

ESTUDIO DEL PARAMAGNETISMO EN EL SUELO Y SU RELACIÓN CON LAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS

PAUL GUILLERMO LÓPEZ POSSO

INGENIERÍA AGRÍCOLA

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA**

2011



ESTUDIO DEL PARAMAGNETISMO EN EL SUELO Y LA RELACIÓN CON SUS PROPIEDADES
FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS

PAUL GUILLERMO LÓPEZ POSSO

Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Agrícola

Director:

ORLANDO ZUÑIGA ESCOBAR Ph. D.
Profesor titular Universidad del Valle

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA AGRÍCOLA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE - EIDENAR
SANTIAGO DE CALI
2011

NOTA DE ACEPTACIÓN

DIRECTOR

JURADO

JURADO

Santiago de Cali, Diciembre de 2011

“La Facultad y los Jurados de Tesis no serán
responsables de las ideas emitidas
por el o los autores de la misma”.

Artículo 24, Resolución 04 de 1974.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por su paciencia y apoyo constante e incondicional en esta etapa de mi vida profesional.

A la Universidad del Valle, por permitirme la formación como Ingeniero Agrícola.

Al profesor Orlando Zúñiga, por el aporte de sus conocimientos y experiencia para el desarrollo de este trabajo.

Al Ingeniero Juan Carlos Osorio, Por su colaboración con los análisis químicos en la hacienda La Araucana; y su orientación en el desarrollo de este estudio.

Al Medico Julio Calonge, por permitir la realización de este estudio en La hacienda La Araucana.

A cada uno de los integrantes del grupo ILAMA, Cristián, Ramiro, Sebastián y Don Emilio. Por su acompañamiento, asesoría y paciencia en las labores de muestreo y procesamiento de la información.

A mis compañeros de carrera, por compartir conmigo esta etapa universitaria.

A mis amigos, y a todas aquellas personas que de una u otra forma hicieron parte de este proceso formativo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	3
JUSTIFICACIÓN	5
1. OBJETIVOS.....	7
1.1. Objetivo general.....	7
1.2. Objetivos específicos.....	7
2. ANTECEDENTES.....	8
3. MARCO TEÓRICO	11
3.1. BREVE RESEÑA HISTÓRICA ACERCA DEL MAGNETISMO	11
3.2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DEL MAGNETISMO.	13
3.2.1. Fuerza ejercida por un campo magnético.....	13
3.2.2. Movimiento de una carga puntual en el interior de un campo magnético.	14
3.2.3. Flujo magnético	15
3.3. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES MAGNÉTICOS	16
3.4. MAGNETISMO EN LA MATERIA: DIAMAGNETISMO, PARAMAGNETISMO Y FERROMAGNETISMO	18
3.4.1. Diamagnetismo.....	20
3.4.2. Paramagnetismo.....	20
3.4.3. Ferromagnetismo.....	21
3.5. APLICACIONES DEL MAGNETISMO EN LA AGRICULTURA.....	22
3.5.1. Acción del campo magnético sobre el suelo.....	22
3.5.2. Uso de campos magnéticos permanentes.....	22
3.5.3. Influencia de campos magnéticos variables	23
3.6. EL SUELO	24
3.6.1. Calidad, fertilidad de los suelos	25
3.6.2. Degradación física del suelo.....	25
3.7. UNA VISIÓN ANALÍTICA Y SINTÉTICA DEL SUELO	27
3.7.1. Potencial Productivo del suelo.....	30
3.7.2. Propiedades analíticas del suelo	30
3.7.3. Propiedades sintéticas del suelo	31
3.7.4. Selección de variables para la determinación del PPS.....	35

3.8.	SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA Ó PARAMAGNETISMO	36
3.8.1.	Equipos para la medición de la Susceptibilidad magnética	37
3.9.	LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)	40
3.9.1.	Aplicación de los SIG en el campo medioambiental	41
3.9.2.	La representación de los datos geográficos en un SIG	42
3.9.3.	El modelo <i>raster</i>	42
3.9.4.	Interpolación a partir de puntos	42
3.9.5.	Método de interpolación Spline.....	43
3.9.7.	Análisis multivariado de los raster	44
3.9.8.	Herramienta Band Collection Stats (estadísticas de colección de bandas)	44
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	1
4.1.	Ubicación y descripción de los sitios de muestreo.....	1
4.1.1.	Hacienda La Araucana	2
4.1.2.	Hacienda Las Gramas	4
4.1.3.	Hacienda Santa Fe	6
4.2.	Propiedades de suelo medidas en el experimento	7
4.3.	Metodología	10
4.3.1.	Georreferenciación	10
4.3.2.	Toma de Muestras.....	11
4.3.3.	Procesamiento de muestras, análisis de los datos y parámetros.	14
4.3.4.	Medición del paramagnetismo.	14
4.3.5.	Generación de los mapas de propiedades del suelo	15
4.4.	Calculo del Potencial Productivo del Suelo (PPS)	20
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
5.1.	HACIENDA LA ARAUCANA.....	24
5.1.1.	Resultado del análisis textural del suelo	24
5.1.2.	Paramagnetismo en el suelo	25
5.1.3.	Paramagnetismo y las propiedades físicas del suelo	26
5.1.4.	Paramagnetismo y las propiedades sintéticas del suelo	28
5.1.5.	Análisis espacial de las propiedades físicas del suelo.....	31
5.1.6.	Paramagnetismo y las propiedades químicas en el suelo	33
5.1.7.	Potencial productivo del suelo	37
5.2.	HACIENDA LAS GRAMAS.....	39

5.2.1.	Resultado del análisis textural del suelo	39
5.2.2.	Paramagnetismo en el suelo	39
5.2.3.	Paramagnetismo y las propiedades físicas del suelo	40
5.2.4.	Paramagnetismo y las propiedades sintéticas del suelo	41
5.2.5.	Paramagnetismo y las propiedades químicas del suelo	42
5.2.6.	Potencial Productivo del Suelo	43
5.3.	HACIENDA SANTA FE.....	45
5.3.1.	Resultado del análisis textural del suelo	45
5.3.2.	Paramagnetismo en el suelo	45
5.3.3.	Paramagnetismo y las propiedades físicas del suelo	46
5.3.4.	Paramagnetismo y las propiedades físicas del suelo	48
5.3.5.	Paramagnetismo y la producción en caña de azúcar.	48
5.3.6.	Potencial Productivo del suelo	49
CONCLUSIONES		51
RECOMENDACIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN		53
BIBLIOGRAFÍA.....		54
ANEXOS.....		a

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Flujo magnético	15
Figura 2. Dinámica no lineal del suelo	27
Figura 3. Visión energética del suelo	29
Figura 4. Enfoque analítico – sintético para el estudio del suelo.	29
Figura 5. Esquema del sistema suelo-cilindro.	32
Figura 6. Sistema por medio del cual se procesan las muestras de suelo en el laboratorio.....	33
Figura 7. Método de cuatro electrodos: arreglo Wenner (calicatas eléctricas)	34
Figura 8. Sistema de susceptibilidad magnética <i>Bartington MS2</i>	37
Figura 9. Dispositivo para medir el paramagnetismo del suelo PCSM (Paramagnetic Count Soil Meter)	39
Figura 10. Ubicación de las haciendas en el departamento del Valle del Cauca.....	1
Figura 11. Distribución espacial de la hacienda La Araucana.	2
Figura 12. Zona en barbecho	3
Figura 13. Zona cultivada.	3
Figura 14. Zona de bosque.....	3
Figura 15. Distribución espacial Hacienda Las Gramas	4
Figura 16. Hacienda Las Gramas.....	5
Figura 17. Distribución espacial de la hacienda Santa Fe.....	6
Figura 18. Hacienda Santa Fe.....	7
Figura 19. Clasificación de los tipos de muestras.....	11
Figura 20. Extracción de muestras inalteradas.....	12
Figura 21. Toma de la resistividad eléctrica in situ.	13
Figura 22. Diagrama de extracción de muestras de suelo por punto.....	13
Figura 23. Enrasado y saturación muestras en los cilindros plásticos.....	14
Figura 24. Drenaje y medición del paramagnetismo para cada muestra.....	15
Figura 25. Interfaz de Generación del <i>Raster</i> ó superficie empleando el método de interpolación <i>Spline</i>	16
Figura 26. Generación de la distribución espacial de las propiedades analizadas.....	17
Figura 27. Selección de la aplicación <i>Band Collection Statistics</i> en ArcGIS 9.3.....	18
Figura 28. Uso de la interfaz de la aplicación <i>Band Collection Statistics</i>	19
Figura 29. Valores estadísticos descriptivos, Matriz de covarianza y matriz de correlación arrojada por la aplicación <i>Band Collection Statistics</i>	20
Figura 30. Distribución espacial del grupo textural en la Hacienda La Araucana.	24
Figura 31. Distribución espacial de la propiedad paramagnetismo en la hacienda La Araucana.	25
Figura 32. Densidad aparente Vs. Paramagnetismo	26
Figura 33. Microporosidad Vs Paramagnetismo	27
Figura 34. Macroporosidad Vs Paramagnetismo	28
Figura 35. Conductividad Térmica Vs Paramagnetismo	29
Figura 36. Resistividad eléctrica Vs. Paramagnetismo	30
Figura 37. Humedad gravimétrica Vs. Paramagnetismo	30

Figura 38. Distribuciones espaciales de propiedades físicas y sintéticas de los suelos en la hacienda La Araucana.	32
Figura 39. Fósforo Vs. Paramagnetismo	33
Figura 40. Magnesio intercambiable Vs Paramagnetismo	34
Figura 41. Sodio intercambiable Vs Paramagnetismo	34
Figura 42. Boro Vs. Paramagnetismo	35
Figura 43. Manganeseo Vs. Paramagnetismo	35
Figura 44. pH promedio por zonas	36
Figura 45. Distribución espacial de la actividad microbiana en la hacienda La Araucana.	36
Figura 46. Potencial Productivo del Suelo de la hacienda La Araucana	37
Figura 47. Potencial Productivo del Suelo Vs. Paramagnetismo.	38
Figura 48. Distribución espacial de los grupos texturales en la hacienda Las Gramas.	39
Figura 49. Distribución espacial del paramagnetismo en la Hacienda Las Gramas.	40
Figura 50. Gráfico de tendencia lineal entre Paramagnetismo y la Densidad Aparente.	41
Figura 51. Distribuciones espaciales de algunas propiedades físicas del suelo.	42
Figura 52. Distribuciones espaciales para el Potasio y el pH.	43
Figura 53. Potencial Productivo del Suelo en la Hacienda Las Gramas.	44
Figura 54. Grupos texturales en la hacienda Santa Fe.	45
Figura 55. Distribución espacial del paramagnetismo en la hacienda Santa Fe.	46
Figura 56. Conductividad térmica promedio en la hacienda Santa Fe.	47
Figura 57. Paramagnetismo promedio en la hacienda Santa Fe.	47
Figura 58. Gráfico de paramagnetismo contra TCH	48
Figura 59. Potencial productivo del suelo en la hacienda Santa Fe.	49
Figura 60. Figura. Diagrama de barras de Paramagnetismo Vs PPS Vs TCH	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fuerza sobre un gramo de muestra en un campo magnético con $B_z = 18000$ gauss $dB/dz = 1700$ gauss/cm. Sentido de la fuerza: hacia abajo +, hacia arriba –.....	17
Tabla 2. Propiedades analíticas y sintéticas utilizadas en la determinación del PPS	35
Tabla 3. Características generales de las haciendas muestreadas.....	1
Tabla 4. Propiedades físicas y biológicas del suelo que se determinaran en el experimento y el laboratorio responsable del análisis.....	8
Tabla 5. Propiedades Químicas del suelo que se determinaran en el experimento y el laboratorio responsable del análisis.	9
Tabla 6. Puntos de muestreo en los sitios de estudio.....	10
Tabla 7. Variables utilizadas en la determinación del Potencial Productivo del Suelo (PPS)	21
Tabla 8. Resumen de correlaciones y promedios de zonas estudiadas de propiedades del suelo con el paramagnetismo del suelo.....	38
Tabla 9. Resumen de correlaciones espaciales presentadas en la hacienda Las Gramas.	44

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Resultados Análisis de propiedades Hacienda La Araucana. Laboratorio de Física Ambiental – Universidad del Valle.	b
ANEXO 2. Resultados Análisis de propiedades Hacienda La Araucana. Laboratorio AGRILAB.	c
ANEXO 3. Resultados Análisis de propiedades Hacienda Las Gramas. Laboratorio de Física Ambiental – Universidad del Valle.	d
ANEXO 4. Resultados Análisis de propiedades Hacienda Las Gramas. Laboratorio AGRILAB.	e
ANEXO 5. Resultados Análisis de propiedades Hacienda Santa Fe. Laboratorio de Física Ambiental – Universidad del Valle.	f
ANEXO 6. Resultados Análisis de propiedades Hacienda Santa Fe. Laboratorio AGRILAB.	g
ANEXO 7. Matriz de correlaciones físicas y biológicas - Hacienda La Araucana.	h
ANEXO 8. Matriz de correlación de propiedades químicas - Hacienda La Araucana.	i
ANEXO 9. Matriz de correlaciones físicas y biológicas - Hacienda Las Gramas.	j
ANEXO 10. Matriz de correlación de propiedades químicas - Hacienda Las Gramas.	k
ANEXO 11. Matriz de correlaciones físicas y biológicas - Hacienda Las Santa Fe.	l
ANEXO 12. Matriz de correlación de propiedades químicas - Hacienda Santa Fe.	m

RESUMEN

El estudio del paramagnetismo con relación a las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, ha evaluado los conceptos básicos de esta propiedad y su aplicación como técnica complementaria para el diagnóstico del estado de este recurso natural.

Para la llevar a cabo el estudio se seleccionaron tres sitios donde fue evaluada esta propiedad, que se diferenciaron en cuanto a las prácticas agrícolas y el nivel de labranza aplicado; estos sitios se encuentran ubicados en los municipios de Santiago de Cali, Dagua y Roldanillo, donde se realizaron labores de toma de muestras para la determinación de las demás propiedades analíticas y sintéticas del suelo.

Las mediciones de paramagnetismo han sido realizadas con un dispositivo que determina el valor de la susceptibilidad magnética en materiales que emiten campos magnéticos con bajas frecuencias, bajo unidades de medida CGS y de forma eficiente en laboratorio.

Para el análisis de los resultados obtenidos fueron empleados Sistemas de Información Geográfica (SIG) que se utilizaron para la elaboración de los mapas correspondientes a cada propiedad en los lugares estudiados, como también el cálculo de las correlaciones espaciales entre el paramagnetismo y las demás propiedades analíticas y sintéticas utilizadas para el diagnóstico de estado de los suelos.

En los resultados se encontraron correlaciones espaciales altas entre el paramagnetismo y algunas propiedades físicas de los suelos relacionadas directamente con la calidad de laboreo del mismo, como es el caso de la densidad aparente, que alcanzó valores de correlación espacial hasta del 96%, este hecho permitió también establecer relaciones de tipo lineal entre las dos propiedades, encontrándose un valor de correlación de pearson (r^2) del orden de 0,9.

También se presentaron correlaciones espaciales entre el paramagnetismo con propiedades como la microporosidad, y la humedad gravimétrica del suelo con valores alcanzados de 86% y 89% respectivamente. Conjuntamente se encontraron correlaciones altas con propiedades sintéticas de suelo como la Conductividad Térmica y la Resistividad Eléctrica.

Con respecto de las propiedades químicas y biológicas del suelo y el paramagnetismo se evidenció algunas tendencias sin correlaciones espaciales altas o significativas; aunque no de forma uniforme o recurrente en los casos estudiados.

En general el paramagnetismo del suelo resulta ser una propiedad sintética que permite inferir inicialmente el estado físico del suelo relacionado con la calidad de laboreo de manera eficiente y con un método no destructivo.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un sistema complejo: consiste de componentes sólidos (minerales y orgánicos), irregularmente fragmentados, variadamente asociados y arreglados en un intrincado y complicado factor geométrico. (IGAC, 1990).

Para estudiar este sistema complejo existen diversas metodologías que permiten caracterizarlo, sin embargo, y puesto que son métodos fragmentarios no tienen en cuenta que el estudio del suelo puede depender de diversos factores, por lo que en algunos casos la información que brindan estos métodos no son suficientes.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto, cuando se desea hacer la caracterización física de un suelo con fines de diagnosticar sus posibles problemas de manejo y conservación, se encuentra que una de las principales dificultades reside en la selección de los métodos y sus variables para tal caracterización. (Pla, 1983.). Sin embargo es posible complementar el estudio de suelos empleando las metodologías convencionales complementadas con nuevas técnicas que involucren un estudio holístico del suelo a fin de una mejor caracterización.

Sin embargo, es necesario que estos métodos sean acompañados de tecnologías complementarias que mejoren la precisión y la localización de los problemas en el suelo como los Sistemas de Información Geográfica; de esta forma tomar decisiones que permitan corregir o mitigar el impacto de la agricultura sobre el recurso suelo.

Dentro de estas propuestas se encuentran el estudio acerca de los efectos que tiene el magnetismo en el suelo. Durante los últimos años el número de investigaciones enfocadas a determinar el efecto del campo magnético en el desarrollo y crecimiento de cultivos está aumentando. En líneas generales, los estudios realizados muestran relación entre el tratamiento magnético y el desarrollo de las plantas. No obstante, debido a la diversidad de factores involucrados se hace necesario realizar más estudios para determinar claramente las relaciones existentes (Zúñiga *et al.* 2003).

Por lo tanto se propuso una metodología que permitiera la medición y posterior relación del paramagnetismo con las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos que tuviera en cuenta la cantidad de muestra en un volumen establecido de suelo y el tipo de mineral o la posible composición del mismo. Estos resultados complementados con la ubicación del estado del suelo en cuanto a sus propiedades empleando mapas y correlaciones para el establecimiento de posibles relaciones.

El objetivo de este trabajo es el de establecer las relaciones entre una propiedad que describe la susceptibilidad magnética (Paramagnetismo) y su relación con las propiedades convencionales de suelo más utilizadas para el diagnóstico del estado actual de los mismos; de esta manera plantear una novedosa técnica acompañada de una metodología rápida, de bajo costo y no destructiva.

JUSTIFICACIÓN

Las metodologías empleadas actualmente para el diagnóstico del estado de los suelos, a fin de medir el grado de degradación de los mismos, se basan en métodos fraccionarios que no tienen en cuenta la naturaleza compleja del suelo, por lo que en ocasiones se proporcionan diagnósticos que no evidencian de forma clara problemas asociados a prácticas como la labranza y que en consecuencia afectan las decisiones que se requieran tomar para mejorar la calidad del suelo, o ante la presencia de alguna limitación, evitar o mitigar este tipo de problemas.

El análisis de los suelos puede suministrar información muy valiosa sobre la necesidad de usar fertilizantes para aumentar el rendimiento de las cosechas. Sin embargo debe tenerse en cuenta que estos análisis no son una panacea; hay además otros factores que afectan el crecimiento de las plantas y, por lo tanto deben estudiarse si se quiere aumentar la producción (ICA, 1992).

Por lo tanto, La metodología desarrollada, se basa en la necesidad de realizar un esfuerzo por complementar desde una visión cuántica del pensamiento, la visión actual de fraccionar el conocimiento (física, química y biología de suelos) con una visión holística de la dinámica del suelo que garantice procesos de conservación de los recursos naturales y producción armónica de los mismos (Zúñiga et al, 2001).

La propuesta de medición del paramagnetismo en el suelo, consiste en un método sintético que considera diversos factores físicos y químicos, para medir el estado de este con base en su susceptibilidad aparente de un material a la inducción de un campo magnético.

Teniendo en cuenta lo anterior, el paramagnetismo puede ser una propiedad complementaria que contribuya a mejorar el conocimiento de la complejidad del suelo a partir de la identificación de su efecto en cuanto al análisis de los suelos, de tal forma que se pueda establecer un parámetro que caracterice su estado.

Por lo tanto, la medición del paramagnetismo en el suelo puede proporcionar una guía rápida y precisa que permita caracterizar el estado del suelo a fin de contribuir con el mejoramiento o mantenimiento de sus propiedades del suelo. Además de su complementación con herramientas como los Sistemas de Información Geográfica que se ha convertido en los últimos años en uno de los referentes de la agricultura de precisión.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

- Contribuir al desarrollo del conocimiento de la relación suelo – planta a través del estudio del paramagnetismo del suelo.

1.2. Objetivos específicos.

- Establecer una metodología para la medición del paramagnetismo en el suelo a partir de muestras tomadas en campo.
- Determinar las relaciones entre el paramagnetismo y las propiedades físicas químicas y biológicas del suelo.
- Estimar la relación existente entre el paramagnetismo y el Potencial Productivo del suelo.
- Estimar una posible relación del paramagnetismo sobre la producción en cultivos, en un caso particular como la caña de azúcar.

2. ANTECEDENTES

Las mediciones y los tratamientos que consideran las propiedades magnéticas en los suelos han sido de mucho estudio a fin de correlacionar las propiedades magnéticas de los suelos con diferentes factores de su estructura.

Arshad *et al.* (1988) determinó las diferencias en la composición de la materia orgánica asociada con complejos orgánico-minerales, paramagnéticos y no-magnéticos sometidos a diferentes fuerzas del campo magnético.

Muller y Gallas. (1991) estudiaron el paramagnetismo en el desgaste de la caolinita a partir de lo que los autores denominan “centros paramagnéticos” Este estudio se realizó en suelos lateríticos.

Vásquez *et al.* (1998) estudio el magnetismo en rocas y su aplicación en paleosuelos donde también se midió la susceptibilidad del suelo sometido a diferentes intensidades de campo magnético a fin de detectar grandes cambios químicos en el suelo en los resultados obtenidos se puede afirmar que los paleosuelos estudiados tienen componente magnético principal a la magnetita-titanomagnetita, cuya señal es la más importante. Sin embargo, superpuesta a esta señal se detecta la presencia de otros minerales como la goethita. El aporte de la fracción paramagnética, en la susceptibilidad no sería despreciable dada la gran cantidad de dichos minerales presentes.

Jezierski *et al.* (1999) emplearon la RPE para determinar la estabilidad de los radicales transitorios en cuatro tipos de ácidos húmicos extraídos a partir de compost, de suelo y el carbón.

Cuero y Tulande (2004), pertenecientes al Grupo de Investigación en Ciencias Ambientales y de la Tierra – ILAMA de Universidad del Valle; evaluaron la estimulación magnética con campo magnético variable en la cachaza seca y en el período de compostaje de la cachaza verde de caña de azúcar (*saccharum officinarum* L.) tratadas con microorganismos benéficos, obteniendo que para potenciar contundentemente el proceso de descomposición de la cachaza fresca se recomienda emplear

estimulación magnética con campo magnético de 4.00 mT, producido a una frecuencia de 25 Hz, durante al menos 120 minutos, con aplicaciones de microorganismos.

Ipaz y López (2004), tesistas del grupo ILAMA, desarrollaron un equipo dinámico de estimulación magnética con campos electromagnéticos variables para fluidos. Este equipo permitió la realización de experimentos a nivel de laboratorio en donde se estudió el efecto de la estimulación magnética del agua y microorganismos, en solución aplicada como riego, sobre la germinación de semillas y plántulas de sorgo.

Bartel *et al.* (2005) estudiaron las propiedades de diferentes suelos en La Plata Argentina midiendo parámetros como la susceptibilidad al campo magnético encontrando que el descenso en el valor de la susceptibilidad hacia los horizontes superficiales, se interpreta como consecuencia de la disolución de los óxidos de hierro detríticos, este proceso es, en esta área, más intenso en condiciones de suelos mal drenados.

CVC (2009), el Grupo de Investigación en Ciencias Ambientales y de la Tierra ILAMA, recuperó suelos degradados por salinidad en haciendas ubicadas en los municipios de Palmira, Roldanillo y Candelaria; realizando una comparación entre tecnologías convencionales y el de biofertilizantes estimulados con electromagnetismo. Los datos de las propiedades fisiológicas del cultivo de maíz y las propiedades físicas y biológicas de suelo en Las Gramas de Roldanillo demuestran totalmente el enriquecimiento nutricional del suelo con el tratamiento electromagnético con biofertilizantes al aumentar la producción del cultivo del maíz en un 45%.

Peña (2010), vinculado al Grupo de investigación de ILAMA, participó como Joven Investigador en el año 2009, su estudio mejoró la configuración del equipo de estimulación magnética y se analizó la eficiencia productiva y disminución del proceso de compostaje utilizando el tratamiento de cachaza fresca con microorganismos estimulados magnéticamente (FME), Como resultado este tratamiento, presentó una aceleración en el proceso de compostaje en un 49 % de acuerdo a la medición de la actividad microbiana de la cachaza, es decir que reduce en casi la mitad el tiempo de compostaje de la cachaza, demostrando así la efectividad de la técnica electromagnética.

Barragán (2010), planteó una metodología para la caracterización magnética de suelos en el área de Manizales - Colombia. El estudio consistió en evaluar la susceptibilidad magnética a tres diferentes frecuencias, 9, 0.465, 4.65 kHz en núcleos de suelo a diferentes profundidades; Con el objetivo de detectar la presencia de minerales en estado superparamagnético, Encontrándose un incremento de la susceptibilidad magnética con la profundidad. También se concluyó que a partir de las medidas de susceptibilidad magnética a tres diferentes frecuencias sin un patrón definido indicando la posible presencia de contaminación en el suelo.

Otros resultados de este estudio, mostraron un incremento de la susceptibilidad magnética con la profundidad en el horizonte A. La susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia fue un parámetro que aparecía entre 1% y 6% en la mayoría de los núcleos indicando la presencia de minerales en el estado superparamagnético (SP) con relativamente bajas concentraciones.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. BREVE RESEÑA HISTÓRICA ACERCA DEL MAGNETISMO¹

Históricamente, las fuerzas magnéticas se observaron por primera vez en conexión con el comportamiento de piedras imanes naturales. Existen pruebas de que los chinos conocían los fenómenos magnéticos ya en el año 2637 a.C.

Primeras observaciones en Grecia

La piedra imán, o magnetita (Fe_3O_4) que se encontraba en magnesia, ciudad de Grecia, y es mencionada en los escritos de *Thales de Mileto* (625 – 547 a.C.) como una piedra que presenta la propiedad de atraer el hierro. Aristoteles (384 – 322 a.C.) registró la imantación del hierro dulce bajo la acción de imanes naturales.

Estudios medievales del imán

Pierre de Maricourt en 1269 evidenció una serie de fenómenos magnéticos fundamentales:

- “El polo norte de una piedra imán puede atraer el polo sur de otra, y viceversa; si se aproximan el polo norte de una al polo norte de la otra se ve a la piedra huir.”
- Un imán imanta por contacto a un trozo de hierro, de tal forma que la piedra imán y el hierro imantado se atraen y se repelen de acuerdo con la misma ley que dos piedras imán.”

Otros escritores medievales pensaron que el imán podía curar la melancolía y que tenía poderes afrodisiacos, que podía sanar la gota, artritis, envenenamiento y calvicie.

Nacimiento de la ciencia del magnetismo

W. Gilbert (1544 – 1603), reconoció que el hierro puede recibir la virtud magnética de la Tierra en ausencia de cualquier imán. Señaló que no solo el calor sino también la herrumbre y la humedad

¹ CARBONELL, M^a V.; MARTINEZ E. “Bioelectromagnetismo aplicado a la agricultura” Asignatura de doctorado, curso 98 – 99. ETSI Agrónomos (UPM), España 1998.

quitan su virtud a un imán. Impuso la idea de que la Tierra es un imán gigantesco. En su opinión, la tierra no es magnética porque contenga sustancia magnética, sino que las sustancias son magnéticas debidas a su naturaleza terrestre.

Nuevas teorías

Kepler (1571 – 1630), supone que el sol, envía efluvios magnéticos que rotan, como radios de una rueda, con el giro del sol y propulsa así los planetas.

Descartes (1596 – 1650), estudió el magnetismo a través del espectro magnético. Para él, las líneas del espectro dibujan el trayecto de las partes acanaladas que atraviesan el imán, salen de el y vuelven tras un circulo exterior.

Avances de la electricidad y el magnetismo a finales del siglo XVIII y principios de XIX

Coulomb (1736 – 1806) afirmo que el campo magnético terrestre es uniforme en un lugar dado. Estableció la ecuación del movimiento de una aguja imantada en el campo terrestre.

En 1813 *Poisson*, define el estado de un cuerpo magnético por su imantación, vector que puede variar de un punto a otro y que mide localmente el momento magnético de la unidad de volumen.

Ampere propuso un modelo teórico del magnetismo que todavía sirve para la teoría moderna del magnetismo: la fuente fundamental del magnetismo no es un polo magnético, sino una corriente eléctrica. Propuso que el magnetismo de un imán permanente es debido al alineamiento de espiras moleculares de corriente dentro del material.

Actualmente se sabe que estas espiras de corriente resultan parcialmente del movimiento de los electrones dentro del átomo y parcialmente del spin electrónico, una propiedad mecánico – cuántica del electrón.

Maxwell desarrolló una teoría completa de la electricidad y el magnetismo según la cual un campo eléctrico variable produce un campo magnético.

3.2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DEL MAGNETISMO²

3.2.1. Fuerza ejercida por un campo magnético

Se define el campo magnético en un punto dado del espacio en términos de la fuerza que sería ejercida sobre una carga que se mueve con velocidad v . Los experimentos realizados sobre el movimiento de distintas partículas cargadas que se desplazan en un campo magnético han proporcionado los siguientes resultados:

- La fuerza magnética es proporcional a la carga q y a la velocidad v de la partícula.
- La magnitud y la dirección de la fuerza magnética depende de la velocidad de la partícula y de la magnitud y dirección del campo magnético.
- Cuando la carga se mueve en dirección paralela al vector campo magnético, la fuerza magnética sobre la carga es nula.
- Cuando la velocidad forma un ángulo con el campo magnético, la fuerza magnética actúa en una dirección perpendicular tanto a la velocidad como al campo magnético. La fuerza es perpendicular al plano que determinan la velocidad y el campo magnético.
- La fuerza magnética sobre una carga positiva, tiene sentido opuesto a la fuerza que actúa sobre una carga negativa que se mueva en la misma dirección.
- Si el vector velocidad forma un ángulo con el campo magnético, la magnitud de la fuerza magnética es proporcional al seno del ángulo.

Estas observaciones se pueden resumir escribiendo la fuerza magnética de la forma:

$$F = qv \wedge B$$

² CARBONELL, M^a V.; MARTINEZ E. "Bioelectromagnetismo aplicado a la agricultura" Asignatura de doctorado, curso 98 – 99. ETSI Agrónomos (UPM), España 1998.

Existen varias diferencias entre las fuerzas eléctricas y magnéticas, que pueden resumirse en

- La fuerza eléctrica siempre está en la dirección del campo eléctrico, mientras que la fuerza magnética es perpendicular al campo magnético.
- La fuerza eléctrica actúa sobre una partícula cargada independientemente de la velocidad de la partícula, mientras que la fuerza magnética actúa solo cuando las partículas cargadas están en movimiento.
- La fuerza eléctrica realiza trabajo al desplazar una partícula cargada, mientras que la fuerza magnética asociada a un campo magnético estacionario no realiza trabajo cuando una partícula se desplaza.

En el sistema internacional de unidades, la unidad de campo magnético es el webber/m², también denominado *Tesla*. En el sistema CGS para el campo magnético se emplea la unidad gauss. y se relacionan de tal forma que $1\text{T} = 10^4\text{ G}$.

3.2.2. Movimiento de una carga puntual en el interior de un campo magnético.

Se conoce que la fuerza magnética que actúa sobre una partícula móvil en un campo magnético es siempre perpendicular a la velocidad de la partícula. Si la velocidad es perpendicular a un campo magnético uniforme (por ejemplo entrante hacia el papel), la partícula describe una trayectoria circular.

El radio de la trayectoria circular descrita por la carga es:

$$F = ma = \frac{mv^2}{r} \quad (1)$$

$$F = qvB \quad (2)$$

Igualando (1) y (2):

$$r = \frac{mv}{qB}$$

El periodo del movimiento, es el tiempo que tarda en describir una circunferencia completa, por tanto:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

Si la partícula se mueve en un campo magnético uniforme con su velocidad formando un ángulo arbitrario con el campo magnético, la trayectoria es una hélice.

3.2.3. Flujo magnético

El flujo magnético es análogo al flujo eléctrico, y está relacionado con el número de líneas de campo magnético que pasan a través de un área determinada. Considerando el caso en que el campo magnético es perpendicular a una superficie dada

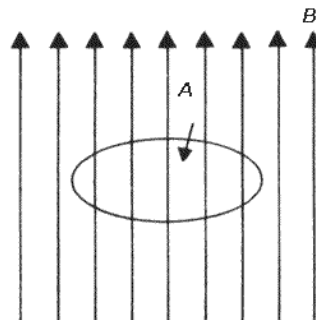


Figura 1 Flujo magnético.

En ese caso se define el flujo magnético como $\Phi_m = B \cdot A$

Se puede generalizar la definición de flujo magnético a superficies en las que el campo no es perpendicular a la superficie. Para ello se considera un punto de la superficie en la que hay definido un campo B y en el entorno del punto se considera un elemento de área dA , siendo el vector característico de la superficie (perpendicular al elemento diferencial de área) $dA = dA u_n$. Sobre ese elemento diferencial de área, habrá un flujo elemental $d\Phi$ que es el producto $d\Phi = B \cdot dA = B \cdot A \cdot \cos\varphi$

Por lo que, integrando se calcula el flujo del campo a través de la superficie A

$$\Phi = \int_A B \cdot dA$$

Para una bobina de N vueltas

$$\Phi = \int_A NB \cdot dA = N \int_A B \cdot dA$$

La unidad de flujo magnético se denomina weber (Wb) y es el producto de Tesla (T) por unidad de superficie (m²).

3.3. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES MAGNÉTICOS³

Cómo responden distintas sustancias al campo magnético

Suponiendo que se tiene una bobina capaz de producir un campo magnético alto en su centro y alimentada por una potencia eléctrica., Aclarando que el campo será uniforme cerca al centro del solenoide, reduciéndose en el eje en cualquier extremo a aproximadamente la mitad de su valor central, si el campo central de 30 kilogauss (B_z). La intensidad exactamente al final de la bobina es de 18000 gauss, y en sus proximidades el campo varía con un gradiente (dB_z/dz) de unos 1700 gauss/cm.

Si se colocan varias sustancias (muestras) no mayores de 1 cm³ a 2 cm³ en volumen, suspendidas en la parte final superior de la bobina teniendo en cuenta el valor del campo magnético tanto en el espacio vacío como en el portamuestras que contiene la sustancia, se encuentra en este experimento que la fuerza sobre una sustancia determinada, por ejemplo el aluminio metálico es

³ PURCELL, E. Electricidad y magnetismo. Vol 2. Editorial Reverté, S.A., España, 1969.

proporcional a la masa de la muestra e independiente de su forma, siempre y cuando el tamaño no sea muy grande.

Por otro lado, parece que algunas sustancias son siempre atraídas hacia donde la intensidad del campo es *creciente*, mientras otras, lo son hacia donde la intensidad del campo es *decreciente* independientemente del sentido del campo.

Tabla 1. Fuerza sobre un gramo de muestra en un campo magnético con $B_z = 18000$ gauss $dB/dz = 1700$ gauss/cm.

Sentido de la fuerza: hacia abajo +, hacia arriba –

Sustancia	Fórmula	Fuerza(dinas)	Temperatura
Diamagnéticas			
Agua	H ₂ O	-22	20°
Cobre	Cu	-2,6	20°
Plomo	Pb	-37	20°
Cloruro Sódico	NaCl	-15	20°
Cuarzo	SiO ₂	-16	20°
Azufre	S	-16	20°
Diamante	C	-16	20°
Grafito	C	-110	20°
Nitrógeno Líquido	N ₂	-10	78° K
Paramagnéticas			
Sodio	Na	+20	20°
Aluminio	Al	+17	20°
Cloruro de cobre	CuCl ₂	+280	20°
Sulfato de Níquel	NiSO ₄	+830	20°
Oxígeno Líquido	O ₂	+7500	90° K
Ferromagnéticas			
Hierro	Fe	+400000	20°
Magnetita	Fe ₃ SO ₄	+120000	20°

Las sustancias mostradas en la tabla se han seleccionado para sugerir lo mejor posible con un muestreo reducido, el gran intervalo de comportamiento magnético que se encuentra en materiales ordinarios.

A partir de este experimento se pueden definir la siguiente clasificación:

Primeramente, aquellas sustancias que son ligeramente repelidas por un electroimán, agua cloruro sódico, cuarzo, etc., se llaman diamagnéticas la mayor parte de los compuestos inorgánicos y prácticamente todos los compuestos orgánicos son diamagnéticos. Cuando se observa comportamiento contrario, es debido a que el diamagnetismo es superado por un efecto distinto y más intenso, el cual conduce a la atracción.

Las sustancias que son atraídas hacia la región de campo más intenso se llaman paramagnéticas. En algunos casos, notablemente en los metales como el Al, Na, y muchos otros, el paramagnetismo no es mucho mayor que el diamagnetismo corriente. En otros materiales tales como el NiSO_4 y el CuCl_2 de la tabla 1, el efecto del paramagnetismo es más intenso. En estas sustancias también, aquel se incrementa cuando la temperatura disminuye, conduciendo a efectos muy intensos a temperaturas próximas al cero absoluto. Este incremento del paramagnetismo al disminuir la temperatura es responsable en parte de la gran fuerza encontrada para el oxígeno líquido.

Finalmente, se llaman ferromagnéticas las sustancias que se comportan como el hierro y la magnetita. Además de los metales de esta clase se conocen una gran cantidad de aleaciones ferromagnéticas y compuestos cristalinos.

3.4. MAGNETISMO EN LA MATERIA: DIAMAGNETISMO, PARAMAGNETISMO Y FERROMAGNETISMO ⁴

El estado magnético de una sustancia se describe mediante una cantidad llamada vector magnetización, M . La magnitud de la vector magnetización es igual al momento magnético por unidad de volumen de la sustancia, por lo que el campo magnético total de una sustancia depende tanto del campo magnético externo como de la magnetización de la sustancia.

Considerando una región donde exista un campo magnético B_0 producido por un conductor que lleva una corriente, si introducimos una sustancia magnética, el campo total en esta región vendrá dado por la expresión $B = B_0 + B_m$ donde B_m es el campo producido por la sustancia magnética.

⁴ CARBONELL, M^a V.; MARTINEZ E. "Bioelectromagnetismo aplicado a la agricultura" Asignatura de doctorado, curso 98 – 99. ETSI Agrónomos (UPM), España 1998.

Esta contribución puede expresarse en términos de la magnetización como $B_m = \mu_0 M$ (μ_0 , es la constante conocida como permeabilidad del espacio libre); por lo que el campo total es:

$$B = B_0 + \mu_0 M$$

Introduciendo una nueva magnitud, denominada intensidad de campo $H = \frac{B}{\mu_0}$, se puede expresar:

$$B = \mu_0 H + M$$

Las unidades en el sistema internacional de la intensidad de campo y de la magnetización son Amperios por unidad de longitud (A/m). Para un gran número de sustancias, la magnetización es proporcional a la intensidad de campo magnético. En estas sustancias, se puede escribir:

$$M = \chi H$$

Donde χ es un factor adimensional llamado susceptibilidad magnética.

Si la ecuación anterior se cumple para todo valor campo H, los materiales se denominan paramagnéticos si $\chi > 0$ ó diamagnéticos si $\chi < 0$. En unidades SI es un numero adimensional debido a que el momento magnético M tiene unidades de momento dipolar magnético sobre el volumen ($A \cdot m^2/m^3$). Y el campo magnético H viene dado por momento dipolar magnético sobre la distancia elevada al cubo ($A \cdot m^2/m^3$).

La medición de susceptibilidad se realiza utilizando campos alternos usualmente bajos, y la respuesta depende de la frecuencia utilizada.

A partir del concepto de la Susceptibilidad magnética, surge la siguiente clasificación:

3.4.1. Diamagnetismo

Una sustancia diamagnética es aquella cuyos átomos no tienen momento dipolar permanente. El termino diamagnetismo se refiere al fenómeno por el cual la intensidad de magnetización inducida en un cuerpo por aplicación de un campo magnético es inferior que el producido en el vacío por el mismo campo. En la práctica, el efecto se manifiesta por una repulsión entre el cuerpo y el campo aplicado, de aquí que las susceptibilidades tengan signo negativo. Tales sustancias se denominan diamagnéticas. Prácticamente todas las sustancias orgánicas e inorgánicas con excepción de los radicales libres y compuestos de los elementos de transición son diamagnéticos. La susceptibilidad magnética es independiente de la temperatura y el campo aplicado. Cualquier significativo cambio en la susceptibilidad magnética con la temperatura en la mayoría de los casos debe ser atribuido a cambios en la estructura física o química del material. Rango de Valores, $\chi < 0$, $\chi = 10^{-5}$ a temperatura ambiente y $\chi \neq f(T)$.

3.4.2. Paramagnetismo.

Las sustancias paramagnéticas tienen un pequeño valor de la susceptibilidad lo cual se debe a la presencia de átomos o iones con momentos magnéticos permanentes. Estos dipolos solo interactúan fuertemente entre ellos y están orientados en forma aleatoria en ausencia de campo magnético externo. Cuando la sustancia se coloca en un campo magnético externo, sus dipolos atómicos tienden a alinearse con el campo, aunque este alineamiento tiende a competir con los efectos de movimiento térmico que tiende a desorientar los dipolos. Todas las sustancias, aunque sean paramagnéticas tienen un cierto diamagnetismo subyacente, porque tal diamagnetismo es una propiedad universal; sin embargo, la magnitud de paramagnetismo que manifiesta como fuerza de atracción es normalmente tan grande que enmascara el débil y opuesto diamagnetismo subyacente. La susceptibilidad paramagnética es independiente del campo aplicado pero es proporcional e inversa a la temperatura.

De acuerdo con la teoría de *Langevin* la susceptibilidad molar es

$$\chi_M = \frac{N\mu^2}{3kT}$$

Donde μ es el momento permanente, T la temperatura absoluta, N el número de *Avogadro* y K es la constante de *Botzman*. *Curie* estableció experimentalmente previamente a los trabajos de *Langevin* que la susceptibilidad paramagnética χ_M es inversamente proporcional a la inversa de la temperatura absoluta T, y la expresión

$$\chi_M = \frac{C}{T}$$

Es conocida como *Ley de Curie*, y C es la denominada constante de *Curie*.

Rango de valores $\chi > 0$, $\chi = 10^{-4}$ A temperatura ambiente.

3.4.3. Ferromagnetismo.

El hierro, cobalto, níquel y disprosio son materiales fuertemente magnéticos, y suele llamárseles ferromagnéticos. Estas sustancias contienen momentos magnéticos atómicos que tienden a alinearse paralelamente unos de otros en presencia de un fuerte campo magnético externo. Con los momentos alineados, la sustancia permanecerá magnetizada después de quitar el campo magnético externo.

El ferromagnetismo es dependiente del campo, y las sustancias ferromagnéticas muestran curvas de histéresis típicas. Los materiales ferromagnéticos, cuando se calientan, empiezan a perder gradualmente su magnetismo. Cerca de una temperatura crítica, denominada temperatura de Curie, o punto de Curie empieza a comportarse como paramagnético. En la naturaleza, el ferromagnetismo esta reducido a unos pocos metales como el hierro aunque se han preparado aleaciones con aplicaciones tecnológicas. Rango de valores $\chi \gg 1$.

3.5. APLICACIONES DEL MAGNETISMO EN LA AGRICULTURA

Desde la antigüedad se ha estudiado la relación que los astros ejercen sobre los seres vivos. Así, se sabe que las fases de la luna ejercen una notable influencia sobre el agua terrestre, cuyo ejemplo más claro son las mareas, y el hecho de que la mayoría de los seres vivos están constituidos por una media de aproximadamente un 70% de agua. Esta influencia de la luna sobre los seres vivos ha centrado atención de los científicos en la interacción que esta produce sobre el crecimiento y el desarrollo de los cultivos, creando un calendario de labores agrícolas: la fecha de la siembra, el anuncio de los cambios estacionales, fechas de poda y tala.

3.5.1. Acción del campo magnético sobre el suelo.

Es posible que todos los trabajos realizados sobre la influencia del campo magnético en el desarrollo de la planta se haya producido, además, una alteración sobre el medio empleado como sustrato, pero que dicha modificación no haya sido el principal objeto de estudio. Sin embargo son muy relevantes los resultados publicados por *Oleshko* (Citado por Carbonell y Martínez, 1998), que analiza conjuntamente la alteración del suelo y el desarrollo de la planta. Este autor aplica campos magnéticos permanentes de 1500 – 3500 G durante 15 – 30 minutos, notando que se produce un incremento en el grado de agregación que aumenta con la intensidad del campo magnético en función de sus componentes paramagnéticos y ferromagnéticos, favoreciendo el desarrollo de la planta.

El análisis químico del suelo regado con agua tratada magnéticamente refleja un nivel mayor de las formas móviles de N, P y K frente a las regadas con agua sin tratar. De esta forma se justifica el incremento en la producción.

3.5.2. Uso de campos magnéticos permanentes

Se han utilizado numerosos métodos en la experimentación con campos magnéticos permanentes, basados en la utilización de diferentes intensidades de campo magnético, y diferentes tiempos de

exposición; así mismo los imanes utilizados pueden tener forma de barra, de herradura o con forma de toroide.

Los experimentos con una intensidad comprendida entre los 125 y 250 Gauss demostraron que se requieren más valores altos de la intensidad de campo magnético para incrementar la producción.

3.5.3. Influencia de campos magnéticos variables

El efecto producido por la acción de campos magnéticos variables, presenta discrepancias en la bibliografía. No es de extrañar ya que los campos magnéticos obtenidos son distintos en función de la frecuencia, intensidad y forma de la onda.

La preocupación por la posible repercusión en el medio ambiente, y como consecuencia en la salud, de la presencia de líneas de alta tensión que generan campos magnéticos variables, ha llevado a varios investigadores a realizar estudios sobre su posible incidencia.

3.6. EL SUELO

El suelo es la resultante de numerosas interacciones dinámicas tanto de componentes orgánicos como inorgánicos, de cuya integración se deriva este cuerpo natural, cuya función más sobresaliente ha sido la de constituir el medio para el desarrollo vegetal (IGAC, 1990).

Es un hábitat extremadamente complejo para la vida en él, por la heterogeneidad de sus partículas; el cambio constante en los regímenes hídricos y gaseosos, la discontinuidad entre los microhábitats, el suministro intermitente de nutrientes, etc. Esta complejidad del suelo se refleja en la diversidad de sus habitantes y en sus fluctuaciones, ambas en el tiempo y en el espacio, en su número y actividad (Bonilla 1998).

Todos los suelos se han derivado de los productos resultantes de la meteorización de las rocas. Las características de la mayor parte de los suelos dependen principalmente de las propiedades inherentes a los materiales de los cuales se derivan. En el suelo, los elementos nutritivos las arcillas (minerales secundarios), resultan de los procesos de meteorización al alterarse los minerales que componen las rocas, el calcio, el potasio, el magnesio y otras bases pasan a la solución del suelo o quedan absorbidas en la superficie de las arcillas para ser posteriormente tomadas por las plantas. (González, 1999).

Los suelos difieren entre sí por sus propiedades físicas, químicas y biológicas. El comportamiento mecánico de la fase sólida determina, a su vez, las propiedades físicas del suelo, las cuales con asociación de las características químicas, generan la habilidad para producir cosechas, dependiendo de los nutrientes presentes en él (IGAG, 1990).

A pesar del énfasis que siempre se ha dado a las características químicas, erróneamente concebidas como las más íntimamente asociadas con la producción, las características físicas son, en muchos casos, las determinantes de estas y algunas de ellas, asociadas con la estructura, han sido llamadas, la clave de la productividad del suelo (Baver, 1972, citado por el IGAG, 1990); no obstante, no hay que desconocer que existe una estrecha relación entre las propiedades químicas y físicas (IGAG, 1990).

En lo que corresponde a la parte biológica del suelo, según el United States Department of Agriculture (USDA (1998), citado por Jaramillo (2002)), es “la parte más diversa, biológicamente, de la tierra”. Los organismos vivos del suelo mejoran la entrada y el almacenamiento de agua, la resistencia a la erosión, la nutrición de las plantas y la descomposición de la materia orgánica en él. La biodiversidad del suelo, el tamaño de las poblaciones de organismos en él y su actividad dependen de prácticas de manejo como laboreo, controles fitosanitarios y manejo de residuos de cosecha, así como de la cobertura y de la fertilidad que tenga aquel (Jaramillo, 2002).

3.6.1. Calidad, fertilidad de los suelos

La calidad del suelo es un concepto basado en la premisa de que su manejo puede deteriorar, estabilizar o mejorar las funciones del ecosistema suelo (Jiménez, 2008).

El reciente interés en mantener la calidad del suelo ha sido estimulado por un conocimiento renovado de la importancia de la condición del suelo para la sostenibilidad de los sistemas de producción agrícola y la calidad del medio ambiente (Plaster, 2000).

Los principales factores determinantes de la fertilidad del suelo son: la materia orgánica (incluyendo la biomasa microbiana), la textura, la estructura, la profundidad, el contenido de los nutrientes, la capacidad de almacenamiento (capacidad de adsorción), la reacción del suelo y la ausencia de los elementos tóxicos (por ejemplo: aluminio libre). Los suelos difieren ampliamente en estos factores (FAO, 2002).

3.6.2. Degradación física del suelo

Según el concepto de Pla, (citado por Jaramillo, 2002), la degradación del suelo comprende aquellos procesos que lo conducen a una reducción gradual o acelerada, temporal o permanente, de su capacidad productiva y/o al incremento de los costos de producción.

Aunque hay situaciones naturales que no permiten el desarrollo de un buen espacio físico en el suelo como las condiciones de drenaje impedido o de sequía por largos períodos de tiempo, en este capítulo se hará énfasis en el deterioro edáfico provocado por el uso inadecuado de este recurso.

Castro (1995) (citado por Jaramillo, 2002) identifica como las principales causas del deterioro físico del suelo las siguientes:

- Exceso de mecanización.
- Monocultivo.
- Pérdida de la materia orgánica.
- Problemas de mal drenaje.

Amézquita (Citado por Jaramillo, 2002) considera que los principales problemas físicos del suelo que restringen la producción vegetal y que se relacionan con el laboreo del mismo son:

- Impedancia mecánica.
- Estrés de agua (déficit).
- Estrés de aireación (exceso de agua).
- Escorrentía y erosión.

A los anteriores problemas se les podría agregar el uso del suelo en explotaciones que no están de acuerdo con su aptitud, así como alteraciones graves producidas por el mal manejo del riego.

3.7. UNA VISIÓN ANALÍTICA Y SINTÉTICA DEL SUELO

La producción agrícola, con un enfoque analítico y sintético se refiere a la necesidad de realizar un esfuerzo por complementar desde una visión cuántica del pensamiento, la visión actual de fraccionar el conocimiento (física, química y biología de suelos) con una visión sintética de la dinámica del suelo que posibilite el manejo sostenible de los recursos naturales y la producción armónica de los mismos (Zúñiga, 2001).

Desde este punto de vista se debe de percibir el suelo como un sistema complejo donde se complementan distintas fases. Una primera fase lineal, donde son válidos los análisis euclidianos; una segunda fase correspondiente a sistemas no lineales que involucra estructuras fractales y sintéticas; una tercera fase de complejidad propiamente que involucra procesos de caos, irreversibles y de no linealidad; finalmente el sistema se ordena según criterios de autoorganización y resiliencia (ver figura 2).

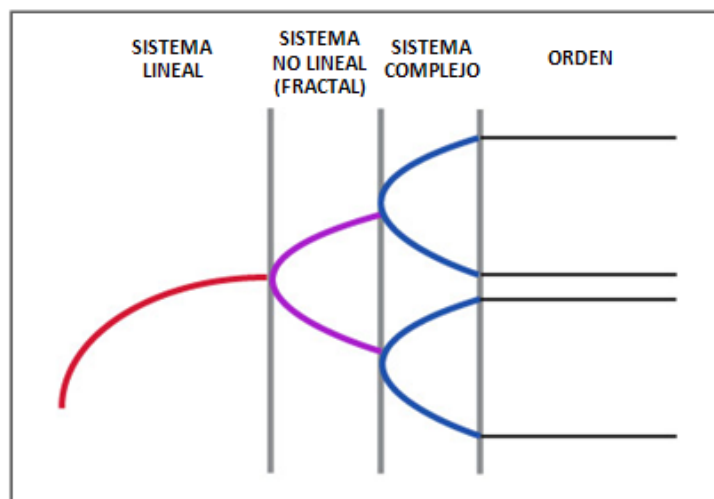


Figura 2. Dinámica no lineal del suelo

Una opción para abordar esta naturaleza compleja de los suelos es a partir del principio de la complementariedad tomada de la mecánica cuántica que nos permite reflexionar sobre un nuevo paradigma para interpretar y construir un nuevo marco teórico de las ciencias del suelo. Según Bohr,

dos conceptos son complementarios si son mutuamente excluyentes pero ambos necesarios para agotar toda la información, por ejemplo, los conceptos de onda y partícula, son conceptos complementarios respecto al electrón. Algunas veces el electrón se comporta como onda que transporta **energía** y otras como partícula o **materia** en vibración.

Uno de los aspectos conceptuales subyacentes a la producción agrícola es su visión mecanicista de la naturaleza, basado en el reduccionismo, según el cual todas las propiedades de un sistema se explican por medio del análisis en sus partes componentes: análisis químico, físico, biológico y fitosanitario. Es necesario también un enfoque holístico o sintético con énfasis en el todo. Es decir, existe la necesidad de considerar la complementariedad entre la visión analítica y la visión sintética (Zúñiga *et al*, 2001).

Bajo esta óptica de la complementariedad es necesario entonces, profundizar sobre la relación entre las variables tradicionalmente medidas que brindan información sobre el estado de la materia en el suelo (materia) y aquellas que ofrecen información sobre su estado energético (como la conductividad térmica y la resistividad eléctrica). La visión energética del suelo se puede visualizar cuando consideramos un ecosistema de bosque sin intervenir y un ecosistema intervenido con labranza intensiva (ver figura 3).

En el ecosistema inicial de *bosque sin intervenir* la densidad aparente y la conductividad térmica del suelo es menor que en el *ecosistema intervenido*. Igualmente la energía libre de Gibbs es mayor en el *bosque sin intervenir* que en el *ecosistema intervenido* con labranza intensiva. Es decir la Reserva Energética del Suelo o el Potencial Productivo del Suelo (PPS) es mayor en el *bosque sin intervenir*, lo cual indica una pérdida de energía del suelo cuando se aplica una labranza intensiva (López, 2006).

El Grupo ILAMA de La Universidad del Valle, ha realizado una serie de investigaciones con el objetivo de desarrollar tecnologías sintéticas que permitan cuantificar la Reserva Energética del Suelo y complementarlas con las técnicas analíticas de suelos

VISION ENERGETICA DEL SUELO: BOSQUE NATIVO Vs AGRICULTURA INTENSIVA.

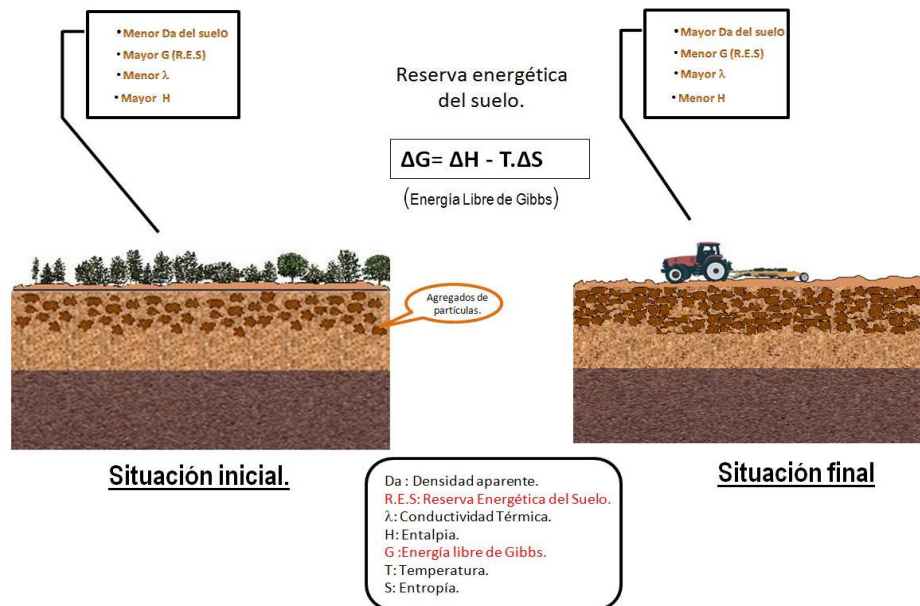


Figura 3. Visión energética del suelo

Las técnicas sintéticas de suelos desarrolladas consideran una muestra de suelo no alterada la cual es sometida a estímulos eléctricos, térmicos o acústicos (ver figura 4). La información es procesada utilizando algoritmos no lineales de interpretación (Redes Neuronales).

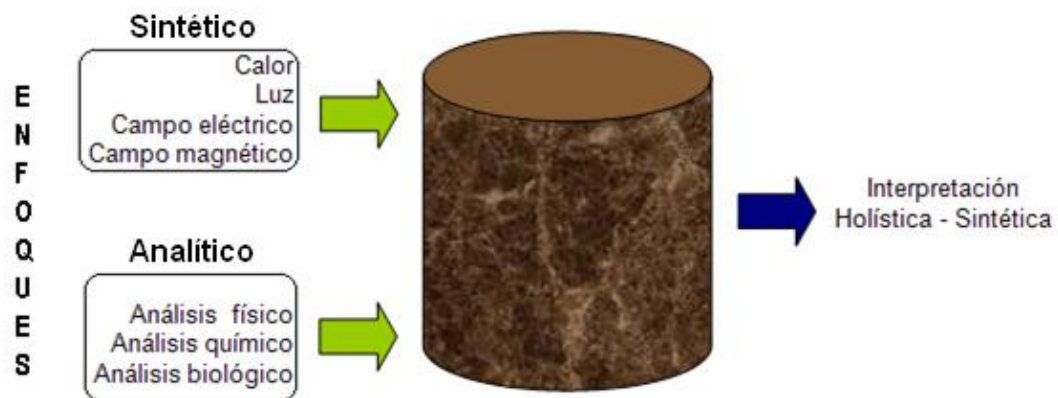


Figura 4. Enfoque analítico – sintético para el estudio del suelo.

Esta metodología analítica y sintética del suelo denominada Potencial Productivo del Suelo (**PPS**) o Reserva Energética del Suelo (**RES**) permite con mayor precisión inferir sobre la sostenibilidad, la eficiencia y la productividad del manejo de suelos en el mediano y largo plazo (Gómez y Romero, 2004), así como planificar una fertilización diferencial del cultivo en estudio, lo cual reduce costos de producción y disminuye la contaminación o el uso indiscriminado de insumos.

3.7.1. Potencial Productivo del suelo

El Potencial Productivo del Suelo (PPS) puede definirse como la capacidad que tiene el suelo para brindar las condiciones necesarias en el desarrollo de un cultivo específico, en un sitio determinado, donde la planta puede aprovechar al máximo las características del suelo para promover su desarrollo y rendimiento.

El Potencial Productivo del Suelo se determina a partir de los valores de algunas propiedades analíticas y sintéticas bajo el concepto de complementariedad (Zúñiga et al, 2001), asumiendo que bajo determinadas condiciones de manejo clima y cultivo, el rendimiento depende de las condiciones edáficas que propicien un adecuado crecimiento radical (Delgado, 1995).

Diversos estudios se han realizado en el Grupo de Investigación en Ciencias Ambientales y de la Tierra, **ILAMA** de la Universidad del Valle para establecer la dinámica energética de los suelos, y poder definir los factores diferenciadores de su potencial productivo, PPS. Con esta herramienta se ha avanzado en la construcción de una propuesta de agricultura de precisión.

3.7.2. Propiedades analíticas del suelo

Las propiedades analíticas son las tradicionalmente medidas que caracterizan el estado de la materia en el suelo. Estas incluyen las de tipo físico, químico y biológico que en general son importantes para describir su capacidad para producir cultivos.

Las propiedades físicas como la humedad del suelo, densidad aparente, macroporos, microporos, se relacionan generalmente con la dinámica del aire y del agua dentro del suelo, suplementando las necesidades de oxígeno, carbono e hidrógeno a las plantas y la solubilidad de muchos nutrientes.

Las propiedades químicas del suelo representan la fertilidad del mismo, ya que son las encargadas de brindar los nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas, entre las más representativas tenemos el potencial de hidrógeno, la materia orgánica, los macroelementos y microelementos, capacidad de intercambio catiónico, entre otras.

En lo que respecta a la parte biológica del suelo, tenemos la actividad microbiana como una propiedad indispensable para una buena fertilidad del suelo y una buena producción del cultivo. Su acción en el suelo es muy significativa, dado que descomponen la materia orgánica para dar humus, reúnen partículas del suelo para dar una mayor estructura, protegen las raíces de diferentes enfermedades y parásitos, retienen el nitrógeno y otros nutrientes, producen hormonas que ayudan a las plantas a crecer y pueden convertir los contaminantes que encuentran en el suelo.

3.7.3. Propiedades sintéticas del suelo

Se consideran propiedades sintéticas aquellas que pueden inferir sobre el estado energético del suelo, específicamente sobre el flujo de energía. Entre diferentes métodos están: en forma de calor y en forma eléctrica, indirectamente determinados por la conductividad térmica y resistividad eléctrica del suelo, respectivamente.

Uno de los principios de la determinación de estas propiedades corresponde a realizar un análisis no destructivo del suelo que permita observar a éste en su estado natural con el fin de medir el flujo de energía considerando la distribución original de las partículas, dadas unas condiciones ambientales y un manejo en particular.

Por otra parte, estas propiedades han demostrado correlación con una serie de variables analíticas como la densidad aparente (Reyes y Viera, 2001) y la actividad microbiana (Rojas, 2002) en distintos trabajos realizados en el laboratorio de Física Ambiental de la Universidad del Valle.

Los fundamentos para la determinación de estas propiedades se especifican a continuación (Zúñiga y Pohlan, 2001).

3.7.3.1. Conductividad térmica del suelo

La conductividad térmica del suelo es considerada como una de las más importantes propiedades térmicas del sistema suelo-planta-atmósfera porque controla el flujo de calor a través de materiales de los diferentes tipos de materiales que componen el suelo (Abu-Hamdeh, 2001).

La conductividad térmica depende de varios factores que pueden ser diferenciados en dos grupos: el primero lo constituyen propiedades inherentes al suelo tales como la textura y la composición mineralógica, y el segundo grupo lo constituyen las prácticas de manejo que modifican el contenido de agua y la densidad aparente. Son quizás las prácticas de manejo las que determinan en gran parte la productividad del cultivo y es por esta razón que la conductividad térmica toma mayor importancia (Abu-Hamdeh, 2001).

El modelo para determinar conductividad térmica (Zúñiga O., Reyes A.; Pohlan J., 2003) plantea que la energía térmica disipada en la resistencia ($w \cdot m^2$) calienta el volumen de suelo encerrado dentro de un cilindro portador (Figura 5).

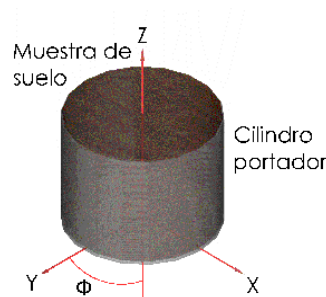


Figura 5. Esquema del sistema suelo-cilindro.

$$\lambda = \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)$$

Para llevar esta aplicación a casos reales se diseñó y construyó un dispositivo electrotérmico de medida y geometría cilíndrica con el cual se procesan los datos de las muestras de suelo no alteradas en laboratorio.

El equipo con el cual se procesan los datos en laboratorio de las muestras de suelo consta de la sonda electrotérmica, un circuito compuesto por una fuente eléctrica, un voltímetro y un amperímetro, una termocupla de tungsteno, un Micrologger CR23X con registro de 600 datos/s y precisión de $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$, como interfase y una computadora dotada con el programa PC 200W donde se registra los datos temperatura vs. Tiempo.

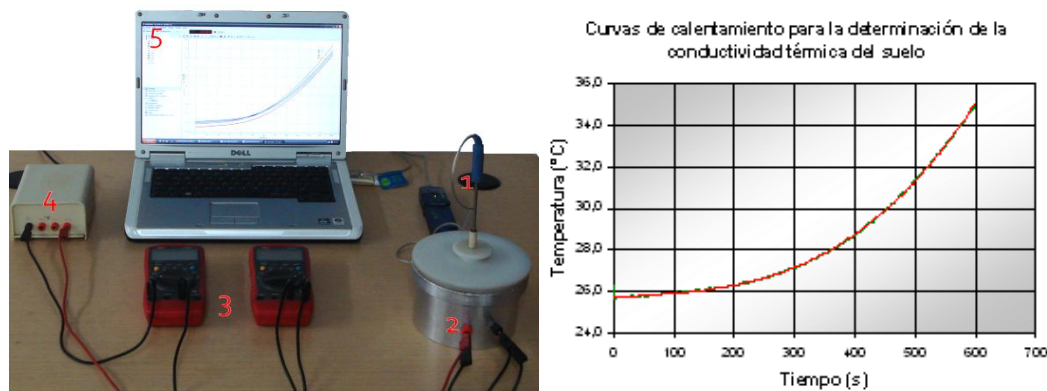


Figura 6. Sistema por medio del cual se procesan las muestras de suelo en el laboratorio.

3.7.3.2. Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica, es una medida de la dificultad que la corriente eléctrica encuentra a su paso por un material determinado, donde los registros responden a una combinación entre la humedad, la concentración de iones solubles y el tipo físico del suelo, siendo regida por el número y la movilidad de su carga libre (es decir, los iones solubles) (Orellana, 1972).

Si se inyecta corriente al suelo por medio de los electrodos A y B (ver figura 4), la circulación de corriente está ligada a la existencia de un campo eléctrico, cuyo potencial eléctrico en estado estacionario corresponde a la ecuación de Laplace (Zúñiga, 1996):

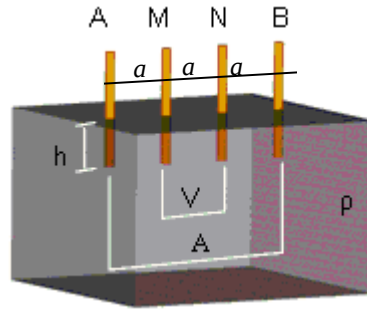


Figura 7. Método de cuatro electrodos: arreglo Wenner (calicatas eléctricas)

La expresión para la resistividad eléctrica ρ toma la forma de la ecuación

$$\rho = K \Delta V / I$$

Y para el caso del dispositivo tipo Wenner mostrado en la figura 8 la expresión se observa en la siguiente ecuación.

$$\rho = K_w \cdot \Delta V / I = 2\pi \cdot a \cdot \Delta V / I = 2\pi \cdot a \cdot R_E$$

3.7.4. Selección de variables para la determinación del PPS

El desarrollo del modelo Potencial Productivo del Suelo (PPS) incluye la selección de parámetros de entrada para su cálculo. Esta selección se realiza con base en la importancia de las propiedades analíticas en la producción de cultivos, y bajo la premisa de considerar las variables sintéticas como el complemento que tiene en cuenta el factor energético en el suelo (Duarte, 2006; Erazo, 2007).

En lo que respecta al conjunto de propiedades analíticas que comprenden las de tipo físicas, químicas y biológicas se considera dar una importancia uniforme a estas, por ello se intenta seleccionar un número significativo de variables para cada tipo de propiedad, exceptuando las de tipo biológico donde se tiene solamente la actividad microbiana como parámetro representativo (ver tabla 2).

Tabla 2. Propiedades analíticas y sintéticas utilizadas en la determinación del PPS

Propiedades sintéticas	Unidades
Conductividad térmica	Cal /cm.s. °C
Resistividad eléctrica	Ohm.m
Impedancia	Ω
Propiedades analíticas	Unidades
Materia orgánica	%
Densidad aparente	g/cm ³
Macroporos	%
Microporos	%
Espacio poroso total	%
Actividad microbiana	$\mu\text{gC-CO}_2/\text{gSS}$
Porcentaje de humedad	%
Porcentaje de arena	%
Potencial de hidrógeno	Escala de pH
Saturación de bases	%
CIC	cmol/kg
Conductividad eléctrica	dS/m
(Ca+Mg)/K	-
Fósforo	ppm
Potasio	cmol/kg
Elementos menores	mg/kg

3.8. SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA Ó PARAMAGNETISMO

Actualmente se han desarrollado metodologías sintéticas novedosas para el diagnóstico del estado de los suelos, sin embargo cada vez son necesarias nuevas herramientas efectivas y no destructivas que permitan una mejor aproximación a los problemas actuales asociados a los problemas actuales de baja producción y degradación de los suelos; por lo tanto se han desarrollado nuevas tecnologías que contemplan el uso de fundamentos de magnetismo para tal fin.

La susceptibilidad magnética mide la "magnetizabilidad" de un material. En el ambiente natural la magnetizabilidad nos habla sobre los minerales que se encuentran en suelos, rocas, polvos y sedimentos, particularmente minerales portadores de hierro. Así, las mediciones pueden dar una información similar a la producida por otras técnicas mineralógicas, como la difracción por rayos X o el análisis de minerales pesados, pero a menudo con mayor eficiencia y resolución. En resumen, las mediciones nos permiten:

- Identificar los minerales presentes en una muestra.
- Calcular su concentración o volumen total con alta resolución.
- Clasificar diferentes tipos de materiales.
- Identificar los procesos de su formación o transporte.
- Crear "huellas dactilares ambientales" para comparar y contrastar materiales.

Difícilmente existe algún área de la investigación ambiental dónde la susceptibilidad magnética no se haya usado; una aproximación mineralógica magnética es aplicable prácticamente a toda clase de investigación ambiental. Las mediciones pueden ser diagnósticas de procesos específicos, como quemado, contaminación atmosférica o anegado de suelos y estos tipos de aplicaciones diagnósticas se están volviendo cada vez más importantes en áreas particulares de estudio, tales como reconstrucción climática, Arqueología y Edafología. Los investigadores también encuentran que la susceptibilidad magnética es una medición conveniente porque:

- Las mediciones pueden ser hechas en prácticamente todos los materiales.
- Las mediciones son seguras, rápidas y no destructivas.
- Las mediciones se pueden hacer en laboratorio o en campo.
- Las mediciones complementan muchos otros tipos de análisis ambientales.

En investigación ambiental se pueden medir grandes números de muestras, económicamente y sin limitar los análisis subsiguientes. Por lo tanto las mediciones son ideales en estudios de reconocimiento, dónde es necesario un gran conjunto de muestras para encontrar muestras "promedio" o "típicas" para otros análisis costosos o de larga duración. Las mediciones hechas *in situ* en el campo aceleran el proceso de vincular los datos a observaciones de campo, lo cual es importante para la gente trabajando en zonas remotas o del extranjero, lejos de las facilidades del laboratorio. Por ello las mediciones de la susceptibilidad magnética ofrecen una opción efectiva en coste al decidir sobre cuál técnica analítica utilizar. Cada vez más se utiliza la susceptibilidad magnética entre una cantidad de técnicas analíticas ambientales. Por ejemplo, es utilizada conjuntamente con análisis de química, radioisótopos, microfósiles y otras propiedades magnéticas.

3.8.1. Equipos para la medición de la Susceptibilidad magnética

Este tipo de dispositivos varía según su precisión y el tipo de aditamentos ó accesorios que empleen para su uso, por consiguiente también variará su costo económico.

Sistema de susceptibilidad magnética *Bartington MS2*



Figura 8. Sistema de susceptibilidad magnética *Bartington MS2*

El Sistema *MS2* mide la susceptibilidad magnética de los materiales. Los materiales que se miden comúnmente incluyen rocas, suelos, sedimentos de ríos, sedimentos marinos, polvos atmosféricos y materiales de construcción. La susceptibilidad magnética es una medida de cuán "magnética" es una muestra. En la práctica esto depende de un pequeño grupo de minerales portadores de hierro en el material. Algunos minerales son mucho más magnéticos que otros y algunos materiales tienen más minerales magnéticos que otros. La susceptibilidad magnética puede ayudar a identificar el tipo de material y la cantidad de mineral portador de hierro que contiene. El hierro y el acero también contribuirán para una lectura de la susceptibilidad magnética.

El sistema *MS2* es el estándar en todo mundo para la medición de la susceptibilidad magnética en roca, suelos, sedimento y muestras de polvo de contaminación. El sistema es utilizado por instituciones académicas y organizaciones comerciales que cubren una amplia gama de campos: ciencias ambientales, Geología, prospecciones, Arqueología, Geografía, Geofísica, ingeniería, ciencias agrarias y explotación petrolífera. Los sistemas *MS2* se usan para diferentes propósitos en las diferentes áreas temáticas. Hay aproximadamente un reparto por igual entre usos para educación y para investigación, con una proporción más pequeña de sistemas utilizados en la industria.

El sistema *MS2* hace mediciones de bajo costo, limpias, seguras y rápidas, con una mínima preparación de muestra. Las mediciones pueden emplear tan poco tiempo como 20 segundos por muestra. Las mediciones son muy fieles, con un alto nivel de precisión y reproducibilidad. La gama de sensores *MS2* es única, permitiendo hacer mediciones en el laboratorio y en el campo, en la superficie del terreno, rocas expuestas, secciones en fosos y debajo del agua. Los datos de las mediciones pueden ser descargados a un computador para su análisis.

Este equipo entrega lecturas en unidades CGS ó SI con una resolución de 2×10^{-6} SI y entrega lectura por muestra cada 10 segundos. La precisión mejora dependiendo los accesorios que se empleen con este dispositivo. Dada su precisión maneja un costo relativamente alto.

Medidor de paramagnetismo en el suelo PCSM (Paramagnetic Count Soil Meter)

A diferencia del medidor *Bartington MS2*, el *PCSM*, es un equipo más compacto, portátil y que ofrece una rapidez en la lectura de la susceptibilidad magnética en corto tiempo también tiene un principio de funcionamiento diferente al del *MS2* al igual que el costo económico. Sin embargo es un dispositivo muy sensible que solo abarca rangos de susceptibilidad magnética bajos ó paramagnéticos.

La sensibilidad del dispositivo viene dada por las ondas de extremada baja frecuencia (ELF). Los campos magnéticos y eléctricos que manejan este tipo de frecuencia, abarcan un intervalo de frecuencia por encima de los campos estáticos (> 0 Hz) hasta los 30 kHz. En el intervalo de frecuencia mayor a 0 a 30 kHz, las longitudes de onda varían entre ∞ y 10 Km.

Para la medición de la variable paramagnetismo se dispone de un dispositivo que mide la susceptibilidad magnética aplicando un campo magnético débil sobre la muestra. Este dispositivo fue diseñado por el Profesor Ph.D. *Phil Callahan*. El diseño consiste en dos bobinas, ambas inicialmente llenas de aire atmosférico, cuando una muestra de suelo es adicionada a una de las bobinas se presentará un desbalance entre ambas. El lado que queda desbalanceado medirá provisionalmente el desbalance en el sistema de unidades CGS. El portamuestras que se introduce en la bobina consiste en un recipiente cilíndrico de 5 cm de alto por 3 cm de diámetro.



Figura 9. Dispositivo para medir el paramagnetismo del suelo PCSM (Paramagnetic Count Soil Meter)

3.9. LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

El inicio de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se remonta a comienzos de la humanidad. Los mapas más antiguos se conocieron antes del 2500 a.C., pero probablemente hayan sido de tiempos anteriores. Desde entonces el hombre ha continuado mejorando los métodos de representación de la información espacial.

Un SIG se puede definir como aquel método o técnica de tratamiento de la información geográfica que permite combinar eficazmente información básica para obtener información derivada. Para ello, se cuenta tanto con las fuentes de información como con un conjunto de herramientas informáticas (hardware y software) que facilitarán esta tarea; todo ello enmarcado dentro de un proyecto que habrá sido definido por un conjunto de personas, y controlado, así mismo, por los técnicos responsables de su implantación y desarrollo. En definitiva, un SIG es una herramienta capaz de combinar información gráfica (mapas) y alfanumérica (estadísticas) para obtener una información derivada sobre el espacio.

La importancia de los SIG radica en la asociación de información descriptiva (atributos) con información geográfica. Con la utilización de los SIG se tienen los beneficios de poder realizar operaciones de bases de datos, visualización de información espacial y análisis geográfico. Dichos beneficios nos permiten responder a preguntas espaciales que con otro tipo de sistemas sería más difícil responder. Los SIG contribuyen a la toma de decisiones y resolución de problemas (Jiménez 2010).

El SIG se apoya en los sistemas de posicionamiento global (GPS) para la ubicación. El GPS consta de tres componentes básicos: una constelación de satélites, un equipo receptor de señal y finalmente el usuario. El equipo GPS recibe la señal de radio de los satélites que se encuentran orbitando en el espacio y mediante métodos y rutinas de triangulación logra obtener las coordenadas del punto sobre la Tierra (latitud, longitud y altitud).

A partir de la señal de los satélites (satélite) el GPS usa el modo de cálculo de distancia y el de triangulación para conocer su posición.

Es la utilización de modernas herramientas capaces de facilitar la obtención y análisis de datos georreferenciados, mejorando el diagnóstico, la toma de decisiones y la eficiencia en el uso de insumos logrando, mayor producción con sostenibilidad del ambiente productivo (ESRI, 1997).

3.9.1. Aplicación de los SIG en el campo medioambiental

Otro campo tradicional y frecuente de desarrollo de aplicaciones ha sido el Medio Ambiente. En él se enmarcan proyectos de gestión de riesgos ambientales, usos del suelo, gestión de Espacios Naturales, control de la contaminación, etc.

Frecuentemente se opina que el estudio del Medio Ambiente encaja mejor en la lógica de análisis de los sistemas *ráster*, esto es debido en gran medida a que los primeros sistemas ambientales se desarrollaron bajo este formato y a que los estudios medioambientales suelen utilizar variables continuas que se representan mejor en esos sistemas. No obstante, hoy en día muchos sistemas combinan ambas posibilidades, potenciando los estudios medioambientales con características de ambos métodos (vectorial y *ráster*).

La agricultura es una de las actividades en la que mayores aplicaciones pueden tener. La variabilidad espacial en el vigor vegetativo de los cultivos, así como la estimación de diferentes variables biofísicas y bioquímicas pueden abordarse a partir de estas técnicas de percepción remota. Por tanto, a través de la teledetección se puede obtener información sobre la vegetación a un bajo coste en comparación con otro tipo de medidas in situ. Además, los sistemas de información geográfica (SIG) constituyen el soporte lógico fundamental para poder almacenar y consultar dicha información.

3.9.2. La representación de los datos geográficos en un SIG

Los SIG no pueden representar toda la información implícita en la extrema complejidad inherente al mundo real, por lo que es necesario optar por simplificaciones que destaquen los elementos que se consideren más relevantes. Estas simplificaciones se denominan modelos de representación y, en el mundo de los SIG, existen dos tipos de modelización básicos: el modelo raster y el modelo vectorial.

3.9.3. El modelo *raster*

En primer lugar, se caracteriza por centrar su interés en la tipología de los elementos a representar más que en su delimitación cartográfica precisa. El espacio se divide en una red regular de unidades diferenciadas, de igual tamaño y forma, denominadas píxeles o celdas y, por este motivo, se le considera como una red regular. Cada uno de los píxeles dispone de un valor numérico que codifica un determinado elemento del mundo real.

La representación de los elementos del mundo real se realiza de la siguiente forma:

- Un elemento puntual = un píxel
- Un elemento lineal = una secuencia de píxeles
- Un elemento poligonal = una agrupación de píxeles

3.9.4. Interpolación a partir de puntos

El proceso de interpolación espacial consiste en la estimación de los valores que alcanza una variable Z en un conjunto de puntos definidos por un par de coordenadas (X,Y) , partiendo de los valores de Z medidos en una muestra de puntos situados en la misma área de estudio (por ejemplo la interpolación de la temperatura a partir de datos de observatorios meteorológicos), la estimación de valores fuera del área de estudio se denomina *extrapolación*. En algunos casos pueden utilizarse otras variables de apoyo, de las que se conoce su variación espacial en el proceso de interpolación/extrapolación (en el caso de la interpolación de la temperatura puede ser la altitud ya

que aquella depende de esta. El área de estudio vendría definida, aunque no de forma muy clara, por el entorno de los puntos en los que sí se dispone de datos.

Cuando se trabaja con un SIG la interpolación espacial suele utilizarse para obtener capas *raster* que representan la variable a interpolar. En esos casos cada celdilla de la capa *raster* constituye un punto en el que hay que realizar la interpolación.

Lo más habitual es partir de medidas puntuales (variables climáticas, variables del suelo) o de isolíneas (curvas de nivel). Aunque los métodos que se utilizan en uno u otro caso son bastante diferentes, todos los métodos de interpolación se basan en la presunción lógica de que cuanto más cercanos estén dos puntos sobre la superficie terrestre, los valores de cualquier variable cuantitativa que sean medidos en ellos serán más parecidos.

3.9.5. Método de interpolación Spline

El método de los *splines* ajusta funciones polinómicas en las que las variables independientes son X e Y. Es similar a una interpolación global mediante regresión, pero ahora esta interpolación se lleva a cabo localmente. En general producen resultados muy buenos con la ventaja de poder modificar una serie de parámetros en función del tipo de distribución espacial de la variable.

La técnica de *splines* consiste en el ajuste local de ecuaciones polinómicas en las que las variables independientes son X e Y. La forma de la superficie final va a depender de un parámetro de tensión que hace que el comportamiento de la superficie interpolada tienda a asemejarse a una membrana más o menos tensa o aflojada que pasa por los puntos de observación.

La ventaja fundamental del método de *splines* respecto a los basados en medias ponderadas es que, con estos últimos, los valores interpolados nunca pueden ser ni mayores ni menores que los valores de los puntos utilizados para interpolar.

3.9.6. Análisis multivariado de los raster

El análisis estadístico multivariado permite la exploración de relaciones entre varios tipos diferentes de atributos. Existen dos tipos de análisis multivariado disponibles, Clasificación (supervisada y no supervisada) y Análisis de componentes principales (PCA).

El objetivo de la clasificación es asignarle una clase o categoría a cada celda de un área de estudio. En la clasificación supervisada, tiene un conocimiento específico sobre el área de estudio y puede identificar áreas representativas o muestras de cada clase. La clasificación no supervisada utiliza agrupaciones estadísticas que ocurren naturalmente en los datos para determinar los *clusters* en los que se clasificarán los datos.

3.9.7. Herramienta para el cálculo de las correlaciones espaciales

Esta herramienta proporciona las estadísticas para el análisis multivariado de un conjunto de bandas de ráster. Cuando utiliza la opción *Calcular matrices de covarianza y correlación*, las matrices de covarianza y correlación son salidas así también como los parámetros estadísticos básicos, tales como los valores de la desviación mínima, máxima, media y estándar para cada capa.

$$Cov_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N (Z_{ik} - \mu_i) (Z_{jk} - \mu_j)}{N - 1}$$

Dónde:

Z : valor de una celda

i, j : son las capas de una pila

μ : es la media de una capa

N : es la cantidad de celdas

K : denota una determinada celda

La matriz de correlación muestra los valores de los coeficientes de correlación que representan la relación entre los dos *datasets*. En el caso de un conjunto de capas ráster, la matriz de correlación

presenta los valores de celda de una capa ráster a medida que se relacionan con los valores de celda de otra capa. La correlación entre las dos capas es una medida de dependencia entre las capas. Es la relación de la covarianza entre las dos capas dividido por el producto de sus desviaciones estándares. Debido a que es una relación, es un número sin unidades. La ecuación para calcular la correlación es la siguiente:

$$Corr_{ij} = \frac{Cov_{ij}}{\delta_i \delta_j}$$

La correlación varía de +1 a -1. Una correlación positiva indica una relación directa entre dos capas, tal como cuando los valores de celda de una capa aumentan, es probable que los valores de celda de otra capa también aumenten. Una correlación negativa significa que una variable cambia de manera inversa a la otra. Una correlación de cero significa que las dos capas son independientes entre sí.

La matriz de correlación es simétrica. La diagonal desde la parte superior izquierda a la inferior derecha es 1,0000 debido a que el coeficiente de correlación de capas idénticas es +1.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Ubicación y descripción de los sitios de muestreo

El muestreo en campo se realizó en tres lugares diferentes del Departamento del Valle del Cauca, estos sitios presentan diferencias cuanto a la intensidad de laboreo agrícola, como también de condiciones medio ambientales y características de los suelos. Los sitios de muestreo, y su respectiva información geográfica se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3. Características generales de las haciendas muestreadas.

Hacienda	Municipio	Coordenadas		Altitud
		Norte	Este	
La Araucana	Dagua - Valle	3° 34' 29"	76° 37' 12"	1700 m.s.n.m.
Las Gramas	Roldanillo -Valle	4° 27' 13"	76° 30' 17"	940 m.s.n.m.
Santa Fe	Santiago de Cali - Valle	3° 18' 44"	76° 29' 56"	983 m.s.n.m.

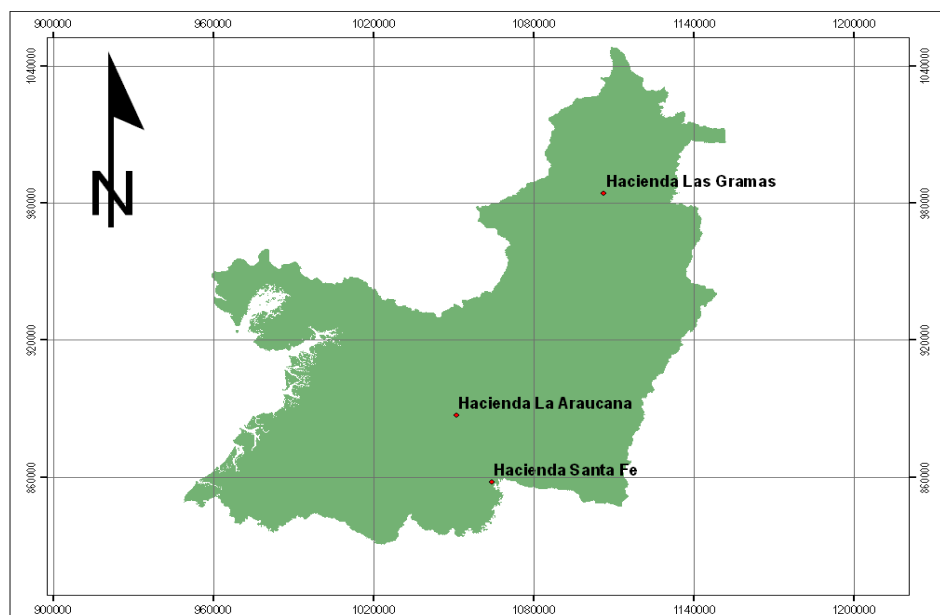


Figura 10. Ubicación de las haciendas en el departamento del Valle del Cauca.

4.1.1. Hacienda La Araucana

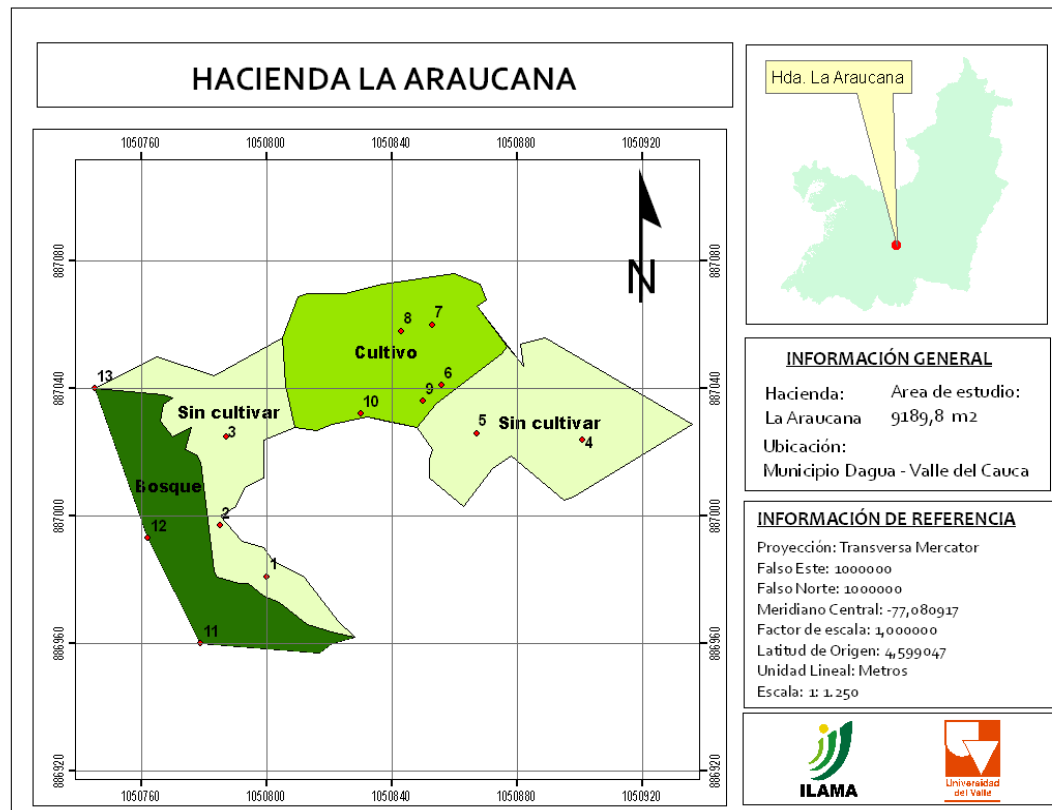


Figura 11. Distribución espacial de la hacienda La Araucana.

Se encuentra ubicada en el Municipio de Dagua, específicamente en la vereda El Vergel la cual presenta un clima templado; La zona de muestreo tiene un área de 9189,8 m², de los cuales 4608,3 m² pertenecían a una zona en barbecho que llevaba hasta la fecha de muestreo dos años sin ser cultivada (ver figura 12); 2581,2 m² conforman la zona cultivada de la hacienda sobre la cual existe una gran variedad de hortalizas de corto período vegetativo entre las cuales se encuentran lechuga, zanahoria, cebolla, ají, entre otros (ver figura 13). También para el muestreo de suelos, se consideró una zona de bosque que hace parte de la hacienda y que abarca una zona de 2000,3 m² en ella se encuentran especies vegetales endémicas (ver figura 14).

Esta hacienda es propiedad del señor Julio Calonge, quién se ha dedicado a la producción de hortalizas, plantas medicinales y otros productos agrícolas de forma orgánica.

El muestreo de suelos se realizó en el mes de Marzo del año 2011; y, Para el estudio del paramagnetismo en esta hacienda, se consideró el muestreo en cada una de las tres zonas descritas anteriormente con el fin de establecer diferencias de la propiedad en cada zona.



Figura 12. Zona en barbecho



Figura 13. Zona cultivada.



Figura 14. Zona de bosque.

4.1.2. Hacienda Las Gramas

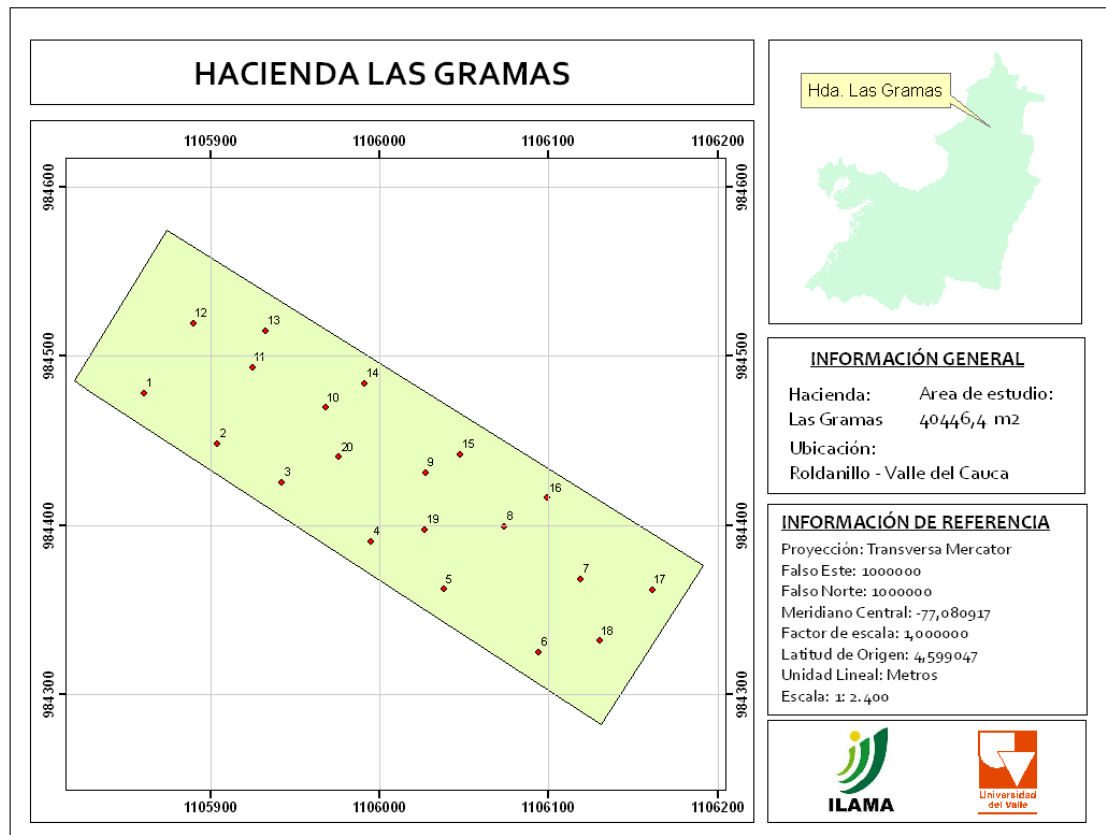


Figura 15. Distribución espacial Hacienda Las Gramas

Se encuentra ubicada en la zona plana del municipio de Roldanillo, específicamente en el corregimiento de Santa Rita, donde predomina un clima cálido. La zona de muestreo comprendió 40446,4 m², los cuales se encontraban cultivados con maíz y ají tabasco en el momento del muestreo. Según estudios de suelos realizados previamente, este presenta condiciones de salinidad y baja calidad en el agua de riego.

Esta hacienda es propiedad del señor Nicolás Millán, y se encuentra en la zona de influencia del distrito de riego RUT.

El muestreo de suelos se realizó en el mes de Julio de 2011, en el marco del proyecto “*CARACTERIZACIÓN DE SUELOS SALINOS UTILIZANDO MÉTODOS FÍSICOS ENERGÉTICOS*” que actualmente es desarrollado por el Grupo en Ciencias Ambientales y de La Tierra – ILAMA de la

Universidad del Valle con el Apoyo del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e innovación - COLCIENCIAS.



Figura 16. Hacienda Las Gramas.

4.1.3. Hacienda Santa Fe

La hacienda Santa Fe está localizada en el municipio de Cali, por la vía que de este municipio conduce al Hormiguero, vereda Cascajal, Valle del Cauca. Tiene una extensión de 160 hectáreas, cultivada con caña de azúcar (IGAC 2003) La zona de estudio presenta un clima cálido.

El muestreo de suelos se realizó en el mes de Junio de 2010. Del total del área que comprende la hacienda, fueron muestreados en total 45,8 hectáreas. Esta medición se hizo en el marco del proyecto “DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL PRODUCTIVO DEL SUELO PARA MANEJO DIFERENCIAL DE CULTIVOS DE CAÑA DE AZÚCAR DEL INGENIO INCAUCA S.A.” Que fue desarrollado por el Grupo en Ciencias Ambientales y de La Tierra – ILAMA de la Universidad del Valle en conjunto con El Grupo Integral de Gestión Agrícola – GIGA y financiado por INCAUCA, que abarcó en total 360 hectáreas en los departamentos de Valle y Cauca.

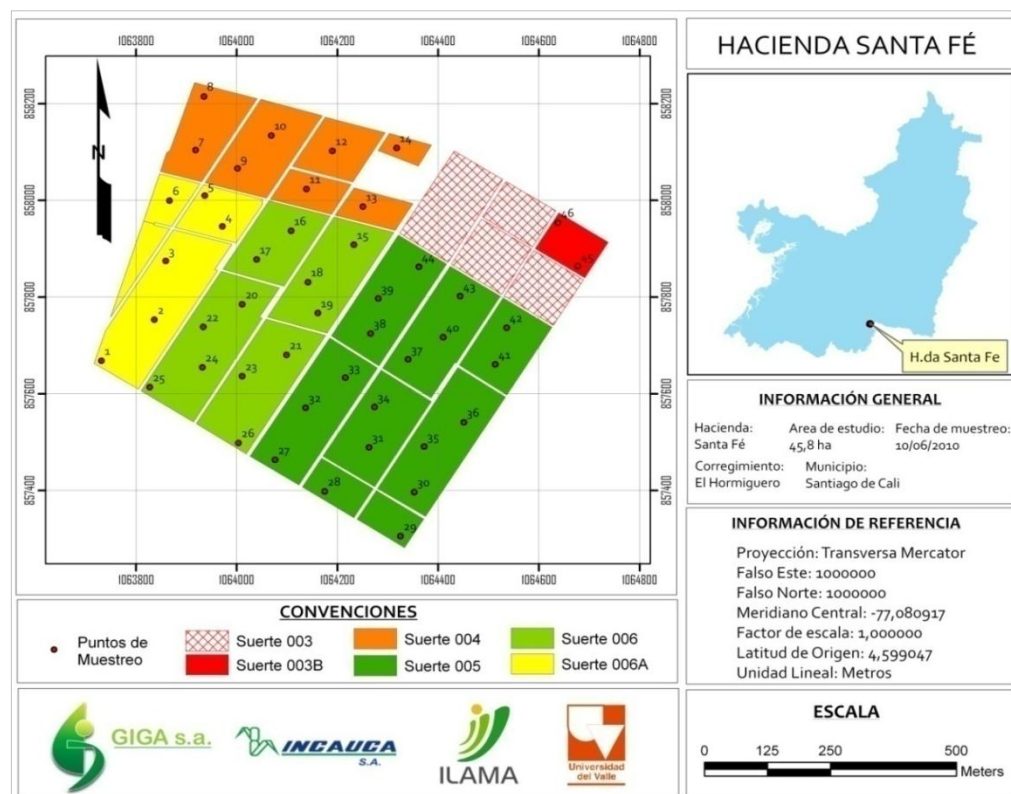


Figura 17. Distribución espacial de la hacienda Santa Fe.



Figura 18. Hacienda Santa Fe.

4.2. Propiedades de suelo medidas en el experimento

Para el establecimiento de la relación entre el paramagnetismo y las demás propiedades analíticas y sintéticas del suelo existentes, se realizó el muestreo de suelos teniendo en cuenta las propiedades enunciadas en las siguientes tablas; algunas de estas propiedades fueron medidas en el Laboratorio de Física Ambiental de la Universidad del Valle (propiedades físicas, sintéticas y la actividad microbiana). Las propiedades químicas se midieron en dos laboratorios especializados en suelos, uno de ellos es el laboratorio de suelos AGRILAB, ubicado en la ciudad de Bogotá, en este laboratorio fueron procesadas y analizadas las muestras de las haciendas La Araucana y Las Gramas; mientras que para la hacienda Santa Fe, el procesamiento y análisis se realizó en el laboratorio de suelos perteneciente al Ingenio Providencia S.A.

Es necesario considerar que algunas propiedades no fueron medidas debido a la disposición del proyecto para cada lugar de estudio.

Tabla 4. Propiedades físicas y biológicas del suelo que se determinaran en el experimento y el laboratorio responsable del análisis.

Tipo de Propiedad	Propiedad	Unidades	Laboratorio
FÍSICAS	Textura	%	AGRILAB - PROVIDENCIA - UNIVALLE -
	Humedad Gravimétrica (%Hg)	%	UNIVALLE
	Densidad aparente (Da)	g/cm ³	
	Porosidad (% Macroporosidad - %Microporosidad - Espacio Poroso Total (%EPT))	%	
	Resistividad eléctrica (ρ)	$\Omega.m$	
	Conductividad Térmica (λ)	Cal/cm.s.°C	
	Susceptibilidad magnética (X) - Paramagnetismo	Adimensional (Sistema CGS)	
BIOLÓGICAS	Actividad Microbiana (A.M.)	kgC-CO ₂ /ha*día	UNIVALLE

Tabla 5. Propiedades Químicas del suelo que se determinaran en el experimento y el laboratorio responsable del análisis.

Tipo de Propiedad	Propiedad	Unidades	Laboratorio
QUÍMICAS	Potencial de Hidrógeno (pH)	Adimensional	AGRILAB - PROVIDENCIA
	Materia Orgánica (M.O.)	%	
	Fósforo (P) (*)	p.p.m.	
	Potasio (K)	meq/100g	
	Calcio (Ca)	meq/100g	
	Magnesio (Mg)	meq/100g	
	Sodio (Na)	meq/100g	
	Boro (B)	p.p.m.	
	Cobre (Cu)	p.p.m.	
	Hierro (Fe)	p.p.m.	
	Manganeso (Mn)	p.p.m.	
	Zinc (Zn)	p.p.m.	
	Conductividad Eléctrica (C.E.)	dS/m	
	Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (*)	meq/100g	

(*) Propiedades que solo se midieron en la Hacienda Santa Fe y La Araucana

(**) Propiedad que solo fue medida en la Hacienda Santa Fe

4.3. Metodología

Dentro de la metodología se consideran principalmente cuatro procesos que comprendieron la Georeferenciación, la toma y procesamiento de muestras de suelo, y el procedimiento para generación de mapas. El número de los puntos de muestreo se diferenció en cuanto a la extensión de cada hacienda y su ubicación fue, de manera aleatorizada en la hacienda La Araucana, En cuadrícula en la hacienda Las Gramas, y en “zig – zag” en la hacienda Santa Fe..

Tabla 6. Puntos de muestreo en los sitios de estudio.

Hacienda	Área (ha)	# Puntos de muestreo (por hectárea)	# De puntos Total
La Araucana	0,92	13	13
Las Gramas	4,04	5	20
Santa Fe	45,8	1,76	26

4.3.1. Georreferenciación

Con la finalidad de orientar puntos de muestreo y delimitación de las áreas de estudio antes del muestreo, fue necesario el uso de un navegador GPS con funciones específicas que permitieran una mejor precisión en la ubicación de estos sitios. Por lo tanto se empleó un navegador GPS “Garmin Colorado 300”; como característica principal, este dispositivo de navegación puede alcanzar una precisión óptima de 4 metros (± 4 m).

La información que proporciona el navegador GPS en cada una de las mediciones (puntos) contiene la ubicación en coordenadas geográficas Este – Norte, altitud, temperatura, fecha y hora de la medición. Esta información que se encuentra almacenada en el dispositivo es descargada a un computador utilizando un paquete informático conocido como *map source* que permite la extracción y la exportación de la información a formatos de texto, hojas de cálculo ó paquetes SIG.

En la Hacienda La Araucana, fue necesario inicialmente delimitar la zona total de estudio, ya que en un principio no existía algún plano o mapa de la misma; por lo que a través de puntos ubicados con

el GPS en cada vértice de la hacienda se recopiló información necesaria para la generación del mapa general de la hacienda; en cuanto a las propiedades de suelo estudiadas, el empleo del navegador GPS fue necesario para la ubicación de los puntos de muestreo con los cuales se generaron los mapas para cada una de las propiedades de suelo analizadas. Este tipo de georreferenciación también se hizo en la hacienda Las gramas, sin embargo, para la Hacienda Santa Fe, ya se contaba con información geográfica (SIG), que fue proporcionada por el Ingenio INCAUCA S.A., En esta hacienda solo se referenciaron los puntos de muestreo previo al trabajo en campo usando el paquete informático SIG.

4.3.2. Toma de Muestras

En cada punto de muestreo georreferenciado se realizó la extracción de las muestras de suelo que consistieron en dos tipos, alteradas e inalteradas.

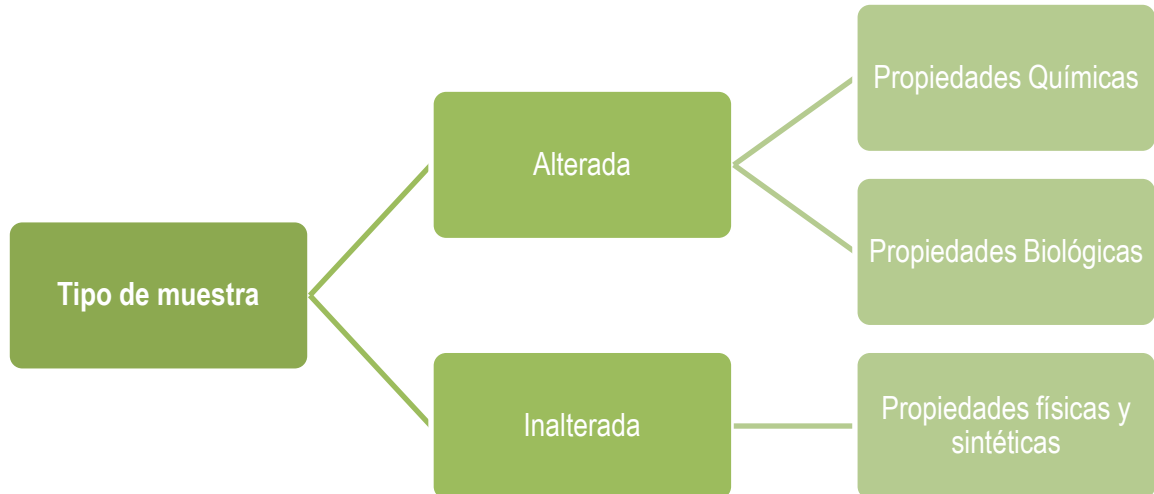


Figura 19. Clasificación de los tipos de muestras.

4.3.2.1. Muestras Alteradas

En cada punto de muestreo se escavó en tres (3) sitios, cada uno con una profundidad entre 0 y 30 centímetros para la extracción de suelo el cual posteriormente se mezcló para obtener una muestra representativa para análisis químico y medición de la actividad microbiana.



Fig. Extracción de muestras alteradas.

Luego de ser extraídas del suelo, las muestras se empaican en bolsas plásticas de cierre hermético con su respectivo rótulo para ser enviadas al laboratorio para su análisis.

4.3.2.2. Muestras Inalteradas

Se utilizaron dos barrenos de núcleo con los cuales se extrajeron tres (3) muestras inalteradas por punto de muestreo, un grupo de muestras fue extraído en cilindros metálicos para el análisis de las propiedades físicas; mientras que otro grupo de muestras se obtuvo a partir de cilindros plásticos, que se emplearon en la determinación del paramagnetismo del suelo.



Figura 20. Extracción de muestras inalteradas

También se midió la resistividad eléctrica del suelo in situ mediante el método de calicatas eléctricas con cuatro electrodos en tres (3) sitios diferentes alrededor de cada punto de muestreo.



Figura 21. Toma de la resistividad eléctrica in situ.

El siguiente diagrama muestra la forma de extracción de muestras en cada punto georreferenciado.



Figura 22. Diagrama de extracción de muestras de suelo por punto.

4.3.3. Procesamiento de muestras, análisis de los datos y parámetros.

El procesamiento de las muestras físicas se llevó a cabo en el laboratorio de Física Ambiental de la Universidad del Valle, adscrito al grupo de Ciencias Ambientales y de la Tierra – ILAMA, mientras que los análisis químicos se realizaron en el laboratorio AGRILAB de la ciudad de Bogotá D.C. y El laboratorio del Ingenio Providencia S.A. en el municipio de Palmira – Valle.

4.3.4. Medición del paramagnetismo.

Para la determinación del paramagnetismo se emplearon los cilindros plásticos extraídos del suelo, los cuales fueron inicialmente enrasados a fin de obtener un volumen uniforme para cada muestra además que se puedan acoplar correctamente a la bobina del dispositivo medidor de la susceptibilidad magnética; Una vez enrasados, los cilindros fueron saturados con agua por 48 horas en un recipiente con agua, posteriormente se dejaron drenar en platos cerámicos de 15 bares de presión por 48 horas; para la lectura del paramagnetismo se tomó la muestra previamente drenada y se introdujo en la bobina del dispositivo hasta que la pantalla este arroja el dato, el cuál, se reporta en una planilla para luego ser analizado.

Durante la medición de esta propiedad y debido al diseño del dispositivo, fue necesario aislarlo de interferencias tales como metales y equipos de telecomunicación puesto que la bobina donde se introduce la muestra está diseñada para percibir frecuencias muy bajas de magnetismo, lo que pudo generar en algunas ocasiones distorsión en la lectura de los datos y posible descalibración.



Figura 23. Enrasado y saturación muestras en los cilindros plásticos.



Figura 24. Drenaje y medición del paramagnetismo para cada muestra.

Para el análisis de los datos obtenidos se emplearon herramientas de la estadística descriptiva con la finalidad de realizar la depuración de posibles datos dudosos, para ello se empleó el método de *t-student* con una confiabilidad del 90% para cada dato tomado por punto en campo, y cada parámetro de las propiedades físicas calculados en laboratorio.

4.3.5. Generación de los mapas de propiedades del suelo

Para la elaboración de los mapas de propiedades del suelo se empleó un paquete informático SIG que constituye una herramienta muy útil dentro de los Sistemas de Información Geográfica para el análisis de diferentes propiedades, en este caso para analizar los datos y parámetros obtenidos de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo a través de métodos de interpolación espacial, en este caso se empleó el método de interpolación *Spline*.

4.3.5.1. Descripción del método *Spline*.

Este método funciona bajo la estimación de valores usando una función matemática que reduce al mínimo la curvatura de la superficie total, dando como resultado, una superficie lisa que pasa exactamente a través de los puntos muestreados.

Este método ha sido empleado para variar superficies como la elevación, alturas de superficie del agua, o concentraciones de contaminación. Existen dos métodos Spline: *Regularized* y *tensión*

Regularized: El método Regularizado crea una superficie suave, de manera gradual cambiando la superficie con los valores que pueden estar fuera de la gama de datos de la muestra.

Tension: El método de Tensión suaviza la rigidez de la superficie según el carácter del fenómeno modelado. Esto crea la superficie lisa con valores estrechamente obligados por la gama de datos de la muestra.

Para el caso particular de estudio fue utilizado el método *tension* para la elaboración de los mapas de propiedades del suelo.

Otro factor importante que se tuvo en cuenta al momento de desarrollar las distribuciones espaciales es el peso o *weight* en la interpolación, el cual define el suavizado de las superficies a interpolar, por lo tanto a mayor valor del peso, se obtendrá una superficie más suave reduciendo los cambios bruscos entre puntos de muestreo. Sin embargo, un cambio abrupto de valores puede alterar los rangos en cada zona interpolada, por lo tanto, para evitar este inconveniente, se escogió un valor estándar para el peso de cinco (5). Hay que tener en cuenta que el método toma valores desde 0,1; a continuación se muestra la interfaz que permite configurar la generación de los mapas.

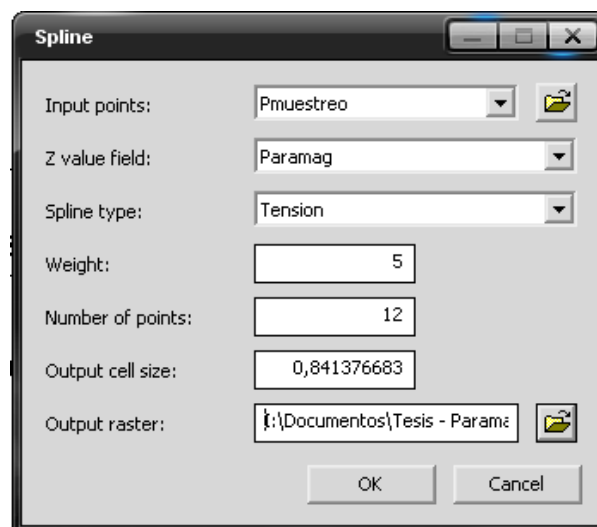


Figura 25. Interfaz de Generación del *Raster* o superficie empleando el método de interpolación *Spline*

Esta interfaz hace parte de la opción de *análisis espacial* del paquete SIG, como se puede apreciar en la figura 25, los mapas realizados fueron configurados bajo estas opciones.

Finalmente se obtiene la superficie o la distribución espacial de la propiedad de suelo en particular, posteriormente se modifican los intervalos de las propiedades analíticas y sintéticas del suelo, si existen rangos en la literatura que permitan una mejor caracterización de las superficies generadas.

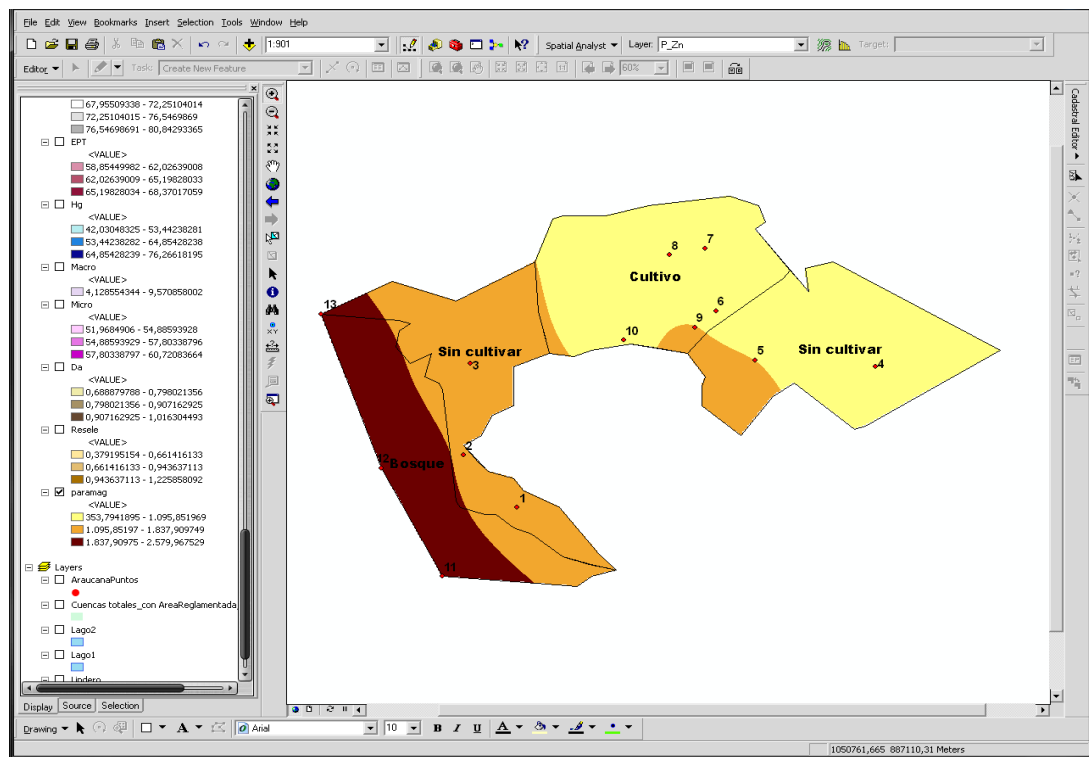


Figura 26. Generación de la distribución espacial de las propiedades analizadas.

4.3.5.2. Cálculo de las correlaciones espaciales

Después de generar los *raster*, y asignarles su respectiva clasificación, se procedió a usar la herramienta de análisis espacial.

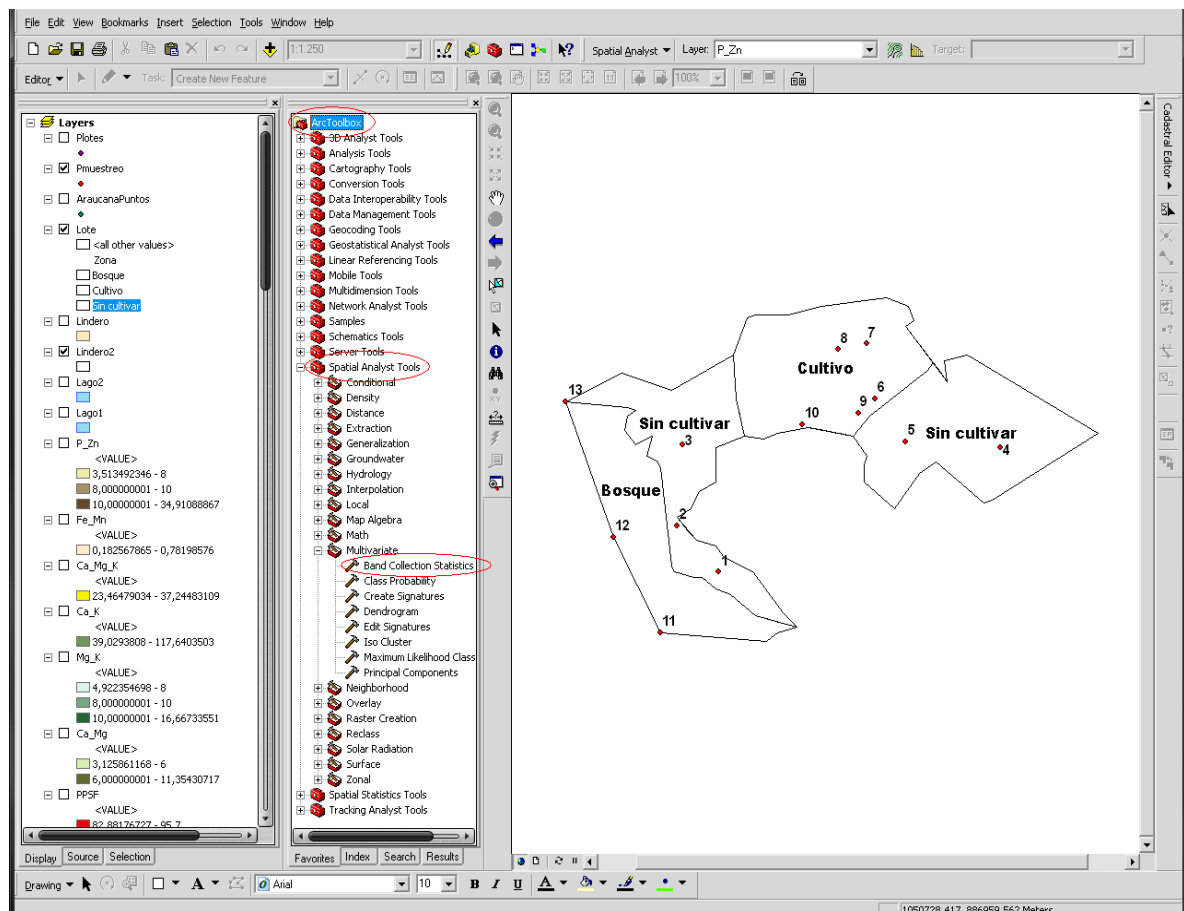


Figura 27. Selección de la aplicación SIG.

Una vez seleccionada la aplicación, se modificó la interfaz correspondiente, seleccionando el conjunto de *rasters* a correlacionar. En la figura 28 se muestra como fue el uso de esta aplicación para la correlación de las propiedades físicas y sintéticas del suelo en la hacienda La Araucana como también la opción para guardar una copia en un archivo de extensión de texto (.txt) los resultados de los cálculos hechos por la aplicación del paquete informático SIG.

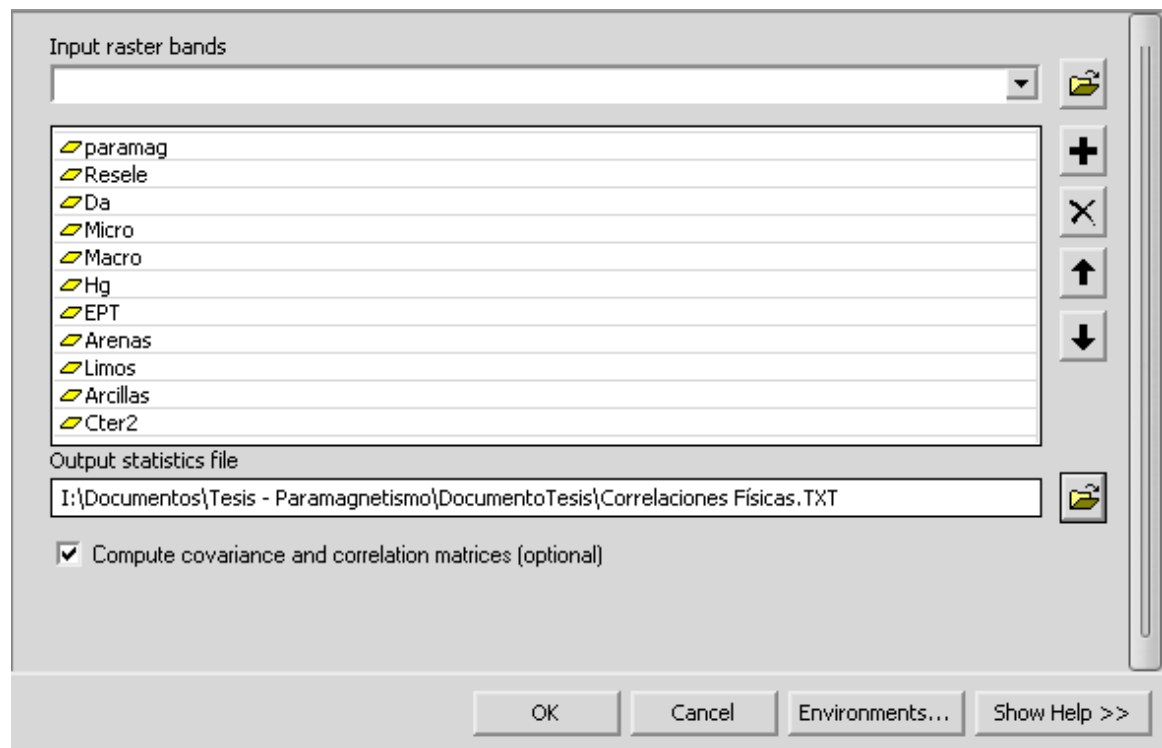


Figura 28. Uso de la interfaz de la aplicación SIG.

Finalmente y después del procesamiento de la aplicación, el programa arrojó el archivo .txt, con la información estadística descriptiva de cada raster analizado (Ver figura 29), la matriz de covarianza y la matriz de correlaciones, la identificación para cada capa ó *raster*, está determinada por números enteros que toman valores desde 1 a 20, dependiendo la complejidad de las capas a analizar, el numero puede variar dependiendo la capacidad de análisis de la aplicación. La identificación toma el orden en el cual fueron seleccionadas las propiedades en la interfaz.

Para un mejor análisis el archivo .txt se convirtió en un archivo de tipo hoja de cálculo (.xlsx) para su organización y complementariedad en el análisis de las propiedades a correlacionar.

De la misma forma, los grupos de propiedades químicas y biológicas fueron correlacionados empleando esta aplicación, incluyendo en cada grupo de propiedades a correlacionar la propiedad de paramagnetismo en cada una de las haciendas estudiadas.

Figura 29. Valores estadísticos descriptivos, Matriz de covarianza y matriz de correlación arrojada por la aplicación S/G.

STATISTICS OF INDIVIDUAL LAYERS				
Layer	MIN	MAX	MEAN	STD
1	353,7942	2579,9675	1215,6085	530,6182
2	0,3792	1,2259	0,8290	0,2244
3	0,9889	1,0163	0,8811	0,0812
4	51,9685	60,7208	55,8065	2,3090
5	4,1286	9,5709	6,8662	1,3110
6	42,0305	76,2662	59,6785	9,1361
7	58,8545	68,3702	62,6724	2,2808
8	67,9551	80,8429	76,4315	3,2082
9	5,4052	17,5131	12,2780	3,4373
10	6,1267	19,2305	11,2905	3,5578
11	0,8144	1,4013	1,1409	0,1566
12	5,6238	15,6337	9,7460	2,4183
13	7,8790	95,9471	40,3336	18,2560
14	0,0013	0,0019	0,0015	0,0002

COVARIANCE MATRIX										
Layer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,138676e+005	3,548154e+001	1,095947e+001	-2,997826e+002	-4,623993e+001	-1,629776e+003	-3,463047e+002	-6,739023e+001	-2,068821e+002	2,742723e
2	3,548154e+001	2,036910e-002	3,154843e-003	-1,173945e-001	-5,647134e-003	-5,126467e-001	-1,231716e-001	-7,793456e-003	-8,723110e-002	9,502455e
3	1,095947e+001	3,154843e-003	2,663627e-003	-6,026644e-002	-2,384621e-003	-2,121557e-001	-6,262059e-002	2,934603e-002	-7,540632e-002	4,606028e
4	-2,997826e+002	-1,173945e-001	-6,026644e-002	2,156221e+000	-3,726904e-001	4,763188e+000	1,783562e+000	-1,270787e+000	2,443694e+000	-1,235906e
5	-4,623993e+001	-5,647134e-003	-2,384621e-003	-3,726904e-001	6,950726e-001	2,302346e+000	3,212970e-001	-2,533004e-001	-8,131815e-001	1,066482e
6	-1,629776e+003	-5,126467e-001	-2,121557e-001	4,763188e+000	2,302346e+000	3,375658e+001	7,062305e+000	-3,478843e+000	3,074401e+000	4,044420e
7	-3,463047e+002	-1,231716e-001	-6,262059e-002	1,783562e+000	3,212970e-001	7,062305e+000	2,103813e+000	-1,456847e+000	1,630020e+000	-1,731730e
8	-6,739023e+001	-7,793456e-003	2,934603e-002	-1,207787e+000	-2,533004e-001	-3,478843e+000	-1,456847e+000	4,162616e+000	-1,910819e+000	-2,25173e
9	-2,068821e+002	-8,723110e-002	-7,540632e-002	2,443694e+000	-8,131815e-001	3,074401e+000	1,630020e+000	-1,910819e+000	4,778222e+000	-2,867403e
10	2,742723e+002	9,502455e-002	4,606028e-002	-1,235906e+000	1,066482e+000	4,044420e-001	-1,731730e-001	-2,251798e+000	-2,867403e+000	5,119201e
11	-4,366178e+000	4,138593e-005	-2,258744e-003	7,963211e-002	-1,505488e-002	-5,931167e-002	2,465204e-002	4,039847e-003	1,754633e-001	-1,795032e
12	6,197019e+001	-1,226789e-002	3,602479e-002	-1,328180e+000	7,412166e-001	6,377465e-002	-5,875855e-001	5,676954e-001	-2,624082e+000	2,056386e
13	-2,618935e+003	-1,272597e+000	-2,495484e-001	7,692892e+000	3,764054e+000	5,470268e+001	1,145398e+001	-4,773108e+000	-9,670956e-001	3,740203e
14	-5,252528e-002	-1,251563e-005	-4,808063e-006	1,490014e-004	5,916749e-006	5,810621e-004	1,349159e-004	-7,733497e-005	1,558695e-004	-7,853454e

CORRELATION MATRIX										
Layer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,000000	0,73674	0,62929	-0,60501	-0,16436	-0,83128	-0,70755	-0,09788	-0,28047	0,35924
2	0,73674	1,000000	0,42831	-0,56016	-0,04746	-0,61823	-0,59501	-0,02676	-0,27961	0,29427
3	0,62929	0,42831	1,000000	-0,79523	-0,05542	-0,70752	-0,83652	0,27870	-0,66840	0,39445
4	-0,60501	-0,56016	-0,79523	1,000000	-0,30443	0,55831	0,83741	-0,40314	0,76132	-0,37200
5	-0,16436	-0,04746	-0,05542	-0,30443	1,000000	0,47531	0,26570	-0,14891	-0,44621	0,56538
6	-0,83128	-0,61823	-0,70752	0,55831	0,47531	1,000000	0,83804	-0,29348	0,24207	0,03077
7	-0,70755	-0,59501	-0,83652	0,83741	0,26570	0,83804	1,000000	-0,49230	0,51411	-0,05277
8	-0,09788	-0,02676	0,27870	-0,40314	-0,14891	-0,29348	-0,49230	1,000000	-0,42845	-0,48780
9	-0,28047	-0,27961	-0,66840	0,76132	-0,44621	0,24207	0,51411	-0,42845	1,000000	-0,57977
10	0,35924	0,29427	0,39445	-0,37200	0,56538	0,03077	-0,05277	-0,48780	-0,57977	1,000000
11	-0,12991	0,00291	-0,43936	0,54441	-0,66292	-0,10248	0,17062	0,01988	0,80583	-0,79645
12	0,11242	-0,03189	0,45388	-0,38815	0,57811	0,00714	-0,26342	0,18093	-0,78059	0,59069
13	-0,66850	-0,76804	-0,41648	0,45126	0,38888	0,81097	0,68019	-0,20151	-0,03811	0,21853
14	-0,81576	-0,74224	-0,79179	0,85885	0,06007	0,84649	0,90400	-0,32083	0,60354	-0,29379

Figura 29. Valores estadísticos descriptivos, Matriz de covarianza y matriz de correlación arrojada por la aplicación S/G.

4.4. Cálculo del Potencial Productivo del Suelo (PPS)

Con el fin de establecer posibles relaciones entre el PPS y el paramagnetismo, se realizó el cálculo de este parámetro, el cual es un modelo desarrollado por el Grupo de Investigación de Ciencias Ambientales y de la Tierra - ILAMA de la Universidad del Valle, propuesto para establecer zonas con diferente potencialidad de condiciones para la producción de cultivos y como herramienta para la toma de decisiones en el manejo de suelos.

El Potencial Productivo del Suelo PPS se define como el producto de los parámetros estandarizados de relación *directa* con la calidad del suelo y la división de los *indirectos* (propiedades del suelo que al incrementarse, generan un detrimento en las condiciones del mismo):

Tabla 7. Variables utilizadas en la determinación del Potencial Productivo del Suelo (PPS)

CLASIFICACIÓN	VARIABLE
DIRECTOS	AM
	Macro
	Arena
	pH
	CE
	MO (*)
	P
	Ca
	Mg
	K
	Na
	CIC (*)
	B
	Cu
	Fe
	Mn
	Zn
	ρ
INDIRECTOS	λ
	Da
	Micro
	Hg
	Arcillas

(*) No fueron medidos en la hacienda Las Gramas.

El modelo utilizado se expresa como:

$$Z_{PPS} = \frac{Z_{Directos}}{Z_{Indirectos}} \quad (1)$$

Dónde:

Z_{PPS} : Potencial Productivo del Suelo estandarizado.

$Z_{Directos}$: Productos de propiedades directas estandarizadas.

$Z_{Indirectos}$: Productos de propiedades indirectas estandarizadas.

La obtención de los valores de PPS implica la normalización o estandarización de los parámetros de entrada, mediante una distribución normal (Myers et al., 1998) para cada punto de muestreo, de acuerdo a la ecuación:

$$Z_i = 10 * \frac{x_i - \mu}{\sigma} + 100 \quad (2)$$

Donde x_i , es el valor del parámetro en el punto de muestreo i , μ es el valor promedio del parámetro y σ , es la desviación estándar. Los valores de los parámetros, resultado de la estandarización, tienen promedio de 100 unidades y desviación estándar 10 de acuerdo a la Ec. (2).

Con la estandarización de las propiedades del suelo se implementa la Ec (1) para obtener un valor de PPS por cada punto analizado. Este valor igualmente se estandariza utilizando la Ec. (2) para mejorar su interpretación; además se categoriza al PPS en tres niveles básicos llamados Alto, Medio y Bajo. Los rangos de cada nivel se dan con una probabilidad del 33% dentro de una distribución normal que posee 100 unidades como valor medio y 10 unidades de dispersión, determinando que para aquellos valores que se encuentren dentro del rango **95.7 – 104.3** se puede categorizar como *PPS Medio*, con *PPS Bajo* y *PPS Alto* los valores que se encuentren por debajo y encima de dicho rango respectivamente.

Cabe aclarar que estos rangos solo son aplicables para cada hacienda individualmente, puesto que el PPS depende de los resultados del conjunto de propiedades Físicas, químicas y biológicas

medidos en dichos lugares, es decir, que un valor de PPS bajo en una hacienda, no implica que ese rango sea aplicable a otra hacienda diferente.

A partir de los datos de *PPS* estandarizados, se generan las distribuciones espaciales siguiendo un proceso similar con el cual se crearon los *raster* de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo también se empleó la correlación espacial, con las cuales se realizó el respectivo análisis.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de suelo fue realizado, teniendo en cuenta los tres lugares presentados en la metodología, dado que cada uno posee características que los diferencian en cuanto a las actividades agrícolas realizadas.

5.1. HACIENDA LA ARAUCANA

5.1.1. Resultado del análisis textural del suelo

Según los resultados de la prueba de textura, la Hacienda La Araucana se encuentra dentro de la clasificación de grupo textural en el número uno, que corresponde a las texturas Arenoso (A), Areno – Francoso (AF) y Franco Arenoso (FA). (Florentino 1994). Por lo tanto la hacienda tiene una textura Franco Arenosa (FA). (Ver Anexo 2).

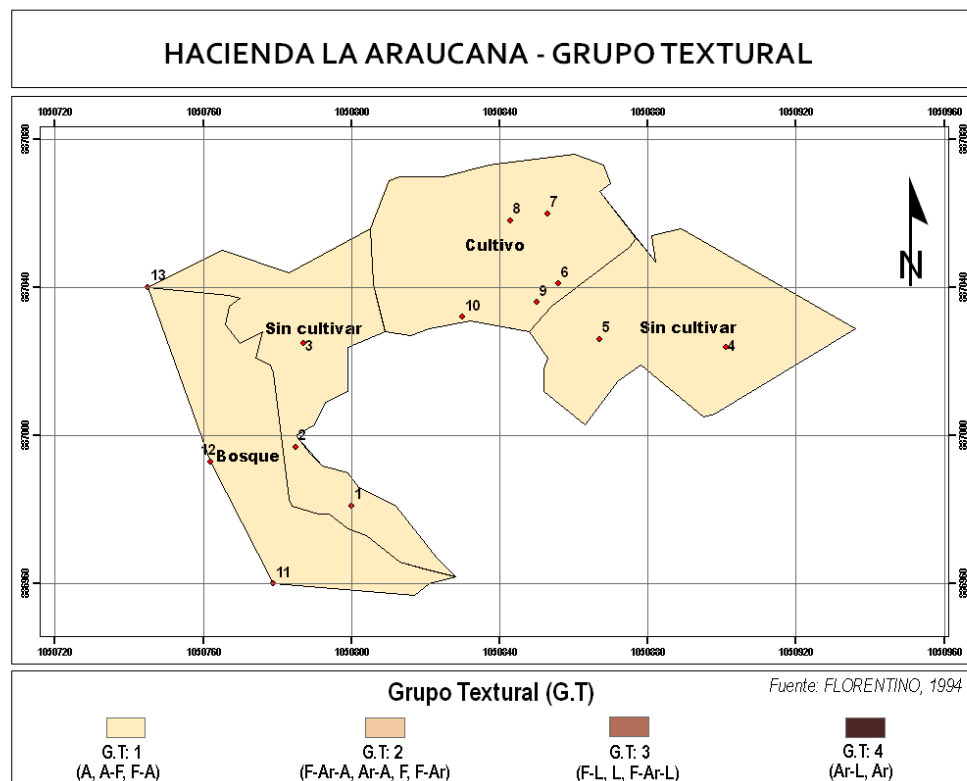


Figura 30. Distribución espacial del grupo textural en la Hacienda La Araucana.

5.1.2. Paramagnetismo en el suelo

A partir de los datos medidos en el dispositivo PCSM, y empleando la herramienta SIG se obtuvo la siguiente distribución espacial de la propiedad.

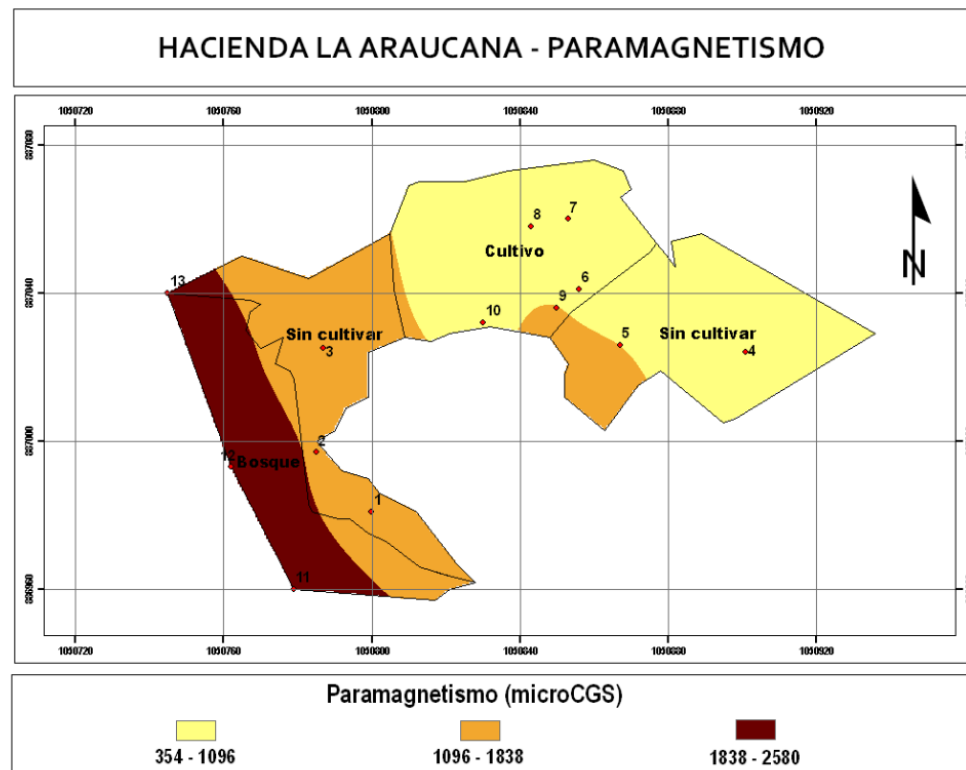


Figura 31. Distribución espacial de la propiedad paramagnetismo en la hacienda La Araucana.

En esta hacienda, Se tuvieron delimitadas tres zonas con diferentes niveles o rangos de paramagnetismo, la zona de bosque presentó el rango más alto de paramagnetismo en comparación con las zonas cultivadas y sin cultivar. La razón por la cual esta situación se presentó, fue debido a que dicha zona con alta lectura de paramagnetismo es un bosque endémico que nunca ha sido intervenido o sometido a algún nivel de laboreo del suelo, lo que permitiría inferir que pueden existir condiciones físicas, químicas y/o biológicas favorables en el suelo.

5.1.3. Paramagnetismo y las propiedades físicas del suelo

La revisión de los resultados de las propiedades físicas del suelo en esta hacienda fueron comparadas a partir de los valores promedios por zonas de estudio (Bosque, Cultivo y No cultivo) con el paramagnetismo.

En las siguientes figuras, se muestran gráficos comparativos entre algunas propiedades del suelo con respecto al paramagnetismo en las zonas evaluadas, la densidad aparente presenta una leve variación, considerando que esta se encuentra en un rango bajo para los tres sitios comparados (Figura 32.); ya que en general para esta hacienda son suelos con alto contenido en materia orgánica (Ver Anexo 2), lo que facilita la aireación del suelo y por consiguiente, la influencia en el valor de la densidad aparente (Jaramillo 2002).

No obstante, se encontró que la densidad aparente en la zona de bosque corresponde con el valor de paramagnetismo encontrándose una relación inversa solo comparando los puntos seleccionados para este análisis.

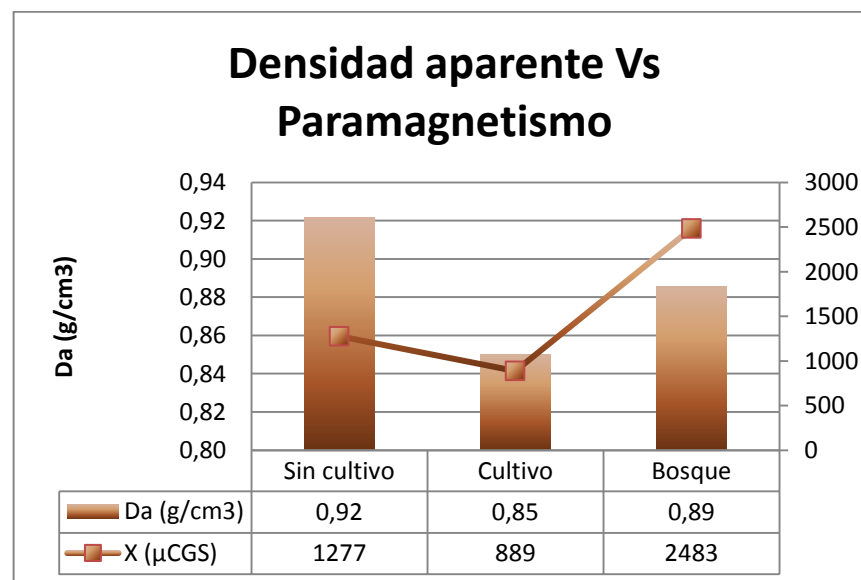


Figura 32. Densidad aparente Vs. Paramagnetismo

En cuanto a la porosidad del suelo, el valor promedio del bosque es mayor comparado con las dos zonas de cultivo y no cultivo, en cuanto a los microporos (Figura 33), no obstante, las diferencias entre los tres lugares de estudio no son significativas; como se espera, la macroporosidad (Figura 34), presenta un comportamiento inverso con respecto al contenido de microporos, aun así se evidencia una tendencia en cuanto a las propiedades con respecto al paramagnetismo del suelo, teniendo en cuenta que ciertas propiedades puedan favorecer el estado del suelo.

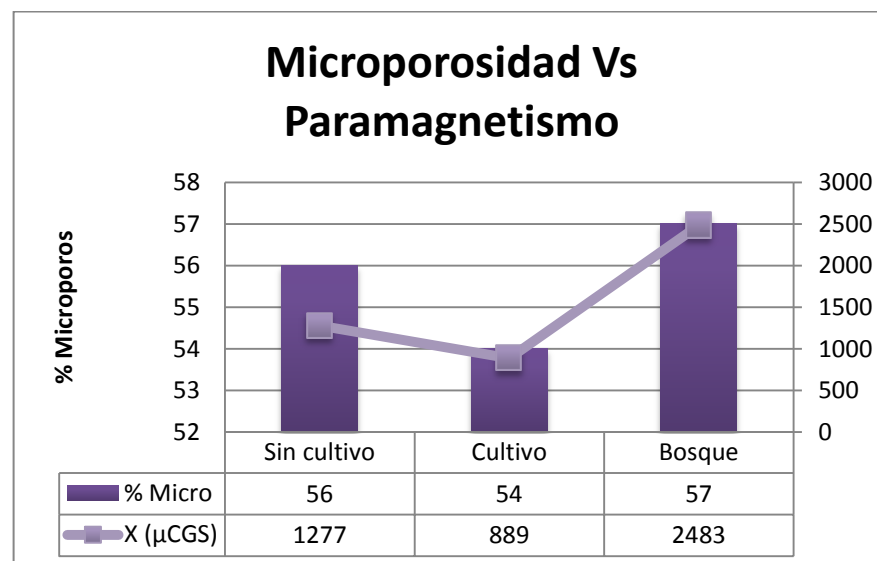


Figura 33. Microporosidad Vs Paramagnetismo

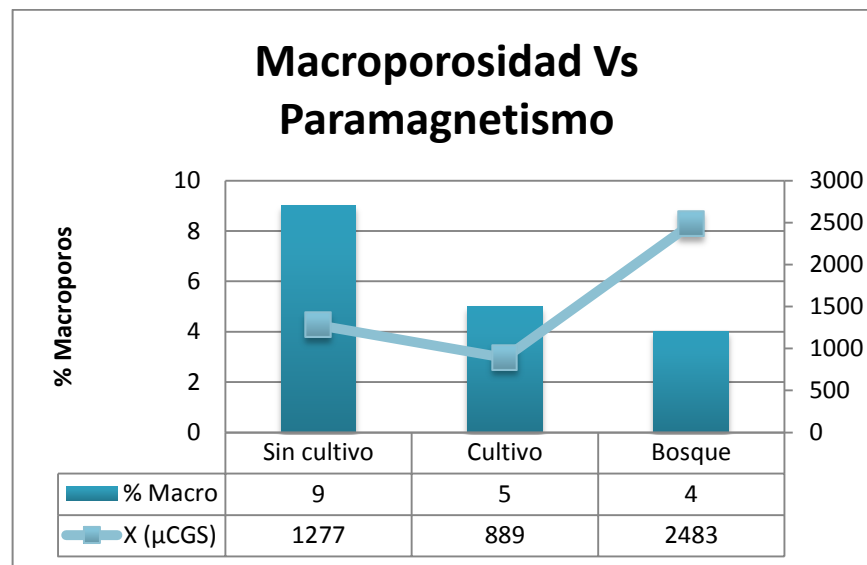


Figura 34. Macroporosidad Vs Paramagnetismo

5.1.4. Paramagnetismo y las propiedades sintéticas del suelo

Realizando la comparación en las tres zonas de estudio, relacionando el paramagnetismo con las propiedades sintéticas del suelo, se encontraron los siguientes resultados:

La conductividad térmica (Figura 35), se encuentra ligada a la densidad aparente, textura y porosidad del suelo (Montenegro y Malagón 1990.), por lo tanto la conducción de calor será más elevada en sitios donde no se encuentren espacios ocupados por aire, es decir donde interactúa en mayoría la fracción mineralógica del suelo, en el caso particular se encuentran diferencias que establecen que la zona no intervenida (Bosque) posee un valor bajo de conductividad térmica, lo que puede estar ligado a un suelo liviano. Realizando la comparación con el paramagnetismo, existe una relación inversa entre las propiedades que indican un suelo con buena aireación debido a factores como la materia orgánica. La relación con el paramagnetismo fue de tipo inverso como se puede apreciar el gráfico (Figura 35).

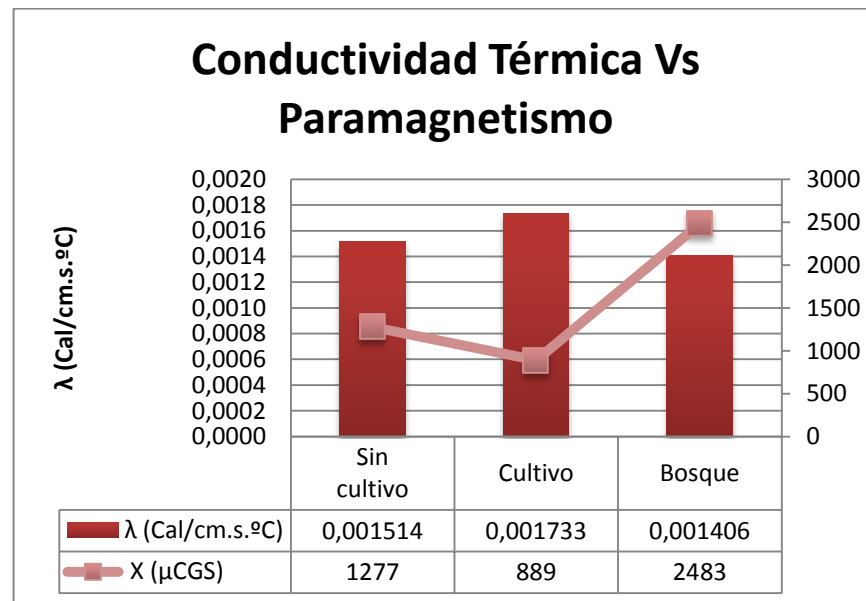


Figura 35. Conductividad Térmica Vs Paramagnetismo

En cuanto a la resistividad eléctrica (Figura 36), se encontró que esta depende también de la fracción mineralógica del suelo es decir que, si un suelo presenta condiciones favorables de porosidad en el suelo como buen contenido de macroporos, baja densidad aparente, y baja retención de la humedad (Figura 37), encontrará una mayor resistencia al paso de un flujo eléctrico por el suelo, la relación que se establece entonces entre la resistividad eléctrica y el paramagnetismo es directa.

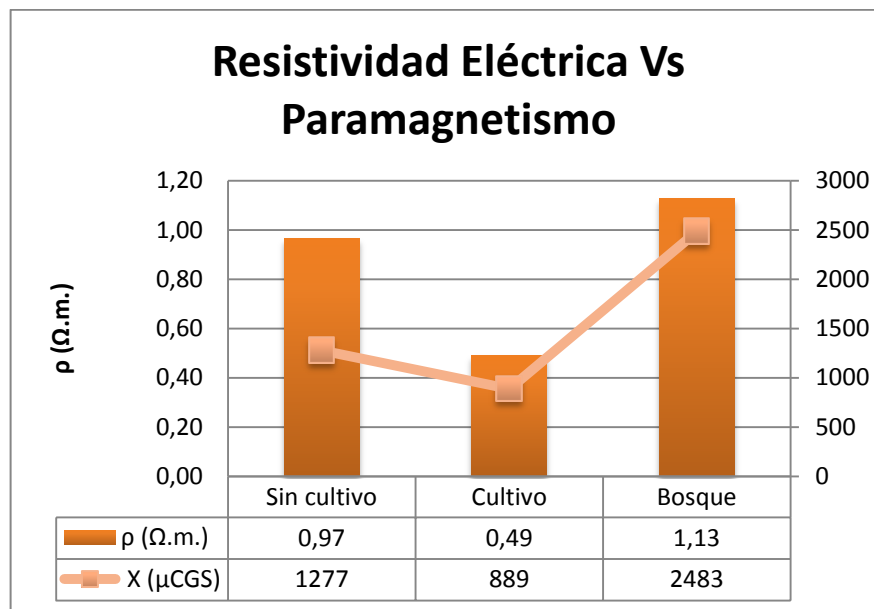


Figura 36. Resistividad eléctrica Vs. Paramagnetismo

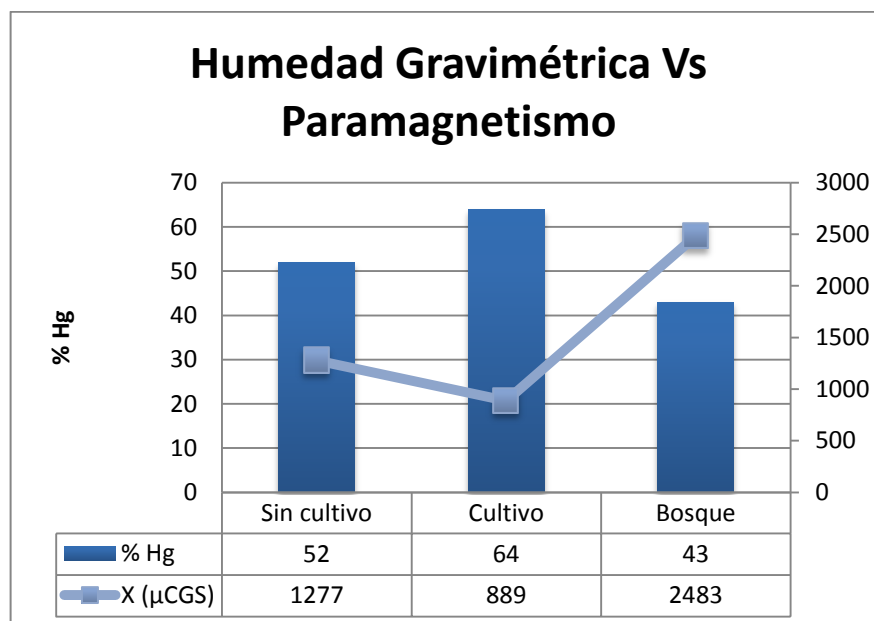


Figura 37. Humedad gravimétrica Vs. Paramagnetismo

5.1.5. Análisis espacial de las propiedades físicas del suelo

Los resultados del análisis espacial realizado por el paquete informático SIG, presentaron valores de correlaciones positivas y negativas en algunos casos, con valores porcentuales por encima del 50% (ó -50%). Se debe tener en cuenta que el signo en el valor porcentual de la correlación indica que dentro de la comparación entre dos propiedades del suelo, la abundancia de una implica la escasez o detrimento de la otra, de obtenerse un valor de cero en la correlación indicará que no hay relación significativa entre propiedades.

La densidad aparente presentó una correlación espacial del 63% con respecto al paramagnetismo, mientras que, con respecto a la microporosidad se tuvo como resultado una correlación espacial negativa del 61% lo que permite afirmar a partir de esta metodología de análisis, las tendencias mostradas en los gráficos de barras de algunas propiedades físicas del suelo.

Otro tipo de correlación destacada dentro de los resultados, se presentó con la humedad gravimétrica del suelo, indicando una correlación negativa del 83%. La zona de bosque presentó casi que en su totalidad un rango de humedad gravimétrica bajo en comparación con los rangos pertenecientes a las zonas de cultivos y no cultivados. Esta propiedad se encuentra ligada y en parte define la propiedad de resistividad eléctrica, debido a que en una zona con baja retención de la humedad, el paso del flujo de corriente será menor, es decir que el bosque ofrece una mayor resistencia eléctrica, esta propiedad presentó una correlación espacial positiva del 74% con el paramagnetismo.

Con relación a la propiedad de la conductividad térmica, la correlación con el paramagnetismo fue negativa indicando un valor del 82%, teniendo en cuenta que esta propiedad se relaciona con los valores de la textura en el suelo, densidad aparente, de la misma forma que en el tipo de labranza aplicada en el suelo.

Con respecto a otras propiedades físicas del suelo, no se encontraron correlaciones significativas o que su valor fuera alto (Ver Anexo 7). Sin embargo se pueden apreciar tendencias que permiten

inferir sobre el comportamiento de dichas propiedades como se podrá observar las demás haciendas analizadas.

Las distribuciones espaciales de las propiedades mencionadas anteriormente se muestran a continuación

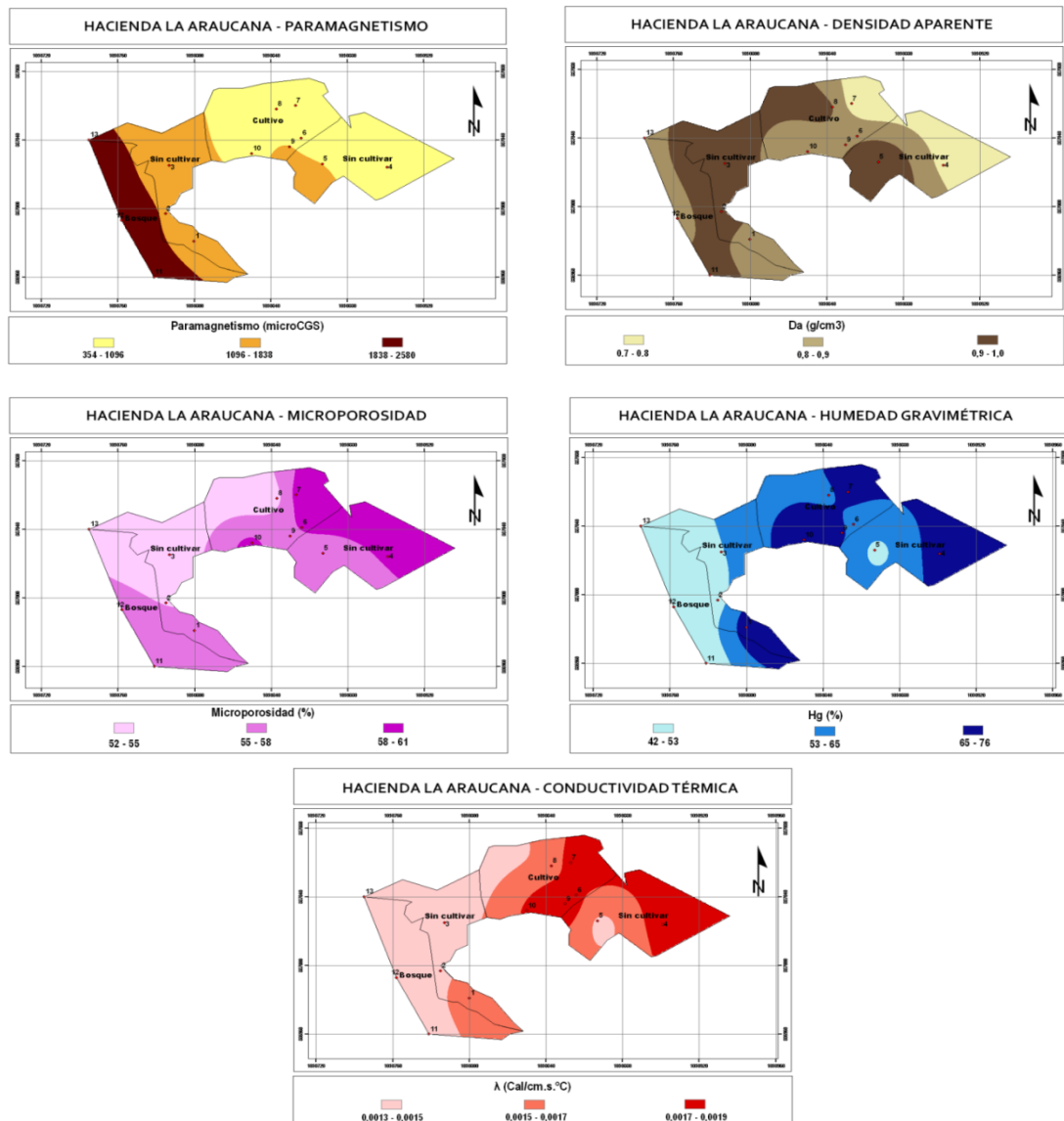


Figura 38. Distribuciones espaciales de propiedades físicas y sintéticas de los suelos en la hacienda La Araucana.

5.1.6. Paramagnetismo y las propiedades químicas en el suelo

En cuanto a las propiedades químicas del suelo, el análisis realizado utilizando las correlaciones espaciales no arrojó resultados significativos al momento de confrontarlas con el paramagnetismo, sin embargo, al realizar comparaciones entre los valores promedio de algunas propiedades en cada zona estudiada, se pueden apreciar tendencias directas entre el paramagnetismo con respecto a nutrientes menores como el boro (Figura 42), el manganeso (Figura 43), y algunas bases intercambiables como el Magnesio (Figura 40), y el sodio (Figura 41).

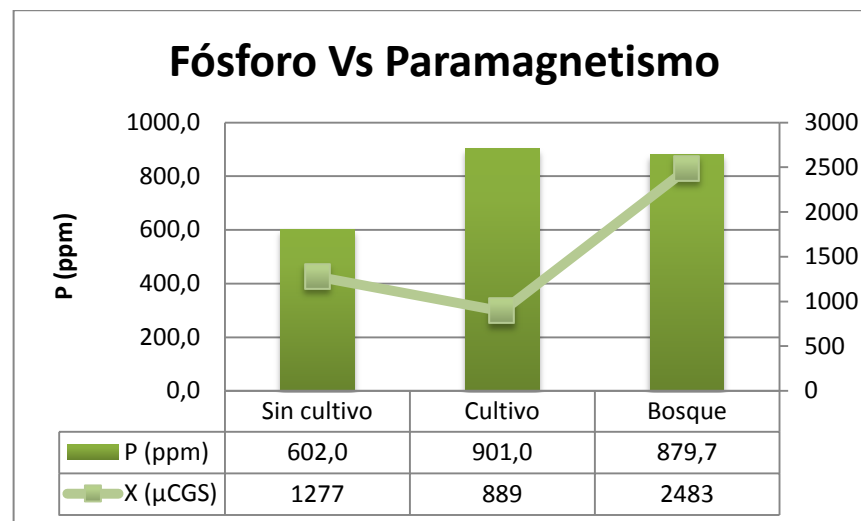


Figura 39. Fósforo Vs. Paramagnetismo

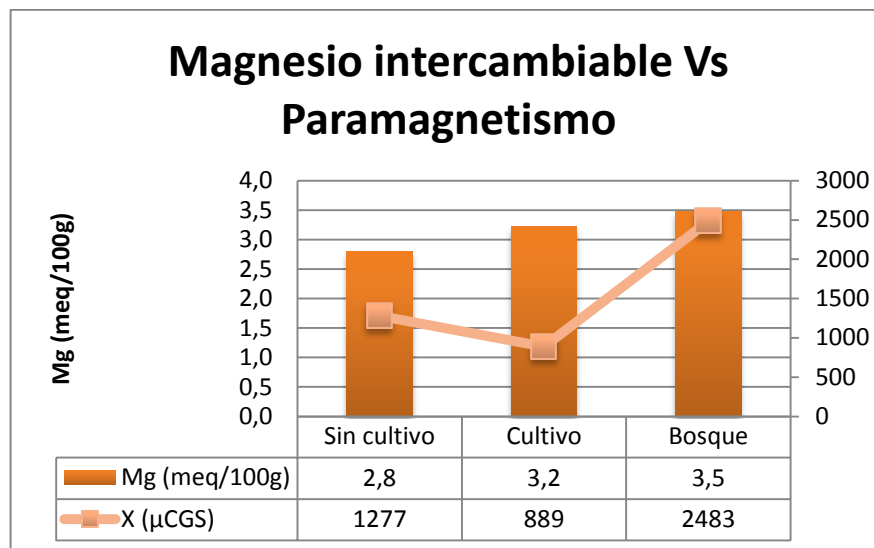


Figura 40. Magnesio intercambiable Vs Paramagnetismo

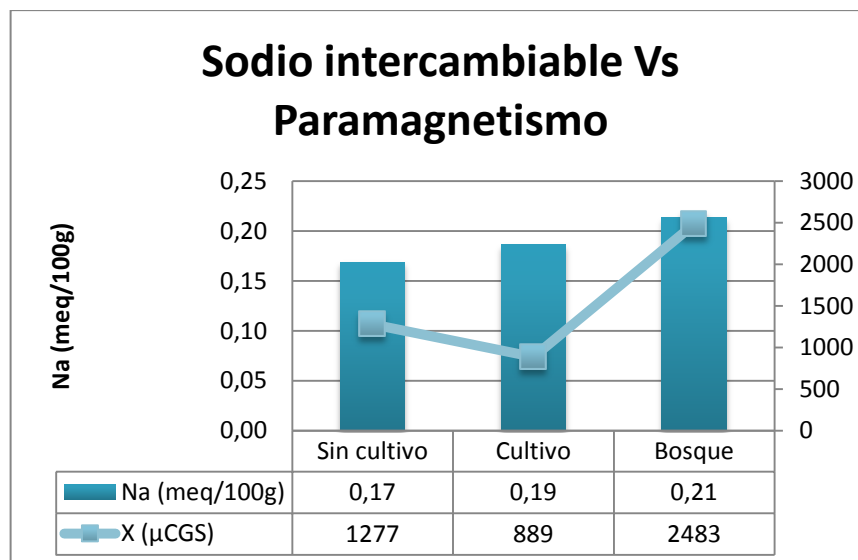


Figura 41. Sodio intercambiable Vs Paramagnetismo

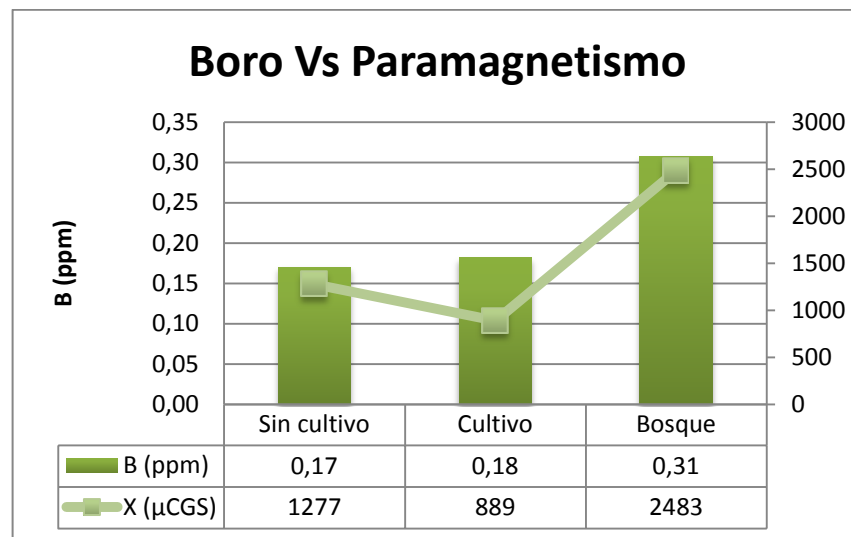


Figura 42. Boro Vs. Paramagnetismo

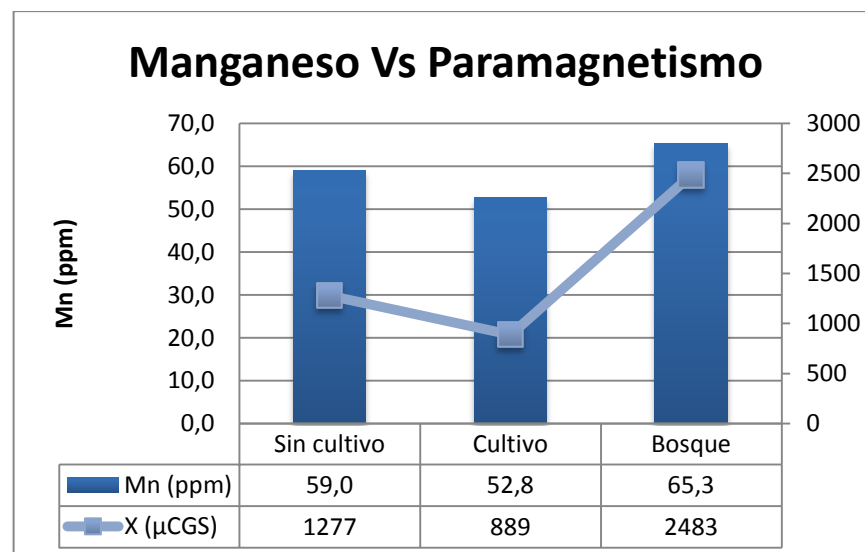


Figura 43. Manganeso Vs. Paramagnetismo

Con referencia al potencial de hidrógeno (pH) en el suelo, el valor alto de paramagnetismo presenta una relación con la clasificación neutra de pH, lo anterior, teniendo en cuenta los valores promedio de las zonas estudiadas.

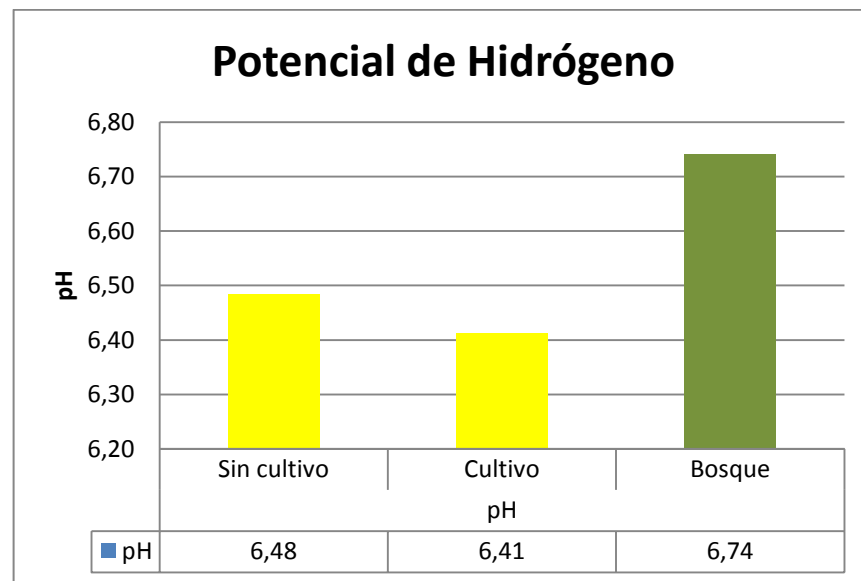


Figura 44. pH promedio por zonas

En cuanto a las propiedades biológicas del suelo, los resultados de la actividad microbiana mostraron los valores más altos en la zona de cultivo, la razón de este resultado se debe a que en esta zona el suelo ya había sido acondicionado con biofertilizantes y microorganismos benéficos antes de la realización de la toma de muestras.

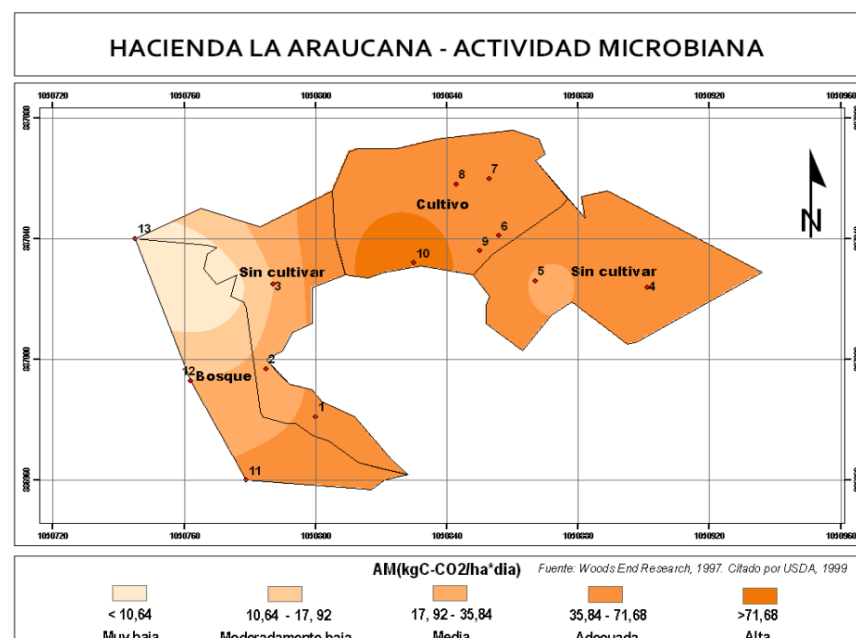


Figura 45. Distribución espacial de la actividad microbiana en la hacienda La Araucana.

5.1.7. Potencial productivo del suelo

Se calculó el potencial productivo en el suelo para la hacienda La Araucana, la distribución espacial de esta propiedad muestra las zonas de alto, medio y bajo PPS.

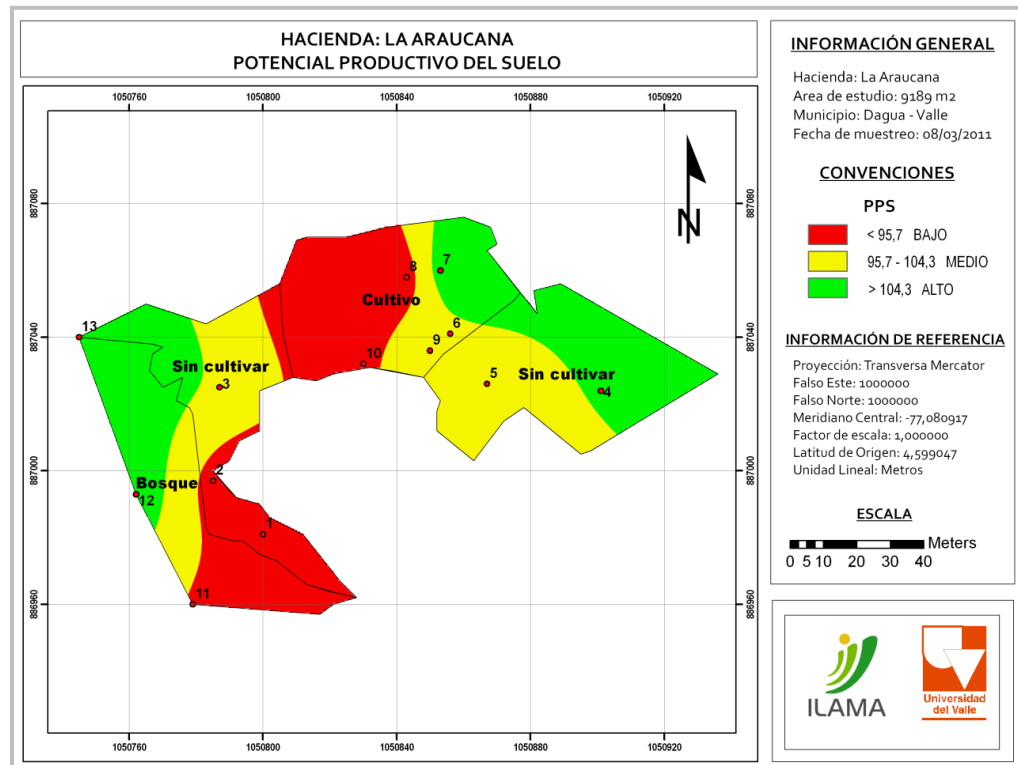


Figura 46. Potencial Productivo del Suelo de la hacienda La Araucana.

El análisis espacial no mostró un resultado significativo al momento de realizar la correlación del PPS con el paramagnetismo, sin embargo se evidenciaron tendencias que asocian los rangos directamente entre estas dos propiedades holísticas.

Esto se pudo evidenciar a partir del cálculo de los promedios en ambas propiedades para cada grupo de puntos que comprenden las zonas de Bosque, Cultivo y No Cultivo, se pudo observar la relación directa entre valores altos de PPS con altos valores de paramagnetismo.

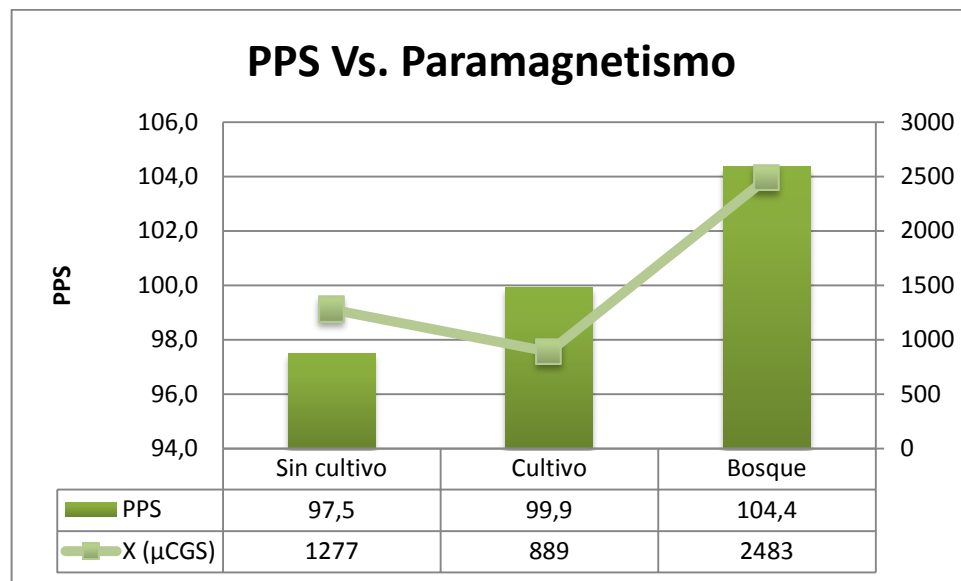


Figura 47. Potencial Productivo del Suelo Vs. Paramagnetismo.

A continuación (Tabla 8), se resumen los resultados de las correlaciones entre el paramagnetismo y las propiedades del suelo, como también las tendencias graficas en cuanto a los promedios de las propiedades estudiadas.

Tabla 8. Resumen de correlaciones y promedios de zonas estudiadas de propiedades del suelo con el paramagnetismo del suelo.

PROPIEDADES	CORRELACIÓN ESPACIAL (%)	COMPARACIÓN GRÁFICA DE PROMEDIOS EN LAS ZONAS ESTUDIADAS
FISICAS		
Densidad aparente	63	Buena
Microporosidad	-61%	Buena
Humedad Gravimétrica	-83%	Muy Buena
Conductividad Térmica	-82%	Muy Buena
Resistividad Eléctrica	74%	Muy Buena
QUIMICAS		
Fósforo	No presentó	Muy Buena
Magnesio		Muy Buena
Sodio		Muy Buena
Boro		Muy Buena
Manganeso		Muy Buena
PPS	No presentó	Buena

5.2. HACIENDA LAS GRAMAS

5.2.1. Resultado del análisis textural del suelo

Según los resultados de la prueba de textura, la Hacienda Las Gramas cuenta con dos grupos texturales, el número 2, que corresponde a las texturas Franco – Arcillo -Arenosa (FArA), Arcillo - Arenosa(ArA), Franca (F), y Franco – Arcillosa (FAr); y el grupo textural 4, donde se encuentran las texturas, Arcillo – Limoso (ArL), y Arcillosa(Ar). (Florentino 1994). Por lo tanto y según los análisis, la hacienda se encontró texturas Franco Arcillosas (FAr) y Arcillosas (Ar). (Ver Anexo 3).

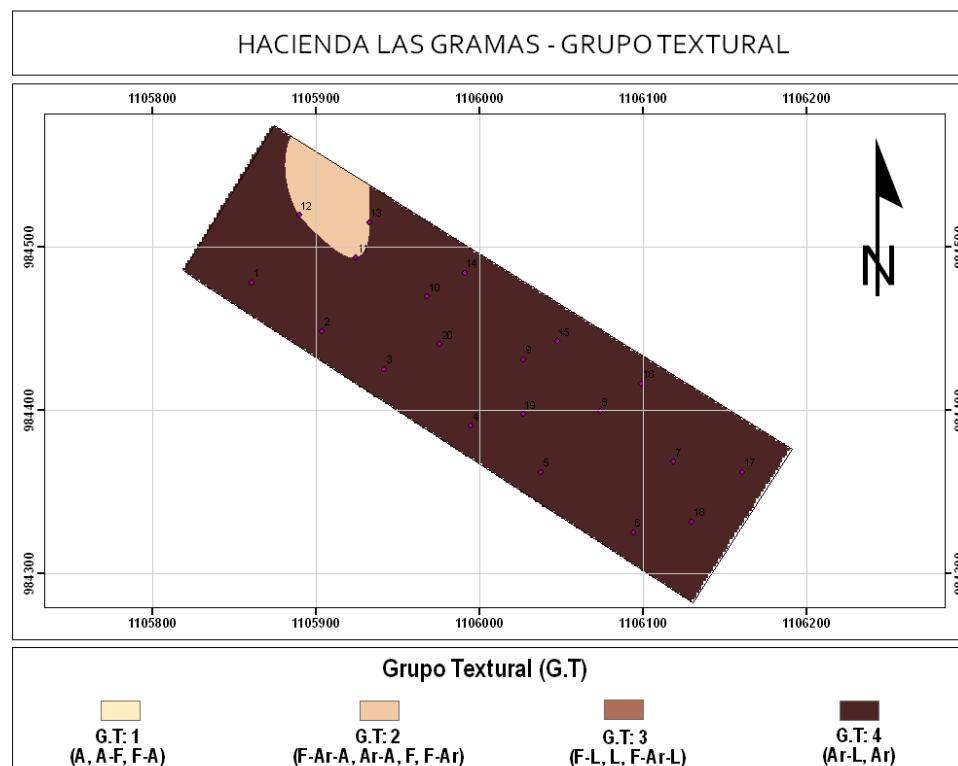


Figura 48. Distribución espacial de los grupos texturales en la hacienda Las Gramas.

5.2.2. Paramagnetismo en el suelo

En esta hacienda, no hubo una clasificación por zonas que permitieran hacer alguna comparación en los rangos de paramagnetismo, sin embargo, se presentaron correlaciones espaciales importantes con respecto a algunas propiedades físicas en los suelos y tendencias en algunas propiedades químicas.

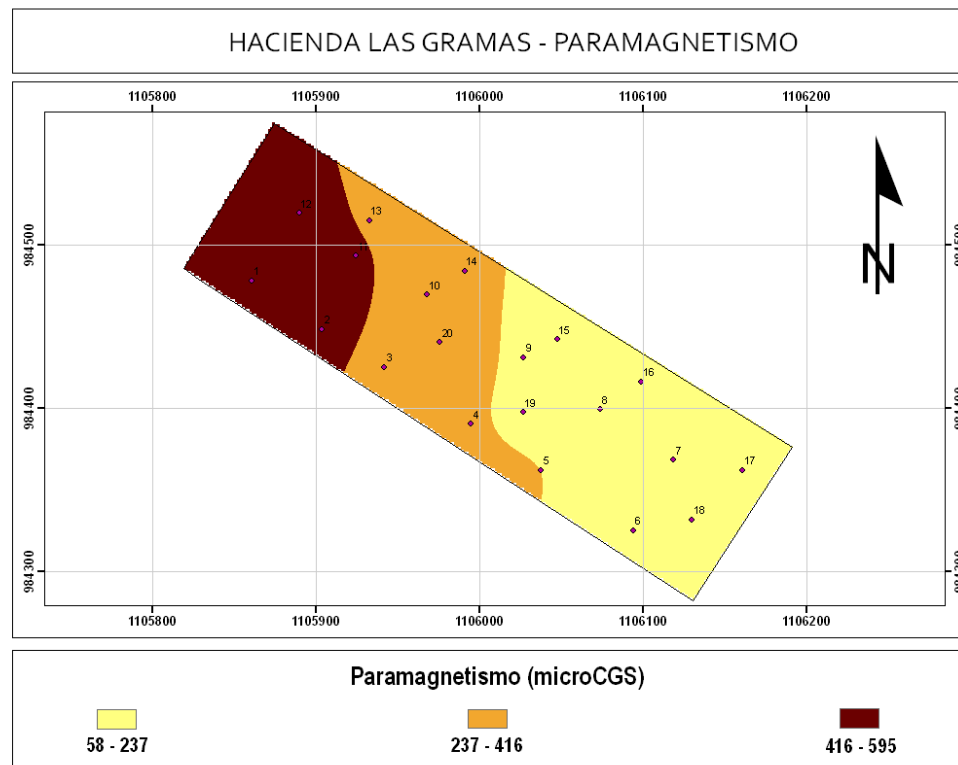


Figura 49. Distribución espacial del paramagnetismo en la Hacienda Las Gramas.

Según la distribución espacial se puede apreciar un cambio gradual en la propiedad, con lecturas de paramagnetismo entre 58 y 595 μCGS , comparando estos valores con los obtenidos en la hacienda La Araucana, se tiene una reducción que pudo variar teniendo en cuenta factores como los antecedentes de salinidad de la hacienda, tipo de labranza y calidad de agua para el riego.

5.2.3. Paramagnetismo y las propiedades físicas del suelo

Para establecer las relaciones entre esta propiedad y demás propiedades del suelo, se emplearon las correlaciones espaciales.

Para esta hacienda nuevamente se presentó una correlación alta entre el paramagnetismo y la densidad aparente del 96%, este valor de correlación, se llevó a una correlación lineal entre propiedades, lo que permite deducir una ecuación de tendencia entre ambas propiedades dada la alta correlación lineal (R^2) del orden de 0,89.

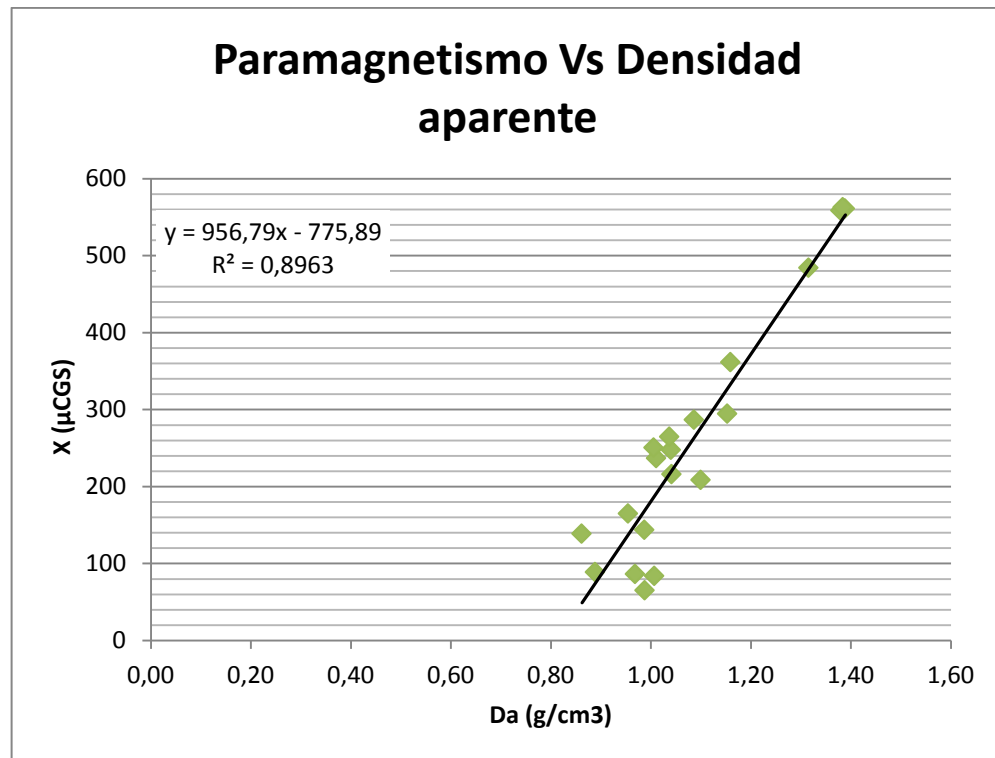


Figura 50. Gráfico de tendencia lineal entre Paramagnetismo y la Densidad Aparente.

Otras propiedades como la microporosidad mostraron una correlación espacial negativa del 86%, y la humedad gravimétrica con una correlación del 89% negativa.

5.2.4. Paramagnetismo y las propiedades sintéticas del suelo

Las correlaciones espaciales para este caso, solo evidenciaron comportamientos considerables con respecto a la conductividad térmica, también, como en el caso de la hacienda La Araucana un valor porcentual negativo del 81%.

La resistividad eléctrica no presentó correlación significativa, ya que según la distribución espacial de esta propiedad se muestra un rango bajo en casi la totalidad de la hacienda.

Las distribuciones espaciales de las propiedades físicas del suelo, confrontadas con el paramagnetismo se muestran a continuación.

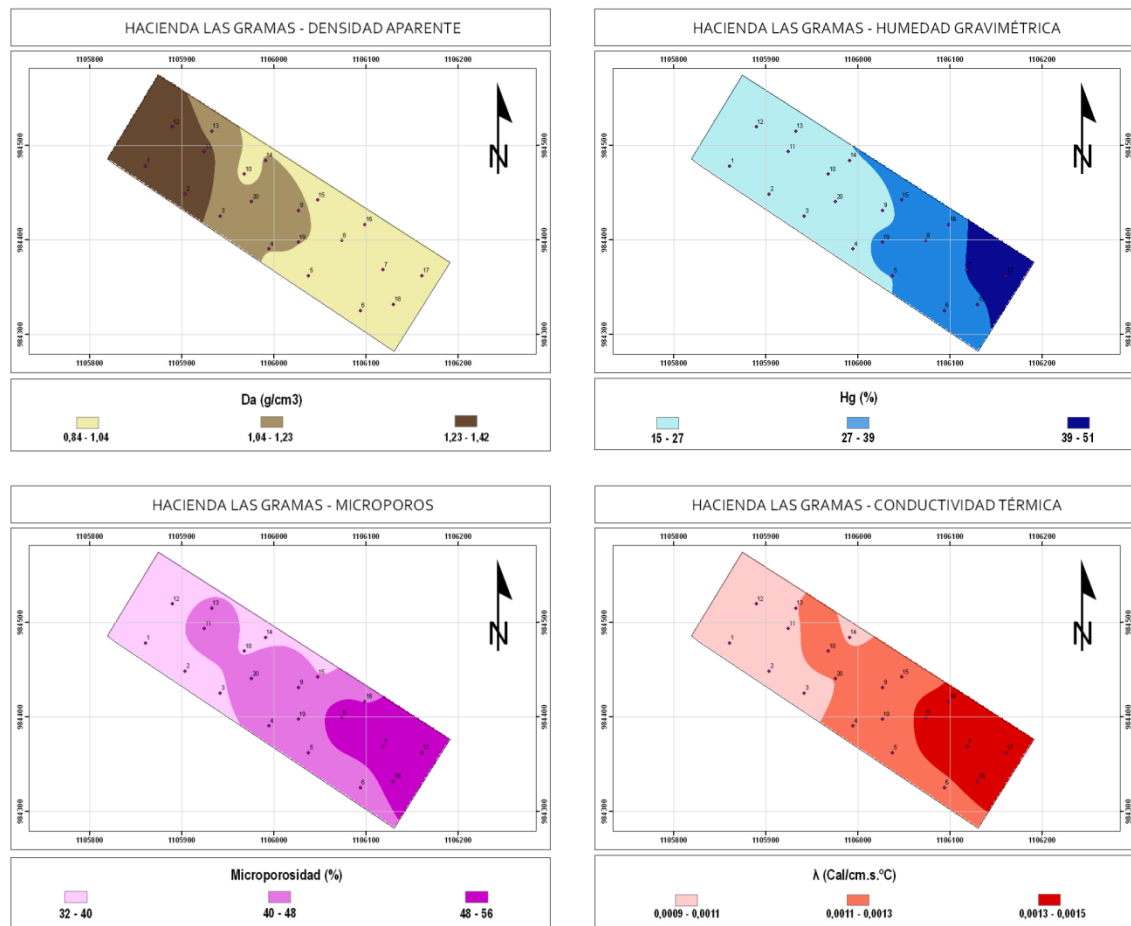


Figura 51. Distribuciones espaciales de algunas propiedades físicas del suelo.

5.2.5. Paramagnetismo y las propiedades químicas del suelo

En cuanto a las distribuciones espaciales con las propiedades químicas, solo hubo correlación con la base intercambiable potasio (K) en un 64%, y con el potencial de hidrógeno en un 65% negativo (Figura 52), sin embargo, en este último caso de debe tener cuidado, ya que los valores extremos en el pH pueden ser nocivos para el desarrollo de las plantas, por lo que habría que establecer una tendencia hacia valores de pH entre 6,2 y 6,5 (Guerrero 1991). como valores favorables para la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo de los cultivos.

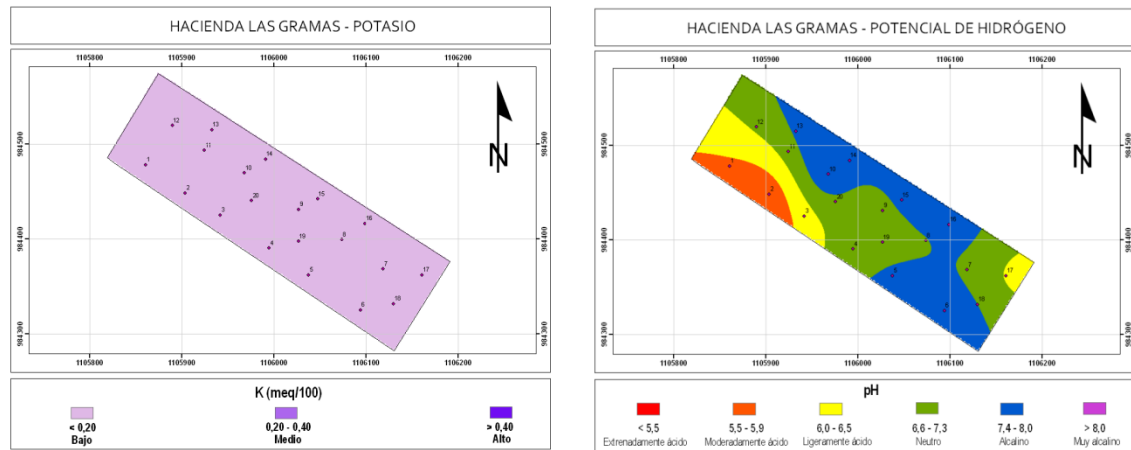


Figura 52. Distribuciones espaciales para el Potasio y el pH.

En cuanto a las propiedades biológicas del suelo y su relación con el paramagnetismo, no se encontró correlación significativa.

5.2.6. Potencial Productivo del Suelo

La distribución espacial del PPS en el suelo para la hacienda Las Gramas presenta en su totalidad un rangos medios y bajos para esta propiedad, los valores de alto PPS solo se presentan es tres partes de menor área que los rangos anteriormente mencionados. Por lo tanto y dada la distribución de dichos rangos no hubo correlación de esta propiedad con el paramagnetismo.

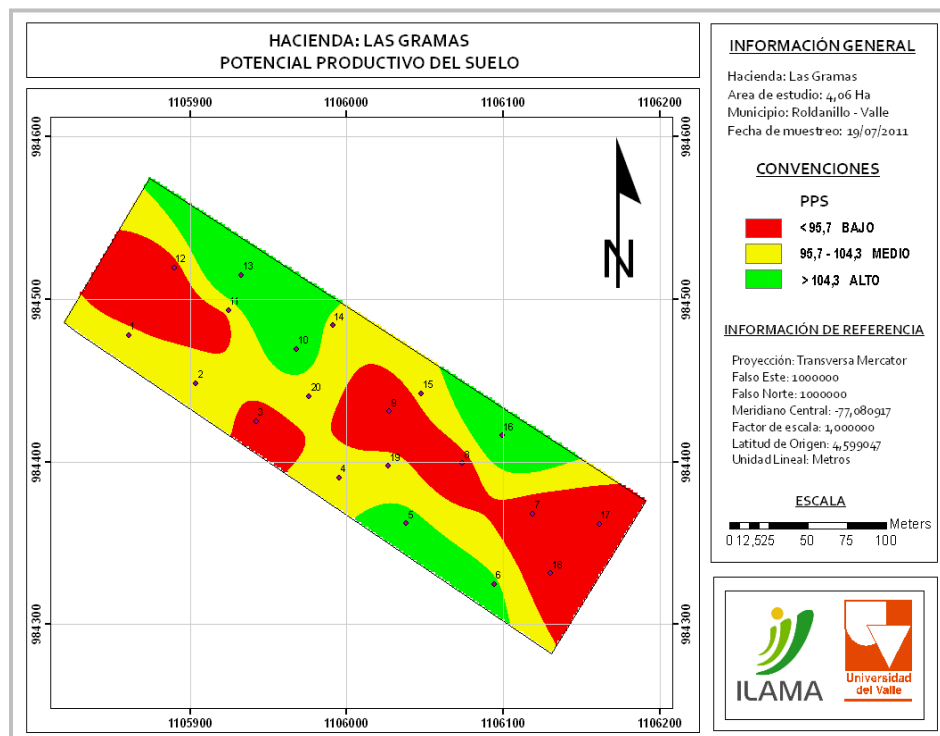


Figura 53. Potencial Productivo del Suelo en la Hacienda Las Gramas.

En esta hacienda solo se presentaron correlaciones espaciales en mayoría con propiedades físicas del suelo; no hubo una zonificación como en el caso de la hacienda La Araucana que permitiera establecer tendencias a partir de promedios de las propiedades del suelo.

Tabla 9. Resumen de correlaciones espaciales presentadas en la hacienda Las Gramas.

Propiedad	Correlación Espacial (%)	Comparación Gráfica de Promedios en las zonas estudiadas
FISICAS		
Densidad aparente	96	Buena
Microporosidad	-86	Buena
Humedad Gravimétrica	-89	Buena
Conductividad Térmica	-93	Buena
Resistividad Eléctrica	No presentó	No presentó
QUIMICAS		
Potasio	64	Buena
pH	-65	Buena
PPS	No presentó	No presentó

5.3. HACIENDA SANTA FE

5.3.1. Resultado del análisis textural del suelo

La hacienda Santa Fe cuenta con dos grupos texturales de suelo, donde se encuentran la textura Franco – Arcillosa (FAr) que pertenece al grupo textural 2, Arcilloso (Ar) y Arcillo – Limoso (ArL) que corresponden al grupo textural 4 (Florentino 1994).

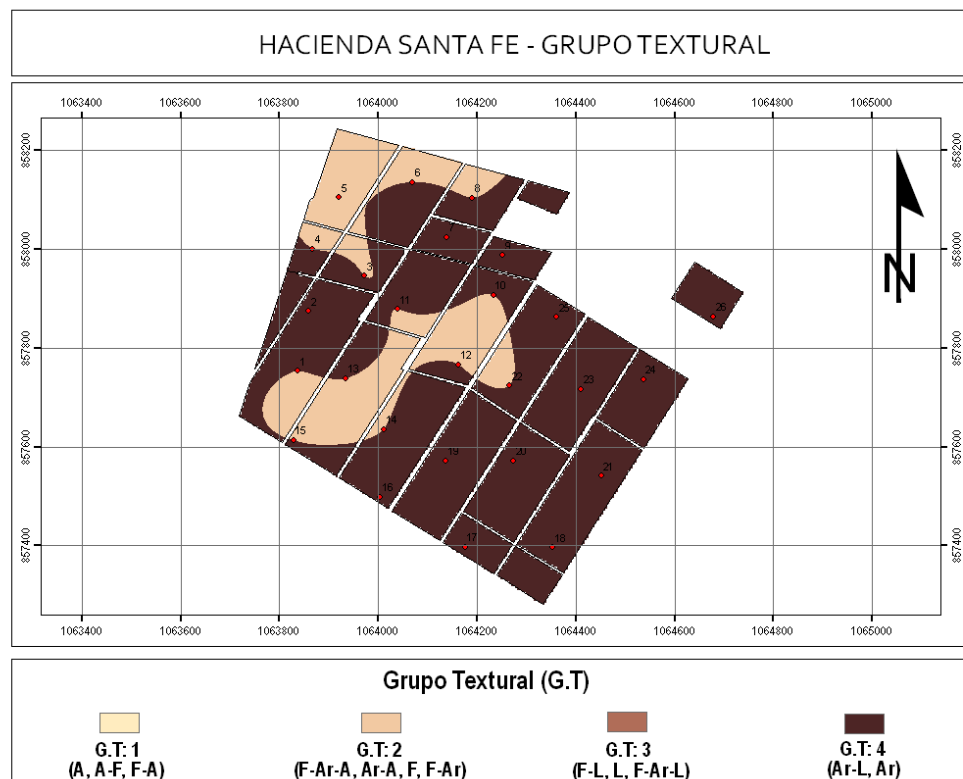


Figura 54. Grupos texturales en la hacienda Santa Fe.

5.3.2. Paramagnetismo en el suelo

Para el análisis de los resultados, se debe tener en cuenta que en la extensión de esta hacienda que comprende 45,8 hectáreas distribuidas en 6 suertes solamente presentó una lectura de paramagnetismo alto en la suerte 006A. Los rangos de esta propiedad para la hacienda Santa Fe resultaron ser más bajos en comparación con las haciendas analizadas anteriormente, el valor máximo alcanzado fue de 352 μ CGS. Esto puede estar relacionado con la labranza intensiva que se practica en esta hacienda, además se encuentra el antecedente de haber sido cultivada en arroz;

este comportamiento también se puede evidenciar en las demás propiedades físicas estudiadas (Anexo 5 - 6).

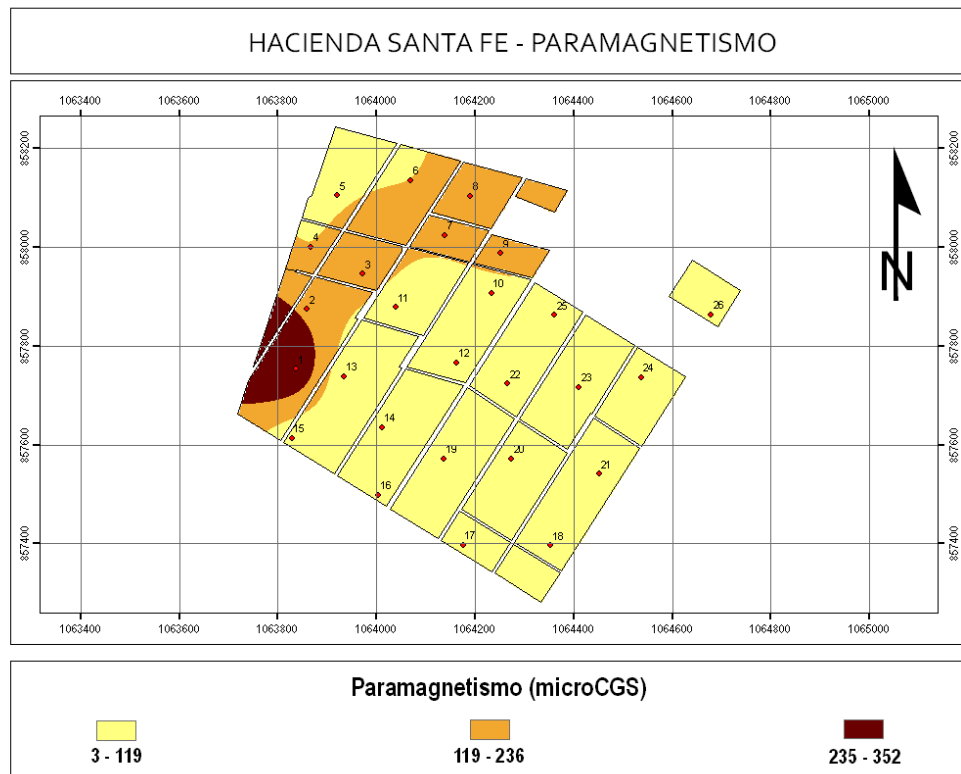


Figura 55. Distribución espacial del paramagnetismo en la hacienda Santa Fe.

Otro factor importante evidenciado es que en el 83% del área total de la hacienda se encuentra en un rango bajo de lectura del paramagnetismo el cual oscila entre 3 y 119 μ CGS.

5.3.3. Paramagnetismo y las propiedades físicas del suelo

Para esta hacienda, se presentaron correlaciones bajas en cuanto a esta propiedad y las propiedades físicas del suelo, sin embargo se presentaron tendencias en cuanto a la densidad aparente, donde la correlación espacial fue del 31%, también se presentó una correlación espacial negativa con la humedad gravimétrica del 47% (Anexo 11).

En cuanto a las propiedades sintéticas del suelo, con la conductividad térmica la correlación fue muy baja, sin embargo a partir del cálculo de promedios de esta propiedad para cada suerte mostró que

en las suertes 006A y 004 presentaron valores inferiores de esta propiedad con respecto a las suertes 005 y 003. En relación con el paramagnetismo la tendencia que se sigue presentando es que a mayor paramagnetismo, la conductividad térmica es baja.

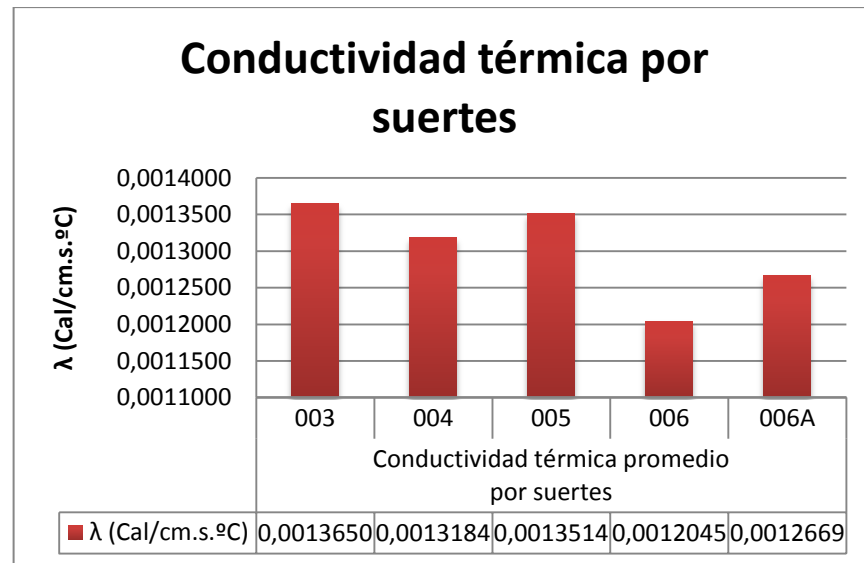


Figura 56. Conductividad térmica promedio en la hacienda Santa Fe.

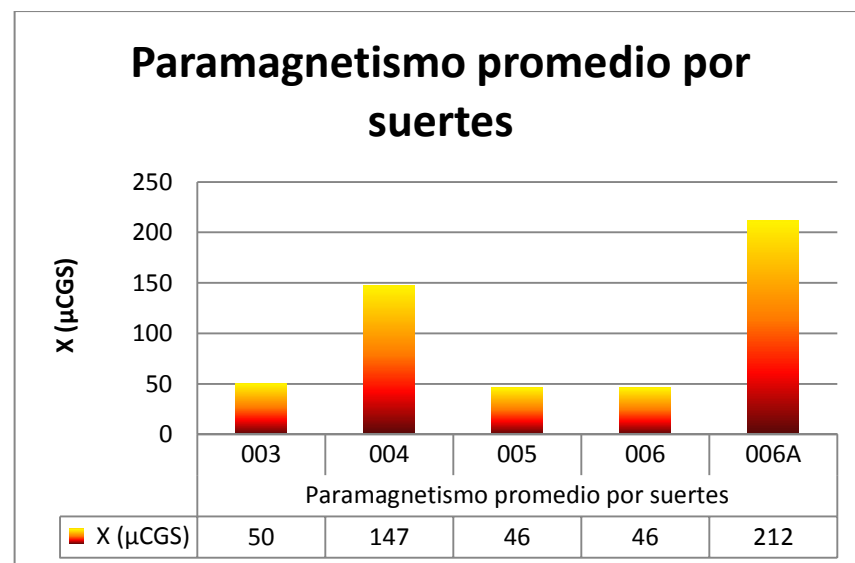


Figura 57. Paramagnetismo promedio en la hacienda Santa Fe.

5.3.4. Paramagnetismo y las propiedades Químicas del suelo

Particularmente solo se presentó correlación espacial alta con el Boro del 69% para esta hacienda, las otras propiedades químicas presentaron correlaciones con valores poco significativos. Por otra parte el pH presentó un comportamiento uniforme ya que en el total de la hacienda persisten rangos ligeramente ácidos (Anexo 12).

5.3.5. Paramagnetismo y la producción en caña de azúcar.

En esta hacienda se pudo confrontar los valores de toneladas de caña por hectárea (TCH) teniendo en cuenta la información cronológica facilitada por el Ingenio INCAUCA de las últimas cosechas, con los valores promedio del paramagnetismo por cada suerte.

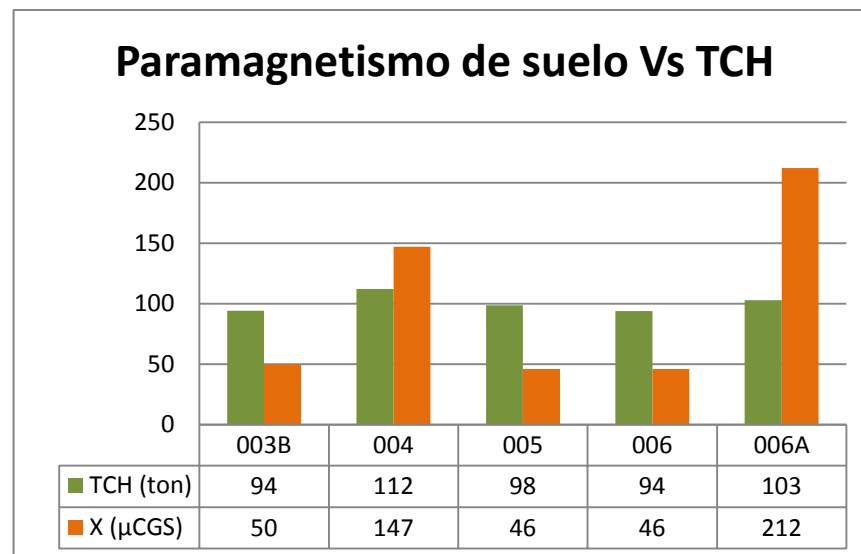


Figura 58. Gráfico de paramagnetismo contra TCH

Se encuentra que existe una tendencia de relación directa entre TCH y paramagnetismo, evidenciándose una mayor producción en las suertes 004 y 006A, de igual forma en estas suertes se distribuyen los valores de paramagnetismo medido en el suelo, por lo tanto es posible establecer una relación con esta propiedad agronómica que está ligada a la producción de caña de azúcar.

5.3.6. Potencial Productivo del suelo.

En la hacienda Santa Fe el Potencial Productivo del Suelo, tiene una distribución espacial donde predominan valores medios y bajos de esta propiedad, sin embargo al establecer una relación con el paramagnetismo y los valores promedios de toneladas de caña por hectárea se encontraron tendencias directas entre estas tres propiedades.

Para revisar dicha tendencia se elaboró un gráfico de promedios normalizados para estas tres propiedades (Figura 60)

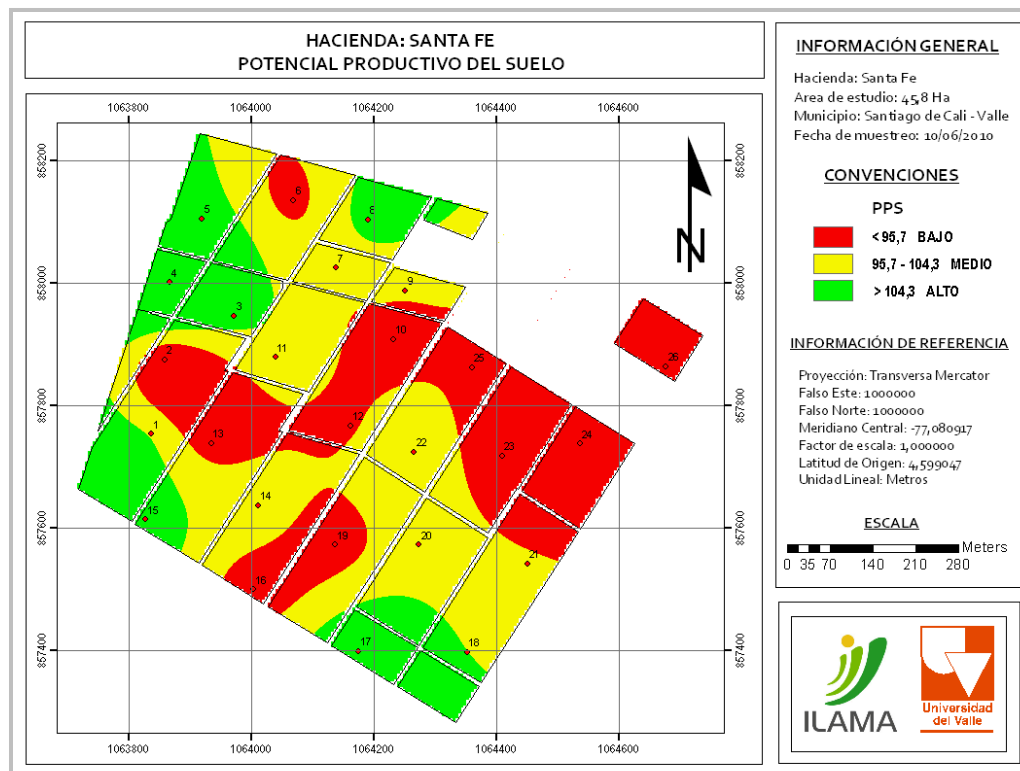


Figura 59. Potencial productivo del suelo en la hacienda Santa Fe.

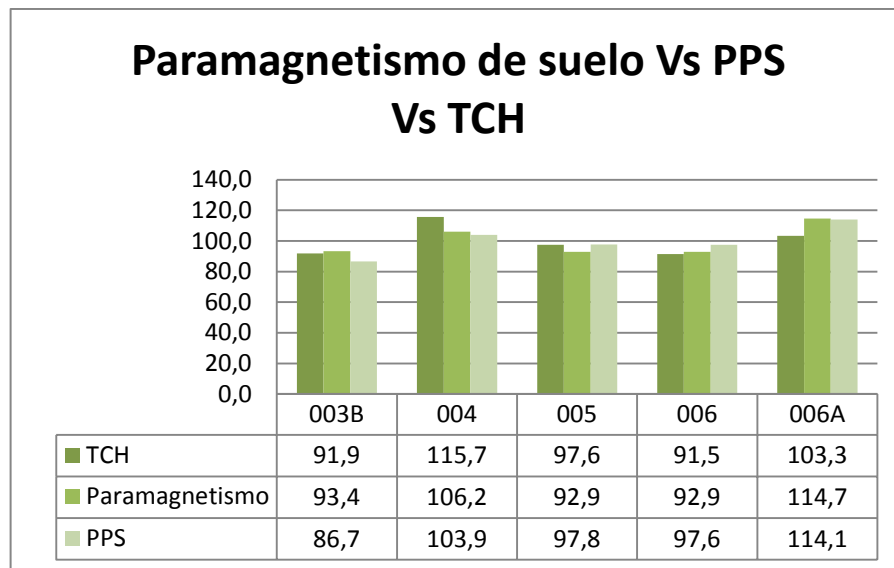


Figura 60. Figura. Diagrama de barras de Paramagnetismo Vs PPS Vs TCH

CONCLUSIONES

- En particular, el paramagnetismo relaciona adecuadamente propiedades físicas del suelo en orden de importancia, la densidad aparente, la porosidad y la humedad en el suelo, lo que permitiría establecer una nueva propiedad holística complementaria para el rápido diagnóstico del suelo, a partir de un método no destructivo.
- Es posible establecer en un punto de partida, posibles ecuaciones que permitan relacionar el paramagnetismo en el suelo con las demás propiedades físicas a fin de predecir o inferir el comportamiento de otras propiedades como la densidad aparente utilizando relaciones lineales.
- En cuanto a las propiedades químicas, las correlaciones espaciales permiten inferir alguna tendencia con respecto al paramagnetismo, esta situación se presentó en las tres haciendas pese a no ser constante o predominar alguna propiedad como en el caso de las propiedades físicas.
- Con respecto a la producción en cultivos, se tiene una muy buena relación de los datos de producción por suertes con los valores de paramagnetismo y PPS, esta comparación solo fue posible realizarla en la Hacienda Santa Fe, ya que existían datos históricos de producción desde el año 1995.
- Un hecho interesante que se presentó fue la disminución de los valores de paramagnetismo en el suelo con respecto al tipo de labranza practicada en cada hacienda, por ejemplo, la hacienda La Araucana, en la que maneja un tipo de labranza de conservación, presentó los valores más altos, mientras que la Hacienda Santa Fe donde la labranza es más intensiva (pesada), presento valores muy bajos de esta propiedad.

- Son necesarios métodos rápidos, precisos y no destructivos para el diagnóstico del estado del suelo, complementado con herramientas informáticas como los SIG que permitan la localización de posibles problemas hasta ahora relacionados con el tipo de labranza practicada en cada hacienda; de esta forma establecer correctivos que mitiguen o eviten impactos que comprometan la estabilidad física, química y biológica de los suelos.

RECOMENDACIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

- Es necesario un estudio del paramagnetismo y su relación con las propiedades del suelo bajo un adecuado diseño de experimento que permita asociar no solo el paramagnetismo con el suelo, sino también con el desarrollo de la planta.
- El uso de dispositivos más precisos para el estudio de esta propiedad sería complementario pese a su alto costo. Además de relacionarlos con la mineralogía de suelos, ya que se trata de un método asociado a la degradación por la práctica inadecuada de la labranza.
- Establecer posibles ecuaciones que establezcan relaciones entre el paramagnetismo y otras propiedades que describen el suelo, con el fin de poder inferir el estado de estas.

BIBLIOGRAFÍA

ABU-HAMDEH N. H., 2001. Measurement of the thermal conductivity of sandy loam and clay loam soils using single and dual probes. Agricultural Engineering and Technology Department, Jordan University of Science and Technology. Irbid, Jordan. 209-13 p.

ArcGIS, palabra clave "Spatial Analyst".

<http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z00000003000000> . Visitada en Noviembre de 2011.

ARSHAD, C. Effect of high magnetic field on the chemical composition of soil organic matter. Agriculture and Agri – Food. Canada.

BARRAGÁN, J. Caracterización magnética de suelos en el área de Manizales, Colombia. Tesis de Magister en Ciencias, Geofísica. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. 2010.

BARTEL, A. *et al.* Propiedades magnéticas de diferentes suelos del partido de La Plata, provincia de Buenos Aires. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 60 p 591 – 598., Argentina 2005.

BONILLA, C. Notas preliminares sobre biología de suelo. Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira. 1998.

CALLAHAN, P. Paramagnetism: Rediscovering Nature's Secret Force of Growth. Across U.S.A., 1995.

CARBONELL, M^a V.; MARTINEZ E. "Bioelectromagnetismo aplicado a la agricultura" Asignatura de doctorado, curso 98 – 99. ETSI Agrónomos (UPM), España 1998.

CASTERAD, M, LÓPEZ R., ACEVEDO, A., Uso de técnicas SIG y teledetección en el seguimiento del cultivo de viña. Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón.

CUERO, R. y R. TULANDE. Evaluación de la estimulación magnética con campo magnético variable en la cachaza seca y en el período de compostaje de la cachaza verde de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) tratadas con microorganismos benéficos. Trabajo de grado Ingeniería Agrícola. Universidad del Valle. Facultad de Ingenierías, Cali. 2004.

CVC - Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, Universidad del Valle - Grupo de Investigación ILAMA, 2009. Proyecto “Diseño y promoción de tecnologías y prácticas para la recuperación de áreas con suelos degradados por erosión y salinidad”.

DOMINGUEZ, J. Breve Introducción a la cartografía y a los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Informes técnicos Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, (CINEMAT)., Ministerio de Ciencia y Tecnología. Editorial CINEMAT. Madrid – España. 2000.

ERAZO, E., 2007. Determinación del Potencial Productivo del Suelo en un sistema de manejo ecológico de yuca en el norte del Cauca, a partir de propiedades sintéticas y analíticas del suelo. Trabajo de grado (Ingeniería Agrícola). Universidad del Valle, Universidad Nacional de Colombia.

FAO, Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Los fertilizantes y su uso, 2002

FLORENTINO, A. Guía para determinar los requerimientos de labranza de los suelos; Instituto de Edafología; Facultad de Agronomía; Universidad Central de Venezuela. Maracay – Venezuela. 1994.

FEYNMAN, R. Física: Electromagnetismo y Materia. Vol 2. Fondo Educativo Interamericano, S.A. Estados Unidos. 1972.

GONZALEZ, M .A. “Suelos agrícolas” notas de laboratorio Universidad Nacional de Colombia. 1999.

INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO (ICA). Fertilización en diversos cultivos (Quinta aproximación). Editorial PRODUMEDIOS. Santa Fe de Bogotá D.C. – Colombia. 1992.

JARAMILLO D. Introducción a la ciencia del suelo, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, 2002.

JEZIERSKI A. *et al.* Electron Paramagnetic Resonance (EPR) studies on stable and transient radicals in humic acids from compost, soil, peat and Brown coal. *Spectrochimica Acta Part A*, 60 379 – 385. Poland 1999.

JIMÉNEZ, C. Modelación del Potencial Productivo del suelo de cultivos de yuca (*Manihot esculenta crantz*) en zonas de ladera del norte del Cauca, a partir de propiedades del suelo y rendimientos. Universidad del Valle. 2010.

JOHNSON, R; KUBY, P; Estadística Elemental: lo esencial. Cengage Learning Editores; 2004.

LÓPEZ, L. Evaluación de la dinámica de la Reserva Energética del Suelo y su relación con la productividad en un cultivo de algodón en el municipio del Cerrito Valle del Cauca. Trabajo de grado (Ingeniería Agrícola). Universidad del Valle, Universidad Nacional de Colombia. 2006.

MONTENEGRO, H. y MALAGÓN, D. 1990. Propiedades físicas de los suelos, Instituto geográfico “AGUSTIN CODAZZI” (IGAC). Sección Imprenta y Ediciones IGAC, Bogotá, 1990

MULLER, J. *et al.* Paramagnetic Centers in kaolinite and the history of weathering crusts. *Geochemistry of the earth's surface and of mineral formation 2nd international symposium.*, France., 1990.

ORELLANA E. Prospección geoelectrica en corriente continua, Paraninfo, Biblioteca técnica Philips Madrid - España, 23-25, 107-108 pp. 1972.

PEÑA, J. Estimulación magnética de microorganismos benéficos aplicados a la cachaza para mejorar su uso como fertilizante orgánico. Universidad del Valle, Colciencias. 2010.

PLASTER E. J. La ciencia del suelo y su manejo, Editorial Paraninfo, España, 2000.

PURCELL, E. Electricidad y magnetismo. Vol 2. Editorial Reverté, S.A., España, 1969.

REYES, A. y VIERA, M. Efecto de cuatro sistemas de labranza en la compactación de un suelo vertisol de Palmira (Valle) y su relación con el comportamiento térmico. Trabajo de grado (Ingeniería Agrícola). Universidad del Valle, Universidad Nacional de Colombia. 2001.

Scholar Google, Palabra clave “suelos paramagnéticos”.

http://scholar.google.com.co/scholar?hl=es&q=suelos+paramagneticos&btnG=Buscar&lr=&as_ylo=&as_vis=0. Visitada en octubre de 2010.

SERWAY, R. Física. Tomo II. McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V. Bogotá –Colombia. 1998.

Springer Link, Palabra clave “Paramagnetic soil”.

<http://www.springerlink.com/content/?k=paramagnetic+soil>. Visitada en Septiembre de 2010.

VASQUEZ, C. *et al.* Magnetismo de rocas y su aplicación a paleosuelos: estudio piloto en una secuencia loess-paleosuelo de la región chacopampeana. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 53 p 83 - 90., Argentina. 1998.

ZUÑIGA, O. Nuevas técnicas no destructivas en el manejo de suelos y plantas como herramientas para una agricultura de conservación. Memorias VIII Congreso Nacional y X Seminario de Ingeniería Agrícola. 2001.

ZÚÑIGA, O.; REYES, A. y Universidad del Valle, 2007. Patente de invención Europea No. 20030228: "Equipo para determinar conductividad térmica del suelo. Sonda Electrotérmica para estudios de compactación, reserva energética del suelo y evaluación de la calidad de alimentos y productos agroecológicos".

ZÚÑIGA, O. et al. Estrategias de desarrollo y la concepción agroambiental: un enfoque analítico y sintético. Modulo I, Diplomado en Agricultura Orgánica, Universidad del Valle, 2001.

ZÚÑIGA O., PEÑA J., OSORIO J., Y CUERO R., Evaluación de tecnologías para la recuperación de áreas con suelos degradados por salinidad. Revista Facultad Nacional de Agronomía. Vol. 64 No 1. 2011

ZÚÑIGA O., PEÑA J., Y CUERO R., 2. Estimulación con campo electromagnético variable de microorganismos benéficos aplicados a la cachaza para mejorar su uso como biofertilizante. Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial. Vol. 9 No 2011

ZÚÑIGA, O; POHLAN, J. Agricultura orgánica en Colombia: Un enfoque Analítico y Sintético. Universidad del Valle. Santiago de Cali. 2003.

ANEXOS

ANEXO 1. Resultados Análisis de propiedades Hacienda La Araucana. Laboratorio de Física Ambiental – Universidad del Valle.



Grupo de Investigación en Ciencias Ambientales y de la Tierra - **ILAMA**
Laboratorio de Física Ambiental
UNIVERSIDAD DEL VALLE
Teléfono: (02) 3212389
EMAIL: ilama@univalle.edu.co

Descripción: Análisis de suelos en la Hacienda La Araucana

Municipio: Dagua

Fecha de Muestreo: 03/03/2011

Tipo de análisis: Determinación de Actividad Microbiana, Resistividad Eléctrica, Conductividad Térmica, Densidad Aparente, Microporosidad, Macroporosidad y Humedad Gravimétrica del suelo.

No.	Descripción	Posicion Geográfica		AM (mgC-CO2/gss)	ρ (Ω.m.)	λ (Cal/cm.s.°C)	Da (g/cm ³)	Micro porosidad (%)	Macro porosidad (%)	Hg (%)	X (μCGS)
		Este	Norte								
01	1	1050800	886981	142,5	1,03	0,00158	0,84	55	9	70	1350
02	2	1050785	886997	67,9	1,10	0,00141	1,01	55	8	49	1756
03	3	1050787	887025	54,6	1,22	0,00131	0,98	52	8	53	1543
04	4	1050901	887024	187,3	0,76	0,00180	0,77	58	6	71	644
05	5	1050867	887026	102,8	0,70	0,00146	1,01	56	5	52	1093
06	6	1050856	887041	170,5	0,51	0,00175	0,88	58	5	61	852
07	7	1050853	887060	197,4	0,54	0,00177	0,76	59	8	68	695
08	8	1050843	887058	162,8	0,54	0,00158	0,91	54	9	64	820
09	9	1050850	887036	182,3	0,40	0,00186	0,89	56	7	66	1106
10	10	1050830	887032	350,9	0,45	0,00172	0,82	58	7	71	969
11	11	1050779	886960	124,4	1,07	0,00136	0,98	56	5	42	2583
12	12	1050762	886993	65,3	0,84	0,00137	0,83	57	4	43	2227
13	13	1050745	887040	58,6	1,47	0,00149	0,85	59	4	48	2640

Promedio	143,6	0,8	0,00157	0,89	56,5	6,6	58,3	1406
Desviación Estándar	81,3	0,3	0,000188	0,09	2,0	1,8	10,8	698
Coefficiente de Variación (%)	56,6	40,9	11,9	9,7	3,6	26,7	18,6	49,6

MÉTODOS IMPLEMENTADOS

AM, Actividad Microbiana - CAB.

λ , Conductividad térmica - Método electrotérmico Universidad del Valle.

ρ , Resistividad eléctrica - Método geoelectrico Universidad del Valle.

Da, Densidad aparente del - ETSIA.

Microporosidad y Macroporosidad - ETSIA.

Hg, Humedad Gravimétrica - ETSIA.

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección: Transversa Mercator

Falso Este: 1000000

Falso Norte: 1000000

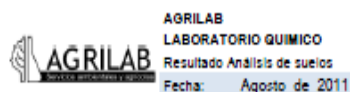
Meridiano Central: -77,080917

Factor de escala: 1,000000

Latitud de Origen: 4,599047

Vo.Bo. Orlando Zúñiga Escobar Ph. D
Director Laboratorio de Física Ambiental

ANEXO 2. Resultados Análisis de propiedades Hacienda La Araucana. Laboratorio AGRILAB.



AGRILAB
LABORATORIO QUÍMICO
Resultado Análisis de suelos
Fecha: Agosto de 2011

HACIENDA: Hda. La Araucana
DESTINATARIO:

PUNTO	pH V-V 1:1	CE dS/m	CO W.B %	MO %	P Bray II ppm	Cationes intercambiables meq/100 g				CICE meq/100	Micronutrientes ppm					Textura Bouyoucos %			Clasif. Text.	N-NH4 ppm	N-NO3 ppm	Sat media %
						Ca	Mg	K	Na		B	Cu	Fe	Mn	Zn	Arena	Limos	Arcillas				
1	6,2	1,01	5,12	8,80688	789,00	19,25	2,88	0,28	0,18	23,40	0,18	0,90	23,00	45,00	45,00	69,00	12,00	19,00	Fr-A	16	109	32
2	6,5	1,05	6,07	10,46468	567,00	22,51	2,13	0,30	0,17	18,40	0,21	1,05	18,00	48,00	34,00	75,00	8,00	17,00	Fr-A	12	108	31
3	6,6	1,14	5,67	9,77508	345,00	18,84	2,30	0,37	0,12	22,10	0,12	0,80	33,00	56,00	57,00	80,00	8,00	12,00	Fr-A	13	89	27
4	6,9	1,28	4,58	7,89592	1053,00	20,50	3,76	0,26	0,21	24,70	0,21	1,90	28,00	59,00	40,00	76,00	16,00	8,00	Fr-A	12	121	40
5	6,2	1,18	5,08	8,75792	256,00	20,06	2,88	0,31	0,17	25,60	0,13	0,80	18,00	87,00	45,00	76,00	12,00	10,00	Fr-A	21	79	35
6	6,9	1,28	4,58	7,89592	1053,00	20,50	3,76	0,26	0,21	24,70	0,21	1,90	28,00	59,00	40,00	76,00	16,00	8,00	Fr-A	12	121	40
7	6,9	1,28	4,58	7,89592	1053,00	20,50	3,76	0,26	0,21	24,70	0,21	1,90	28,00	59,00	40,00	76,00	16,00	8,00	Fr-A	12	121	40
8	5,8	0,98	7,80	13,4472	456,00	22,84	2,32	0,20	0,14	20,40	0,12	0,80	28,00	39,00	34,00	77,00	12,00	11,00	Fr-A	18	89	38
9	6,9	1,28	4,58	7,89592	1053,00	20,50	3,76	0,26	0,21	24,70	0,21	1,90	28,00	59,00	40,00	76,00	16,00	8,00	Fr-A	12	121	40
10	5,5	0,87	7,50	12,93	890,00	19,40	2,48	0,37	0,17	22,30	0,16	1,02	14,00	48,00	38,00	77,00	7,00	16,00	Fr-A	12	101	36
11	6,5	1,14	7,10	12,2404	780,00	22,84	2,88	0,32	0,19	21,80	0,15	0,30	16,00	70,00	28,00	70,00	16,00	14,00	Fr-A	16	78	34
12	6,9	1,28	4,58	7,89592	1053,00	20,50	3,76	0,26	0,21	24,70	0,21	1,90	28,00	59,00	40,00	76,00	16,00	8,00	Fr-A	12	121	40
13	6,8	1,54	4,89	8,43036	806,00	11,73	3,80	0,30	0,24	22,60	0,56	0,56	12,00	67,00	39,00	78,00	12,00	10,00	Fr-A	12	58	30

ANEXO 3. Resultados Análisis de propiedades Hacienda Las Gramas. Laboratorio de Física Ambiental – Universidad del Valle.



Grupo de Investigación en Ciencias Ambientales y de la Tierra - **ILAMA**
Laboratorio de Física Ambiental
UNIVERSIDAD DEL VALLE
Teléfono: (02) 3212389
EMAIL: ilama@univalle.edu.co

Descripción: Análisis de suelos en la Hacienda Las Gramas

Municipio: Roldanillo

Fecha de Muestreo: 19 / 07 / 2011

Tipo de análisis: Determinación de Actividad Microbiana, Resistividad Eléctrica, Conductividad Térmica, Densidad Aparente, Microporosidad, Macroporosidad y Humedad Gravimétrica del suelo.

No.	Descripción	Posición Geográfica		AM (mgC-CO ₂ /gss)	ρ (Ω.m.)	λ (Cal/cm.s.°C)	Da (g/cm ³)	Micro porosidad (%)	Macro porosidad (%)	Hg (%)	X (μCGS)
		Oeste	Norte								
01	1	1105861	984478	4,6	0,08	0,001016	1,38	35	17	15	559
02	2	1105904	984448	14,0	0,21	0,001050	1,39	34	12	17	561
03	3	1105942	984425	27,7	0,11	0,001061	1,15	39	14	26	295
04	4	1105995	984390	68,6	0,12	0,001239	1,04	42	19	22	248
05	5	1106038	984362	22,9	0,13	0,001254	1,01	43	18	27	237
06	6	1106094	984325	38,1	0,09	0,001281	0,86	43	27	36	139
07	7	1106119	984368	38,8	0,14	0,001543	1,01	53	9	39	84
08	8	1106074	984399	81,6	0,21	0,001395	0,99	52	14	28	144
09	9	1106027	984431	41,6	0,13	0,001302	1,10	47	10	22	209
10	10	1105968	984469	47,9	0,22	0,001218	1,01	40	23	26	251
11	11	1105925	984493	33,1	0,13	0,001081	1,32	45	12	18	484
12	12	1105890	984519	37,8	0,09	0,000943	1,38	35	13	18	563
13	13	1105933	984515	31,1	0,35	0,001127	1,16	42	16	20	362
14	14	1105991	984484	42,8	0,21	0,001120	1,04	39	27	26	265
15	15	1106048	984442	31,5	0,30	0,001272	0,95	41	27	31	165
16	16	1106099	984416	691,6	0,10	0,001391	0,89	48	21	34	89
17	17	1106161	984362	41,2	0,12	0,001489	0,99	56	6	48	65
18	18	1106130	984331	32,9	0,20	0,001425	0,97	52	12	37	86
19	19	1106027	984397	39,0	0,07	0,001200	1,04	42	20	30	216
20	20	1105976	984440	32,3	0,21	0,001143	1,09	44	15	24	287

Promedio	70,0	0,2	0,001227	1,1	43,7	16,7	27,2	265,2
Desviación Estándar	147,3	0,1	0,000164	0,2	6,1	6,2	8,5	163,0
Coefficiente de Variación (%)	210,5	46,7	13,3	14,8	14,1	37,1	31,1	61,5

MÉTODOS IMPLEMENTADOS

AM, Actividad Microbiana - CAB.
 λ , Conductividad térmica - Método electrotérmico Universidad del Valle.
 ρ , Resistividad eléctrica - Método geoelectrico Universidad del Valle.
Da, Densidad aparente del - ETSIA.
Microporosidad y Macroporosidad - ETSIA.
Hg, Humedad Gravimétrica - ETSIA.

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección: Transversa Mercator
Falso Este: 1000000
Falso Norte: 1000000
Meridiano Central: -77,080917
Factor de escala: 1,000000
Latitud de Origen: 4,599047

Vo.Bo. Orlando Zúñiga Escobar Ph. D
Director Laboratorio de Física Ambiental

ANEXO 4. Resultados Análisis de propiedades Hacienda Las Gramas. Laboratorio AGRILAB.

AGRILAB
LABORATORIO QUIMICO
Resultado Análisis de suelos
Fecha: Agosto de 2011

HACIENDA: Hda. Las Gramas
DESTINATARIO:

PUNTO	pH V:V 1:1	CE dS/m	Cationes intercambiables ppm				Cationes intercambiables meq/100 g				Micronutrientes ppm					Textura Bouyoucos %			Clasif. Text.
			Ca	Mg	K	Na	Ca	Mg	K	Na	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Arena	Limos	Arcillas	
1	6,22	0,66	52,00	20,00	44,00	26,00	0,26	0,17	0,11	0,11	0,47	0,05	2,50	0,20	0,12	21,37	21,30	57,33	Ar
2	6,00	0,75	65,00	23,00	45,00	28,00	0,33	0,19	0,12	0,12	0,42	0,05	1,10	0,24	0,12	18,65	23,31	58,04	Ar
3	6,57	0,58	46,00	26,00	20,00	19,00	0,23	0,22	0,05	0,08	0,58	0,02	0,50	0,13	0,06	27,60	28,55	43,85	Ar
4	6,96	0,71	60,00	33,00	34,00	11,00	0,30	0,28	0,09	0,05	0,49	0,03	0,30	0,05	0,09	22,28	25,13	52,58	Ar
5	7,38	1,05	82,00	49,00	41,00	30,00	0,41	0,41	0,11	0,13	0,39	0,02	0,70	0,09	0,08	22,02	24,18	53,80	Ar
6	7,62	0,72	71,00	25,00	25,00	20,00	0,36	0,21	0,06	0,09	0,66	0,05	0,40	0,05	0,13	17,53	20,50	61,97	Ar
7	7,16	0,73	77,00	26,00	16,00	22,00	0,39	0,22	0,04	0,10	0,53	0,02	0,50	0,11	0,04	14,86	17,90	67,24	Ar
8	7,22	0,65	63,00	26,00	24,00	12,00	0,32	0,22	0,06	0,05	0,40	0,03	0,50	0,07	0,03	18,00	21,53	60,47	Ar
9	6,96	0,81	66,00	36,00	37,00	18,00	0,33	0,30	0,09	0,08	0,34	0,02	0,20	0,04	0,07	21,90	24,29	53,81	Ar
10	7,58	1,05	93,00	52,00	38,00	12,00	0,47	0,43	0,10	0,05	0,39	0,03	0,40	0,15	0,05				
11	7,00	1,06	104,00	40,00	62,00	10,00	0,52	0,33	0,16	0,04	0,50	0,03	0,30	0,09	0,05	32,57	31,21	36,23	F-Ar
12	6,85	0,47	46,00	16,00	27,00	8,00	0,23	0,13	0,07	0,03	0,61	0,05	0,10	0,05	0,08	35,47	32,61	31,92	F-Ar
13	7,30	0,92	88,00	36,00	50,00	14,00	0,44	0,30	0,13	0,06	0,58	0,09	0,20	0,10	0,09	31,25	30,63	38,12	F-Ar
14	7,52	0,77	74,00	35,00	26,00	10,00	0,37	0,29	0,07	0,04	0,21	0,08	0,20	0,07	0,06	24,84	25,85	49,31	Ar
15	7,44	0,62	61,00	24,00	22,00	10,00	0,31	0,20	0,06	0,04	0,27	0,07	0,40	0,03	0,11	17,29	21,25	61,46	Ar
16	7,51	0,59	66,00	20,00	17,00	13,00	0,33	0,17	0,04	0,06	0,29	0,08	0,40	0,10	0,06				
17	6,76	0,55	59,00	18,00	13,00	16,00	0,30	0,15	0,03	0,07	0,35	0,08	1,50	0,08	0,08				
18	7,24	0,59	65,00	20,00	9,30	18,00	0,33	0,17	0,02	0,08	0,32	0,07	0,60	0,03	0,07	14,50	17,00	68,50	Ar
19	6,90	0,52	56,00	23,00	34,00	12,00	0,28	0,19	0,09	0,05	0,57	0,06	1,90	0,15	0,03	36,73	30,57	32,70	F-Ar
20	7,12	0,66	58,00	27,00	30,00	14,00	0,29	0,23	0,08	0,06	0,25	0,09	0,80	0,15	0,09	23,78	26,11	50,10	Ar

ANEXO 5. Resultados Análisis de propiedades Hacienda Santa Fe. Laboratorio de Física Ambiental – Universidad del Valle.



Grupo de Investigación en Ciencias Ambientales y de la Tierra - **ILAMA**
Laboratorio de Física Ambiental
UNIVERSIDAD DEL VALLE
Teléfono: (02) 3212389
EMAIL: ilama@univalle.edu.co

Descripción: Análisis de suelos en la Hacienda Santa Fé

Municipio: Dagua

Fecha de Muestreo: 10 / 06 / 2010

Tipo de análisis: Determinación de Actividad Microbiana, Resistividad Eléctrica, Conductividad Térmica, Densidad Aparente, Microporosidad, Macroporosidad y Humedad Gravimétrica del suelo.

No.	Descripción	Posición Geográfica		AM (mgC-CO ₂ /gss)	ρ (Ω .m.)	λ (Cal/cm.s.°C)	Da (g/cm ³)	Micro porosidad (%)	Macro porosidad (%)	Hg (%)	X (μ CGS)
		Oeste	Norte								
01	1	1063836	857753	30,2	1,25	0,00111	1,45	38	3	30	330
02	2	1063858	857874	22,9	1,00	0,00125	1,43	49	3	33	210
03	3	1063972	857946	31,2	0,84	0,00125	1,32	49	5	32	183
04	4	1063866	858001	29,5	0,64	0,00146	1,14	55	5	44	124
05	5	1063920	858105	32,0	0,73	0,00151	1,26	53	2	40	105
06	6	1064069	858135	45,7	0,68	0,00122	1,26	51	3	40	120
07	7	1064138	858025	30,4	0,71	0,00139	1,23	51	4	38	149
08	8	1064190	858103	35,4	0,68	0,00124	1,21	48	7	33	163
09	9	1064251	857987	69,5	0,83	0,00123	1,34	49	4	36	199
10	10	1064233	857907	14,2	0,89	0,00117	1,36	45	4	30	45
11	11	1064039	857878	68,1	1,14	0,00117	1,34	47	5	41	47
12	12	1064162	857766	33,7	0,98	0,00117	1,40	45	4	33	45
13	13	1063934	857738	40,3	1,18	0,00114	1,35	46	3	36	46
14	14	1064012	857636	59,8	1,35	0,00114	1,34	45	4	59	45
15	15	1063828	857613	60,7	1,29	0,00131	1,37	45	6	30	45
16	16	1064004	857499	49,7	0,96	0,00133	1,27	47	5	40	47
17	17	1064175	857397	62,0	0,79	0,00143	1,29	42	4	41	42
18	18	1064353	857396	33,5	0,59	0,00153	1,12	50	6	50	50
19	19	1064137	857572	30,4	0,72	0,00143	1,22	44	8	38	44
20	20	1064274	857572	18,6	0,51	0,00126	1,28	43	3	45	43
21	21	1064451	857541	23,5	0,50	0,00156	1,14	53	2	47	53
22	22	1064266	857724	53,0	0,88	0,00127	1,31	43	6	34	43
23	23	1064410	857717	52,1	0,95	0,00114	1,28	47	3	35	47
24	24	1064536	857737	57,9	0,53	0,00127	1,16	45	5	38	45
25	25	1064361	857862	35,0	0,82	0,00127	1,28	46	4	37	46
26	26	1064678	857864	65,9	0,66	0,00136	1,27	50	2	37	50

Promedio	41,7	0,9	0,00129	1,29	47,2	4,2	38,3	91
Desviación Estándar	16,3	0,2	0,00013	0,09	3,7	1,5	6,7	74
Coefficiente de Variación (%)	39,1	28,4	10,0	6,8	7,9	35,4	17,5	81,1

MÉTODOS IMPLEMENTADOS

AM, Actividad Microbiana - CAB.

λ , Conductividad térmica - Método electrotérmico Universidad del Valle.

ρ , Resistividad eléctrica - Método geoelectrico Universidad del Valle.

Da, Densidad aparente del - ETSIA.

Microporosidad y Macroporosidad - ETSIA.

Hg, Humedad Gravimétrica - ETSIA.

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección: Transversa Mercator

Falso Este: 1000000

Falso Norte: 1000000

Meridiano Central: -77,080917

Factor de escala: 1,000000

Latitud de Origen: 4,599047

Vo.Bo. Orlando Zúñiga Escobar Ph. D
Director Laboratorio de Física Ambiental

ANEXO 6. Resultados Análisis de propiedades Hacienda Santa Fe. Laboratorio ING. PROVIDENCIA S.A.



INGENIO PROVIDENCIA, S.A.
LABORATORIO QUÍMICO DE CAMPO
Resultado Análisis de suelos
Fecha: Julio 27 de 2010

HACIENDA: SANTAFE - INCAUCA S.A.
DESTINATARIO: ING. ALFONSO CAMARGO - NELSON VASQUEZ

METODOLOGIA DE ANALISIS	
pH:	V.V.
Cu, Fe, Mn, Zn:	DTPA - TEA
CE:	(USDA) en el Manual 50 (1964)
M.O.:	Walkler Black
P:	Bray II B: Hunter (Colorimetria)
Ca, Mg, K y Na:	(NH4OAc - 1N - pH 7)
Textura:	Bouyoucos

SUERTE	INCAUCA Mtra Nº	Lab. Nº	pH V:V 1:1	CE dS/m	MO W.B %	P Bray II ppm	P Fijación (%)	Cationes Intercambiables meq/100 g				CIC	Ca/Mg	PSI	PMg/l	Saturación de bases (%)				Micronutrientes ppm					Textura Bouyoucos %			Clasif. Text.
								Ca	Mg	Na						Ca	Mg	K	Na	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Arena	Limos	Arcillas	
5A	001	3707	5,1	0,19	2,59	2,04	40,65	11,33	6,96	0,24	0,23	17,75	1,63	1,30	39,22	60,39	37,11	1,28	1,23	0,23	4,85	61,58	55,14	1,29	27,12	34,00	38,88	FAr
5A	002	3708	5,3	0,18	2,09	1,74	43,65	11,97	8,13	0,28	0,25	22,72	1,47	1,10	35,78	58,02	39,41	1,36	1,21	0,23	2,59	32,89	38,03	0,55	19,12	36,00	44,88	Ar
5A	003	3709	6,0	0,24	2,63	1,58	36,81	14,15	9,97	0,35	0,28	32,77	1,42	0,85	30,42	57,17	40,28	1,41	1,13	0,24	4,67	53,86	46,85	0,89	33,12	36,00	30,88	FAr
5A	004	3710	5,9	0,27	3,09	1,89	35,10	19,11	14,68	0,39	0,51	37,02	1,30	1,38	39,65	55,09	42,32	1,12	1,47	0,27	7,02	61,42	46,08	1,28	35,12	32,00	32,88	FAr
4	005	3711	6,0	0,17	2,88	2,63	29,97	16,89	13,21	0,42	0,35	44,28	1,28	0,79	29,83	54,71	42,79	1,36	1,13	0,26	6,34	56,23	42,10	1,15	35,12	36,00	28,88	FAr
4	006	3712	6,3	0,18	2,12	1,59	34,68	13,92	10,10	0,30	0,34	24,96	1,38	1,36	40,46	56,45	40,96	1,22	1,38	0,20	4,85	51,85	30,71	0,39	21,12	40,00	38,88	FAr
4	007	3713	6,3	0,16	2,92	1,74	28,36	18,88	13,01	0,30	0,28	40,73	1,45	0,69	31,94	58,15	40,07	0,92	0,86	0,45	4,55	41,30	29,93	0,60	15,12	40,00	44,88	ArL
4	008	3714	6,0	0,19	3,11	1,59	34,34	11,37	7,25	0,21	0,21	23,74	1,57	0,89	30,54	59,71	38,08	1,10	1,11	0,36	5,79	64,86	34,96	0,87	27,12	44,00	28,88	FAr
4	009	3715	6,4	0,18	2,65	1,44	35,10	16,96	11,07	0,30	0,24	30,32	1,53	0,79	36,51	59,36	38,75	1,05	0,84	0,24	4,34	43,09	27,78	0,69	21,12	34,00	44,88	Ar
6	010	3716	6,1	0,09	2,41	1,89	35,53	12,44	7,99	0,26	0,19	27,47	1,56	0,69	29,09	59,58	38,27	1,25	0,91	0,11	5,03	62,83	43,46	1,22	23,12	38,00	38,88	FAr
6	011	3717	6,4	0,17	2,53	4,27	41,08	14,53	6,93	0,25	0,30	26,33	2,10	1,14	26,32	66,02	31,49	1,14	1,36	Trazas	2,98	46,40	37,70	0,94	23,12	38,00	38,88	FAr
6	012	3718	6,2	0,16	2,47	1,44	38,52	22,59	8,30	0,22	0,20	18,58	2,72	1,08	44,67	72,15	26,51	0,70	0,64	Trazas	3,99	49,08	49,49	1,05	25,12	38,00	36,88	FAr
6	013	3719	5,7	0,12	2,89	2,34	45,78	8,28	4,17	0,27	0,17	23,14	1,99	0,73	18,02	64,24	32,35	2,09	1,32	Trazas	3,78	47,74	67,14	1,46	29,12	34,00	36,88	FAr
6	014	3720	6,1	0,12	2,72	2,78	40,65	9,52	5,49	0,22	0,27	17,40	1,73	1,55	31,55	61,42	35,42	1,42	1,74	Trazas	6,29	68,83	59,49	1,75	27,12	38,00	34,88	FAr
6	015	3721	5,9	0,31	2,42	2,34	33,82	11,85	8,20	0,23	0,36	26,04	1,45	1,38	31,49	57,41	39,73	1,11	1,74	Trazas	5,13	65,95	45,95	1,05	25,12	38,00	36,88	FAr
6	016	3722	6,1	0,15	2,46	2,04	34,24	10,88	7,26	0,21	0,26	27,68	1,60	0,94	26,23	58,46	39,01	1,13	1,40	Trazas	3,93	47,97	31,35	0,67	19,12	42,00	38,88	FArL
5	017	3723	6,1	0,18	3,17	5,16	32,11	20,93	13,02	0,37	0,31	31,13	1,61	1,00	41,82	60,44	37,60	1,07	0,90	0,13	5,20	59,81	25,31	0,85	17,12	40,00	42,88	ArL
5	018	3724	5,7	0,19	3,26	3,38	38,94	19,01	15,28	0,33	0,37	44,09	1,24	0,84	34,66	54,33	43,67	0,94	1,06	0,11	7,49	76,68	25,05	1,26	15,12	32,00	52,88	Ar
5	019	3725	6,1	0,15	2,34	2,04	31,68	13,10	9,23	0,24	0,28	21,10	1,42	1,33	43,74	57,33	40,39	1,05	1,23	0,11	4,01	46,93	34,85	0,55	21,12	38,00	40,88	Ar
5	020	3726	6,0	0,19	3,02	2,48	34,24	17,87	13,27	0,31	0,34	43,71	1,35	0,78	30,36	56,21	41,74	0,98	1,07	0,11	6,24	60,18	34,01	1,30	13,12	36,00	50,88	Ar
5	021	3727	6,1	0,20	3,24	2,19	35,10	18,67	16,07	0,33	0,37	45,93	1,16	0,81	34,99	52,68	45,34	0,93	1,04	0,14	5,42	58,08	21,28	0,94	23,12	30,00	46,88	Ar
5	022	3728	6,1	0,19	2,56	2,78	37,66	11,92	7,71	0,23	0,22	20,55	1,55	1,07	37,52	59,36	38,40	1,15	1,10	0,11	5,16	68,33	38,48	0,97	27,12	36,00	36,88	FAr
4	023	3729	6,2	0,15	2,42	1,44	39,80	9,09	9,14	0,24	0,27	25,28	0,99	1,07	36,16	48,51	48,77	1,28	1,44	Trazas	3,00	46,91	24,80	0,42	21,12	32,00	46,88	Ar
4	024	3730	6,2	0,15	2,26	1,59	37,34	12,17	10,35	0,23	0,35	24,37	1,18	1,44	42,47	52,69	44,80	1,00	1,51	Trazas	3,73	41,71	17,95	0,36	21,12	26,00	52,88	Ar
4	025	3731	6,3	0,17	2,67	1,59	35,95	14,64	11,82	0,33	0,30	38,96	1,24	0,77	30,34	54,04	43,63	1,22	1,11	0,14	3,79	41,66	27,86	0,97	19,12	30,00	50,88	Ar
3B	026	3732	6,3	0,14	2,52	1,59	33,39	17,28	11,87	0,31	0,25	28,45	1,46	0,88	41,72	58,16	39,95	1,04	0,84	0,12	4,73	43,18	21,28	0,60	17,12	34,00	48,88	Ar

Los resultados de los análisis, corresponden sólo a los muestreos recibidos en el Laboratorio y no a otros materiales de la misma procedencia.

Cordialmente,

COPIA: Archivo

JAVIER JARAMILLO B.
Jefe Laboratorio Químico de Campo.

ANEXO 7. Matriz de correlaciones físicas y biológicas - Hacienda La Araucana.

PROPIEDADES	Paramag	Resele	Da	Micro	Macro	Hg	EPT	Arenas	Limos	Arcillas	CE	MO	AM	Cter
Paramag	1,00	0,74	0,63	-0,61	-0,16	-0,83	-0,71	-0,10	-0,28	0,36	-0,13	0,12	-0,67	-0,82
Resele	0,74	1,00	0,43	-0,56	-0,05	-0,62	-0,60	-0,03	-0,28	0,29	0,00	-0,06	-0,77	-0,74
Da	0,63	0,43	1,00	-0,80	-0,06	-0,71	-0,84	0,28	-0,67	0,39	-0,44	0,45	-0,42	-0,79
Micro	-0,61	-0,56	-0,80	1,00	-0,30	0,56	0,84	-0,40	0,76	-0,37	0,54	-0,59	0,45	0,86
Macro	-0,16	-0,05	-0,06	-0,30	1,00	0,48	0,27	-0,15	-0,45	0,57	-0,66	0,58	0,39	0,06
Hg	-0,83	-0,62	-0,71	0,56	0,48	1,00	0,84	-0,29	0,24	0,03	-0,10	0,01	0,81	0,85
EPT	-0,71	-0,60	-0,84	0,84	0,27	0,84	1,00	-0,49	0,51	-0,05	0,17	-0,26	0,68	0,90
Arenas	-0,10	-0,03	0,28	-0,40	-0,15	-0,29	-0,49	1,00	-0,43	-0,49	0,02	0,18	-0,20	-0,32
Limos	-0,28	-0,28	-0,67	0,76	-0,45	0,24	0,51	-0,43	1,00	-0,58	0,81	-0,78	-0,04	0,60
Arcillas	0,36	0,29	0,39	-0,37	0,57	0,03	-0,05	-0,49	-0,58	1,00	-0,80	0,59	0,22	-0,29
CE	-0,13	0,00	-0,44	0,54	-0,66	-0,10	0,17	0,02	0,81	-0,80	1,00	-0,94	-0,41	0,31
MO	0,12	-0,06	0,45	-0,59	0,58	0,01	-0,26	0,18	-0,78	0,59	-0,94	1,00	0,36	-0,36
AM	-0,67	-0,77	-0,42	0,45	0,39	0,81	0,68	-0,20	-0,04	0,22	-0,41	0,36	1,00	0,68
Cter	-0,82	-0,74	-0,79	0,86	0,06	0,85	0,90	-0,32	0,60	-0,29	0,31	-0,36	0,68	1,00

ANEXO 8. Matriz de correlación de propiedades químicas - Hacienda La Araucana

PROPIEDADES	Paramag	CO	CICE	B	Cu	Fe	Mn	Zn	pH	Ca	Mg	K	Na
Paramag	1,00	0,12	-0,32	-0,24	-0,41	0,03	-0,04	0,24	-0,01	-0,03	-0,34	0,41	-0,32
CO	0,12	1,00	-0,85	-0,78	-0,81	-0,21	-0,73	-0,17	-0,92	0,38	-0,90	0,12	-0,79
CICE	-0,32	-0,85	1,00	0,54	0,66	0,11	0,79	0,19	0,66	-0,51	0,86	-0,12	0,71
B	-0,24	-0,78	0,54	1,00	0,87	-0,09	0,38	-0,39	0,78	0,09	0,86	-0,40	0,94
Cu	-0,41	-0,81	0,66	0,87	1,00	0,29	0,40	-0,12	0,85	-0,09	0,91	-0,38	0,82
Fe	0,03	-0,21	0,11	-0,09	0,29	1,00	-0,13	0,63	0,41	-0,35	0,14	0,02	-0,21
Mn	-0,04	-0,73	0,79	0,38	0,40	-0,13	1,00	0,17	0,56	-0,33	0,59	0,11	0,53
Zn	0,24	-0,17	0,19	-0,39	-0,12	0,63	0,17	1,00	0,15	-0,84	-0,14	0,67	-0,44
pH	-0,01	-0,92	0,66	0,78	0,85	0,41	0,56	0,15	1,00	-0,23	0,84	-0,14	0,71
Ca	-0,03	0,38	-0,51	0,09	-0,09	-0,35	-0,33	-0,84	-0,23	1,00	-0,17	-0,65	0,06
Mg	-0,34	-0,90	0,86	0,86	0,91	0,14	0,59	-0,14	0,84	-0,17	1,00	-0,40	0,92
K	0,41	0,12	-0,12	-0,40	-0,38	0,02	0,11	0,67	-0,14	-0,65	-0,40	1,00	-0,47
Na	-0,32	-0,79	0,71	0,94	0,82	-0,21	0,53	-0,44	0,71	0,06	0,92	-0,47	1,00

ANEXO 9. Matriz de correlaciones físicas y biológicas - Hacienda Las Gramas

PROPIEDADES	Paramag	AM	Resele	Cter	Da	Micro	Macro	Hg	CE	EPT	Arenas	Limos	Arcillas
Paramag	1,00	-0,37	-0,13	-0,93	0,96	-0,86	-0,10	-0,89	-0,02	-0,88	0,70	0,68	-0,70
AM	-0,37	1,00	-0,10	0,39	-0,36	0,31	0,11	0,34	-0,19	0,39	-0,37	-0,34	0,36
Resele	-0,13	-0,10	1,00	0,01	-0,21	-0,02	0,35	-0,03	0,26	0,28	0,04	0,13	-0,08
Cter	-0,93	0,39	0,01	1,00	-0,83	0,95	-0,14	0,90	0,05	0,76	-0,78	-0,79	0,79
Da	0,96	-0,36	-0,21	-0,83	1,00	-0,72	-0,34	-0,81	-0,10	-0,94	0,63	0,59	-0,62
Micro	-0,86	0,31	-0,02	0,95	-0,72	1,00	-0,34	0,86	0,05	0,66	-0,67	-0,69	0,68
Macro	-0,10	0,11	0,35	-0,14	-0,34	-0,34	1,00	-0,10	0,18	0,49	0,03	0,09	-0,06
Hg	-0,89	0,34	-0,03	0,90	-0,81	0,86	-0,10	1,00	-0,14	0,72	-0,73	-0,77	0,75
CE	-0,02	-0,19	0,26	0,05	-0,10	0,05	0,18	-0,14	1,00	0,16	0,05	0,15	-0,09
EPT	-0,88	0,39	0,28	0,76	-0,94	0,66	0,49	0,72	0,16	1,00	-0,60	-0,58	0,59
Arenas	0,70	-0,37	0,04	-0,78	0,63	-0,67	0,03	-0,73	0,05	-0,60	1,00	0,97	-1,00
Limos	0,68	-0,34	0,13	-0,79	0,59	-0,69	0,09	-0,77	0,15	-0,58	0,97	1,00	-0,99
Arcillas	-0,70	0,36	-0,08	0,79	-0,62	0,68	-0,06	0,75	-0,09	0,59	-1,00	-0,99	1,00

ANEXO 10. Matriz de correlación de propiedades químicas - Hacienda Las Gramas.

PROPIEDADES	Paramag	CE	Ca	Mg	K	B	Na	Cu	Fe	Mn	Zn	pH	AM
Paramag	1,00	-0,02	-0,25	-0,11	0,64	0,43	-0,04	-0,13	0,24	0,48	0,37	-0,65	-0,37
CE	-0,02	1,00	0,90	0,93	0,68	-0,05	0,26	-0,44	-0,26	0,23	-0,22	0,28	-0,19
Ca	-0,25	0,90	1,00	0,78	0,44	-0,14	0,11	-0,24	-0,34	0,07	-0,37	0,45	0,02
Mg	-0,11	0,93	0,78	1,00	0,58	-0,09	0,11	-0,44	-0,37	0,09	-0,32	0,39	-0,20
K	0,64	0,68	0,44	0,58	1,00	0,23	0,09	-0,38	0,07	0,51	0,05	-0,28	-0,35
B	0,43	-0,05	-0,14	-0,09	0,23	1,00	0,15	-0,40	0,03	0,14	0,10	-0,23	-0,29
Na	-0,04	0,26	0,11	0,11	0,09	0,15	1,00	-0,44	0,45	0,45	0,27	-0,31	-0,17
Cu	-0,13	-0,44	-0,24	-0,44	-0,38	-0,40	-0,44	1,00	-0,03	-0,30	0,31	0,21	0,25
Fe	0,24	-0,26	-0,34	-0,37	0,07	0,03	0,45	-0,03	1,00	0,59	0,22	-0,66	-0,15
Mn	0,48	0,23	0,07	0,09	0,51	0,14	0,45	-0,30	0,59	1,00	0,00	-0,67	-0,06
Zn	0,37	-0,22	-0,37	-0,32	0,05	0,10	0,27	0,31	0,22	0,00	1,00	-0,26	-0,24
pH	-0,65	0,28	0,45	0,39	-0,28	-0,23	-0,31	0,21	-0,66	-0,67	-0,26	1,00	0,28
AM	-0,37	-0,19	0,02	-0,20	-0,35	-0,29	-0,17	0,25	-0,15	-0,06	-0,24	0,28	1,00

ANEXO 11. Matriz de correlaciones físicas y biológicas - Hacienda Las Santa Fe.

PROPIEDADES	Paramag	AM	Resele	Cter	Da	Micro	Macro	Hg	Arena	Limos	Arcillas	MO	EPT
Paramag	1,00	-0,15	0,13	-0,13	0,31	0,05	-0,05	-0,47	0,28	0,09	-0,25	-0,10	0,04
AM	-0,15	1,00	0,15	-0,21	-0,02	-0,06	0,11	0,04	-0,08	-0,18	0,16	-0,19	-0,03
Resele	0,13	0,15	1,00	-0,68	0,83	-0,46	0,09	-0,21	0,42	0,37	-0,51	-0,36	-0,49
Cter	-0,13	-0,21	-0,68	1,00	-0,74	0,49	-0,03	0,44	-0,23	-0,17	0,26	0,54	0,54
Da	0,31	-0,02	0,83	-0,74	1,00	-0,52	-0,08	-0,51	0,31	0,39	-0,44	-0,49	-0,64
Micro	0,05	-0,06	-0,46	0,49	-0,52	1,00	-0,35	0,27	0,20	-0,13	-0,07	0,25	0,93
Macro	-0,05	0,11	0,09	-0,03	-0,08	-0,35	1,00	-0,05	-0,01	0,30	-0,17	0,01	0,01
Hg	-0,47	0,04	-0,21	0,44	-0,51	0,27	-0,05	1,00	-0,21	-0,06	0,18	0,53	0,27
Arena	0,28	-0,08	0,42	-0,23	0,31	0,20	-0,01	-0,21	1,00	0,21	-0,83	-0,16	0,20
Limos	0,09	-0,18	0,37	-0,17	0,39	-0,13	0,30	-0,06	0,21	1,00	-0,72	-0,05	-0,06
Arcillas	-0,25	0,16	-0,51	0,26	-0,44	-0,07	-0,17	0,18	-0,83	-0,72	1,00	0,14	-0,11
MO	-0,10	-0,19	-0,36	0,54	-0,49	0,25	0,01	0,53	-0,16	-0,05	0,14	1,00	0,29
EPT	0,04	-0,03	-0,49	0,54	-0,64	0,93	0,01	0,27	0,20	-0,06	-0,11	0,29	1,00

ANEXO 12. Matriz de correlación de propiedades químicas - Hacienda Santa Fe.

PROPIEDADES	Paramag	B	Na	K	Mg	Ca	Zn	Mn	Fe	Cu	P	MO	CIC	pH	CE
Paramag	1,00	0,69	0,00	0,11	-0,04	-0,09	-0,12	0,13	-0,09	-0,02	-0,33	-0,10	-0,10	0,16	0,50
B	0,69	1,00	0,19	0,49	0,38	0,28	-0,23	-0,17	-0,03	0,25	-0,24	0,20	0,35	0,14	0,40
Na	0,00	0,19	1,00	0,59	0,74	0,39	-0,09	-0,37	0,19	0,48	0,13	0,32	0,62	-0,22	0,51
K	0,11	0,49	0,59	1,00	0,76	0,57	-0,06	-0,32	-0,03	0,39	0,12	0,43	0,78	-0,08	0,28
Mg	-0,04	0,38	0,74	0,76	1,00	0,73	-0,24	-0,68	0,06	0,45	0,05	0,52	0,86	-0,04	0,32
Ca	-0,09	0,28	0,39	0,57	0,73	1,00	-0,01	-0,36	0,07	0,38	0,25	0,46	0,58	0,04	0,15
Zn	-0,12	-0,23	-0,09	-0,06	-0,24	-0,01	1,00	0,72	0,64	0,49	0,47	0,43	-0,04	-0,64	0,03
Mn	0,13	-0,17	-0,37	-0,32	-0,68	-0,36	0,72	1,00	0,32	0,04	0,21	-0,15	-0,53	-0,40	-0,05
Fe	-0,09	-0,03	0,19	-0,03	0,06	0,07	0,64	0,32	1,00	0,81	0,53	0,50	0,10	-0,78	0,29
Cu	-0,02	0,25	0,48	0,39	0,45	0,38	0,49	0,04	0,81	1,00	0,36	0,68	0,47	-0,67	0,36
P	-0,33	-0,24	0,13	0,12	0,05	0,25	0,47	0,21	0,53	0,36	1,00	0,44	0,13	-0,49	-0,05
MO	-0,10	0,20	0,32	0,43	0,52	0,46	0,43	-0,15	0,50	0,68	0,44	1,00	0,66	-0,54	0,28
CIC	-0,10	0,35	0,62	0,78	0,86	0,58	-0,04	-0,53	0,10	0,47	0,13	0,66	1,00	-0,15	0,28
pH	0,16	0,14	-0,22	-0,08	-0,04	0,04	-0,64	-0,40	-0,78	-0,67	-0,49	-0,54	-0,15	1,00	-0,24
CE	0,50	0,40	0,51	0,28	0,32	0,15	0,03	-0,05	0,29	0,36	-0,05	0,28	0,28	-0,24	1,00