

**IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DEL SUELO BAJO DOS
SISTEMAS DE PRODUCCIÓN GANADERA**

JHONNY GÁLVEZ GONZÁLEZ



**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
PROGRAMA ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA
MANIZALES
2016**

**IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DEL SUELO BAJO DOS
SISTEMAS DE PRODUCCIÓN GANADERA**

JHONNY GÁLVEZ GONZÁLEZ

Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar al título de
Especialista en Información Geográfica

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
PROGRAMA ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA
MANIZALES
2016**

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	10
1. Área problemática	12
2. Objetivos	13
2.1 Objetivo General	13
2.2 Objetivos Específicos	13
3. Justificación	14
4. Marco teórico.....	15
4.1 Efectos de la ganadería	15
4.2 Sistemas Silvopastoriles.....	15
4.2.1 <i>Leucaena</i> (<i>Leucaena leucocephala</i>)	16
4.2.2 Botón de oro (<i>Tithonia diversifolia</i>).....	17
4.3 Beneficios de los sistemas silvopastoriles	18
4.4 Variabilidad espacial del suelo	19
4.5 Indicadores de deterioro del suelo	21
4.6 Indicadores de calidad y fertilidad del suelo	22
4.7 Efectos positivos de la incorporación de silvopastoriles sobre el suelo	24
4.8 Antecedentes	25
5. Metodología	28
5.1 Tipo de trabajo	28
5.2 Procedimiento	28
5.2.1 Fase 1. Selección de fincas	28
5.2.2 Fase 2. Determinación de propiedades químicas	31
5.2.3 Fase 3. Determinación de propiedades físicas	32
5.2.4 Fase 4. Análisis de la información.	32
6. Resultados y Discusión	34
6.1 Descripción de Resultados	34
6.1.1 Finca El Pañuelo	34
6.1.2 Finca Sierra Morena	38
6.1.3 Finca El Palmar	41
6.1.4 Finca San Francisco	45
6.1.5 Finca Montelindo	48
7. Conclusiones	52
Bibliografía	53
Anexos	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de lotes muestreados en la finca El Pañuelo.....	29
Figura 2. Ubicación de lotes muestreados en la finca Sierra Morena.	30
Figura 3. Ubicación de lotes muestreados en la finca El Palmar	30
Figura 4. Ubicación de lotes muestreados en la finca San Francisco.....	31
Figura 5. Lotes de muestreo en la finca Montelindo	31
Figura 6. Lotes muestreados en la finca El Pañuelo.....	34
Figura 7. Mapas de potasio, calcio, magnesio, fósforo, pH y aluminio de la finca El Pañuelo.	36
Figura 8. Mapas de densidad aparente y porosidad total del suelo de la finca El Pañuelo.....	37
Figura 9. Lotes muestreados en la finca Sierra Morena	38
Figura 10. Mapas de potasio, calcio, magnesio, fósforo, pH y aluminio de la finca Sierra Morena.	40
Figura 11. Mapas de densidad aparente y porosidad total del suelo de la finca El Pañuelo.....	41
Figura 12. Lotes muestreados en la finca El Palmar	41
Figura 13. Mapas de potasio y calcio, de la finca El Palmar	43
Figura 14. Mapas de magnesio, fósforo, pH, densidad aparente y densidad real de la finca El Palmar.	44
Figura 15. Lotes muestreados en la finca San Francisco	45
Figura 16. Mapas de potasio, calcio, magnesio, fósforo, pH y aluminio de la finca San Francisco.	47
Figura 17. Mapas de densidad aparente y porosidad total del suelo de la finca San Francisco.	48
Figura 18. Lotes muestreados en la finca San Francisco	48
Figura 19. Mapas de potasio, calcio, magnesio y fósforo de la finca Montelindo. .	50
Figura 20. Mapas de pH, aluminio, densidad aparente y porosidad total del suelo en la finca Montelindo.	51

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación y características de las fincas muestreadas	29
Tabla 2. Descripción de los métodos utilizados en laboratorio	32
Tabla 3. Estadística descriptiva para las variables estudiadas en la finca El Pañuelo	35
Tabla 4. Frecuencias de distribución de la materia orgánica en los dos sistemas ganaderos de la finca El Pañuelo	35
Tabla 5. Estadística descriptiva para las variables estudiadas en la finca Sierra Morena	39
Tabla 6. Frecuencias de distribución de la materia orgánica en los dos sistemas ganaderos de la finca Sierra Morena	39
Tabla 7. Estadística descriptiva para las variables estudiadas en la finca El Palmar	42
Tabla 8. Frecuencias de distribución de la materia orgánica en los dos sistemas ganaderos de la finca El Palmar	42
Tabla 9. Estadística descriptiva para las variables estudiadas en la finca San Francisco	45
Tabla 10. Frecuencias de distribución de la materia orgánica en los dos sistemas ganaderos de la finca San Francisco	46
Tabla 11. Estadística descriptiva para las variables estudiadas en la finca San Francisco	49
Tabla 12. Frecuencias de distribución de la materia orgánica en los dos sistemas ganaderos de la finca Montelindo.	49

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Resultados de análisis químicos y físicos de suelos para la finca El Pañuelo	58
Anexo B. Resultados de análisis químicos y físicos de suelos para la finca Sierra Morena.....	59
Anexo C. Resultados de análisis químicos y físicos de suelos para la finca El Palmar	60
Anexo D. Resultados de análisis químicos y físicos de suelos para la finca San Francisco	61
Anexo E. Resultados de análisis químicos y físicos de suelos para la finca Montelindo	62

GLOSARIO

Calidad del suelo: capacidad funcional de un tipo específico de suelo, para sustentar la productividad animal o vegetal, se entiende como un atributo que se infiere de sus características y observaciones indirectas como los son la compactación, la erodabilidad, la fertilidad, entre otras (Pankhurst *et al.*, 1997).

Densidad aparente del suelo: es la densidad del suelo que se calcula teniendo en cuenta el espacio ocupado por los poros al cuantificar el volumen de la muestra de suelo.

Densidad real del suelo: es el peso de las partículas sólidas del suelo, relacionado con el volumen que ocupan, sin tener en cuenta su organización en el suelo, es decir, sin involucrar en el volumen el espacio ocupado por los poros.

Ganadería: actividad económica de origen antiguo que consiste en el manejo de animales domesticables con fines de producción para su aprovechamiento.

Georreferenciación: proceso de asociación de puntos de datos con ubicaciones específicas en la superficie terrestre

Interpolación: procedimiento para predecir los valores desconocidos entre valores de datos vecinos conocidos

Materia orgánica del suelo: es el producto de la descomposición química de las excreciones de animales y microorganismos, de residuos de plantas o de la degradación de cualquiera de ellas. La materia orgánica es esencial para la fertilidad y la buena producción agropecuaria. Los suelos sin materia orgánica son suelos pobres y de características físicas inadecuadas para el crecimiento de las plantas.

Porosidad total del suelo: es el volumen de éste que no está ocupado por sólidos; es el volumen que hay disponible en el suelo para los líquidos y los gases.

Sistema silvopastoril: Es un arreglo que combina el cultivo agroecológico de leñosas perennes (árboles o arbustos) para consumo del ganado, asociados siempre a pastos de pastoreo o corte.

RESUMEN

Se realizó la identificación de los parámetros de calidad del suelo en dos sistemas de producción ganadera, sistema silvopastoril y pastoreo convencional en cinco fincas de cuatro municipios del departamento de caldas. En cada lote bajo estudio se tomaron muestras de suelos para determinar pH, contenido de materia orgánica, fósforo, calcio, magnesio, potasio, aluminio, densidad aparente, densidad real y porosidad total del suelo; cada sitio de muestreo fue georreferenciado y los lotes delimitados para obtener sus respectivas áreas, con dicha información se realizaron interpolaciones a fin de construir mapas de fertilidad y propiedades físicas. Los suelos en las áreas de estudio presentaron variabilidades altas de fósforo, atribuidas a la baja movilidad que tiene este en el suelo y a la reacción con el pH bajo presentado. Las bases del suelo (Ca, Mg y K), aparecen en desbalance en las fincas estudiadas, generando relaciones iónicas poco favorables que ocasionan deficiencias y excesos. El sistema silvopastoril de la finca Montelindo presentó una porosidad total satisfactoria, lo que indica el beneficio que tiene este tipo de sistema en el suelo, dicho resultado se debe al tiempo de establecimiento del sistema, que en esta finca es superior a los cinco años; La densidad aparente más alta y porosidad total baja del suelo en las fincas restantes revelan problemas de compactación. Se observaron ligeras variaciones, entre los lotes silvopastoriles y los lotes de pastoreo convencional para las variables químicas y físicas del suelo, lo que indica que el corto tiempo de establecimiento de los sistemas silvopastoriles no es suficiente para causar un efecto significativo. Estos suelos requieren intervenciones para el mejoramiento de la fertilidad y de esta manera realizar un aprovechamiento óptimo de los sistemas silvopastoriles, los cuales son una alternativa que permite producir con múltiples beneficios para el medio ambiente.

PALABRAS CLAVES: Calidad del suelo, sistema silvopastoril, interpolación

ABSTRACT

It has been made the soil quality parameters identification in two systems of livestock production, silvopastoral system and conventional grazing on five farms in four municipalities of the department of Caldas. In each batch were taken soil samples to determine pH, organic matter content, phosphorus, calcium, magnesium, potassium, aluminum, bulk density, particle density and total soil porosity; each sampling site was georeferenced and delimited for measuring areas, such information were made interpolations to build maps of fertility and physical properties. Soil areas in the study showed high variability of phosphorus, caused by the low mobility that has the floor and reaction with low pH presented. Soil bases (Ca, Mg and K) appear unbalanced on the farms studied, generating unfavorable ion ratios that cause deficiencies and excesses. The silvopastoral system Montelindo presented a satisfactory porosity, indicating the benefit of this type of system on the ground, this result is due to the time of establishment of the system, which in this farm is more than five years; the apparent higher density and low total soil porosity in farms reveal compaction problems. Little variations were observed between Silvopastoral batches and conventional grazing for soil chemical and physical variables, indicating that the short time of establishment of silvopastoral systems is not enough to cause significant effects. These soils require interventions to improve fertility for optimum use of the silvopastoral systems, which are an alternative to produce multiple benefits for the environment.

KEY WORDS: Soil quality, silvopastoral system, interpolation

INTRODUCCIÓN

La producción agrícola moderna, se debe orientar a mejorar la sostenibilidad y la competitividad, reduciendo el riesgo de degradación ambiental y mejorando su rentabilidad. Por esto, el desarrollo y la aplicación de nuevas tecnologías, como los sistemas de posicionamiento global (GNSS), de información geográfica (SIG) y técnicas geoestadísticas, permiten identificar el comportamiento espacial de los suelos, con el fin de optimizar el uso de los diferentes recursos agrícolas y maximizar la producción de cultivos, vitales para la sostenibilidad agrícola y ambiental. Estas tecnologías permiten valorar y entender el comportamiento espacial y las diferentes relaciones entre las variables del suelo, la productividad de las plantas, así como de plagas y de enfermedades, comportamiento que ocurre a diferentes escalas, como resultado de procesos dinámicos del clima y las labores agrícolas (Molin *et al.* 2008; Castrignano *et al.* 2002; citados por Garzón *et al.*, 2010).

Como consecuencia de las actividades agrícolas y ganaderas vastas áreas de tierra han sido degradadas, algunas en forma irreversible, por un amplio rango de procesos, entre los cuales se destacan: erosión acelerada, desertización, compactación y endurecimiento, acidificación, salinización y/o sodificación, disminución en el contenido de materia orgánica, pérdida de diversidad y caída de la fertilidad del suelo.

La erosión es probablemente el tipo de degradación más común en el mundo. La magnitud de este fenómeno es alta, particularmente en Asia, África y Suramérica con promedios entre 30 a 40 toneladas de suelo ha⁻¹año⁻¹. Las cifras anteriores se pueden comparar con valores promedios de los procesos de formación del suelo que acercan a una tonelada ha⁻¹año⁻¹ (FAO 1996).

En Colombia los procesos erosivos con mayor incidencia están asociados a la erosión hídrica superficial que viene afectando un 79% equivalente a 90'392.661 ha del territorio nacional, seguidos en menor proporción por la remoción en masa cuyo porcentaje llega a un 14,9 % equivalente a 16'533.355 ha (IDEAM, citado por MADR, 2001), El fenómeno erosivo es causado principalmente por la alta presión de pastoreo, por el sobrepastoreo y desarrollo de la ganadería en terrenos no aptos (Mahecha *et al.*, 2002). En la mayoría de fincas o predios ganaderos se evidencia erosión en terracetos tipo pata de vaca.

En el caso de los potreros, la compactación resultante del tránsito de los animales afecta en forma negativa el flujo del agua a través del perfil y la estabilidad estructural, procesos que causan erosión superficial y remociones masales (Rivera, 2003), causa también disminución en la capacidad de retención de humedad; estos, entre otros factores, ocasionan un bajo rendimiento en la producción de forrajes. La ganadería también ha contribuido a la disminución de caudales y al deterioro de la calidad de las aguas en las cuencas donde se desarrolla la actividad, debido en gran parte a la baja capacidad de planificación y de ordenamiento territorial (Mahecha *et al.*, 2002).

En cuanto al reciclaje de nutrientes se refiere, es evidente la transferencia de nutrientes de origen vegetal, la mayor parte de estos nutrientes se retornan en forma excretas, las que contienen los nutrientes necesarios para las plantas y en las proporciones deseadas aproximadamente; estos aportes pueden modificar el contenido del humus, indudablemente en suelos pobres en humus estable, el incremento será positivo, pero en suelos con humus elevado dará lugar a problemas de fertilidad y de contaminación.

La ganadería juega un papel clave en la salud futura del planeta. Esta actividad usa 3.4 billones de has en praderas, representada en cerca de una cuarta parte de tierras cultivables. En total, la ganadería hace uso de más de dos terceras partes de la superficie mundial bajo agricultura y una tercera parte del total del área global. La ganadería también puede jugar un papel importante en el mantenimiento de la fertilidad del suelo. En particular los sistemas cerrados de granjas mixtas pueden renovar o reponer una fracción sustancial de los nutrientes del suelo, y por consiguiente reducir la necesidad de aplicar fertilizantes inorgánicos. Es difícil estimar los beneficios económicos del mejoramiento de la estructura del suelo como un resultado de la adición de materia orgánica. Sin embargo, a nivel general se puede afirmar que la adición de fertilizantes orgánicos incrementa la capacidad de intercambio catiónico y mejora las condiciones físicas por el incremento de la capacidad de retención de agua y por ende la estabilidad estructural, entre otros (Sadeghian, 2003).

Considerando la relevancia de las propiedades químicas y físicas del suelo en la producción de cultivos, se propuso esta investigación, con el objetivo de evaluar la variabilidad de algunas de estas propiedades y la relación existente en éstas, en dos sistemas productivos ganaderos, silvopastoril y convencional, mediante técnicas de estadística univariada e interpolaciones de las variables para representar visualmente los resultados.

1. ÁREA PROBLEMÁTICA

En la región andina colombiana las actividades ganaderas ocupan todo tipo de terrenos y predios de tamaños que varían desde 1 o 2 ha hasta más de 500 ha, estas actividades son realizadas por empresarios agropecuarios de sistemas mixtos o exclusivamente ganaderos, pero también por campesinos, indígenas y colonos. Los sistemas de producción ganadera tienden a ser de lechería en las zonas de altiplanos y altitudes entre 2000 y 3000 msnm; de doble propósito (carne y leche) en los climas medios (1000 a 2000 msnm) y páramos (>3500 msnm); de cría para carne en las zonas más bajas (500 a 1000 msnm) y hay sistemas menores para engorde (ceba), búfalos, ganado de lidia, ovinos y caprinos (Murgueitio, 2002). El término ganadería bovina incluye una variedad de sistemas productivos manejados por distintos grupos sociales, situados en distintos biomas terrestres y por lo tanto enmarcados en diferentes regímenes climáticos, tipos de suelos y formaciones vegetales (Murgueitio y Calle, 1998). Se practica también muchas veces en sitios inapropiados lo que promueve la degradación ambiental.

La ganadería bovina ocupa la mayor parte de las tierras explotadas de Colombia y desarrolla actividades, como la tala y la quema de bosques, la uniformidad genética al privilegiarse el monocultivo de gramíneas, la desecación de humedales, la construcción de vías de penetración, la demanda creciente de madera para construcciones, la deposición de residuos orgánicos e inorgánicos en el agua y en el suelo, la emisión de gases, la compactación del suelo, la pérdida de suelo y nutrientes por erosión superficial y/o remociones en masa, entre otros aspectos, que generan impactos de especial consideración sobre los recursos naturales y el medio ambiente, lo que puede conllevar a desequilibrios naturales de considerable importancia (Mahecha, 2000).

Los sistemas silvopastoriles se presentan como solución a los grandes problemas generados por la ganadería convencional y la implantación de estos pueden traer beneficios y mitigar la fuerte degradación que sufre el suelo con este tipo de explotación.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar el efecto sobre las propiedades físicas y químicas del suelo de dos sistemas de producción ganadera por medio de herramientas SIG.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar las pérdidas de nutrientes almacenados en el suelo bajo dos sistemas de producción ganadera
- Analizar las variaciones presentadas por la compactación
- Crear mapas de variabilidad de propiedades físicas y químicas más relevantes

3. JUSTIFICACIÓN

El silvopastoreo es un tipo de agroforestería, considerada como una opción de producción pecuaria en donde las leñosas perennes (árboles y/o arbustos) interactúan con los componentes tradicionales (forrajeras herbáceas y animales) bajo un sistema de manejo integral (Pezo y Ibrahim, 1998). Los árboles pueden ser de vegetación natural o plantada con fines maderables, para productos industriales, como frutales o como árboles multipropósito en apoyo específico para la producción animal. Estos sistemas presentan alta aceptación comercial, investigativa y de desarrollo agropecuario, integran el uso de pasturas, árboles y animales con diferentes objetivos y estrategias de producción, contrarrestan los impactos negativos generados sobre el medio ambiente, entre otros aspectos; en ellos es importante tener en cuenta las especies vegetales presentes, el sistema de producción y los objetivos y/o productos buscados con su implementación, ya que de esto depende la sostenibilidad de las interacciones establecidas.

La cobertura vegetal desempeña un papel importante en la regulación del ciclo hidrológico. Bajo condiciones de precipitación, la interceptación de la lluvia por las copas de los árboles reduce la cantidad de agua que cae al suelo (Ibrahim *et al.*, 2001). Asimismo, la presencia de árboles afecta la dinámica del agua de varias formas: i) actuando como barrera que reduce la escorrentía; ii) como cobertura, reduciendo el impacto de las gotas, y iii) como mejoradora del suelo, incrementando la infiltración y la retención de agua (Young 1997; citado por Ríos *et al.*, 2006). La incorporación de leñosas perennes (árboles y arbustos) en los sistemas ganaderos tradicionales tiene los siguientes beneficios: reciclaje de nutrientes, fijación de N, profundidad de las raíces, acción de micro y macro fauna y control de erosión.

El análisis de la fertilidad del suelo en diferentes sistemas y condiciones de producción ganadera por medio de herramientas SIG indicará el correcto uso del suelo para la producción ganadera y podrá facilitarnos de una manera visual la apreciación de las características presentes en estos.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Efectos de la Ganadería

Existen serias y claras evidencias de los graves efectos de la ganadería convencional o tradicional sobre el calentamiento de la tierra o cambio climático global, la pérdida de biodiversidad, el deterioro de las fuentes de agua y de los suelos. La ganadería tradicional tiene mucho que ver con el calentamiento de la tierra, porque emite gases de efecto invernadero (metano, dióxido de carbono y óxido nitroso), que son los causantes del cambio climático global y del calentamiento de la tierra.

La ganadería afecta la biodiversidad, cuando se sobre pastorea, contaminando los potreros y el ambiente, cuando se talan bosques o árboles para establecer pasturas, se transforman los hábitats y ecosistemas naturales por ganadería, se introducen especies vegetales o animales traídas de otros ecosistemas, presentando problemas de adaptación o volviéndose agresivas, afectando las especies nativas.

Los suelos tardan milenios de años para formarse, pero se deterioran en pocos años, aún en meses y días por su mal manejo. Uno de los efectos más negativos sobre el suelo es el pastoreo y mucho más el sobre pastoreo, puesto que ocasionan: compactación, que es la pérdida de la forma del suelo, debido al peso de los animales y a sus pezuñas, lo que contribuye a la destrucción de la capa vegetal o superficial del suelo y al aumento de la presión sobre la tierra, produciendo endurecimiento; Terracetas o Pata de Vaca, que es la formación de caminos en zigzag o surcos, especialmente en suelos pendientes, cuya profundidad y tamaño aumenta con las lluvias y el sobrepastoreo. A la vez causan erosión, que consiste en pérdida de suelo, en especial cuando se encuentra sin vegetación (suelo desnudo) y cuando los suelos son pendientes (Libreros, 2015).

4.2 Sistemas silvopastoriles

Según la Fundación Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV) los “sistemas silvopastoriles son una modalidad de agroforestería pecuaria, que asocia los árboles y arbustos con pastos de pastoreo o pastos de corte”(Calle *et al.*, 2002). Para el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), “un sistema silvopastoril es una opción de producción pecuaria que involucra la presencia de las leñosas perennes (árboles o arbustos), e interactúa con los componentes tradicionales (forrajeras herbáceas o pastos), todos ellos bajo un sistema de manejo integral” (Pezo & Ibrahim, 1997).

De acuerdo con estas definiciones, para que se puedan dar los sistemas silvopastoriles es necesario que existan árboles y/o arbustos. Sin éstos presentes, sería imposible desarrollar cualquier sistema. Lo que debemos tener claro es que

no resulta necesario que estos árboles o arbustos sean forrajeros o consumidos por los animales, pues también, pueden ser maderables, frutales, ornamentales, productores de leña, semillas y sombrío. Los sistemas silvopastoriles cumplen algunas funciones de los bosques naturales porque poseen vegetación permanente (árboles y arbustos) con raíces profundas y un dosel denso (copa); por lo que constituyen una alternativa real al tipo de ganadería que predomina en Colombia, pues inicialmente la gran mayoría del territorio colombiano, estuvo cubierto de bosques, lo que se demuestra al observar la tendencia que tienen los pastizales a formar rastrojos y posteriormente bosques secundarios, en un proceso denominado “regeneración natural”.

Simón (1996), argumenta que la sostenibilidad de los sistemas silvopastoriles puede fundamentarse en la capacidad que tienen los árboles para producir biomasa con altos niveles de proteína, así como en sus posibilidades de aprovechar la energía solar y los recursos naturales y aminorar la dependencia de los fertilizantes químicos y otros insumos. Hasta el momento, los sistemas más estudiados y en los que existen mayor número de reportes han sido los sistemas asociados con árboles y/o arbustos leguminosos, en donde se da un mayor número de interacciones entre los componentes.

Entre las especies arbustivas investigadas en Colombia, consideradas como potenciales por su alto valor nutritivo o servicios multipropósito dentro de los sistemas silvopastoriles, se encuentran las acacias (*Acacia sp.*), el Nacadero (*Trichantera gigantea*), el Poró (*Erythrina poeppigiana*), La Leucaena (*Leucaena leucocephala*), El Algarrobo (*Prosopis juliflora*), el Chachafruto (*Eythrina edulis*), el Pízamo (*Erythrina fusca*), el Guacimo (*Guazuma ulmifolia*), el Matarratón (*Gliricidia sepium*), el orejero (*Enterolobium cyclocarpum*), el Flor amarillo (*Cassia spectabilis*) y Botón de oro (*Tithonia diversifolia*).

En este trabajo se dieron dos especies asociadas a los sistemas silvopastoriles las cuales son:

4.2.1 Leucaena (*Leucaena leucocephala*)

Es un árbol de copa ligeramente abierta y rala, con muchas ramas finas cuando crece aislado. Alcanza alturas diferentes según la variedad, es posible encontrar arboles desde 5 hasta 20 m de altura, con diámetros entre 15 y 40 cm. Es una especie de crecimiento rápido.

Es originaria de América tropical, desde el sur de México hasta Nicaragua. Ha sido introducida desde los Estados Unidos hasta América del sur. La Leucaena se adapta bien a las tierras bajas casi desde el nivel del mar hasta los 800 a 900 metros sobre el nivel del mar y a sitios con 600 a 2300 mm anuales. Tolerancia un amplio rango de suelos, desde rocosos hasta arcillosos, No crece bien en suelos ácidos, ni muy pesados, inundados o sobrepastoreados.

La *Leucaena* es un árbol leguminoso del trópico de alto valor nutricional, rápida recuperación después del ramoneo, fija nitrógeno y tolera períodos de sequía prolongados.

Existen varias especies de *Leucaena* y muchas procedencias diferentes para varios usos, pero no todas se adaptan a sistemas silvopastoriles intensivos. Se deben utilizar cultivares y accesiones comprobadas como forrajeras, porque es una planta multipropósito (leña, madera, abono verde) con gran variabilidad genética y no todas las procedencias son buenas forrajeras. Las procedencias nativas o locales se caracterizan por ser muy leñosas, con baja producción de follaje, baja palatabilidad, se defolian en la época seca y tienen alta concentración de metabolitos secundarios (Mimosina). Se recomienda la *Leucaena leucocephala* tipo Cunningham generada por cruce de los tipos Perú (arbustiva) con tipo Salvador (arbórea). Esta *Leucaena* tiene alta capacidad de rebrote después del ramoneo, responde muy bien a las podas severas, sus tallos son flexibles lo que disminuye el desgarre de las ramas, tiene buena palatabilidad y contiene baja concentración de mimosina (Uribe *et al.*, 2011).

4.2.2 Botón de oro (*Tithonia diversifolia*).

Según Pérez *et al.*, (2009) es una planta herbácea o arbustiva robusta, perteneciente al Reino Plantae, Subreino Traqueobionta (plantas vasculares), División Magnoliophyta (plantas con flor), Clase Magnoliopsida (dicotiledóneas), Subclase Asteridae, Orden Asterales, familia Asterácea y género *Tithonia* (Olabode *et al.*, 2007; Medina *et al.*, 2009; Fasuyi *et al.*, 2010 citados por (González, Hahn, & Narváez, 2014)), originaria de México y Centro América desde donde se ha distribuido a: India, Ceilán, Cuba (Roig y Mesa, 1974; Inayat y Gordon, 2009 citados por (González *et al.*, 2014)); Venezuela, Colombia (Murgueitio *et al.*, 2002; Medina *et al.*, 2009 citados por (González *et al.*, 2014)); África, Filipinas (Agboola *et al.*, 2006; Sao *et al.*, 2010 citados por (González *et al.*, 2014)); Asia (Wang *et al.*, 2004 citados por (González *et al.*, 2014)); Estados Unidos, las islas del pacífico y Australia.

Alcanza alturas hasta de cinco metros; se reconoce fácilmente por sus grandes flores amarillas con fuerte olor a miel y por sus hojas simples y alternas, con tres a cinco lóbulos, el central más grande que los otros.

Aunque en algunas regiones se considera una planta invasora, en otras es un recurso muy apreciado. En Tailandia, por ejemplo, se celebra un festival durante su floración en noviembre. Esta planta es común en áreas perturbadas como bordes de ríos, caminos y carreteras. En Colombia, crece en diferentes tipos de suelo, desde el nivel del mar hasta 2.500 metros de elevación y en sitios con precipitaciones que fluctúan entre 800 y 5.000mm. El botón de oro tiene un gran valor ecológico como fuente de néctar y otros recursos para la fauna silvestre. Es

una planta melífera valorada por los apicultores porque florece abundantemente durante todo el año.

Se propaga fácilmente a partir de estacas de 30 a 50 centímetros de longitud cosechadas del tercio inferior o intermedio de los tallos. En Colombia, muy rara vez se propaga a partir de semillas y no es fácil obtenerla sexual viable. En cierta medida, esta circunstancia es favorable porque impide el comportamiento invasor de la planta. Por otra parte, el botón de oro se adapta bien a suelos ácidos y de baja fertilidad, tiene rápido crecimiento y su cultivo requiere una mínima cantidad de insumos y manejo.

El uso de esta planta como recurso para la alimentación animal es cada vez más generalizado debido a su buen valor nutricional, su rusticidad y a la elevada tasa de producción de biomasa (Calle y Murgueitio 2008). Produce gran cantidad de forraje y rápida recuperación luego del ramoneo, puede asociarse con pastos y leguminosas rastreras de trópico bajo, medio y alto (Uribe *et al.*, 2011).

4.3 Beneficios de los sistemas silvopastoriles

Según Libreros (2015) los sistemas silvopastoriles contribuyen a: reducir los problemas ambientales; mejorar el bienestar de los animales; incrementar la productividad animal y por área y además generan servicios ambientales. Los principales beneficios ambientales y productivos de estos sistemas, son:

- Captura y almacenamiento de carbono: ya que aumentan los depósitos de carbono a través de la materia orgánica de los suelos y el almacenamiento que se hace en tronco, ramas y raíces de la vegetación asociada.
- Conservación de la biodiversidad: Pues ayudan a conservar diversidad de plantas y animales y contribuyen a la supervivencia de diferentes especies de la flora nativa, facilitando la regeneración de algunas plantas pertenecientes al bosque nativo.
- Regulación hídrica y conservación de fuentes de agua: Los árboles aumentan la capacidad de retención, infiltración, circulación y almacenamiento de agua en el suelo; atenúan o reducen la fuerza de la lluvia que cae, protegiendo contra la erosión y conservando manantiales, ríos y quebradas; disminuyendo el daño causado por las inundaciones, favorecen la regulación de caudales y reducen la evaporación directa.
- Prevención de derrumbes, erosión, compactación y formación de cárcavas (calvas): Tanto los árboles, como los pastos de cobertura, forman una malla de raíces a diferentes profundidades y amplitud, lo que hace que se retenga el suelo y se produzca un efecto protector efectivo contra derrumbes, erosión, compactación y cárcavas de los suelos, especialmente durante aguaceros torrenciales, sequías

intensas y sobrepastoreo.

- Mejoramiento de la productividad del suelo: Puesto que la mayoría de los árboles, poseen un sistema radicular bien desarrollado, extraen agua y nutrientes desde las profundidades del suelo y los depositan sobre la superficie, dando como resultado un mejor reciclaje de nutrientes y una mayor productividad del suelo.
- Mejoramiento de la productividad de animales y fincas: Debido a la alta densidad de árboles y arbustos forrajeros que se acostumbra establecer, a la mayor producción y calidad del pasto asociado y al efecto del sombrío, hace que se produzca más cantidad y calidad de biomasa comestible para los animales y se mejore la temperatura ambiente (entre 3° C y hasta 10° C), reduciendo el estrés calórico, mejorando el bienestar de los animales y del ecosistema del rumen e incrementando la producción de leche, carne y crías de los animales y de la finca.
- Refugio de entomofauna benéfica y fauna silvestre: Los árboles, arbustos y otras especies vegetales que se asocian, proporcionan alimento y refugio a gran cantidad de aves e insectos.

4.4 Variabilidad espacial del suelo

La variabilidad de las propiedades del suelo es una condición inherente al mismo, debido a que en su formación intervienen varios procesos diferentes que, a su vez, están controlados por los factores de formación (clima, material parental, organismos, relieve y tiempo). Estas interacciones pueden ser muy variadas dando como consecuencia una alta cantidad de suelos posibles (Jaramillo, 2012b).

La variabilidad depende de la propiedad que se analice, siendo más variables las propiedades químicas que las físicas. Además, hay menor variabilidad en las propiedades del suelo, en su condición natural, que cuando es sometido a uso agropecuario, y aquellas propiedades que más se pueden ver afectadas por el manejo del suelo son las que presentan la mayor variabilidad (Ovalles, 1992; Paz-González *et al.*, 2000; Obando *et al.*; Jaramillo *et al.*, 2012; citados por (Jaramillo, 2012b)).

El uso histórico del suelo tiene grandes efectos sobre la variabilidad de sus propiedades. Diferencias en el manejo del agua, de los fertilizantes y de los abonos orgánicos, tanto en el tipo como en la forma de aplicarlos, generan diferencias en la variabilidad de los contenidos de nutrientes en el suelo. Los cambios en el laboreo también producen efectos similares (Cambardella *et al.*, 1994; Cambardella y Karlen, 1999; Amador *et al.*, 2000; Castrignano *et al.*, 2000; Paz-González *et al.*, 2000; Mallarino *et al.*, 2001; Jaramillo, 2008; Jaramillo *et al.*, 2008; citados por (Jaramillo, 2012b)).

La variabilidad de cualquier propiedad edáfica presenta dos componentes fundamentales: uno aleatorio y otro sistemático. Cuando la variabilidad no puede relacionarse con causas conocidas, se define como variabilidad aleatoria o debida al azar. La variabilidad sistemática es aquella que puede ser atribuida a causas conocidas, entendibles y predecibles (Edmonds, 1991 citados por Jaramillo, 2006).

La variabilidad espacial se caracteriza porque las propiedades que la presentan adquieren valores diferentes dependiendo de la ubicación y/o del espaciamiento entre las muestras utilizadas para caracterizarlas, es decir, que el valor que toma la variable en un sitio depende de la distancia y/o de la dirección a la cual se ubica de otro sitio vecino (Jaramillo, 2006).

Una de las utilidades más importantes que poseen los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es el análisis espacial, en particular el uso de las interpolaciones de diferentes tipos de variables. En el campo agrícola, el uso de esta herramienta permite analizar la variabilidad de diferentes características sobre el paisaje tales como suelo (Clay *et al.*, 2007; citado por (Henríquez, Méndez, & Masís, 2013)), enfermedades y plagas entre otras, lo cual sin duda ayuda a cuantificar el impacto de esta variación sobre la producción y las posibles pautas de manejo requeridas para optimizar los rendimientos (Bertsch *et al.* 2002, Henríquez *et al.* 2005, Peterson *et al.* 1995; citados por Henríquez *et al.*, 2013).

La caracterización de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo ayuda a entender las relaciones complejas que pueden presentarse entre ellas mismas, así como entre ellas y el ambiente en que se desarrolla el suelo, lo que ayuda a definir las prácticas de manejo más adecuadas, tanto para el suelo, como para el cultivo (Goovaerts, 1998, 1999; citado por (Jaramillo, 2012a)). Las herramientas geoestadísticas, y sobre todo los métodos de interpolación no sesgados (kriging), permiten elaborar mapas que ayudan a entender la variabilidad espacial de las propiedades del suelo en un área determinada (Silva *et al.*, 2011; citado por (Jaramillo, 2012a))

De acuerdo con (Trangmar *et al.*, 1986), en el análisis de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, la estadística clásica es inadecuada para la interpolación de variables, ya que asume variación aleatoria y no tiene en cuenta la correlación espacial y relativa de los lugares muestreados.

De acuerdo con lo anterior la geoestadística, constituye una herramienta útil en el estudio de la variabilidad espacial, puesto que brinda herramientas para caracterizarla y cuantificarla, estimando atributos en sitios no muestreados.

La geoestadística se basa en la teoría de las “variables regionalizadas”, que son funciones que describen un fenómeno natural geográficamente distribuido, se encuentran en el espacio y muestran cierta estructura. El análisis estructural de una variable regionalizada se realiza mediante la función de semivarianza, que describe la dependencia espacial de una función aleatoria.

Con el fin de coleccionar, organizar, manipular, transformar, analizar y generar información se debe llevar a cabo la georreferenciación con equipos GPS que indiquen las coordenadas geográficas de los puntos de muestreo. Con la realización de los muestreos de suelos y sus consecuentes análisis y la utilización de tecnologías como los SIG, se podrán obtener mapas de fertilidad, de rendimientos entre otros.

Un mapa de fertilidad de suelos es la representación gráfica en el plano cartesiano, de áreas estudiadas, indicando la distribución espacial de las características químicas del suelo, para catalogar o calificar dichas áreas en el mapa, con niveles de fertilidad alta, media y baja, dependiendo del contenido de los nutrientes presentes en el suelo (Bregt *et al.*, 1991).

Estos métodos geoestadísticos se basan en modelos estadísticos que incluyen auto correlación (la relación estadística entre los puntos medidos). Debido a esto, técnicas geoestadísticas no sólo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción, pero también proporcionan alguna medida de la certeza o la exactitud de las predicciones.

Entre los métodos más utilizados para llevar a cabo la interpolación de variables está la Ponderación del Inverso de la Distancia (IDW por sus siglas en Inglés), método matemático que utiliza un algoritmo basado en las distancias de los puntos. Por otro lado, Kriging es un método geoestadístico que cuantifica la estructura espacial de los datos y su autocorrelación, mediante variogramas para realizar las predicciones correspondientes (Villatoro *et al.*, 2008).

4.5 Indicadores de deterioro del suelo

La Sociedad Americana de la ciencia del suelo define la calidad del suelo como la capacidad funcional de un tipo específico de suelo, para sustentar la productividad animal o vegetal, mantener o mejorar la calidad del agua y el aire, y sostener el asentamiento y salud humana, con límites ecosistémicos naturales o determinados por el manejo (Karlen *et al.*, 1997). Se entiende como un atributo que se infiere de sus características y observaciones indirectas como los son la compactación, la erodabilidad, la fertilidad, entre otras (Pankhurst *et al.*, 1997). Brejda & Moorman, (2001) determinaron que las funciones específicas representadas por la calidad del suelo son: Captar, mantener y liberar nutrientes y otros compuestos químicos; Captar, mantener y liberar agua a las plantas y recargar las napas subterráneas; Mantener un hábitat edáfico adecuado para la actividad biológica del suelo.

Los parámetros que se manejan para llegar a determinar la calidad del suelo son físicos, químicos y biológicos; entre las propuestas para evaluar dicha calidad se encuentra la metodología propuesta por Lal (1994) por medio de la cual se puede clasificar la calidad del suelo y conocer sus potencialidades y limitantes. En general

los factores que afectan la calidad del suelo son las propiedades genéticas del suelo y la interacción con los factores externos, tales como el clima y el ámbito social del entorno del sistema productivo donde el nivel cultural del agricultor, las técnicas empleadas en las prácticas culturales, pueden intervenir de forma positiva o negativa en el sistema productivo.

El conocimiento de la calidad actual del suelo nos da una visión de las potencialidades del suelo para planificaciones futuras de explotación agrícola y el manejo más adecuado del suelo para los sistemas actuales.

Para el departamento de Caldas se tienen los estudios realizados por Obando y Matta (2005) donde desarrollaron indicadores de calidad del suelo en sistemas de producción de hortalizas con manejo continuado de labranza intensiva, utilizaron un modelo aditivo con 10 indicadores físicos, químicos y biológicos y un Índice de Riesgo de Erosión (IRE) como modelo factorial que evalúa tres factores que controlan el proceso de erosión hídrica, el potencial de escorrentía, la agresividad de las lluvias y la pendiente del terreno; encontraron diferencias significativas en estabilidad estructural, carbono orgánico, porosidad total, densidad aparente y capacidad de intercambio Catiónico.

Asimismo Obando & Montes (2007) evaluaron 26 variables físicas, químicas y biológicas en condiciones de bosque y cultivo de mora en seis localidades del departamento de Caldas, en los municipios de Villamaría, Aranzazu, Neira, Salamina, Aguadas y Pacora; utilizaron un análisis estadístico factorial de componentes principales y sugieren como indicadores de la calidad dinámica la estabilidad de los agregados al agua, las familias de artrópodos y el contenido de Calcio y Manganeso; también desarrollaron un índice acumulativo de calidad del suelo (IACS) de nueve variables indicadoras de calidad del suelo, previamente evaluadas mediante calificación en un rango de valores de 1 a 5, desde el menos deseable al más deseable, en relación a los procesos del suelo y su capacidad para ejecutar funciones ecosistémicas, los autores encontraron diferencias significativas de IACS en los sistemas de bosque y cultivo de mora y una pérdida significativa en la estabilidad estructural del suelo en sistemas de manejo intensivo del suelo. También reportan funciones de edafotransferencia con ajustes significativos entre saturación de bases y familias de artrópodos, saturación de bases y pH, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico, aluminio y materia orgánica, y densidad aparente y humedad disponible.

4.6 Indicadores de calidad y fertilidad del suelo

La calidad debe interpretarse como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo (Carter *et al.*, 1997; citado por Bautista *et al.*, 2004). Power & Myers (1989), citados por Doran y Parkin, (1994); definen calidad como: “La capacidad del suelo para apoyar el crecimiento de cultivos, que incluye factores tales como el grado de estabilidad, la agregación, contenido de materia orgánica, la

profundidad del suelo, capacidad de retención de agua, la tasa de infiltración, cambios de pH, capacidad de nutriente". Según Larson y Pierce (1991), citados por Doran y Parkin, (1994); es la capacidad de un suelo para funcionar con los límites de los ecosistemas y de interactuar positivamente con el entorno externo a ese ecosistema. En pocas palabras, aptitud para su uso (Pierce & Larson, 1993; citados por Doran & Parkin, 1994). Doran y Parkin (1994) definen calidad como: "la capacidad de un suelo para funcionar dentro de los límites del ecosistema y el uso de la tierra, para sostener la productividad, mantener la calidad del medio ambiente, y promover la salud de las plantas y de los animales"; siendo este el concepto más utilizado para definir el término calidad de suelo. Así mismo ha sido relacionado con la capacidad del suelo para funcionar. Incluye atributos como fertilidad, productividad potencial, sostenibilidad y calidad ambiental. Simultáneamente, calidad del suelo es un instrumento que sirve para comprender la utilidad y salud de este recurso (Bautista *et al.*, 2004).

Los indicadores de calidad del suelo son variables que sirven para evaluar la condición del suelo, pues representan dicha condición y conllevan información acerca de los cambios o tendencias de esta (Dumanski *et al.*, 1998; citado por Bautista *et al.*, 2004). Los indicadores pueden ser propiedades físicas, químicas y biológicas, o procesos que ocurren en él; deben ser seleccionados de acuerdo con las funciones del suelo de interés (Nortcliff, 2002), y los valores umbral se deben identificar con base en las condiciones locales para generar un índice de la calidad significativa.

La fertilidad del suelo es un concepto amplio que no necesariamente significa lo mismo para todas las personas. La versión más moderna incluye tres tipos de fertilidad, la química, la física y la biológica. Un enfoque adecuado del diagnóstico involucra los tres tipos aunque por lo general se privilegia el primero (Etchevers y Padilla, 2007).

Bajo condiciones de campo el crecimiento y desarrollo de las plantas es el producto de la interacción e interdependencia de todos los factores del medio ambiente, los cuales son clima, ambiente edáfico (suelo) y planta (potencial genético).

La presencia por si sola de los elementos nutritivos requeridos por las plantas no da buena cuenta de la fertilidad del mismo ya que además de estar presentes los elementos en el suelo estos deben estar disponibles para la planta y esa disponibilidad está regulada por propiedades físicas del suelo como aireación, disponibilidad de agua, facilidad de la penetración de raíces y temperatura. También la disponibilidad de los elementos en el suelo va a estar regido por la biología del suelo lo cual es válido específicamente para los ciclos del carbón, nitrógeno y azufre los cuales dependen ampliamente de la actividad biológica en el suelo. La mineralogía del suelo y el grado de humificación regulan en buena medida la capacidad de intercambio catiónico (CIC) contribuyendo de manera significativa a la fertilidad de los mismos. En este orden de ideas se han realizado estudios en la

zona andina colombiana para evaluar el deterioro de la calidad de la fertilidad de los suelos influenciadas por el uso del suelo y la cobertura, así Gomez y Alarcón, (1975) encontraron que en suelos bajo producción de café sin cobertura vegetal se puede perder un cmol/kg (400kg/Ha) de calcio al año comparado con café establecido con coberturas nobles donde la pérdida fue inferior.

Las pérdidas de nutrientes en suelos se deben básicamente a fenómenos como lixiviación, escorrentía, volatilización y erosión

La degradación del suelo implica el cambio en una o más de sus propiedades a un estado que es peor que el original, como resultado de los procesos físicos, químicos y/o biológicos. En términos generales, la degradación del suelo provoca alteraciones en la fertilidad y la capacidad del suelo para sostener la actividad agrícola productiva (El-Swaify & Dangler, 1982 citados por Romero et al., 2012).

4.7 Efectos positivos de la incorporación de silvopastoriles sobre el suelo

La incorporación de leñosas perennes (árboles y arbustos) en los sistemas ganaderos tradicionales tiene los siguientes beneficios:

Reciclaje de nutrientes: El manejo de gramíneas acompañado con árboles y/o arbustos, permite que una fracción representativa de los nutrientes que son extraídos de la solución edáfica sea retornada a ella mediante la deposición, en la superficie del suelo, del follaje y residuos de pastoreo o podas. Esta mayor deposición de materia orgánica, contribuye a modificar las características físicas del suelo como su estructura (Sadeghian *et al.*, 1994).

Fijación de N: Las leguminosas se asocian con bacterias del género *Rhizobium* para captar nitrógeno atmosférico haciéndolo disponible para las gramíneas en el suelo. En promedio se estima una fijación de 200 kg N/ha/año en el trópico (Giraldo, 2000).

Profundidad de las raíces: El sistema radicular extendido y profundo de los árboles, aumenta el área disponible para captar agua y nutrientes (Gutiérrez, (1995) citado por Sadeghian et al., (1994)).

Acción de micro y macro fauna: La mayor presencia de materia orgánica en el suelo y el microclima (humedad y temperatura) creado por la presencia de árboles, favorece la actividad biológica de la micro y macro fauna, lo cual resulta en una mayor mineralización y disponibilidad de N en el suelo (Belsky *et al.*, 1993). Además, la materia orgánica que es incorporada paulatinamente al suelo por la acción de la endofauna, contribuye a mejorar la estabilidad del suelo y la capacidad de infiltración de agua.

Control de erosión: Los árboles en sistemas silvopastoriles cumplen funciones

ecológicas de protección del suelo disminuyendo los efectos directos del sol, el agua y el viento (Fassbender, 1993). Gómez y Velásquez (1999) citados por Mahecha, (2002), demostraron que en suelos descubiertos o con monocultivos de gramíneas, la pérdida de suelo es mayor que en los bosques. El control de la erosión hídrica por parte de los árboles se debe a varios efectos: Reducción del impacto de la lluvia sobre el suelo, aumento de la infiltración, permanencia de materia orgánica sobre la superficie del suelo y efecto agregado de las partículas del suelo (Carvalho et al., 1994).

4.8 ANTECEDENTES

Lal, (1996), determinó los efectos de la deforestación, la labranza de "post desmonte" y sistemas de cultivos sobre las propiedades del suelo, durante 1978 a 1987 en sur oeste Nigeriano. Los resultados mostraron que la deforestación y los cambios en el uso del suelo causan cambios drásticos en las propiedades físicas e hidrológicas del suelo, los cuales habían sido extremadamente favorables bajo el sistema boscoso antes de la tala. La densidad aparente y la resistencia a la penetración como indicadores de la compactación se incrementaron significativamente y con ello la infiltración se vio reducida debido al pisoteo del ganado (3 cabezas por hectárea).

Pinzon y Amézquita (1991) midieron los cambios de las propiedades del suelo, como resultado de su compactación por el pisoteo de animales en pasturas del piedemonte de Caquetá (Colombia). Los resultados de esta investigación revelaron que los animales en pastoreo modifican substancialmente las propiedades físicas de los suelos del piedemonte amazónico. Sin embargo la intensidad de estos cambios depende de la zona y la especie cultivada, siendo más drástico en suelos con guaduilla (*Homolepis aturensis*) que pasturas de *B. decumbens* y más en áreas de lomerío (altura pequeña en el terreno) y de terrazas que en las vegas. La compactación fue mayor en los primeros 15 cm, ocasionando una severa disminución en la porosidad y cambios desfavorables en la relación suelo-agua-aire que afectan el desarrollo de las raíces de las plantas y su productividad. Con relación a la estructura, se encontró una pérdida de esta característica por pisoteo.

Sánchez, *et al.*, (1989) citados por Sadeghian *et al.*, (1994) evaluaron diferentes niveles de pisoteo (0; 3.3; 6.6 y 8.3 animales/ha/año) sobre las características del suelo. En este experimento ellos utilizaron rotaciones de 3 potreros, para un tiempo total de 42 días (14 días/potrero), con animales de 2 años de edad, pardo suizo X cebú, cuyo peso inicial era de 180 kg. Los resultados mostraron que la densidad aparente, como indicador de la compactación mostró valores más bajos a medida en que se disminuía el número de animales. El pisoteo redujo la porosidad total, teniendo mayores efectos sobre la macroporosidad. La biomasa de lombrices mostró una correlación negativa con respecto a la densidad aparente.

Vastas áreas de la tierra se encuentran degradadas, algunas de ellas

irreversiblemente, por un amplio rango de procesos tales como: desertificación y erosión acelerada, compactación y acidificación acentuada, disminución del contenido de materia orgánica y de la biodiversidad y reducción, por abuso, de la fertilidad del suelo. Se estima que el suelo degradado en los trópicos, por diferentes factores, es de 915 millones de hectáreas por erosión hídrica, 417 millones de hectáreas por erosión eólica, 50 millones de hectáreas por degradación física y 213 millones de hectáreas por degradación química (Lal, 1994).

En el mundo, el 85% de la degradación del suelo es causada por erosión (Mbagwu y Obi, 2003; citado por Onweremadu *et al.*, 2007); en Colombia, el 40% del suelo presenta erosión de ligera a severa y la zona andina es la más afectada con el 88% del área por erosión hídrica (Olmos & Montenegro, 1987; citado por Diaz, 2011). La erosión por acción del agua remueve, en los Estados Unidos de América, unos dos billones de toneladas de suelo superficial, por encima de un billón de toneladas que se forma cada año (Lynch y Bragg, 1985; citado por Rivera, (2003).

La pérdida de nutrientes se correlaciona con la cantidad de suelo erosionado y la concentración de nutrientes en el suelo (Maass *et al.*, 1988; citado por Arellano, 2000). La pérdida de la capa superficial del suelo disminuye la cantidad de materia orgánica, incrementa los contenidos de arcilla, disminuye la capacidad de almacenar agua y la disponibilidad de nutrientes para las plantas, lo que afecta la producción de los cultivos (Lal, 1988, Thompson, Gontzer y Anderson, 1991; Fassbender, 1993; Cihacek y Swan, 1994; Weesies, 1994; Citados por Arellano, 2000). En investigaciones realizadas por CENICAFÉ (Gómez y Alarcón, 1975). se registraron pérdidas de nutrientes en café al sol con cobertura natural de (4,28 - 3,7 - 0,12 - 0,26 y 5,44) kg/ha/año de N - Ca- Mg - K - y P respectivamente con pérdidas de suelo de 0,33 Mg/ha/año; en café al sol con barreras vivas (13,68 – 8,74 – 2,6 – 11,64 y 0,33) kg/ha/año con pérdidas de suelo de 1,66 Mg/ha/año y en cafetales bajo sombra (2,21 - 5,33 - 4,9 - 2,35 y 0,08) kg/ha/año con pérdidas de suelo de 0,56 Mg/ha/año. Mbagwu y Auerswald (1999), citado por Onweremadu *et al.*, (2007), reportaron un bajo porcentaje de sodio intercambiable debido a la erosión del suelo, (Romero *et al.*, 2012) reportan que el porcentaje de sodio es mayor en los sedimentos atrapados en diques que en el suelo original, (Oti, 2002, citado por Onweremadu *et al.*, 2007), reportó un aumento en la saturación de aluminio y reducción en las relaciones calcio/magnesio.

El uso de los mapas de interpolación generados a partir de las variables químicas reportadas en un análisis de suelos ha sido catalogado muy útil en el diagnóstico y recomendación de fertilización y aplicaciones de enmiendas, en Costa Rica un ejemplo es lo reportado por Bertsch *et al.*, (2002), quienes lograron establecer un programa de manejo de la fertilización de acuerdo con las necesidades de cada sitio en fincas sembradas con café y caña de azúcar.

La interpolación es una técnica que se convierte en una herramienta muy útil cuando los datos con los que se trabaja son de alto costo y/o difíciles de obtener. Weber &

Englund (1994) demostraron que de forma general, la calidad de la interpolación está condicionada a las características propias de cada base de datos, a la aplicación de diferentes metodologías en el procesamiento de los datos.

Gotway *et al.*, (1996) afirma que el método IDW es más rápido en los cálculos; sin embargo, tiende a producir patrones poco reales conocidos como tipo “ojo de buey” alrededor de los puntos muestreados.

Burrough & McDonnell (1998) determinaron que la medición de la probabilidad, efectuada por los métodos Kriging, hace la diferencia con respecto a los métodos determinísticos para interpolaciones espaciales, de los cuales los más usados son el de ponderación de distancias inversas (IDW) y “splines” o ajuste por curvas.

Johnston *et al.*, (2001) citado por Villatoro *et al.*, (2008) afirma que la interpolación ofrece la ventaja de proyectar mapas o superficies continuas a partir de datos discretos; sin embargo, la utilización de una buena cantidad de puntos del área en estudio limita su utilización y que dentro de los interpoladores usados existe un grupo llamado Kriging, el cual ofrece no solo predicciones y superficies de respuesta requeridas, sino también mapas de probabilidades y cuartiles.

Kravchenko, (2003) recomienda el IDW para bases de datos pequeñas, en donde los parámetros del variograma no son conocidos, también cuando la distancia de muestreo es muy grande e incluso para cuando la distancia de muestreo es mayor al rango de la correlación espacial.

Lozano *et al.*, (2004) citado por Villatoro *et al.*, (2008) menciona que la precisión de las estimaciones es influenciada por la varianza aleatoria, la estructura de variación, y por la intensidad de muestreo.

Villatoro *et al.*, (2008), determinaron que el método Kriging fue más preciso y eficiente que el IDW en el proceso de interpolación respecto del pH, el Ca, y la CICE, aunque la diferencia entre ambos métodos no fue muy amplia. Posiblemente, la alta densidad de muestreo benefició a ambos métodos haciendo difícil determinar cuál fue mejor, lo cual pudo haber sido más marcado a una menor densidad de muestreo, donde el Kriging proporciona un análisis más elaborado y con un fundamento estadístico, por lo que este método puede ser el preferido cuando la intensidad de muestreo es mayor, aunque esto significaría costos mayores.

METODOLOGÍA

5.1 TIPO DE TRABAJO

Este proyecto corresponde a la identificación de los parámetros de la calidad del suelo en dos sistemas de producción ganadera utilizando herramientas SIG para su análisis.

5.2 PROCEDIMIENTO

5.2.1 Fase 1. Selección de fincas

Para el desarrollo del presente estudio se seleccionaron cinco fincas en cuatro municipios del departamento de Caldas (Tabla 1) que tuvieran en uso dos sistemas de producción ganadera (sistema silvopastoril y pastoreo convencional), el sistema silvopastoril debía tener más de un año de establecido.

- **Actividad 1. Muestreo y georreferenciación de lotes.**

Para el estudio de la calidad de la fertilidad y compactación (densidad aparente, densidad real y porosidad total) del suelo se tomaron muestras de suelos en las cinco fincas seleccionadas de acuerdo al área del lote estudiado (Tabla 1). Cada muestra para análisis químico estuvo compuesta aproximadamente por un (1) Kilogramo de suelo, tomada a 15cm de profundidad, el cual fue empacado en bolsas plásticas de 20x30cm, con cierre hermético y rotuladas debidamente con la información de cada sitio; para la determinación de la densidad aparente se utilizó el método del cilindro.

Cada sitio de muestreo fue georreferenciado y los lotes delimitados para obtener sus respectivas áreas con la ayuda de un equipo de sistema de posicionamiento global (GPS, Garmin Oregon 650), el sistema de coordenadas de captura del equipo GPS usado fue el WGS1984. Esta información fue visualizada inicialmente en la aplicación Google Earth para corroborar su veracidad.

Tabla 1. Ubicación y características de las fincas muestreadas.

Finca	Municipio	Altura	Temperatura	Ubicación (WGS84)	Lote Muestreado	Área del Lote (Hectárea)	Número de muestras
El Pañuelo	Manizales	1220	21°C	N5 02.313 34.864 W75	Sistemas silvopastoril con botón de oro	1,328	13
					Sistema Convencional	0,765	8
Sierra Morena	Manizales	1250	23°C	N5 04.451 37.785 W75	Sistemas silvopastoril con botón de oro	1,595	16
					Sistema Convencional	1,005	10
El Palmar	Filadelfia	1520	20°C	N5 17.913 34.176 W75	Sistemas silvopastoril con botón de oro	0,546	5
					Sistema Convencional	0,452	6
San Francisco	Riosucio	2200	18°C	N5 24.660 44.734 W75	Sistemas silvopastoril con botón de oro	0,971	9
					Sistema Convencional	0,612	6
Montelindo	Palestina	1010	24°C	N5 04.746 40.422 W75	Sistema silvopastoril con Leucaena	0,816	8
					Sistema Convencional	0,408	6



Figura 1. Ubicación de lotes muestreados en la finca El Pañuelo

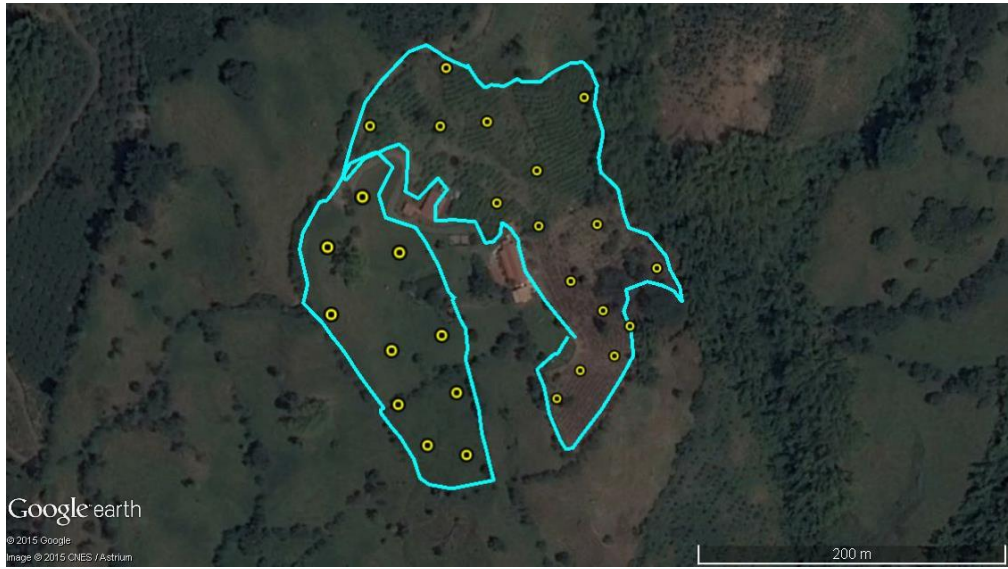


Figura 2. Ubicación de lotes muestreados en la finca Sierra Morena.



Figura 3. Ubicación de lotes muestreados en la finca El Palmar



Figura 4. Ubicación de lotes muestreados en la finca San Francisco.



Figura 5. Ubicación de lotes de muestreo en la finca Montelindo.

5.2.2 Fase 2. Determinación de propiedades químicas

- **Actividad 1. Análisis de laboratorio.**

Las muestras colectadas fueron llevadas al laboratorio de química y fertilidad de suelos de la Universidad de Caldas, allí se determinó pH, contenido de materia orgánica, fósforo, calcio, magnesio, potasio, sodio y aluminio; los métodos de análisis se describen en la tabla 2.

Tabla 2. Descripción de los métodos utilizados en laboratorio.

Elemento	Método de Análisis
pH	Potenciometría
M.O	Oxidación húmeda y cuantificación por Colorimetría
P	Extracción Bray II y cuantificación por Colorimetría
Ca	Extracción Acetato de Amonio 1N pH 7 Absorción atómica
Mg	
K	
Na	
Al	Titulación
Textura	Bouyoucos

5.2.3 Fase 3. Determinación de propiedades físicas

- **Actividad 1. Análisis de laboratorio.**

Las muestras colectadas fueron llevadas al laboratorio de física de suelos de la Universidad de Caldas, allí se determinó densidad aparente, densidad real y porosidad total del suelo.

La densidad aparente se determinó mediante el método del cilindro, que consiste en tomar una muestra indisturbada en un cilindro de volumen conocido (Vc). Se trasvasa el suelo a una capsula de humedad y se lleva a la estufa a 105°C durante 24 horas y se pesa (Ms). $D_a = M_s / V_c$. La densidad real mediante el método del picnómetro, este método consiste en determinar la densidad real midiendo el volumen de fluido desplazado por una masa conocida de suelo en un frasco volumétrico o picnómetro. Debido a que la porosidad del suelo depende de las características de su fracción sólida, ella se estima con base en las densidades real y aparente, según la relación (Valenzuela y Torrente, 2010):

$$P_t = \left(1 - \frac{D_a}{D_r}\right) \times 100$$

5.2.4 Fase 4. Análisis de la información.

- **Actividad 1. Manejo de la información.**

La información obtenida de los análisis de suelos se digitalizó en hojas electrónicas con el fin de conformar una base de datos con la siguiente información: materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, aluminio, arena, limo, arcilla, pH, densidad aparente, densidad real y porosidad total.

Una vez la información de georreferenciación y delimitación de lotes fue obtenida para su procesamiento, fue re proyectada al sistema de coordenadas MAGNA_Colombia_Bogota, y convertida a shape mediante el programa ArcGis, utilizando la extensión GPS to Features de conversión Tools, posteriormente la información de la delimitación de las áreas de los lotes dada en puntos fue convertida a polígono y se obtuvieron las correspondientes áreas (Tabla 1).

Se construyó una base de datos espacial asociando los diferentes puntos de muestreo georreferenciados y los resultados de los análisis del laboratorio obtenidos en cada uno de estos puntos.

- **Actividad 2. Análisis de la información.**

Para cada una de las variables determinadas se hizo un análisis univariado identificando los valores mínimo y máximo, y estimando la media, la mediana, la desviación estándar y los coeficientes de variación.

- **Actividad 3. Creación de mapas de fertilidad y propiedades físicas.**

Mediante la extensión Spatial Analyst Tools, se efectuó la interpolación de los datos obtenidos del laboratorio de suelos, mediante el método de ponderación del inverso de la distancia (IDW) para obtener mapas de fertilidad y propiedades físicas de los diferentes lotes estudiados, y realizar los respectivos análisis teniendo cuenta los resultados estadísticos de los datos.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

6.1.1 Finca El Pañuelo

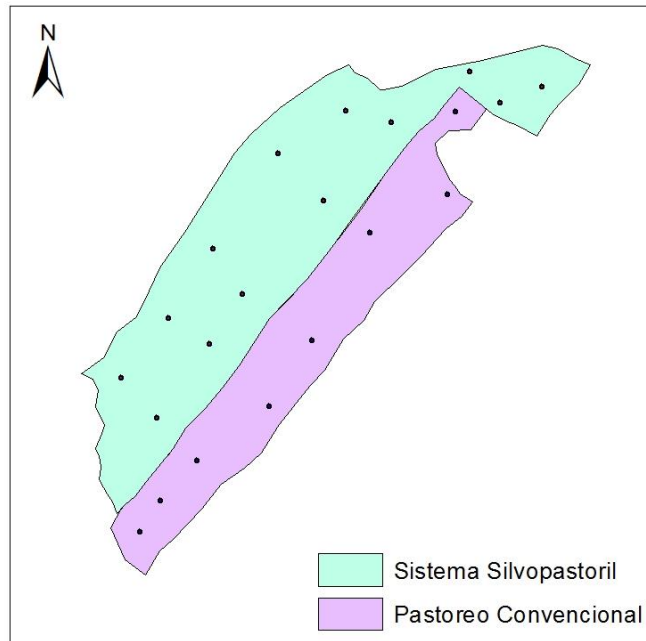


Figura 6. Lotes muestreados en la finca El Pañuelo.

Según los coeficientes de variación de los resultados obtenidos para esta finca, la materia orgánica y el nitrógeno tuvieron menor variabilidad en el sistema Silvopastoril, presentando valores muy homogéneos; a diferencia del sistema de pastoreo convencional donde la variabilidad fue superior exhibiendo valores heterogéneos. Las demás variables bajo estudio tienen datos muy heterogéneos, donde la mayor variabilidad es encontrada para el fósforo y el aluminio en el lote de pastoreo convencional (tabla 3). La variabilidad más alta del fósforo se atribuye a la baja movilidad que tiene este en el suelo y a la reacción con el pH bajo del suelo que promueve la precipitación de los fosfatos (Alcántar y Trejo, 2007).

Según el análisis descriptivo los suelos en la finca el Pañuelo, presentaron porcentajes altos de Materia orgánica y nitrógeno. Aunque con contenidos altos de materia orgánica en los dos sistemas ganaderos, el sistema silvopastoril presenta valores mayores para esta variable, el 76,9% de estos valores está distribuido en el rango de 13,2 – 16% (tabla 4), mientras que para el pastoreo convencional solo el 37,5 de los valores se encuentran en este mismo rango (tabla 4).

Tabla 3. Estadística descriptiva para las variables estudiadas en la finca El Pañuelo.

Sistema Ganadero	Estadístico	M.O	N	P	K	Ca	Mg	Na	Al	pH	Da
Sistema Silvopastoril	Media	13.37	0.51	17	0.46	7.3	3.45	0.35	0.3	5.11	1.33
	Mediana	13.5	0.51	13	0.28	7.6	3.46	0.33	0	5.1	1.31
	Varianza	1.343	0	148	0.21	9.5	4.89	0	0.2	0.3	0.02
	DesvEst	1.159	0.03	12	0.46	3.1	2.21	0.07	0.5	0.55	0.14
	C.V	8.67	6.69	72	99.8	42	64.2	19.5	160	10.8	10.8
Sistema Ganadero	Estadístico	M.O	N	P	K	Ca	Mg	Na	Al	pH	Da
Pastoreo Convencional	Media	12.32	0.47	2.9	0.44	5.3	2.36	0.32	0.1	5.43	1.17
	Mediana	12.59	0.49	0	0.3	5.2	2.7	0.31	0	5.55	1.13
	Varianza	7.875	0.01	31	0.16	9.7	2.4	0	0.1	0.25	0.04
	DesvEst	2.993	0.09	6	0.42	3.1	1.53	0.05	0.2	0.53	0.2
	C.V	24.3	19.2	207	94.3	59	64.8	16.9	283	9.79	17.2

Tabla 4. Frecuencias de distribución de la materia orgánica en los dos sistemas ganaderos de la finca El Pañuelo.

Rangos de distribución de la materia orgánica (%)	Sistema Silvopastoril		Pastoreo Convencional	
	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia	Porcentaje
8 – 10.6	1	7.69	3	37.5
10.6 – 13.2	2	15.4	2	25
13.2 – 16	10	76.9	3	37.5

El potasio, calcio y magnesio tanto en el sistema Silvopastoril como en el convencional presentaron en su mayoría valores entre medio y alto (figuras 7), las zonas de la finca con contenidos bajos de estos nutrientes, corresponden a la parte de los lotes con pendiente, esta zona precisamente tiene pH bajos y presencia de aluminio (figura 8), debido al lavado de las bases por causa del movimiento del agua en el suelo, este proceso, que ocurre lenta pero sostenidamente en el tiempo, determina un reemplazo de estas bases por los cationes ácidos (hidrógeno y aluminio) (Campillo y Sadzawka, 2006).

Se presentaron contenidos más altos de fósforo en el sistema Silvopastoril y bajo en el sistema de pastoreo convencional (figura 7). El contenido de fósforo en el sistemas silvopastoril puede deberse a la hojarasca producida por el botón de oro; según Velasco *et al.*, (1999) al evaluar contenidos de fósforo en sistema silvopastoril con *Acacia mangium* encontraron que La concentración de P en la hojarasca de *A.*

mangium fue de 0.08%, aportando 7 y 4.5 kg ha⁻¹ año⁻¹ a alta y a baja densidad de siembra, respectivamente. La presencia de suelos ácidos y contenidos de aluminio como se mencionó anteriormente puede disminuir la disponibilidad del fósforo así se encuentre en contenido alto.

La densidad aparente se encuentra en el rango 1 – 1.5 g/cm³, que en muchos de los puntos tienden más al valor de 1.5 g/cm³ lo que nos indica suelos pesados; esto sumado a la porosidad presente categorizada entre baja y muy baja, nos revela suelos con problemas de compactación (figura 8), resultado visible en los dos sistemas ganaderos.

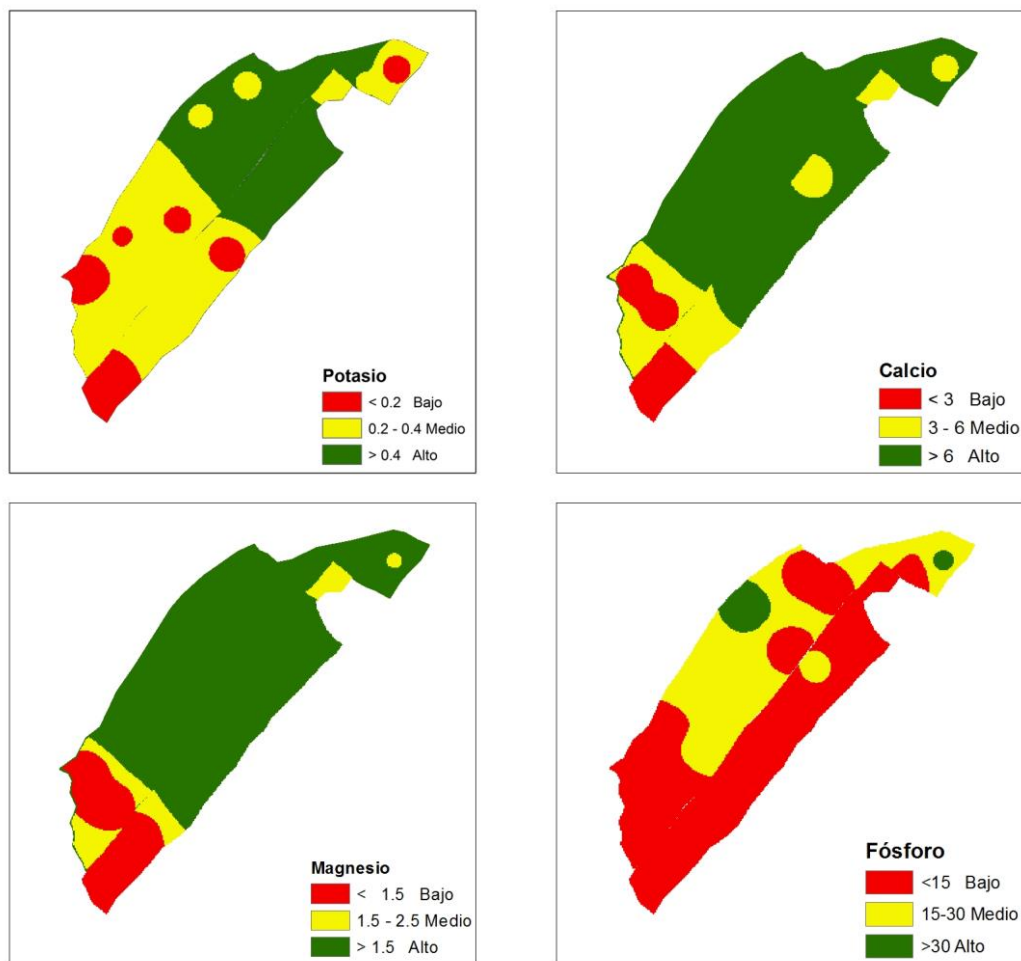


Figura 7. Mapas de potasio, calcio, magnesio, fósforo, pH y aluminio de la finca El Pañuelo.

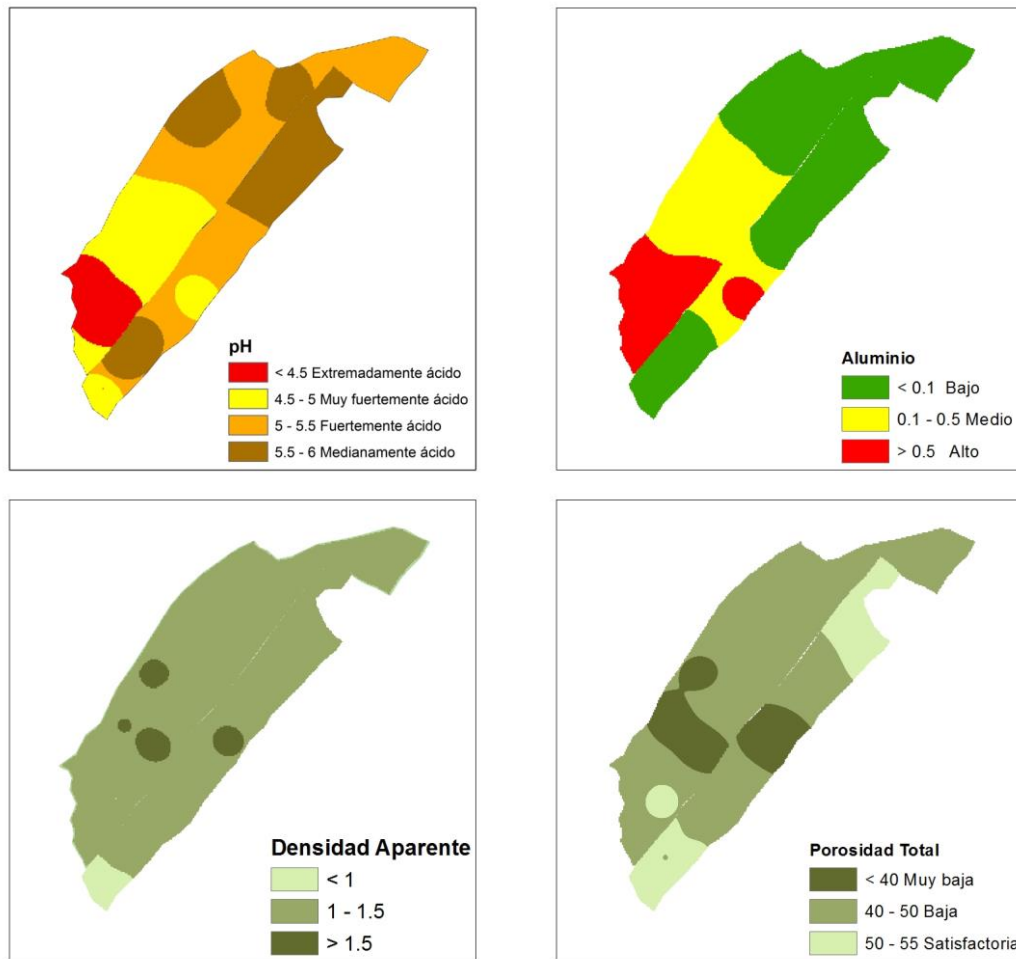


Figura 8. Mapas de densidad aparente y porosidad total del suelo de la finca El Pañuelo.

6.1.2 Finca Sierra Morena

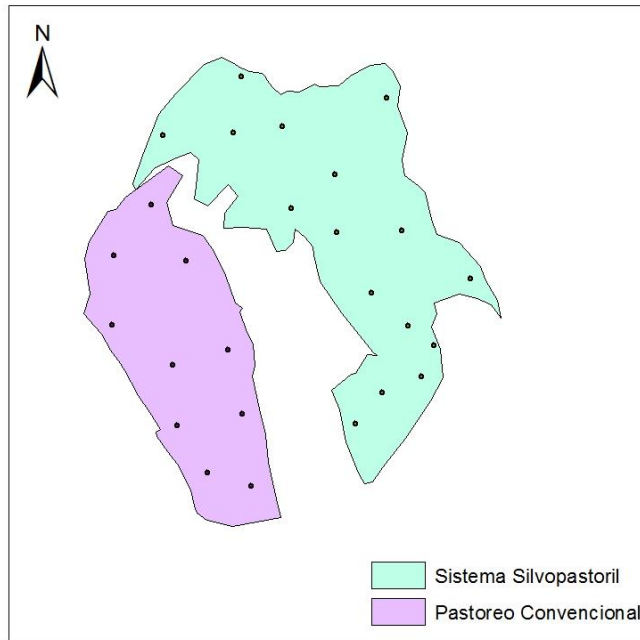


Figura 9. Lotes muestreados en la finca Sierra Morena

La finca Sierra Morena presenta valores altos de materia orgánica, nitrógeno y calcio, valores medios a bajos en su gran mayoría de potasio y magnesio; y bajos de fósforo (figura 10), El pH y la densidad aparente están en rangos adecuados, para cada uno de los sistemas ganaderos bajo estudio (figura 10). La porosidad total se encuentra entre satisfactoria y baja, lo que nos indica que se empiezan a tener problemas de compactación (figura 11).

Aunque con valores altos de materia orgánica en los dos sistemas ganaderos, el lote de pastoreo convencional tiene contenidos mayores donde el 70% de los valores están ubicados en el rango 12.6 – 15 comparado con el lote silvopastoril, donde el 56.3% se encuentra en el rango 10.3 – 12.6 (tabla 6). Este contenido menor en el sistema silvopastoril puede deberse a la acción de los microorganismos del suelo sobre los residuos orgánicos del cultivo silvopastoril y a la alta temperatura en la zona; La temperatura influye en la mineralización del nitrógeno y el carbono a partir de los residuos orgánicos siendo afectada por la temperatura, a más temperaturas más mineralización y a menos temperatura menos mineralización (Munévar y Wollum, 1983).

Los valores bajos del potasio y el magnesio están indicados por la relación Ca/Mg y Mg/K en desbalance, lo que está causando la deficiencia en el suelo de estos cationes.

La materia orgánica y el nitrógeno tienen baja variabilidad en cada sistema ganadero, para los demás elementos en estudio podemos ver datos muy heterogéneos, que nos hablan de una variabilidad alta, siendo el aluminio y el potasio los de mayor valor (tabla 5).

Tabla 5. Estadística descriptiva para las variables estudiadas en la finca Sierra Morena.

Sistema Ganadero	Estadístico	M.O	N	P	K	Ca	Mg	Na	Al	pH	Da
Sistema Silvopastoril	Media	10.96	0.43	3.2	0.24	9.8	1.48	0.21	0.3	5.54	1.1
	Mediana	10.84	0.44	2.5	0.19	8.7	1.11	0.18	0	5.55	1.1
	Varianza	1.585	0	5.9	0.04	30	1.15	0.01	0.4	0.24	0.01
	DesvEst	1.259	0.04	2.4	0.19	5.5	1.07	0.1	0.6	0.49	0.12
	C.V	11.49	9.17	76	79.1	56	72.6	45	225	8.91	11.1
Sistema Ganadero	Estadístico	M.O	N	P	K	Ca	Mg	Na	Al	pH	Da
Pastoreo Convencional	Media	13.01	0.5	8.1	0.36	8.7	1.99	0.15	0.1	5.43	1.18
	Mediana	13.19	0.5	8.5	0.23	7.9	1.83	0.14	0	5.35	1.18
	Varianza	1.372	0	7.9	0.1	29	2.63	0	0.1	0.09	0.03
	DesvEst	1.171	0.04	2.8	0.32	5.4	1.62	0.04	0.3	0.31	0.16
	C.V	9.004	7.07	35	88.9	61	81.6	26	214	5.63	13.7

Tabla 6. Frecuencias de distribución de la materia orgánica en los dos sistemas ganaderos de la finca Sierra Morena.

Rangos de distribución de la materia orgánica (%)	Sistema Silvopastoril		Pastoreo Convencional	
	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia	Porcentaje
8 – 10.3	5	31.3	1	10
10.3 – 12.6	9	56.3	2	20
12.6 – 15	2	12.5	7	70

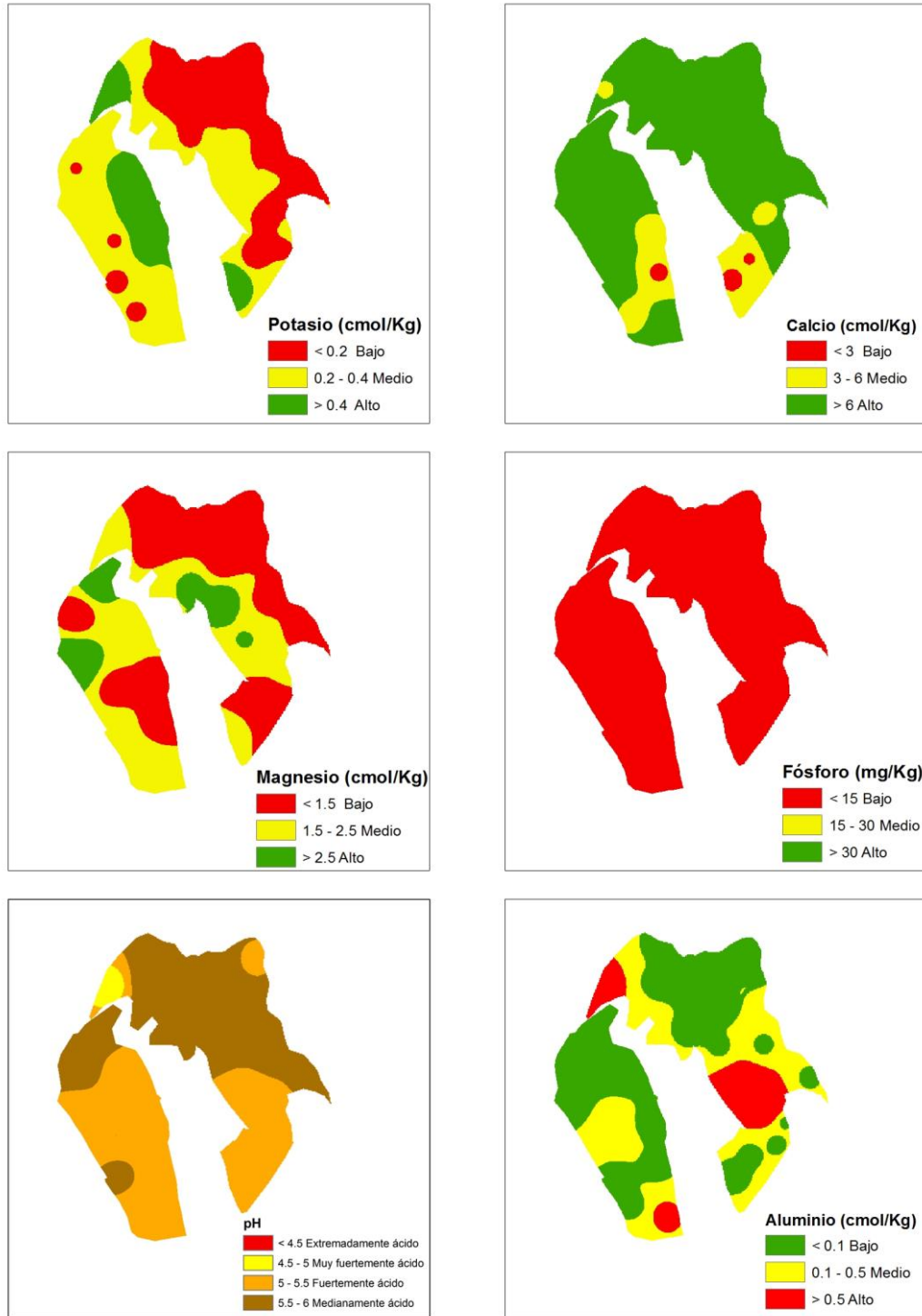


Figura 10. Mapas de potasio, calcio, magnesio, fósforo, pH y aluminio de la finca Sierra Morena.



Figura 11. Mapas de densidad aparente y porosidad total del suelo de la finca El Pañuelo.

6.1.3 Finca El Palmar

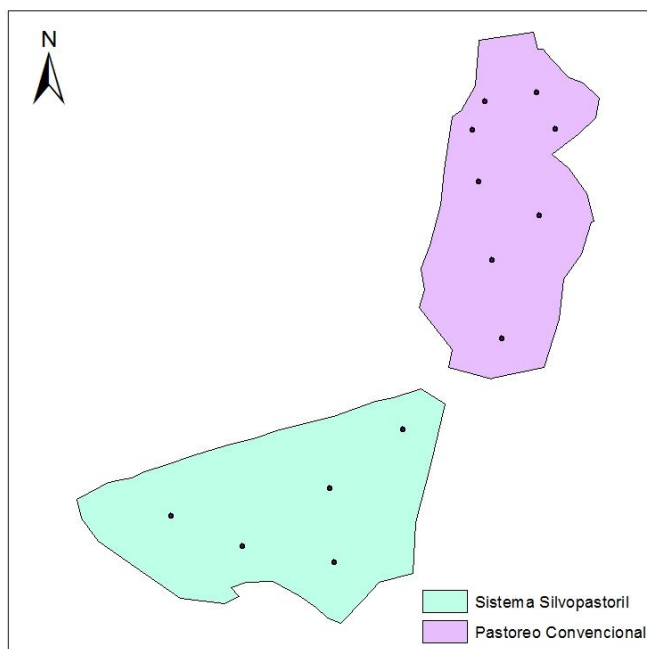


Figura 12. Lotes muestreados en la finca El Palmar

Se presenta baja variabilidad en los contenidos de materia orgánica y nitrógeno, siendo los valores más homogéneos aquellos provenientes del sistema silvopastoril; también hay baja variabilidad en el pH, la densidad aparente y la porosidad, lo que nos habla de valores muy similares en los lotes muestreados. Los contenidos de los restantes elementos son muy heterogéneos, siendo el fósforo en el lote silvopastoril el que presenta mayor variabilidad en sus contenidos.

Tabla 7. Estadística descriptiva para las variables estudiadas en la finca El Palmar

Sistema Ganadero	Estadístico	M.O	N	P	K	Ca	Mg	Na	pH	Da
Sistema Silvopastoril	Media	13.53	0.51	3.4	0.12	4	2.8	0.26	5.6	1.16
	Mediana	13.13	0.5	2	0.14	4	3.41	0.26	5.6	1.17
	Varianza	0.359	0	8.3	0	0.4	1.88	0	0	0.01
	DesvEst	0.599	0.02	2.9	0.04	0.7	1.37	0.07	0.2	0.1
	C.V	4.43	3.21	85	34.6	17	48.9	25.8	3.7	9
Sistema Ganadero	Estadístico	M.O	N	P	K	Ca	Mg	Na	pH	Da
Pastoreo Convencional	Media	15.61	0.57	6	0.18	4.5	3.89	0.18	5.5	1.1
	Mediana	16.15	0.58	6	0.19	4.6	4.61	0.17	5.5	1.09
	Varianza	1.848	0	2.7	0	4	2.88	0	0	0
	DesvEst	1.359	0.03	1.6	0.06	2	1.7	0.04	0.1	0.06
	C.V	8.705	6	27	36	44	43.6	24	2.3	5.21

La distribución de la materia orgánica en la finca el Palmar (tabla 8), nos deja ver que hay contenidos más elevados en el lote de pastoreo convencional, donde el 42.9% está en el rango 16.3 – 18 %, esto comparado con el sistema silvopastoril donde el 100% de los valores para esta variable están en el rango 13 – 14.6% de materia orgánica, comportamiento que coincidió con lo obtenido en la finca sierra morena, donde la temperatura y los residuos del cultivo silvopastoril pueden estar causando este comportamiento.

Tabla 8. Frecuencias de distribución de la materia orgánica en los dos sistemas ganaderos de la finca El Palmar.

Rangos de distribución de la materia orgánica (%)	Sistema Silvopastoril		Pastoreo Convencional	
	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia	Porcentaje
13 - 14.6	5	100	2	28.6
14.6 - 16.3	0	0	2	28.6
16.3 - 18	0	0	3	42.9

De acuerdo al análisis descriptivo los lotes bajo estudio en la finca el palmar tienen contenidos altos de materia orgánica, nitrógeno y en su mayoría de magnesio (figura 14); contenidos medios de calcio, contenidos bajos de potasio (figura 13) y fósforo (figura 14).

El pH se encuentra en un rango de acidez adecuado (figura 14) y la densidad aparente tiene valores normales para cada sistema evaluado, en el rango 1–1.5 g/cm³ (figura 14), la porosidad total es baja (figura 14), lo que al igual que en las fincas ganaderas anteriores nos puede indicar problemas de compactación. Valores de porosidad por debajo del 40% son considerados bajos ya que el flujo de gases y agua por los espacios porosos se vuelve deficiente e inadecuado para la vida del suelo (Jaramillo, 2002). No se presentaron contenidos de aluminio en ninguno de los sistemas ganaderos.

Los contenidos de medio a bajo de Calcio están influenciados por la relación Ca/Mg que tiene en gran porcentaje valores por debajo de 2 y que habla de deficiencia de este elemento; de igual forma la relación Mg/K con valores muy por encima de 10 indican deficiencia de potasio lo que podemos corroborar con los contenidos presentes en los lotes de esta finca (figura 13). Los suelos con alto contenido de magnesio, como sucede en esta finca (figura 14) suelen sufrir una deficiencia de potasio (K) y (Ca). Los niveles de magnesio elevados también hacen que sea difícil para las plantas usar con éxito el poco potasio y el calcio que existe en el suelo. Las plantas que crecen en esas condiciones suelen carecer de vigor y sufren un crecimiento retardado. Además, el alto contenido de magnesio hace que el suelo pierda su estructura y se drene lentamente (Estrada, 1990).

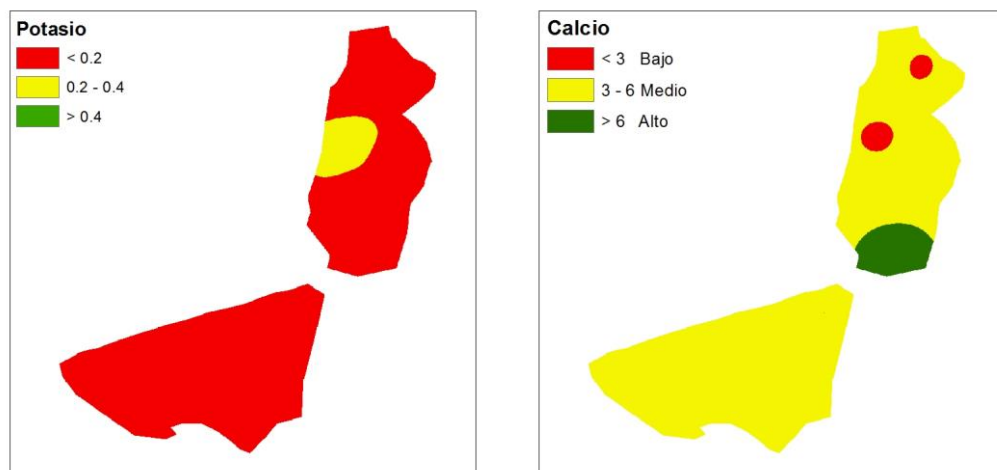


Figura 13. Mapas de potasio y calcio, de la finca El Palmar.

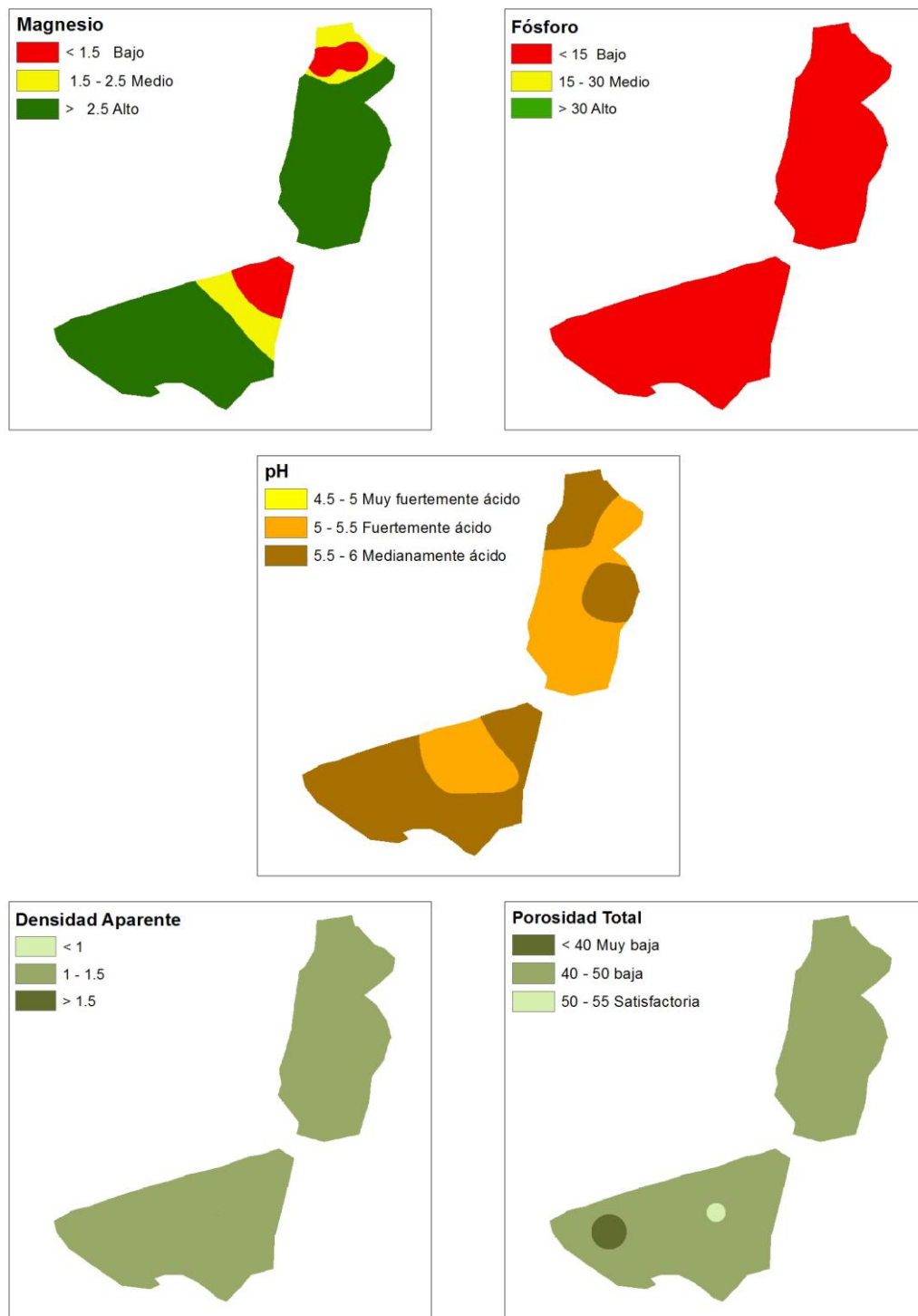


Figura 14. Mapas de magnesio, fósforo, pH, densidad aparente y densidad real de la finca El Palmar.

6.1.4 Finca San Francisco

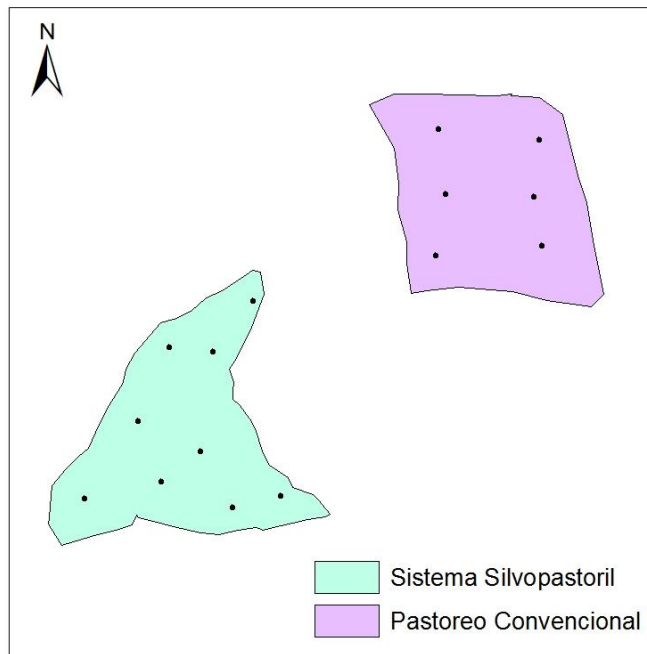


Figura 15. Lotes muestreados en la finca San Francisco

Los contenidos de materia orgánica, nitrógeno, pH y densidad aparente tienen variabilidades bajas, con valores muy semejantes en cada punto de muestreo; las demás variables analizadas tienen una variabilidad alta, siendo el calcio en el sistema silvopastoril y el fósforo en el sistema de pastoreo convencional los elementos con mayor variabilidad en los lotes muestreados (tabla 9).

Tabla 9. Estadística descriptiva para las variables estudiadas en la finca San Francisco

Sistema Ganadero	Estadístico	M.O	N	P	K	Ca	Mg	Na	Al	pH	Da
Sistema Silvopastoril	Media	24.93	0.75	4.4	0.32	1.8	0.37	0.26	0.6	4.97	0.56
	Mediana	25.28	0.76	5	0.25	1.1	0.23	0.26	0.8	4.9	0.55
	Varianza	9.509	0	12	0.06	3.4	0.07	0	0.4	0.08	0
	DesvEst	3.084	0.05	3.5	0.25	1.8	0.26	0.05	0.6	0.28	0.05
	C.V	12.37	6.52	78	78	101	70	18	93	5.61	8.61
Sistema Ganadero	Estadístico	M.O	N	P	K	Ca	Mg	Na	Al	pH	Da
Pastoreo Convencional	Media	25.3	0.75	1.2	0.17	0.3	0.14	0.19	0.5	4.98	0.61
	Mediana	25.37	0.76	1	0.17	0.3	0.13	0.19	0.5	4.95	0.61
	Varianza	3.33	0	1.8	0	0	0	0	0.1	0.01	0
	DesvEst	1.825	0.02	1.3	0.05	0.2	0.04	0.02	0.3	0.12	0.02
	C.V	7.212	2.99	114	26.8	55	28	8.86	70	2.35	3.4

Tabla 10. Frecuencias de distribución de la materia orgánica en los dos sistemas ganaderos de la finca San Francisco.

Rangos de distribución de la materia orgánica (%)	Sistema Silvopastoril		Pastoreo Convencional	
	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia	Porcentaje
19 - 22.3	2	22.2	0	0
22.3- 25.66	3	33.3	3	50
25.66 - 29	4	44.4	3	50

La finca San Francisco, presenta contenidos altos de materia orgánica y de nitrógeno; medio de potasio y bajos de fósforo, calcio y magnesio en los dos sistemas ganaderos en observación (figura 16). En ambos lotes el pH registrado es fuertemente ácido con promedios de 4.9, y presencia de niveles altos de aluminio (figura 16). La densidad aparente registrada es baja, lo que corresponde con suelos de alto contenido orgánico como lo son estos, lo que es corroborado con la porosidad total que aparece como excelente y excesiva (figura 17) en gran parte del sistema silvopastoril, condición que puede generar un drenaje y una aireación excesivos (Jaramillo, 2002).

Este predio presenta los contenidos de materia orgánica más elevados de las fincas bajo estudio (tabla 9), los mayores valores encontrados podrían explicarse por el volumen de residuos orgánicos que ingresa al suelo a y su lenta degradación (Sánchez *et al.*, 2005), en comparación con las otras fincas muestreadas. El aumento en los contenidos de materia orgánica con la altitud está asociado con la disminución de la temperatura para altitudes superiores, mientras que para altitudes inferiores se corresponde con aumento en la precipitación (Ochoa *et al.*, 1999).

Los contenidos bajos de fósforo corresponden a la condición ácida del suelo, donde se dan precipitaciones de fósforo como fosfatos de Fe o Al de muy baja solubilidad. La relación Mg/K tiene valores por debajo de 8 lo que indica deficiencia de magnesio, característica ratificada ya que los contenidos de este nutriente en los lotes muestreados se encuentra en contenido bajo (figura 16). El pH en ambos lotes es fuertemente ácido, lo que enseña de igual forma los bajos contenidos en las bases del suelo: calcio, magnesio y potasio.

En el lote silvopastoril se encontraron valores más altos de potasio (figura 16), lo que concuerda con (Young, 1989) citado por Sadeghian *et al.*, (1994), quien afirma que los sistemas agroforestales mejoran la capacidad de intercambio catiónico y la disponibilidad del potasio.

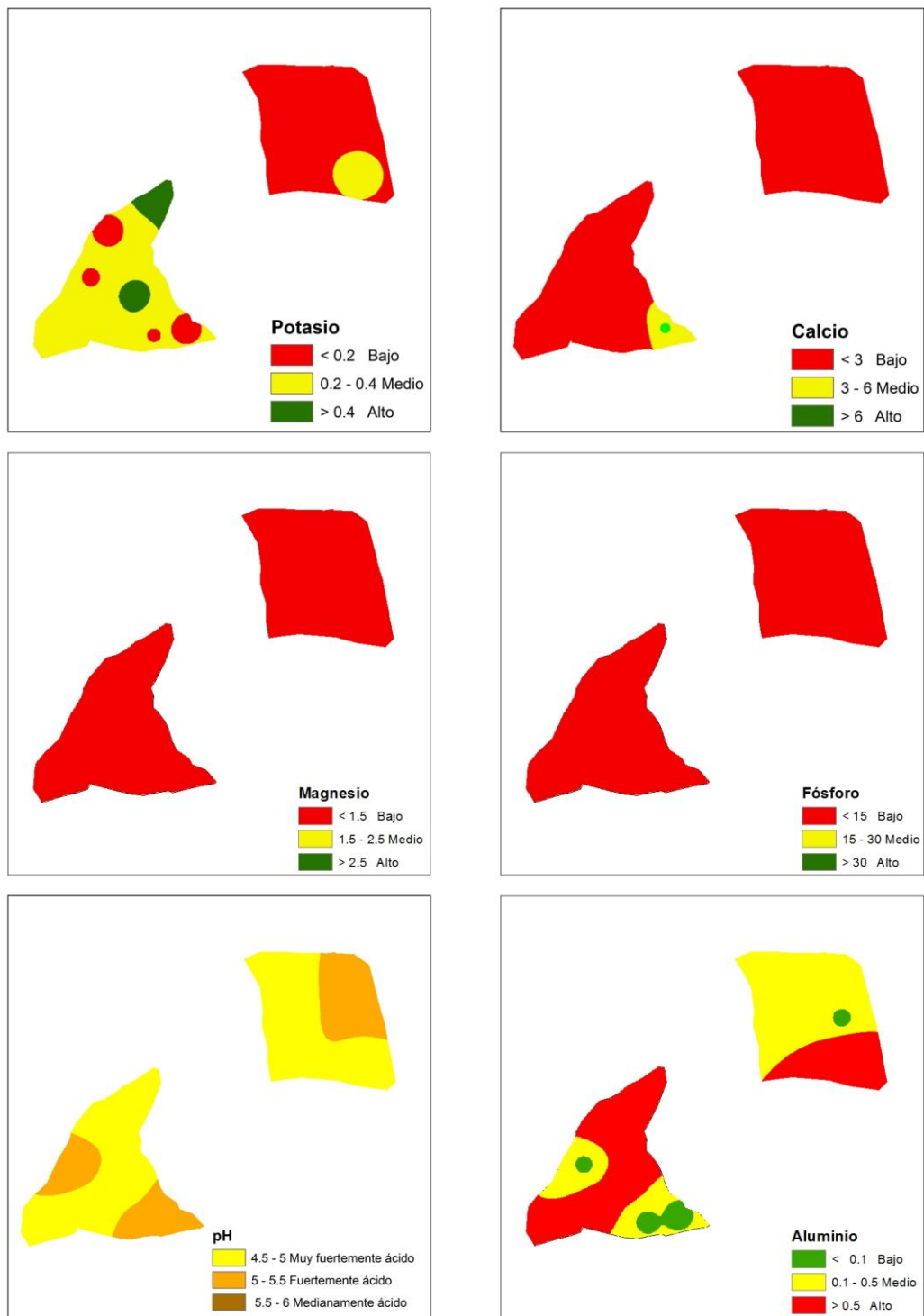


Figura 16. Mapas de potasio, calcio, magnesio, fósforo, pH y aluminio de la finca San Francisco.

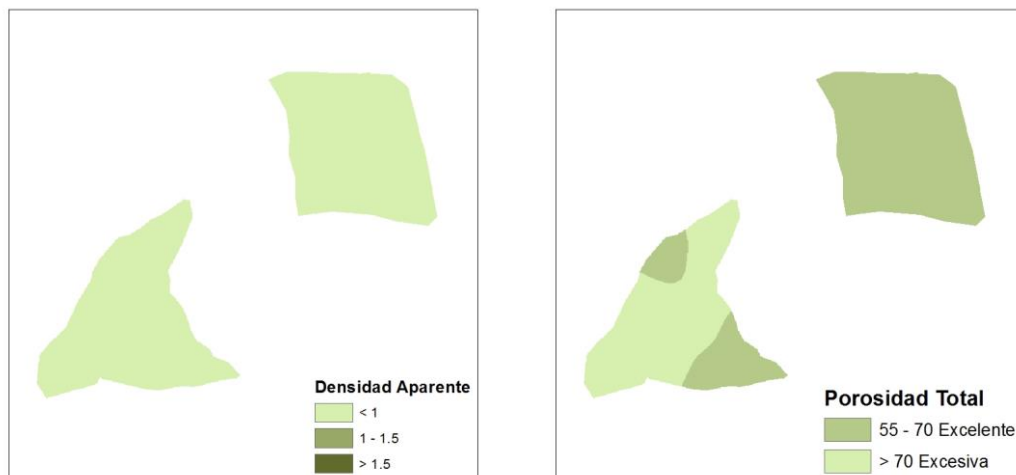


Figura 17. Mapas de densidad aparente y porosidad total del suelo de la finca San Francisco.

6.1.5 Finca Montelindo

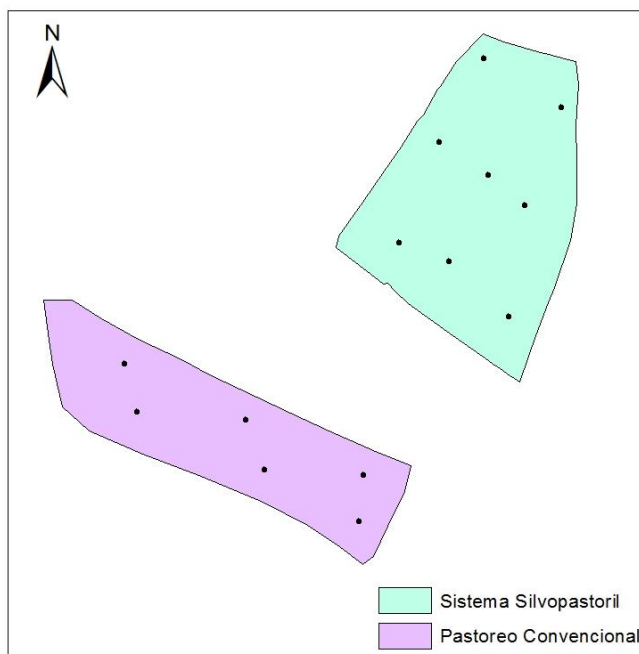


Figura 18. Lotes muestreados en la finca San Francisco

Según los coeficientes de variación la materia orgánica, el nitrógeno, el pH y la densidad aparente tienen baja variabilidad, siendo sus datos muy homogéneos, el aluminio tiene la mayor variabilidad encontrada esto debido a la presencia de dicho elemento solo en tres sitios de los dos lotes muestreados en la finca.

Aunque con valores altos de materia orgánica en ambos sistemas muestreados (tabla 11), los contenidos de mayor valor también se dieron en el lote de pastoreo convencional, lo que coincide con los resultados obtenidos en las fincas sierra morena y el palmar.

Tabla 11. Estadística descriptiva para las variables estudiadas en la finca San Francisco

Sistema Ganadero	Estadístico	M.O	N	P	K	Ca	Mg	Na	Al	pH	Da
Sistema Silvopastoril	Media	13.58	0.51	6.6	0.5	3.4	1	0.24	0.1	5.3	1.06
	Mediana	13.28	0.51	7	0.46	3.6	1.04	0.23	0	5.25	1.01
	Varianza	1.305	0	16	0.1	0.6	0.05	0	0	0.06	0.02
	DesvEst	1.142	0.03	4	0.31	0.8	0.23	0.04	0.2	0.24	0.13
	C.V	8.409	6.41	60	62.1	23	22.8	18.5	193	4.51	12.2
Sistema Ganadero	Estadístico	M.O	N	P	K	Ca	Mg	Na	Al	pH	Da
Pastoreo Convencional	Media	15.31	0.56	7.7	0.59	4.8	1.4	0.23	0.1	5.42	0.96
	Mediana	14.95	0.55	8.5	0.58	3.4	1.4	0.19	0	5.35	0.96
	Varianza	0.687	0	28	0.11	9.5	0.5	0	0	0.11	0
	DesvEst	0.829	0.02	5.3	0.33	3.1	0.7	0.07	0.2	0.33	0.07
	C.V	5.413	3.97	69	55.9	64	50.3	29	245	6.11	6.99

Tabla 12. Frecuencias de distribución de la materia orgánica en los dos sistemas ganaderos de la finca Montelindo.

Rangos de distribución de la materia orgánica (%)	Sistema Silvopastoril		Pastoreo Convencional	
	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia	Porcentaje
12 - 13.6	5	62.5	0	0
13.6 - 15.3	2	25	4	66.7
15.3 - 17	1	12.5	2	33.3

El suelo de la finca Montelindo tiene contenido alto de materia orgánica, nitrógeno y potasio; niveles medios de calcio, de medios a bajos de magnesio, y niveles bajos de fósforo en ambos sistemas ganaderos (figura 19); con niveles de pH ácidos y bajos contenidos de aluminio (figura 20). La densidad aparente se encuentra en niveles normales (figura 20) y una porosidad total más baja en el sistema

convencional, comparado con el silvopastoril donde gran parte del lote tiene condición de satisfactoria para esta variable. Esto debido a la distribución de las raíces, donde el sistema radicular extendido y profundo de los arbustos establecidos, mejora la porosidad y aumenta el área disponible para captar agua y nutrientes, contribuyendo a la baja compactación del suelo (Mahecha, 2002).

Los bajos contenidos de magnesio están asociados a una baja relación Mg/K, donde los altos contenidos de potasio (figura 19) generan la deficiencia de este en el suelo, condición posiblemente explicada ya que en los sistemas ganaderos la extracción alta de calcio y los grandes aportes de potasio, a través de la orina de los animales, han modificado parcialmente el estado original de los suelos, creando desbalances entre los nutrientes (Sadeghian *et al.*, 1994).

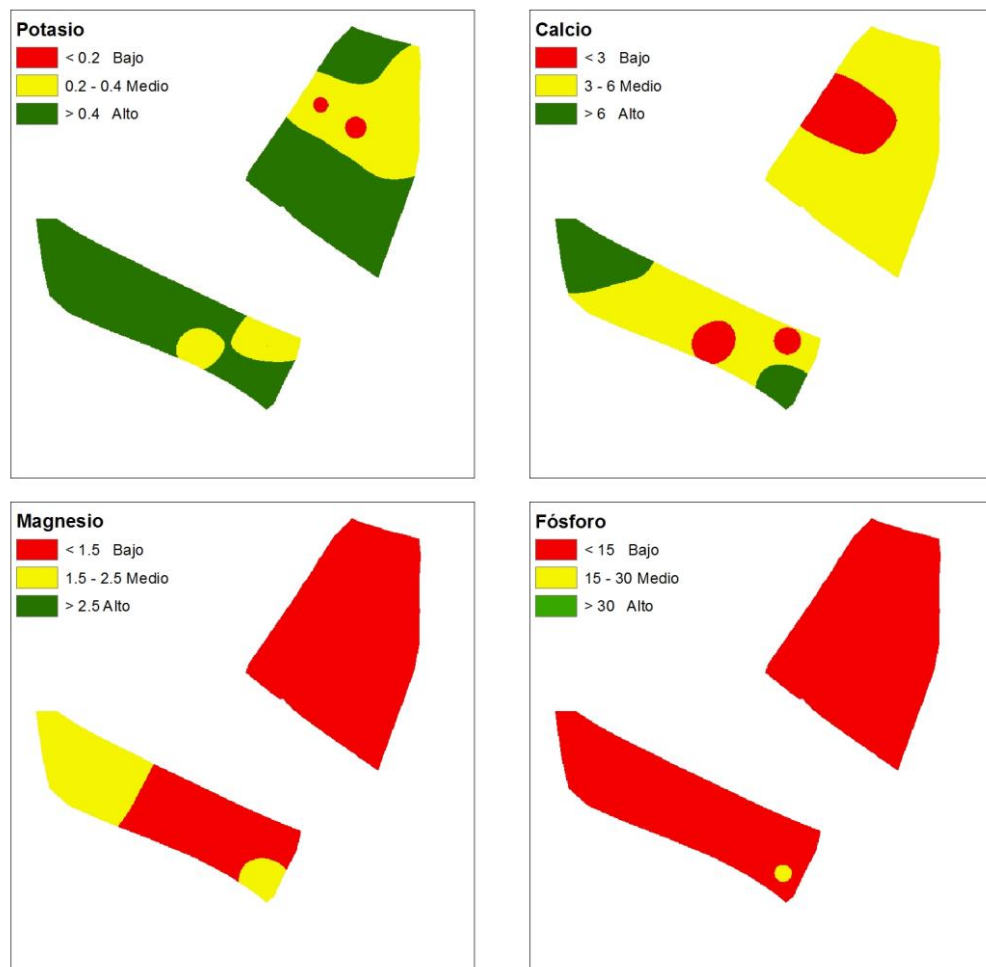


Figura 19. Mapas de potasio, calcio, magnesio y fósforo de la finca Montelindo.

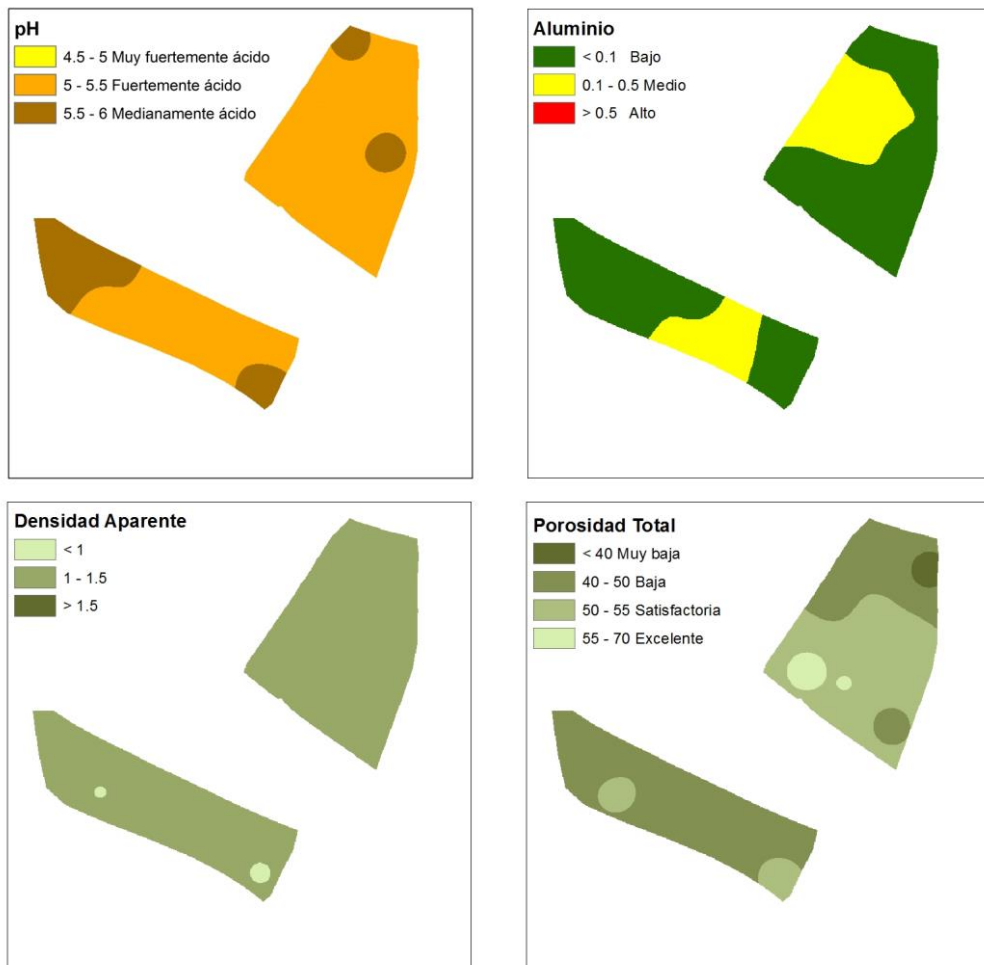


Figura 20. Mapas de pH, aluminio, densidad aparente y porosidad total del suelo en la finca Montelindo.

7. CONCLUSIONES

- Todas las fincas analizadas presentaron contenidos altos de materia orgánica, sin diferencias entre los lotes silvopastoriles y pastoreo convencional.
- Los suelos en las áreas de estudio presentaron variabilidades altas de fósforo, dicha variabilidad se atribuye a la baja movilidad que tiene este en el suelo y a la reacción con el pH bajo que promueve la precipitación de los fosfatos de hierro y aluminio de baja solubilidad.
- Las bases del suelo (Ca, Mg y K), aparecen en desbalance en las fincas estudiadas, generando relaciones iónicas poco favorables, el pH ácido que se encuentra en las fincas, la pendiente que predomina en nuestra zona, el movimiento del agua en el suelo, generan el lavado de las bases, y el reemplazo de estas por cationes ácidos como hierro y aluminio. La absorción de calcio y los aportes de potasio, a través de la orina de los animales, han modificado parcialmente el estado original de los suelos, creando desbalances entre los nutrientes.
- El sistema silvopastoril de la finca Montelindo presentó una porosidad total satisfactoria, lo que indica el beneficio que tiene este tipo de sistema en el suelo, dicho resultado se debe al tiempo de establecimiento del sistema, que en esta finca es superior a los cinco años; La densidad aparente más alta y porosidad total baja del suelo en las fincas restantes revelan problemas de compactación, resultado similar en los lotes silvopastoriles, estas fincas tienen tiempos de establecimiento del cultivo de uno a dos años.
- Se observaron leves variaciones, entre los lotes silvopastoriles y los lotes de pastoreo convencional para las variables químicas y físicas del suelo, lo que indica que el corto tiempo de establecimiento de los sistemas silvopastoriles no es suficiente para causar un efecto significativo, resultados que coinciden con Páez *et al.*, (2014), quienes argumentan que el mejoramiento de algunas variables en los suelos, como el contenido de materia orgánica y el porcentaje de saturación de bases, podría evidenciarse con el transcurrir del tiempo y como consecuencia de la disminución de la acidez del suelo.
- Estos suelos requieren intervenciones para el mejoramiento de la fertilidad y de esta manera realizar un aprovechamiento óptimo de los sistemas silvopastoriles, este sistema productivo es una alternativa que permite producir con múltiples beneficios al medio ambiente.
- Los mapas obtenidos por la interpolación de los resultados de análisis de suelos son una herramienta muy importante ya que hacen completamente visibles las zonas con excesos y deficiencias para hacer más eficiente los métodos preventivos y correctivos.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcántar, G., & Trejo, L. (2007). Nutrición de cultivos. *Ediciones Mundi Prensa. Colegio de Postgraduados. México DF, México*. JOUR.
- Arellano, R. (2000). Pérdida de suelo y nutrientes en agroecosistemas de café en la subcuenca del río Castán, Trujillo, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, 44(2), 79–86.
- Bautista, C. A., Etchevers, B. J., Del Castillo, R. F., Gutiérrez, C., __, __, & __. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13(2), 90–97. <http://doi.org/10.1111/j.1564-9148.2008.00030.x>
- Belsky, A. J., Mwonga, S. M., Duxbury, J. M., __, __, __, & __. (1993). Effects of widely spaced trees and livestock grazing on understory environments in tropical savannas. *Agroforestry Systems*, 24(1), 1–20. JOUR.
- Bertsch, B. F., Henriquez, C., Ramírez, F., Viñas, J. De, Rica, C., __, & __. (2002). Site-Specific Nutrient Management in the Highlands of Cartago Province. *Better Crops International*, 16(1), 16–19.
- Bregt, A. K., Wopereis, M. C. S., McBratney, A. B., __, __, & __. (1991). Construction of isolinear maps of soil attributes with empirical confidence limits. *Soil Science Society of America Journal*, 55(1), 14–19. JOUR.
- Brejda, J. J., & Moorman, T. B. (2001). Identification and Interpretation of Regional Soil Quality Factors for the Central High Plains of the Midwestern USA, (3).
- Burrough, P., & McDonnell, R. (1998). Spatial Information Systems and Geostatistics. P. Burrough, & R. McDonnell, *Principles of Geographical Information Systems*, 333. JOUR.
- Calle, Z., & Murgueitio, E. (2008). El botón de oro: arbusto de gran utilidad para sistemas ganaderos de tierra caliente y de montaña. *Revista Carta Fedegán*, 108, 54–63. Retrieved from <http://www.fedegan.org.co//alimentacion-y-productividad-carta-fedegan-108>
- Calle, Z., Murgueitio, R., Enrique, C. N., ., ., ., & . (2002). *Enfoques silvopastoriles integrados para el manejo de ecosistemas ganadería productiva y sostenible (RPRT)*.
- Campillo, R., & Sadzawka, R. A. (2006). Acidificación de los suelos y los procesos involucrados. Programa de recuperación de suelos degradados. *Serie Actas*, 38, 44–60.
- Carvalho, M. M., Freitas, V. de P., Almeida, D. S. de, Villaça, H. de A., __, __, & __. (1994). Efeito de árvores isoladas sobre a disponibilidade e composicao mineral da forragem em pastagens de braquiaria. *Sociedade Brasileira de Zootecnia*, 23(5), 709–719. JOUR.
- Diaz, C. (2011). Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización. *Ingeniería E Investigación*, 31(3), 80–90.
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). *Defining and assessing soil quality*. JOUR, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.
- Estrada, E. G. (1990). Elementos secundario: calcio, magnesio, azufre. In F. S. Mojica (Ed.), *Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas*

- y aguas para riegos (p. 324).
- Etchevers, B. J. D., & Padilla, C. J. (2007). Diagnóstico de la fertilidad del suelo. In *Nutrición de Cultivos* (p. 438). México.
- Fassbender, H. W. (1993). *Modelos edafológicos de sistemas agroforestales*. BOOK, Bib. Orton IICA/CATIE.
- Garzón, G. C. A., Cortés, C. A., Camacho, T. J. H., ., ., ., & . (2010). Variabilidad espacial de algunas propiedades químicas en un entisol. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 13(1), 87–95.
- Giraldo, L. A. (2000). *Sistemas Silvopastoriles para la ganadería en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, 87p.
- Gomez, A. A., & Alarcón, C. H. (1975). *Manual de conservación de suelos de ladera*.
- Gómez, A., & Alarcón, H. (1975). *Erosión, Manual de Conservación de Suelos de Ladera*. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.
- González, J., Hahn, C., & Narváez, W. (2014). CARACTERÍSTICAS BOTÁNICAS DE *Tithonia diversifolia* (ASTERALES: ASTERACEAE) EN LA ALIMENTACIÓN ANIMAL. *Boletín Científico Museo de Historia Natural*, 18(2), 45–58.
- Gotway, C. A., Ferguson, R. B., Hergert, G. W., Peterson, T. A., __, & __. (1996). Comparison of kriging and inverse-distance methods for mapping soil parameters. *Soil Science Society of America Journal*, 60(4), 1237–1247. JOUR.
- Henríquez, C., Méndez, J. C., & Masís, R. (2013). Interpolación de variables de fertilidad de suelo mediante el análisis Kriging y su validación. *Agronomía Costarricense*, 37(2), 71–82. Retrieved from <http://www.revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/12763>
- Ibrahim, M., Franco, M., Pezo, D., Camero, A., Araya, J., Mora, J., & Rosales, M. (2001). Potencialidades de los sistemas silvopastoriles para la generación de servicios ambientales. In *Conferencia electronica en potencialidades de los sistemas Silvopastoriles para la generación de servicios ambientales*. FAO. CONF.
- Jaramillo, J. D. F. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Jaramillo, J. D. F. (2006). EFECTO DE LA VARIABILIDAD SISTEMÁTICA DE LA PRODUCCIÓN DE FRÍJOL EN EXPERIMENTOS DE FERTILIZACIÓN. SEGUNDA SIEMBRA. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, 59(1), 3147–3165.
- Jaramillo, J. D. F. (2012a). Variabilidad espacial de algunas propiedades de un Mollisol de clima cálido seco de Antioquia (Colombia). *Revista Agronomía, Universidad de Caldas*, 20(2), 7–17.
- Jaramillo, J. D. F. (2012b). Variabilidad Espacial Del Suelo : Bases Para Su Estudio. *Revista de La Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*, 1, 73–87.
- Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K., Lucas, N., __, __, & __. (2001). *Using ArcGIS geostatistical analyst*.
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a

- guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4–10. JOUR.
- Kravchenko, A. N. (2003). Influence of Spatial Structure on Accuracy of Interpolation Methods. *Soil Science Society of America Journal*, 67, 1564–1571. JOUR. <http://doi.org/10.2136/sssaj2003.1564>
- Lal, R. (1994). *Métodos y normas para evaluar el uso sostenible de los recursos suelo y agua en el trópico*. RPRT.
- Lal, R. (1996). Deforestation and land - use effects on soil degradation and rehabilitation in western Nigeria. I. Soilphysical and hydrological properties. *Land Degradation & Development*, 7, 19–45.
- Libreros, H. (2015). Sistemas silvopastoriles: Opción para la mitigación y adecuación al cambio climático en bosque seco tropical. *Revista Semillas*, 57, 62–67. Retrieved from <http://www.semillas.org.co/sitio.shtml?apc=p1-2--&x=20154766>
- Lozano, Z., Bravo, C., Ovalles, F., Hernández, R. M., Moreno, B., Piñango, L., & Villanueva, G. (2004). Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de la variabilidad espacial de los suelos. *Bioagro*, 16(1), 61–72.
- Mahecha, L. (2000). El silvopastoreo: una alternativa para la producción bovina sostenible y competitiva. *Seminario Nacional: Alternativas Para La Producción Bovina Y Especies No Tradicionales. Medellín, Universidad de Antioquia Y Universidad Nacional*. JOUR.
- 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., Gallego, L. A., Peláez, F. J., .., & . (2002). Situación actual de la ganadería de carne en Colombia y alternativas para impulsar su competitividad y sostenibilidad. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias (Colombian Journal of Animal Science and Veterinary Medicine)*, 15(2), 213–225. <http://doi.org/ir-ART0000358602>
- Munévar, M. F., & Wollum, A. G. (1983). Factores físicos, químicos y biológicos que influyen en la mineralización de la materia orgánica en andosoles. *Suelos Ecuatoriales*, 13, 57–72. JOUR.
- Murgueitio, E. (2002). Sistemas de producción ganadera y sus impactos en la transformación de los ecosistemas andinos de Colombia. Memorias del seminario internacional sobre transformación de ecosistemas. *Universidad Javeriana. Bogotá. Colombia*. JOUR.
- Murgueitio, E., & Calle, Z. (1998). Diversidad biológica en sistemas de ganadería bovina en Colombia. In *Conferencia electrónica de la FAO sobre Agroforestería para la producción animal en Latinoamérica*. CONF.
- Nortcliff, S. (2002). Standardisation of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 88, 161–168.
- Obando, F. H., & Montes, J. M. (2007). Indicadores de calidad del Suelo y Funciones de Transferencia Pedológica en Sistemas de Producción de Mora en el Departamento de Caldas. *Suelos Ecuatoriales*, 37(1), 101–109.
- Ochoa, G., Oballos, J., Sánchez, J., Sosa, J., Manrique, J., & Velásquez, J. (1999).

- Variación del carbono orgánico en función de la altitud. Cuenca del río Santo Domingo. Mérida-Barinas, Venezuela. *Rev. Geog. Venez.*, 41(1), 79–87.
- Onweremadu, E. U., Osuji, G. E., Eshett, E. T., Opara, C. C., Ibeawuchi, I. I., __, & __. (2007). Characterization of soil properties of ownermanaged farms of southeastern Nigeria. *Journal of American Science*, 3, 28–37.
- Páez, M. A., Bustamante, L. A. M., Espitia, B. J. E., Cardenas, C. E., ., ., & . (2014). Análisis del componente suelo en sistemas silvopastoriles establecidos y sistemas tradicionales en fincas ganaderas de piedemonte casanareño. *Revista Ciencia Animal*, 8, 7–19.
- Pankhurst, C. E., Doube, B. M., Pankhurst, C., Gupta, V., __, & __. (1997). Biological indicators of soil health: synthesis. *Biological Indicators of Soil Health.*, 419–435. JOUR.
- Pérez, A., Montejo, I., Iglecias, J., López, O., Martín, D., García, D., ... Hernandez, A. (2009). *Tithonia diversifolia* (Hemsley) A . Gray. *Pastos Y Forrajes*, 32(1), 1–5.
- Pezo, D., & Ibrahim, M. (1997). Sistemas silvopastoriles. Una opción para el uso sostenible de la tierra en sistemas ganaderos. *FIRA Boletín Informativo*, 29(290). JOUR.
- Pezo, D., & Ibrahim, M. (1998). Sistemas Silvopastoriles. Colección de Módulos Agroforestales No. 2. CATIE. *Turrialba, Costa Rica*, 15. JOUR.
- Pinzon, A., & Amézquita, E. (1991). Compactacion de suelos por el pisoteo animal en pastoreo en el pie de monte amazonico colombiano. *Pasturas Tropicales*.
- Ríos, R. N., Cárdenas, A. Y., Andrade Castañeda, H. J., Ibrahim, M., Jiménez Otárola, F., Sancho, F., ... Woo, A. (2006). Escorrentía superficial e infiltración en sistemas ganaderos convencionales y silvopastoriles en el trópico subhúmedo de Nicaragua. JOUR.
- Rivera, J. H. (2003). La Labranza De Los Suelos En El Tropico:¿ Necesidad O Costumbre? Retrieved from http://www.oocities.org/biotropico_andino/cap4.pdf
- Romero, D. A., Marín, S. P., Ortiz, S. R., __, __, __, & __. (2012). Loss of soil fertility estimated from sediment trapped in check dams . South-eastern Spain. *Catena*, 99, 42–53. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2012.07.006>
- 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>
- Sadeghian, S., Rivera, J., Gómez, M. E., ., ., ., & . (1994). Impacto de sistemas de ganadería sobre las características físicas , químicas y biológicas de suelos en los Andes de Colombia. *Agroforestera Para La Producción Animal En Latinoamerica*, 77–95.
- Sánchez, B., Ruiz, M., Ríos, M. ., ., ., ., & . (2005). Materia orgánica y actividad biológica del suelo en relación con la altitud, en la cuenca del río Maracay, Estado Aragua. *Agronomía Tropical*, 55(4), 507–534.
- Simón, G. L. (1996). Leguminosas arbóreas utilizadas para cercas vivas y ramoneo. Santefé de Bogotá. *CORPOICA*, 109–124. JOUR.
- Trangmar, B. B., Yost, R. S., Uehara, G., __, __, & __. (1986). Application of

- geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, 38, 45–94. JOUR.
- Uribe, T. F., Zuluaga S., A. F., Murgueitio R., E., Valencia C., L. M., ZapataC., Á., Solarte P., L. H., ... B., R. (2011). *Establecimiento y manejo de SSP Proyecto Ganadería Colombiana Sostenible* (GEF, BANCO).
- Valenzuela, I. G., & Torrente, A. (2010). Física de Suelos. In *Ciencia del Suelo, Principios Básicos*. (pp. 143–206).
- Velasco, A., Ibrahim, M., Kass, D., Jimenez, F., Platero, G. R., __, & __. (1999). Concentraciones de fósforo en suelos bajo sistema silvopastril de Acacia mangium con Brachiaria mangium con Brachiaria humidicola. *Agroforesteria En Las Americas*, 6(23), 45–47.
- Villatoro, M., Henríquez, C., Sancho, F., __, __, & __. (2008). Comparación de los interpoladores idw y kriging en la variación espacial de ph, ca, cice y p del suelo. *Agronomia Costarricense*, 32(1), 95–105.
- Weber, D. D., & Englund, E. J. (1994). Evaluation and comparison of spatial interpolators II. *Mathematical Geology*, 26(5), 589–603. JOUR.
- Young, A. (1989). *Agroforestry for soil conservation*. [http://doi.org/10.1016/0308-521X\(91\)90121-P](http://doi.org/10.1016/0308-521X(91)90121-P)

ANEXO A

Resultados análisis químicos y físicos de suelos finca El Pañuelo

Muestra	M.O	N	P	K	Ca	Mg	Na	Al	Ca/Mg	Mg/K	Arena	Limo	Arcilla	Textura	pH	Da	Dr	Pt
PSP1	13.50	0.51	6	0.14	1.93	0.39	0.463	1.4	4.9487	2.786	60	22	18	F-A	4.3	1.179	2.27	48.08
PSP2	14.60	0.54	8	0.23	2.16	0.92	0.333	1.3	2.3478	4	70	12	18	F-A	4.3	1.084	2.27	52.25
PSP3	13.34	0.51	13	0.18	7.77	4.25	0.298	0.2	1.8282	23.61	75	7	18	F-A	4.9	1.509	2.38	36.61
PSP4	13.62	0.52	18	0.36	8.04	4.25	0.303	0.5	1.8918	11.81	65	18	17	F-A	4.7	1.591	2.38	33.16
PSP5	14.52	0.54	19	0.28	6.77	3.97	0.318	0.2	1.7053	14.18	64	18	18	F-A	5	1.545	2.5	38.2
PSP6	14.44	0.54	17	0.14	7.56	2.94	0.327	0.4	2.5714	21	69	13	18	F-A	4.8	1.306	2.5	47.76
PSP7	13.79	0.52	45	0.36	10.9	3.46	0.265	0	3.1358	9.611	78	14	8	F-A	6.3	1.328	2.5	46.88
PSP8	13.50	0.51	10	0.92	6.82	2.59	0.305	0	2.6332	2.815	57	25	18	F-A	5.2	1.328	2.38	44.2
PSP9	14.20	0.53	11	0.22	10.1	3.51	0.329	0	2.8632	15.95	67	20	13	F-A	5.3	1.308	2.38	45.06
PSP10	13.34	0.51	13	1.53	6.79	3.13	0.309	0	2.1693	2.046	52	25	23	F-Ar-A	5.7	1.278	2.38	46.32
PSP11	12.33	0.48	28	1.24	8.14	3.62	0.457	0	2.2486	2.919	47	30	23	F	5.5	1.323	2.38	44.41
PSP12	10.45	0.42	0	0.33	12.8	9.65	0.413	0	1.3244	29.24	37	29	34	F-Ar	5.3	1.239	2.27	45.4
PSP13	12.12	0.47	33	0.09	4.88	2.11	0.449	0	2.3128	23.44	47	25	28	F-Ar-A	5.1	1.248	2.27	45.02
PP1	15.21	0.56	0	0.14	0.72	0.19	0.299	0	3.7895	1.357	73	14	13	F-A	4.5	0.883	2.27	61.09
PP2	14.52	0.54	0	0.12	2.17	0.65	0.271	0	3.3385	5.417	78	9	13	F-A	5.9	1.043	2.08	49.87
PP3	16.00	0.58	0	0.39	3.77	1.3	0.375	0	2.9	3.333	68	19	13	F-A	5.6	1.043	2.08	49.85
PP4	14.20	0.53	0	0.33	7.19	4.21	0.418	0.7	1.7078	12.76	81	13	6	A-F	4.8	1.259	2.27	44.52
PP5	9.66	0.39	0	0.13	7.79	3.45	0.336	0	2.258	26.54	81	13	6	A-F	5.3	1.547	2.27	31.83
PP6	9.79	0.4	17	1.25	5.51	3.4	0.276	0	1.6206	2.72	81	14	5	A-F	5.9	1.287	2.5	48.53
PP7	10.97	0.44	1	0.91	10.3	3.7	0.266	0	2.7811	4.066	51	28	21	F-Ar-A	5.9	1.103	2.5	55.87
PP8	8.18	0.34	5	0.26	4.98	1.99	0.322	0	2.5025	7.654	67	17	16	F-A	5.5	1.167	2.5	53.34

ANEXO B

Resultados análisis químicos y físicos de suelos finca Sierra Morena

Muestra	M.O	N	P	K	Ca	Mg	Na	Al	Ca/Mg	Mg/K	Arena	Limo	Arcilla	Textura	pH	Da	Dr	Pt
SMSP1	11.87	0.46	1	0.64	2.35	1.89	0.122	0	1.2434	2.9531	64	7	29	F-Ar-A	5.3	0.887	1.92	53.781
SMSP2	11.48	0.45	7	0.11	2.56	0.62	0.147	0	4.129	5.6364	52	23	25	F-Ar-A	5.2	1.048	1.92	45.397
SMSP3	10.32	0.42	0	0.19	9.22	0.62	0.177	0	14.871	3.2632	37	24	39	F-Ar	5.4	1.097	1.92	42.863
SMSP4	13.58	0.52	5	0.21	8.23	2.15	0.15	0	3.8279	10.238	71	4	25	F-Ar-A	5.5	1.097	2	45.149
SMSP5	11.14	0.44	3	0.16	4.63	1.58	0.153	1.5	2.9304	9.875	40	20	40	Ar	5	1.042	2	47.907
SMSP6	9.97	0.4	3	0.23	6.6	2.69	0.169	2	2.4535	11.696	45	9	46	Ar	5.1	1.09	1.92	43.245
SMSP7	11.53	0.45	2	0.19	7.43	0.68	0.228	0	10.926	3.5789	55	20	25	F-Ar-A	5.8	0.877	1.92	54.328
SMSP8	10.71	0.43	2	0.18	11.83	1.03	0.369	0	11.485	5.7222	65	14	21	F-Ar-A	6.3	1.09	2	45.493
SMSP9	12.88	0.49	8	0.3	12.47	3.83	0.317	0	3.2559	12.767	65	7	28	F-Ar-A	5.7	1.137	2.38	52.233
SMSP10	12	0.47	4	0.19	8.09	3.11	0.187	0	2.6013	16.368	56	22	22	F-Ar-A	5.6	1.097	2.38	53.906
SMSP11	9.35	0.38	6	0.18	16.31	0.41	0.203	0	39.78	2.2778	67	9	24	F-Ar-A	5.6	1.247	2.17	42.526
SMSP12	9.66	0.39	0	0.07	13.06	0.33	0.225	0	39.576	4.7143	49	11	40	Ar-A	5.4	1.1	2.17	49.291
SMSP13	10.97	0.44	1	0.11	10.72	0.64	0.427	0	16.75	5.8182	39	19	42	Ar	6	1	2.27	55.968
SMSP14	8.81	0.37	2	0.13	14.49	0.61	0.321	0	23.754	4.6923	56	23	11	F-Ar-A	6.5	1.34	2.27	40.986
SMSP15	10.58	0.42	5	0.77	5.23	2.31	0.099	1	2.2641	3	65	20	15	F-A	4.5	1.274	2.17	41.299
SMSP16	10.53	0.42	2	0.19	23.54	1.18	0.123	0	19.949	6.2105	45	28	27	F-Ar	5.8	1.13	2.17	47.945
SMP1	13.67	0.52	5	0.39	7.62	1.77	0.116	0.7	4.3051	4.5385	60	20	20	F-Ar-A	5.1	1.214	2.3	47.202
SMP2	10.18	0.41	7	0.16	4.83	2.08	0.227	0	2.3221	13	76	7	17	F-A	5.4	1.457	2.27	35.826
SMP3	13.83	0.52	9	0.15	9.06	2.14	0.156	0	4.2336	14.267	76	8	16	F-A	5.7	1.257	2.27	44.617
SMP4	12.54	0.49	8	0.38	2.11	0.53	0.119	0	3.9811	1.3947	60	10	30	F-Ar-A	5.3	0.995	2.27	56.175
SMP5	12.59	0.49	5	1.20	4.95	1.24	0.119	0	3.9919	1.0333	75	4	21	F-Ar-A	5.3	1.184	2.27	47.829
SMP6	13.21	0.50	9	0.16	7.04	0.67	0.183	0.5	10.507	4.1875	67	14	19	F-A	5.1	1.048	2.27	53.836

SMP7	12.67	0.49	5	0.21	8.78	5.48	0.113	0	1.6022	26.095	61	3	36	Ar-A	5.4	1.184	2.27	47.829
SMP8	14.44	0.54	14	0.52	8.19	1.89	0.116	0	4.3333	3.6346	54	14	32	F-Ar-A	5.2	0.934	2.27	58.835
SMP9	13.17	0.50	9	0.19	21.41	0.17	0.174	0	125.94	0.8947	51	23	26	F-Ar-A	5.8	1.384	2.27	39.011
SMP10	13.79	0.52	10	0.24	13.24	3.90	0.168	0	3.3949	16.25	50	15	35	Ar-A	6.0	1.184	2.38	50.241

ANEXO C

Resultados análisis químicos y físicos de suelos finca El Palmar

Muestra	M.O	N	P	K	Ca	Mg	Na	Al	Ca/Mg	Mg/K	Arena	Limo	Arcilla	Textura	pH	Da	Dr	Pt
PALSP1	13.09	0.50	7	0.15	3.56	3.72	0.339		0.957	24.8	55	20	25	F-Ar-A	5.7	1.21	2	39.5
PALSP2	13.05	0.50	1	0.14	4.43	3.41	0.159		1.299	24.4	61	20	19	F-A	5.6	1.3	2.17	40
PALSP3	14.24	0.53	1	0.06	4.04	3.46	0.238		1.168	57.7	51	29	20	F-Ar-A	5.7	1.1	2	45.1
PALSP4	13.13	0.50	2	0.09	4.78	3.02	0.262		1.583	33.6	56	19	25	F-Ar-A	5.2	1.03	2.08	50.5
PALSP5	14.12	0.53	6	0.15	3.10	0.39	0.288		7.949	2.6	59	20	21	F-Ar-A	5.6	1.17	2.27	48.4
PALB1	14.12	0.53	8	0.20	5.62	0.18	0.267		31.22	0.9	49	25	26	F-Ar-A	5.7	1.1	1.92	42.7
PALP1	16.54	0.59	6	0.11	2.21	0.51	0.268		4.333	4.64	30	43	27	F-Ar	5.5	1.2	2.08	42.3
PALP2	15.01	0.55	5	0.20	5.72	4.61	0.169		1.241	23.1	34	29	37	F-Ar	5.4	1.03	2	48.7
PALP3	13.99	0.53	4	0.10	5.19	4.12	0.164		1.26	41.2	45	31	24	F	5.6	1.13	2.17	47.8
PALP4	16.39	0.59	5	0.29	2.01	5.18	0.134		0.388	17.9	51	26	23	F-Ar-A	5.3	1.11	2.08	46.6
PALP5	16.15	0.58	7	0.16	4.57	2.87	0.153		1.592	17.9	55	26	19	F-A	5.6	1.09	2.17	49.7
PALP6	13.83	0.52	9	0.19	3.99	5.29	0.190		0.754	27.8	69	15	16	F-A	5.5	1.08	2	46.1
PALP7	17.39	0.61	6	0.19	7.67	4.67	0.205		1.642	24.6	63	15	22	F-Ar-A	5.3	1.05	2.08	49.6

ANEXO D

Resultados análisis químicos y físicos de suelos finca San Francisco

Muestra	M.O	N	P	K	Ca	Mg	Na	Al	Ca/Mg	Mg/K	Arena	Limo	Arcilla	Textura	pH	Da	Dr	Pt
SP1	20.75	0.68	7	0.91	2.94	0.71	0.337	1.8	4.1	0.8	45	42	13	F	4.7	0.56	2	72.1
SP2	28.47	0.80	5	0.29	1.92	0.21	0.291	1.0	9.1	0.7	61	26	13	F-A	4.8	0.53	2	73.3
SP3	24.25	0.74	11	0.53	1.26	0.79	0.257	0.8	1.6	1.5	69	20	11	F-A	4.6	0.53	1.85	71.4
SP4	25.28	0.76	4	0.17	6.22	0.63	0.221	0	9.9	3.7	65	20	15	F-A	5.4	0.65	1.85	64.8
SP5	25.88	0.77	5	0.19	0.74	0.19	0.261	0	3.9	1.0	68	23	9	F-A	5.2	0.56	1.78	68.4
SP6	28.79	0.80	1	0.25	0.80	0.21	0.237	0.8	3.8	0.8	54	35	11	F-A	4.8	0.5	1.78	71.6
SP7	26.06	0.77	1	0.25	1.04	0.23	0.263	0.5	4.5	0.9	55	32	13	F-A	5.0	0.55	1.85	70
SP8	25.25	0.76	6	0.18	1.14	0.28	0.298	0	4.1	1.6	50	37	13	F	5.3	0.51	1.85	72.3
SP9	19.61	0.66	0	0.12	0.21	0.10	0.176	0.8	2.1	0.8	40	37	23	F	4.9	0.62	1.85	66.6
P1	25.97	0.75	2	0.17	0.35	0.19	0.171	0.3	1.8	1.1	55	32	13	F-A	5.0	0.63	1.56	59.6
P2	25.03	0.76	3	0.16	0.21	0.13	0.200	0.5	1.6	0.8	69	20	11	F-A	5.0	0.61	1.61	61.8
P3	23.32	0.73	0	0.14	0.15	0.12	0.189	0.5	1.3	0.9	62	21	17	F-A	4.9	0.62	1.61	61.5
P4	23.52	0.73	0	0.11	0.17	0.09	0.173	0	1.9	0.8	54	34	12	F-A	5.2	0.57	1.51	62.2
P5	28.28	0.79	0	0.24	0.59	0.17	0.205	1.0	3.5	0.7	44	47	9	F	4.9	0.61	1.51	59.6
P6	25.70	0.76	2	0.20	0.31	0.11	0.212	0.5	2.8	0.6	60	21	19	F-A	4.9	0.6	1.56	61.5
B1	23.73	0.79	1	0.61	1.65	0.61	0.179	0.8	2.7	1.0	64	21	15	F-A	4.6	0.5	1.61	68.7

ANEXO E

Resultados análisis químicos y físicos de suelos finca Montelindo

Muestra	M.O	N	P	K	Ca	Mg	Na	Ca/Mg	Mg/K	Al	Arena	Limo	Arcilla	Textura	pH	Da	Dr	Pt
SP1	15.60	0.57	9	0.85	3.46	1.33	0.199	2.602	1.565	0	50	31	19	F-A	5.3	0.95	2.17	56.2
SP2	14.44	0.54	8	0.86	3.33	1.13	0.181	2.947	1.314	0	56	25	19	F-A	5.2	0.97	2.17	55.2
SP3	13.21	0.50	11	0.63	3.68	1.02	0.207	3.608	1.619	0	53	25	22	F-Ar-A	5.3	1.05	2.08	49.3
SP4	12.84	0.49	2	0.18	2.26	1.04	0.212	2.173	5.778	0.5	63	17	20	F-Ar-A	5.0	1.1	2.08	47.1
SP5	13.34	0.51	2	0.15	2.22	0.57	0.239	3.895	3.800	0.3	53	21	26	F-Ar-A	5.1	0.97	2.08	53.5
SP6	14.44	0.54	3	0.26	3.82	0.79	0.275	4.835	3.038	0	51	41	8	F	5.7	0.95	2.08	54.3
SP7	12.29	0.48	12	0.29	4.29	1.03	0.298	4.165	3.552	0	49	27	24	F-Ar-A	5.2	1.31	2.08	37.2
SP8	12.50	0.48	6	0.78	4.22	1.08	0.283	3.907	1.385	0	59	25	16	F-A	5.6	1.18	2.17	45.6
P1	14.68	0.55	16	0.63	8.16	1.89	0.204	4.317	3.000	0	60	26	14	F-A	5.7	0.89	1.82	51.3
P2	14.93	0.55	1	0.20	2.32	0.61	0.291	3.803	3.050	0	50	31	19	F	5.2	1.02	1.92	46.9
P3	14.56	0.54	9	0.27	2.35	0.68	0.323	3.456	2.519	0.5	46	40	14	F	5.0	0.99	1.92	48.5
P4	14.97	0.55	9	0.86	3.19	1.26	0.176	2.532	1.465	0	60	26	14	F-A	5.3	1.05	1.82	42.4
P5	16.43	0.59	3	1.05	9.29	2.43	0.179	3.823	2.314	0	46	26	28	F-Ar-A	5.9	0.93	1.82	49.1
P6	16.29	0.59	8	0.53	3.60	1.54	0.177	2.338	2.906	0	55	26	19	F-A	5.4	0.9	1.82	50.7
B1	11.48	0.45	4	0.43	4.01	1.21	0.195	3.314	2.814	0.6	49	20	31	F-Ar-A	4.8	1.08	1.82	40.6