Roots on Soil Aggregation. *Terra Latinoamericana*, 31, 71–84.
- Tovar, H., Noriega, J., & Caraballo, P. (2016). Efecto de la ivermectina sobre la estructura
del ensamble de escarabajos coprófagos (Coleoptera : Scarabaeidae : Aphodiinae-
Scarabaeinae) en las sabanas colombianas de la región Caribe. *Actualidades
Biológicas*, 38(April), 157–166. <http://doi.org/10.17533/udea.acbi.v38n105a03>
- Uribe, F., Orozco, J., Martínez, A., Díaz, E., Escobar, R., Rodas, M., & Arango, O. (2007).
*Agenda para el desarrollo sostenible de la ecorregión eje cafetero - Colombia 2007-
2019.* Pereira. Retrieved from
<http://www.almamater.edu.co/sitio/Archivos/Documentos/Documentos/00000021.pdf>
- Uribe, F., Zuluaga, A., Murgueitio, E., Valencia, L., Solarte, L., Cuartas, C., ... Molina, C.
(2011). *Establecimiento y manejo de sistemas silvopastoriles. Manual 1, Proyecto
Ganadería Colombiana Sostenible.* Bogotá.
- USDA. (2014). *Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. United States
Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service* (2nd ed.).
Lincoln, Nebraska. <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.3803.8889>
- USDA, U. S. D. of A., & SQI, S. Q. I. (1996). *Indicators for Soil Quality Evaluation.*
Washington D.C. Retrieved from
https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053149.pdf
- Valenzuela, I., & Torrente, A. (2013). Física de suelos. In *Ciencia del suelo. Principios
básicos* (2nd ed., pp. 139–212). Bogotá.
- Vallejo, V. E. (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos a

- través del componente microbiano: Experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal*, 16(1), 83.
<http://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a06>
- Velásquez, E. (2004). *Bioindicadores de calidad del suelo basados en las poblaciones de macrofauna y su relación con características funcionales del suelo*. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.
- Velasquez, E., & Lavelle, P. (2019). Soil macrofauna as an indicator for evaluating soil based ecosystem services in agricultural landscapes. *Acta Oecologica*, 100(July), 18. <http://doi.org/10.1016/j.actao.2019.103446>
- Velasquez, E., Lavelle, P., & Andrade, M. (2007). GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(12), 3066–3080.
<http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.06.013>
- Vergara, J. A. (2015). *Caracterización de la degradación y los cambios de usos de suelo en fincas ganaderas y su relación con la diversidad de aves en el Valle del río Cesar, Colombia*.
- Vergara, V. W. (2010). La ganadería extensiva y el problema agrario. El reto de un modelo de desarrollo rural sustentable para Colombia. *Revista Ciencia Animal*, n.º 3: 45-53. Retrieved from
<http://revistas.lasalle.edu.co/index.php/ca/article/view/350/281>
- Wilson, M., Quintero, C., Boschetti., Benavidez R., M. W. (2000). Evaluación de Atributos del suelo para su utilización como indicadores de calidad y sostenibilidad entre Rios. *Revsita Facultad de Agronomía*, 20(1), 23–30.
- Wilson, M. (2017). *Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina*. (INTA, Ed.) (1st ed.). Entre Rios.
- Zuluaga, A. F., Giraldo, C., & Chará, J. (2011). *Servicios ambientales que proveen los*

Sistemas silvopastoriles y los beneficios para la biodiversidad. Manual 4, Proyecto Ganadería Colombiana Sostenible.