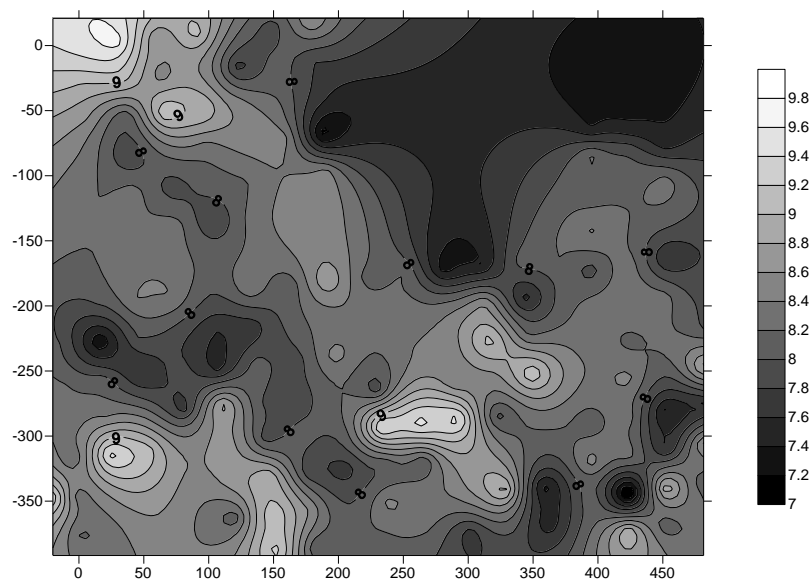


**CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS EN LOS SUELOS DE LA GRANJA EXPERIMENTAL DE LA UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA.**



**JOSE RAFAEL VASQUEZ POLO. I.A.**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE PALMIRA  
CONVENIO UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA  
MAESTRIA EN CIENCIAS AGRARI CON ENFASIS EN SUELOS  
SANTA MARTA - COLOMBIA  
2009**

**CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS  
PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS EN LOS SUELOS DE LA GRANJA  
EXPERIMENTAL DE LA UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA.**

**JOSE RAFAEL VASQUEZ POLO. I.A.**

**Director:  
DIOSDADO BAENA GARCIA.  
Ingeniero Agrónomo, Ph.D  
Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia sede Palmira**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE PALMIRA  
CONVENIO UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA  
MAESTRIA EN CIENCIAS AGRARIAS CON ENFASIS EN SUELOS  
SANTA MARTA - COLOMBIA  
2009**

## **DEDICATORIA**

A mis Padres, Rafael Vásquez De la Hoz y Fanny Beatriz Polo  
Yanci;

A mi esposa, Iromaldis Brugès. A mis Hijos, Rosa Elena, José  
Carlos y Laura Carolina;

A mis Hermanos, Fabián y María José  
y a toda mi familia,

Por su infinito amor y su apoyo irrestricto  
en todas las circunstancias  
de mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

- A todos los Directivos de la Universidad del Magdalena a lo largo del proceso de Refundación; Especialmente a los Doctores Carlos Eduardo Caicedo Omar, Ruthber Escorcía Caballero y Pedro Eslava Eljaieck.
- A todos los Docentes y personal administrativo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Magdalena, especialmente a Irma Quintero, Nelson Piraneque, Héctor Jaime López, Inés Meriño y Kira Núñez.
- A los profesionales del laboratorio de química de la Universidad del Magdalena, Rafael García y Edith Gordon.
- A todos los Docentes de la Maestría en Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, en especial a Dr. Juan Carlos Menjivar Flores, Diosdado Baena, Edgar Madero, Carlos Escobar, Harold Taffur y Álvaro García Ocampo, por su amistad, su guía en las horas de estudio y ayuda solícita en la preparación y conclusión de la presente investigación.
- A mis Compañeros de la Maestría, Edgar, Diomara, Liliana, Sara, Yuri, Betsi y Yovanetti.

Con toda mi gratitud.

**JOSE RAFAEL VASQUEZ POLO**

## RESUMEN

En los lotes destinados a la actividad agrícola de la granja experimental de la Universidad del Magdalena, ubicada en el distrito de Santa Marta, departamento del Magdalena (coordenadas geográficas  $74^{\circ} 07'$  Y  $74^{\circ} 12'$  de longitud oeste y a los  $11^{\circ} 11'$  y  $11^{\circ} 15'$  de latitud norte con respecto al ecuador), se estudió la variabilidad espacial de las siguientes propiedades físicas (humedad gravimétrica, textura, densidad aparente, resistencia a la penetración y conductividad hidráulica) y químicas (MO, pH, CIC, N, P, K, Ca, Mg, Na, Cu, Zn, Fe, Mn, B), utilizando una grid o cuadrícula con espaciamiento de  $29\text{m} \times 29\text{m}$  para un total de 184 puntos de muestreo.

El análisis de los datos se realizó utilizando diversos enfoques univariado (estadística descriptiva), geoestadístico y multivariado. El cual aportó información acerca de la variación de las propiedades, determinando que la densidad aparente y el pH presentan baja variación; los componentes texturales, la resistencia a la penetración, el Ca, Mg, Cu y B una variación media; los contenidos de Humedad, la conductividad hidráulica saturada, la MO, el K, Na, CIC, Zn, P, Mn y el Fe, alta variación.

El análisis Geoestadístico permitió visualizar y graficar la distribución espacial de la variabilidad de las propiedades evaluadas, además mostró que en términos generales existe moderada dependencia espacial en las propiedades excepto en los contenidos de Arena, Ca, CIC, P y Cu que revelan fuerte dependencia espacial, El índice de homogeneidad multivariado para los suelos de la Granja fue bajo; las propiedades con mayor contribución a la heterogeneidad del suelo fueron: textura, Na, B, Fe, K, pH, Ca y MO.

A partir del análisis de clasificación se redefinieron cuatro zonas homogéneas con condiciones de suelos relativamente similares, las cuales se podrán utilizar como referencia para determinar el sistema de muestreo, el número de muestras por lote, el tamaño y la distribución de las unidades experimentales y en general mejorar la interpretación de los resultados de experimentos que se realicen en el futuro en estos lotes; además facilitarán la implementación de prácticas de manejo agronómico acordes con las características de cada zona.

**Palabras Claves:** Variabilidad espacial, propiedades físicas y químicas, Geoestadística, análisis multivariado, zonas homogéneas.

## ABSTRACT

It was studied in lands of the Research Program in Vegetables for Experimental Center Magdalena University, which is located in Santa Marta city (at 11° 11' y 11° 15' L:N y 74° 07' Y 74° 12' L:O.), the spatial variability for the following physical properties: bulk density, resistance to the penetration, texture (sand, silt and clay contents), saturated hydraulic conductivity and chemical properties using a grid of 29m\*29m for 184 sampling points.

The data was analyzed using the univariate (descriptive statistics), geostatistics and multivariate method.

The statistics analysis of the results showed that the variability of properties. Thus, the bulk density and pH had a small variation, the resistance to the penetration and the texture, Ca, Mg, Cu y B a medium variation; and the water content, organic matter, el K, Na, CIC, Zn, P, Mn , Fe and the saturated hydraulic conductivity a great variation.

Through of geostatistics analysis was possible to do a graph of spatial distribution of variability of physical and chemical properties, shown that Sand, Ca, CIC, P y Cu has a strong spatial dependence whereas the remaining properties a moderate spatial dependence. The multivariate homogeneity index in the farm soils was low. Sand, silt, clay, Na, B, Fe, K, pH, Ca and organic matter were the properties with the major contribution to the heterogeneity of those soils.

On the other hand, with the help of analysis of classification was possible to establish four homogeneous zones that will be a worthy reference for the researchers of the Vegetable Program for the adequate selection and location of lots, the blocks inside lots and the experimental zones inside the blocks, with the aim of getting the best quality of the research works carry out in the farm as well to introduce handling practice according to the physical and chemical characteristics in each zone.

**Keywords:** Spatial variability, physical and chemical properties, geostatistics, multivariate analysis and homogeneous zones.



## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1. OBJETIVOS</b> .....	3
<b>2. MARCO CONCEPTUAL</b> .....	4
2.1. EL SUELO COMO UN SISTEMA DINAMICO.....	4
2.2. LA VARIABILIDAD DE LOS SUELOS .....	5
2.2.1 S. I. G. y sus aplicaciones en la Agricultura.....	8
2.2.2 Elaboración de mapas exactos del campo.....	8
2.2.2.1 Elaboración de mapas digitalizados para estudios de suelos.....	9
2.2.2.2 Mapas de remoción de nutrientes.....	9
2.2.2.3 Mapas de costo de producción.....	9
2.2.2.4 Mapas de evaluación de tierras.....	9
2.2.3 GPS y sus aplicaciones en la agricultura.....	10
2.3 GEOESTADISTICA.....	11
2.4 METODOS DE MUESTREO.....	14
2.4.1 Muestreo dirigido .....	15
2.4.2 Muestreo aleatorio simple .....	15
2.4.3 Muestreo aleatorio estratificado .....	15
2.4.4 Muestreo sistemático.....	16
2.4.5 Muestreo en conglomerado.....	16
2.4.6 Muestreo anidado.....	17
2.5 METODOS DE INTERPOLACIÓN.....	17
2.5.1 Kriging.....	17
2.6 ANALISIS MULTIVARIADO .....	18
2.6.1 Índice de homogeneidad multivariado (IHM).....	19
2.7 AGRICULTURA DE PRECISIÓN.....	20
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	24
3.1 LOCALIZACION.....	24
3.1.1 Suelos.....	26
3.1.1.1 Geología.....	28
3.1.1.2 Geomorfología.....	28
3.2. MUESTREO PRELIMINAR.....	29
3.3. RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN .....	31
3.3.1 Fase de campo.....	32
3.3.2 Fase de laboratorio.....	32
3.4 ENFOQUE UNIVARIADO .....	33
3.5 ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO .....	34
3.6 ANALISIS MULTIVARIADO .....	34

<b>4. RESULTADOS Y DISCUSION</b> .....	36
4.1 ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD: ENFOQUE UNIVARIADO .....	36
4.1.1 Propiedades Físicas.....	37
4.1.2 Propiedades Químicas.....	39
4.2 ANALISIS DE LA VARIABILIDADg. ENFOQUE GEOESTADISTICO.....	41
4.3 ANÁLISIS MULTIVARIADO .....	61
4.3.1 Análisis Factorial por componentes principales. ....	61
4.3.2 Análisis Geoestadístico de los Componentes Principales.....	64
4.3.2.1 Propiedades Físicas.....	64
4.3.2.2 Propiedades Químicas.....	66
4.3.3 Estimación del índice de homogeneidad multivariado (IHM) .....	69
4.3.4 Análisis de clasificación para la determinación de zonas homogéneas...	70
<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	76

## **BIBLIOGRAFIA**

Anexos.

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pàg.</b>
<b>Tabla1.</b> Cálculo del tamaño de muestra.....	30
<b>Tabla 2.</b> Estimadores de los parámetros estadísticos para cada una de las propiedades de los suelos de la granja.....	37
<b>Tabla 3.</b> Distribución porcentual de las clases texturales.....	38
<b>Tabla 4.</b> Parámetros geoestadísticos.....	41
<b>Tabla 5.</b> Indicadores estadísticos de la validación cruzada.....	46
<b>Tabla 6.</b> Valores propios para los componentes principales asociados con las propiedades físicas.....	61
<b>Tabla 7.</b> Valores propios para los componentes principales asociados con las propiedades químicas.....	62
<b>Tabla 8.</b> Matriz de correlación entre propiedades físicas y componentes principales.....	63
<b>Tabla 9.</b> Matriz de correlación entre propiedades Químicas y componentes principales.....	63

**Tabla 10.** Contribución relativa de los parámetros físicos a la homogeneidad del lote.....69

**Tabla 11.** Contribución relativa de los parámetros químicos a la heterogeneidad del lote.....70

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág</b>
<b>Figura 1.</b> Esquema de un semivariograma.....	15
<b>Figura 2.</b> Imagen de la Granja Experimental tomada de Google Earth.....	24
<b>Figura 3.</b> Temperatura Máxima, Media, Mínima. Estación Aeropuerto Simón Bolívar Lat. N= 11°07 y Long. W= 74°0.....	25
<b>Figura 4.</b> Balance hídrico <i>por método</i> Thornthwaite & Mather (1955), Estación Universidad del Magdalena: Lat. N= 11°14´ y Long W= 74°13´.....	25
<b>Figura 5.</b> Tabla de Deficiencia y exceso Hídrico según Thornthwaite & Mather (1955), Estación Universidad del Magdalena: Lat. N= 11°14´ y Long W= 74°13´.....	26
<b>Figura 6.</b> Demarcación de los sitios de muestreo.....	31
<b>Figura 7.</b> Semivariogramas para las propiedades físicas: <b>a)</b> Arcilla, <b>b)</b> Limo, <b>c)</b> Arena, <b>d)</b> Humedad Gravimétrica .....	44
<b>Figura 8.</b> Validación cruzada para las propiedades físicas: <b>a)</b> Arcilla, <b>b)</b> Limo, <b>c)</b> Arena, <b>d)</b> Humedad Gravimétrica .....	45
<b>Figura 9.</b> Mapas isorritmicos para los contenidos de Ar y L.....	48
<b>Figura 10.</b> Mapas isorritmicos para los contenidos de Arena y Humedad.....	49

<b>Figura 11.</b> Mapa isorritmico para la densidad aparente.....	50
<b>Figura 12.</b> Mapa isorritmico. Conductividad Hidráulica.....	51
<b>Figura 13.</b> Mapa isorritmico. Resistencia a la Penetración.....	52
<b>Figura 14.</b> Mapa isorritmico de pH.....	53
<b>Figura 15.</b> Mapa isorritmico para MO y CIC.....	54
<b>Figura 16.</b> Mapa isorritmico para el contenido de Ca y Mg.....	55
<b>Figura 17.</b> Mapa isorritmico para K y Na.....	56
<b>Figura 18.</b> Mapa isorritmico para P y B.....	57
<b>Figura 19.</b> Mapa isorritmico para Fe.....	58
<b>Figura 20.</b> Mapa isorritmico para Mn.....	59
<b>Figura 21.</b> Mapa isorritmico para Zn y Cu.....	60
<b>Figura 22.</b> Mapa isorritmico del Factor 1 relacionado con la composición textural de los suelos de la granja.....	64
<b>Figura 23.</b> Mapa isorritmico de los Factores 2 y 3 .....	65
<b>Figura 24.</b> Mapa isorritmico del Factor 1.....	66
<b>Figura 25.</b> Mapa isorritmico del Factor 2.....	67
<b>Figura 26.</b> Mapa isorritmico del Factor 3 y 4.....	68

<b>Figura 27.</b> Dendograma.....	71
<b>Figura 28.</b> Zonas Resultantes del Análisis de Clasificación.....	72

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo 1.</b> Semivariogramas para algunas de las características físicas y químicas de los suelos de la granja.....	87
<b>Anexo 2.</b> Diagrama que muestra la relación entre valores observados y ajustados en el proceso de validación cruzada.....	92
<b>Anexo 3.</b> Clasificación en grupos o Cluster.....	97



## INTRODUCCIÓN

Este trabajo se constituye en la base fundamental y punto de partida del Plan de Desarrollo proyectado para La Granja Experimental de la Universidad del Magdalena, siendo el primer trabajo que se realiza en variabilidad espacial de las propiedades de los suelos que la conforman.

La Granja Experimental a través del tiempo ha sido el escenario predilecto para la realización de actividades de docencia, investigación y extensión principalmente del programa académico de Ingeniería Agronómica que le ha demandado uso intensivo de sus suelos desde la década de los 70. Hoy día la Universidad del Magdalena ha emprendido dentro de su Plan de Desarrollo entre otros aspectos la modernización de todas sus unidades académico-administrativas incluyendo la Granja Experimental, proyectándola como un gran laboratorio para la investigación y de apoyo a la docencia, que se ajuste a las tendencias actuales en materia de innovación tecnológica y pertinencia regional con los sectores Agrícola y Acuícola, principalmente.

Estos retos hicieron necesario desarrollar un estudio detallado que permitiera caracterizar espacialmente las propiedades físicas y químicas de los diferentes lotes que conforman la Granja con el fin de garantizar a corto plazo la calidad y confiabilidad de los resultados experimentales que allí se realicen. Esta variabilidad ha sido analizada estadística y geoestadísticamente determinando claramente el índice de homogeneidad de los suelos y estableciendo un mapeo detallado del área de estudio, constituyéndose en una valiosa herramienta para definir el plan de uso y manejo de los suelos de la Granja experimental.

Entre las principales limitaciones que afronta la experimentación de campo en la granja Experimental, está la relacionada con las marcadas variaciones en las propiedades físicas y químicas de los suelos aún en áreas relativamente cercanas entre sí, lo cual dificulta el manejo uniforme de los ensayos. El conocimiento preciso y la identificación geográfica de las fuentes de heterogeneidad sistemática presentes en los lotes, contribuyen en buena medida a mejorar la calidad y confiabilidad de los experimentos, ante la dificultad de realizar labores de adecuación, altamente costosas para la Institución; sin que ello garantice mejora sustancial en los índices de precisión y sensibilidad experimental de los ensayos, en las diferentes líneas de investigación del programa de Ingeniería Agronómica.

## **1. OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Caracterizar la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas de los suelos de la Granja Experimental de la Universidad del Magdalena destinados a la docencia, investigación y a la extensión.

### **ESPECIFICOS**

- Determinar las propiedades físicas (humedad gravimétrica, textura, densidad aparente, resistencia a la penetración y conductividad hidráulica) y químicas (MO, pH, CIC, N, P, K, Ca, Mg, Na, Cu, Zn, Fe, Mn, B) y su distribución espacial.
- Identificar mediante la elaboración de mapas temáticos, la distribución espacial y caracterización de los atributos del suelo.
- Delimitar zonas en el área de la Granja que agrupen condiciones edáficas homogéneas como herramienta útil en el mejoramiento de la calidad experimental de los ensayos que se realicen en el futuro.

## **2. MARCO CONCEPTUAL**

Los suelos de las zonas tropicales se caracterizan por ser heterogéneos y presentar marcada variabilidad espacial en sus propiedades físicas y químicas principalmente.

### **2.1. EL SUELO COMO UN SISTEMA DINAMICO**

El suelo es un cuerpo natural y dinámico que desempeña muchos roles claves en los ecosistemas terrestres (Doran & Parkin, 1994; USDA, 2003) y se forma a partir del material parental, el relieve, la biota, el clima y el tiempo, en una serie de procesos globales: ganancias, pérdidas, traslocaciones y transformaciones, que determinan sus características (Malagón *et al.*, 1995). La acción combinada de factores y procesos formadores conlleva al desarrollo de gran diversidad de suelos (Buol *et al.*, 1983). Igualmente el suelo es el intermediario entre el sistema físico-climático (física dinámica de la atmósfera) y el sistema biogeoquímico (en la biosfera), por lo que cualquier actividad sobre él influye en procesos de nivel global. De acuerdo con la Teoría de Sistemas, el “sistema suelo” puede entenderse como un punto relativamente estable en la superficie terrestre frente a procesos de transferencia y transformación y, desde esta perspectiva, es evidente la relación morfología-procesos.

Aplicar la Teoría de Sistemas al suelo debería hacer posible modelar los flujos de energía y materia. Sin embargo, la falta de datos cuantitativos es crítica para establecer modelos matemáticos y, por consiguiente, para avanzar en el conocimiento de la génesis de estos sistemas (Malagón *et al.*, 1995).

## 2.2. LA VARIABILIDAD DE LOS SUELOS

Las variaciones espaciales pueden estudiarse a través de técnicas geoestadísticas que permiten elaborar mapas y delimitar áreas de manejo homogéneo. Se ha estudiado la variabilidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que afectan la productividad de los cultivos, reportándose asociaciones entre éstas y el rendimiento, aunque dichas asociaciones dependen del rango de variación del parámetro y del rango en que éste afecta al rendimiento (Ortega y Flores, 1999).

A pesar de la necesidad de mejorar la precisión de los ensayos que se realizan en las estaciones experimentales, generalmente no se mapean los suelos con suficiente detalle, en procura de identificar los cambios marcados en sus atributos los cuales suelen presentarse aún en cortas distancias. Por el contrario, se ha preferido disminuir la incidencia de la variabilidad del suelo en los ensayos mediante el proceso de aleatorización en los diseños experimentales, es decir, se ha intentado neutralizar el efecto de la variabilidad, pero se ha avanzado poco en su estudio como un elemento del suelo mismo y de su relación con los resultados experimentales (Beckett y Webster, 1971).

Para el estudio detallado de la variabilidad espacial de los suelos en las estaciones experimentales, no es factible el uso de la fotointerpretación como herramienta de mapeo, debido a que generalmente las unidades de suelos ocupan superficies pequeñas donde no hay límites obvios y donde los atributos de interés no se correlacionan con cambios visibles externamente (Burrough, 1986). En tales circunstancias es posible utilizar análisis geoestadísticos, los cuales usan el semivariograma y la interpolación para lograr un mapa isorítmico de un atributo en particular (Burrough, 1986). Sin embargo, el suelo es una entidad compleja que se caracteriza por la presencia de múltiples atributos.

La variabilidad de las propiedades del suelo es una condición inherente al mismo debido a que en su formación intervienen varios procesos diferentes, controlados su vez por los factores de formación; éstas interacciones pueden ser muy variadas dando como consecuencia una buena cantidad de suelos posibles.

La variabilidad depende de la propiedad que se analice, siendo más variables las químicas que las físicas. Hay menor variabilidad en las propiedades del suelo en su condición natural, que cuando es sometido a uso y aquellas propiedades que más se afectan por el manejo serán las que presenten mayor variabilidad. (OVALLES, F. 1992)

La variabilidad en el campo se debe a varios factores naturales y antropogénicos. El factor natural más importante es el tipo de suelo cuyas características están definidas por el material parental y la topografía. (BROUDER, 1999)

El material parental a menudo varía en patrones de gran escala regional, pero también se pueden observar variaciones a pequeña escala, en especial en suelos originarios de depósitos coluviales o aluviales en zonas cercanas a los ríos. (BRADY, N.; WEIL, R. 2002)

Además, de los factores citados se debe considerar la variación en función del clima. En especial la cantidad, frecuencia e intensidad de precipitaciones, vientos, temperatura máxima, mínima, amplitud diurna y nocturna, así como la radiación solar. (BRAGACHINI, M. 1999)

La actividad humana promueve la variabilidad a través de la distribución de residuos recientes y en el pasado lejano afectando la acumulación de materia orgánica con todas sus implicaciones. Son factores importantes en la variabilidad antropogénica la distribución de fertilizantes, la diferente remoción de nutrientes causada por diferentes tipos de cultivos y rotaciones, el efecto

significativo de la erosión, labores culturales, nivelaciones de terrenos y compactación. (BROUDER, 1999)

La gran constante en relación a los suelos es su variabilidad, pudiendo ser esta: vertical u horizontal. La primera se refiere a las diferencias entre los horizontes y la segunda, a como los suelos varían de un lugar a otro. (BRAGACHINI, M. 1999)

La variabilidad horizontal se puede estudiar en diferentes escalas. A pequeña escala, se puede notar que las propiedades de los suelos cambian en pequeñas distancias. En esta escala las variaciones generalmente se deben a pequeños cambios en la topografía y al tamaño de las partículas derivadas de los materiales parentales, así como al efecto de microorganismos y uso anterior del suelo. Muchas veces la variación en pequeña escala no es fácilmente apreciada, sin embargo la altura o vigor de las plantas pueden reflejar dicha variabilidad, así como los análisis de suelos. El análisis de la variabilidad a pequeña escala tiene usos prácticos para el manejo de la fertilidad.

La variabilidad a mediana escala para algunas propiedades del suelo, es referida principalmente a las diferencias de un factor particular del mismo, como la topografía, drenaje o material parental. Comprendiendo las influencias de los factores formadores del suelo es posible definir grupos de suelos que tienden a aparecer en secuencia a lo largo del terreno. Tales grupos de suelos incluyen las litosecuencias (ocurridas a través de una secuencia de materiales parentales), cronosecuencias (materiales parentales de edad variable) y topo secuencias (suelos arreglados de acuerdo a los cambios en el relieve) (Jaramillo 2003).

En las variaciones a gran escala, los patrones del suelo son principalmente resultado del clima y vegetación y secundariamente debidas a las diferencias de material parental. Aunque a menudo es útil referirse a las características regionales generales del suelo, es importante recordar que existen muchas

variaciones al interior de cada grupo regional. Un ejemplo de estudio de la variabilidad a gran escala es el Mapa de Suelos Mundial, donde se aprecia por ejemplo, que los Oxisoles con altos contenidos de humedad pueden ser encontrados principalmente en las regiones cálidas y húmedas regadas por el Amazonas y el Congo en Sur América y África respectivamente. (BRADY, and WEIL, R. 2002)

**2.2.1 Sistemas de Información Geográfica y sus aplicaciones en la Agricultura.** La utilidad principal de un Sistema de Información Geográfica radica en su capacidad para construir modelos o representaciones del mundo real, a partir de las bases de datos digitales. Esos modelos se los puede utilizar en la simulación de los efectos que un proceso de la naturaleza o una acción antrópica produce sobre un determinado escenario en una época específica (ORTIZ, 2004).

Al inicio, esta herramienta se utilizó para manejar la información de análisis de suelo, para desarrollar mapas de dosis variables de fertilización y aplicación de cal agrícola.

Luego, se uso SIG para manejar estudios más generales del suelo, datos de producción y otra información de manejo y administración agrícola. Sin embargo, el poder del GIS va más allá del desarrollo de mapas que muestran la variabilidad del suelo o del rendimiento.

Entre las principales aplicaciones de los sistemas de información geográfica en la agricultura están:

**2.2.2 Elaboración de mapas exactos del campo.** Se relacionan diversos mapas como los de producción, generales de suelos y mapas de contenido de nutrientes para lograr un mapa de aplicación precisa de fertilizantes con dosis



variables dependiendo de la localización del sitio en el campo, luego se puede generar un mapa de cómo se aplicó el fertilizante y otro que refleje los cambios generados por la aplicación (REETZ, 2000)

**2.2.2.1 Mapas digitalizados para estudios de suelos.** Mapas de textura, pendiente y profundidad del subsuelo, que se combinan con mapas de producción, para determinar áreas que requieran drenaje interno o superficial y realizar un monitoreo de los niveles freáticos dentro las plantaciones (CASTAÑEDA, 2005).

**2.2.2.2 Mapas de remoción de nutrientes.** Se pueden determinar con base en los mapas de producción. Varios años de datos de fertilización, análisis de suelo y fertilización, análisis de suelo y remoción de nutrientes permiten que un GIS pueda ser usado para determinar zonas de fertilidad variable dentro del campo (REETZ, 2000)

**2.2.2.3 Mapas de costo de producción.** A partir de las bases de datos creadas se pueden diseñar mapas de la variabilidad en rentabilidad para cada campo. Se puede incluir información de manejo de plagas, producción, humedad del grano a la cosecha y otros factores (REETZ, 2000)

**2.2.2.4 Mapas de evaluación de tierras.** Se pueden desarrollar mapas para determinar el valor de mercado de la tierra, basándose en las características del suelo y su productividad.

Por otro lado, muchas son las posibilidades del GIS para los distribuidores de insumos y los consultores agrícolas. Esta es una herramienta de manejo e interpretación de la información que puede ser útil para sus clientes. El seguir el rastro demográfico de las ventas de los productores, el determinar la distribución geográfica de problemas de plagas y enfermedades y distribución

geográfica de los factores de la calidad del grano son unos pocos ejemplos de cómo los datos en GIS se pueden usar con éxito en el desarrollo y la administración de los agro negocios. Por todas estas razones el GIS se constituye en una de las herramientas más útiles para el manejo de suelos y cultivos por sitio específico. (REETZ, H. 2000)

**2.2.3 GPS y sus aplicaciones en la agricultura.** En la primera etapa de introducción a la Agricultura de Precisión en EEUU, allá por los años 1991-1993 se diseñó un esquema de utilización de las herramientas posicionadas por GPS para la aplicación de insumos en forma variable (VRT) con GPS, como única alternativa que disponía el productor. (BRAGACHINI, M. 1999)

Los primeros trabajos relacionados con la aplicación de GPS en agricultura consistieron en ubicar espacialmente y el tiempo real empleado por una cosechadora. Paralelamente, se desarrollaron los sensores de flujo y humedad de grano, monitores computarizados, para almacenar los datos y software capaces de integrar esa información y producir un mapa de rendimiento.

En 1992 se pudieron ver los primeros mapas de rendimiento y en 1993 en los Estados Unidos en el “Farm Progress Show” una máquina trabajó demostrando la utilidad de este sistema. Desde ese año esta tecnología tuvo un comportamiento creciente y cinco años después aproximadamente unas 14,000 cosechadoras implementaban el monitoreo de rendimiento a través de esta tecnología (BRAGACHINI, M.; MARTELLOTTO, E.; RUIZ, S. 1998.)

Mediante el uso del GPS, al medir el rendimiento como al muestrear el suelo se puede determinar exactamente el sitio en el campo para poder regresar al mismo sitio cuando sea necesario. De esta forma es posible comparar los mapas de rendimiento y de suelo por ejemplo. (ESPINOSA, J. 2000 a.)

### **2.3 GEOESTADISTICA.**

Diversos métodos han sido utilizados para describir los cambios del suelo, entre ellos se encuentran los considerados en los procesos rutinarios de clasificación e inventario de suelos, hasta métodos cuantitativos considerando análisis estadístico y geoestadístico (Ovalles y Rey, 1995)

El enfoque estadístico convencional describe la variabilidad de parámetros a través de observaciones de una propiedad dada; estas observaciones son estadísticamente independientes de su posición inicial, es decir, considera la magnitud de estos como si los puntos en que se realizan las observaciones, estuvieran ubicados completamente al azar. Puesto que el enfoque estadístico convencional no considera la estructura espacial de las propiedades del suelo, es necesario utilizar un enfoque más real que incorpore descripciones estadísticas de la estructura espacial de los parámetros del suelo. Por tal razón la estadística simple se considera como un método no apropiado, debido a que no toma en cuenta la dependencia espacial presente en la mayoría de las propiedades de los suelos, por lo cual se hace necesario la utilización de herramientas estadísticas adicionales.

Una herramienta útil en los estudios de variabilidad es la geoestadística. Su origen se remonta a la industria minera, fundamentalmente en SurAfrica, a principios de siglo XVIII y está referida al estudio de la distribución en el espacio de variables geológicamente importantes, con fines de explotación. A partir de 1951 comienza el desarrollo empírico de la geoestadística con los trabajos de Sichel y Krige (1960), G. Matheron retomó los trabajos de Krige, desarrollando el fundamento teórico de la geoestadística.

La Geoestadística es una rama de la estadística basada en la teoría de las variables regionalizadas y provee herramientas cuantitativas para su discusión y estimación (Trangmar *et al.*, 1985). Con ella pueden estudiarse los cambios

graduales del suelo dentro de cada delineación y también es posible estimar los atributos de suelo en sitios no muestreados. Además es una técnica capaz de examinar la estructura espacial de las propiedades del suelo (Utstet *et al.*, 1989) y contribuye significativamente en la comprensión de los efectos espaciales de los factores formadores y procesos genéticos.

A escala experimental, el suelo se ha considerado por la estadística Fisheriana como un factor no controlado y cualquier variación se piensa que se puede manejar por la aleatorización de las muestras ignorando su localización. Esta concepción de la variabilidad no ha permitido una evaluación precisa; esto ha influido en parte en que a nivel experimental el suelo ha sido considerado como un factor no controlado, y cualquier posible variación se piensa que puede ser manejada por el proceso de aleatorización de los tratamientos. Consecuentemente, se supone a la unidad experimental como homogénea quedando, en el mejor de los casos, el efecto diferencial del suelo enmascarado dentro del error experimental. Con el análisis de la variable regionalizada (Nielsen 1998 citado por Madero *et al* 2000), las muestras no se colectan al azar; con ello se puede obtener estructura espacial de la varianza e información útil acerca del número de muestras, la época, el lugar, el dominio de cada muestra y la utilidad de una muestra en relación con un modelo conceptual y la utilidad de esta en relación con la muestra.

Generalmente, cuando se estudia la variabilidad espacial de una propiedad del suelo, es conveniente utilizar la teoría de variables regionalizada (Gurovich y Stern, 1983). Una variable regionalizada no es más que una función dependiente del espacio, que toma valor por cada punto y está caracterizada **por localización**, es decir, ella ocurre en un espacio, denominado soporte geométrico; caracterizado por una forma, tamaño y dirección; **continuidad** y **anisotropía**, su comportamiento varía con la dirección; (Ovalles, 2001). Una variable regionalizada describe una variable que se encuentra en el espacio y que muestra cierta estructura.

De otra parte en la geoestadística hay necesidad de conocer la localización relativa de las muestras en el espacio o en el tiempo, a partir de lo cual se puede calcular la estructura de la varianza, la cual expresa la dependencia entre las medidas a través de autocorrelogramas y semivariogramas.

El análisis de autocorrelación es un método alternativo para examinar la relación espacial entre observaciones de una propiedad determinada, en puntos distantes unos de otros en el campo. La autocorrelación es una función más simple que el método del variograma para detectar diferencias entre puntos y constituye excelente herramienta para analizar datos en el espacio (Ovalles, 2001).

$$r_z(h) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [(z(v_i + h) - \mu_z)(z(v_i) - \mu_z)]}{\Gamma_z^2} \quad (1)$$

$r_z(h)$ : Autocorrelación

$N$ : Numero de pares de valores de  $Z$

$Z(v_i)$ : La propiedad  $Z$  en un lugar  $v_i$

$Z(v_i+h)$ : La propiedad  $Z$  a una distancia  $h$  del lugar  $v_i$

$\mu_z$ : La media de los valores para la propiedad  $Z$

$\Gamma_z^2$ : Varianza de la propiedad  $Z$

La semivarianza es una medida del grado de similitud que existe entre dos observaciones situadas a una determinada distancia; mientras más similares sean las observaciones menor será la semivarianza. La semivarianza no es más que la varianza de las diferencias entre pares de puntos separados por una distancia dada (Ovalles, 1991). La función semivarianza se expresa en la siguiente ecuación:

$$Y(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=0}^n (Z_{(x+h)} - Z_{(x)})^2 \quad (2)$$

$Y_{(h)}$  = Semivarianza.

$N$  = Número de pares de valores de  $Z$ .

$Z_{(x)}$  = Valor de la propiedad  $Z$  en el lugar  $x$ .

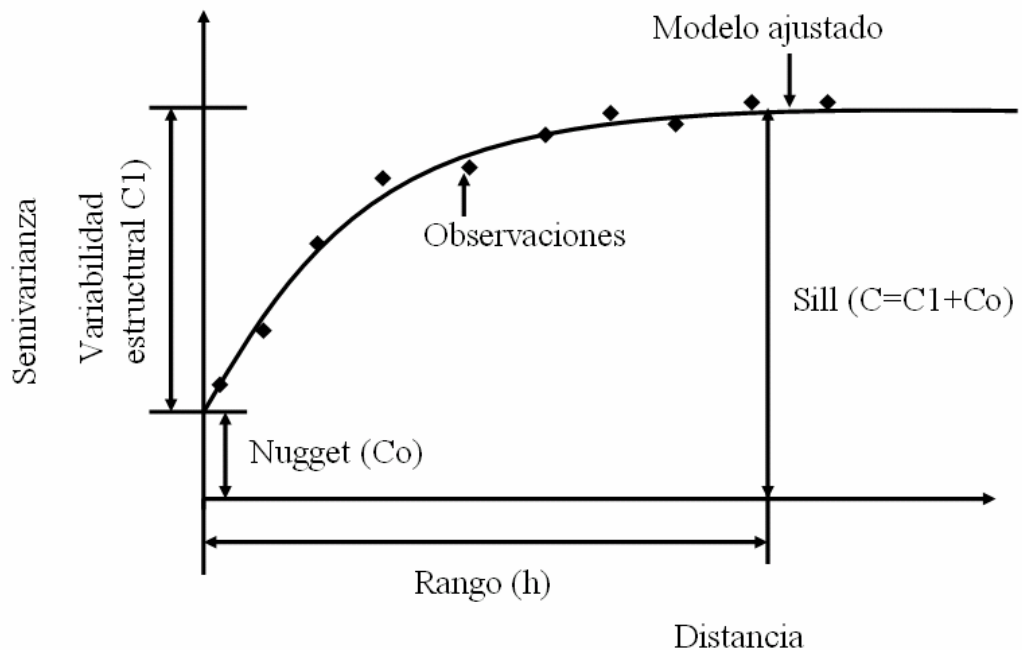
$Z_{(x+h)}$  = Valor de la propiedad  $Z$  a una distancia  $h$  del lugar  $x$ .

El gráfico de la semivarianza contra la distancia se conoce como el semivariograma. Generalmente, la semivarianza aumenta con los incrementos de la distancia hasta alcanzar un valor estable denominado **umbral o sill**, la distancia en la cual se alcanza el umbral se denomina **alcance, amplitud o rango de dependencia espacial**, y constituye la distancia hasta donde existe dependencia espacial entre las observaciones. Teóricamente la semivarianza debería ser cero (0) cuando la distancia es cero (0), pero esto frecuentemente no ocurre, este fenómeno se denomina **efecto nugget** o **aleatorio** y es causado principalmente por una variación imposible de detectar a la escala de muestreo utilizada. En la figura 1, se presenta el esquema de un semivariograma (Jaramillo, 2003).

## 2.4 METODOS DE MUESTREO

La caracterización del suelo se basa en una fracción del mismo que debe tener un alto grado de representatividad del total; por consiguiente el objetivo del muestreo es el de hacer inferencias sobre la población de interés, basado en la información contenida en la muestra. La confiabilidad de los resultados depende en gran parte de la representatividad de la muestra, de tal forma que se puedan hacer recomendaciones adecuadas con un determinado nivel de confianza (Ovalles, 1991).

**Figura 1.** Esquema de un semivariograma



**Fuente:** (Jaramillo 2003)

**2.4.1 Muestreo dirigido.** Este método se basa en la selección de lugares típicos, los cuales se consideran representativos de la condición que se quiere caracterizar. Este método de muestreo es de uso común en los estudios agrológicos donde las unidades cartográficas y los suelos que las integran son caracterizados con base en un bajo número de observaciones (Ovalles, 2001).

**2.4.2 Muestreo aleatorio simple.** El muestreo es aleatorio simple cuando una muestra de tamaño  $n$  es tomada de una población de tamaño  $N$  de tal forma que cada individuo de la población tiene la misma probabilidad de ser seleccionado. (Ovalles, 2001).

**2.4.3 Muestreo aleatorio estratificado.** Este muestreo se lleva a cabo dividiendo a los elementos de la población en estratos y seleccionando una muestra aleatoria simple en cada estrato. Se recomienda cuando la población

no es uniforme, estableciendo grupos de elementos que constituyen los estratos. (Ovalles, 2001).

**2.4.4 Muestreo sistemático.** Este método de muestreo consiste en tomar las muestras a distancias fijas, existen diversas variantes del método, entre ellas se tiene:

- Muestreo sistemático en una dimensión: Siguiendo transectos en cada dirección **X**, pudiendo ser cada punto de muestreo o medida equidistante de otro, en una distancia  $L$ , denominada “lag” (espacio).
- Muestreo sistemático en dos dimensiones: Siguiendo un “grid” (red o cuadrícula) en las direcciones **X**, e **Y** nuevamente cada medida puede ser espaciada una distancia  $L$  “lag” constante. Este método presenta las siguientes ventajas: (i) las muestras son fácilmente seleccionadas y ubicadas en el campo, (ii) hay una cobertura uniforme de la población, (iii) provee de más información por unidad de costo comparado con el muestreo aleatorio simple, (iv) los resultados son fáciles de expresar en un mapa, (v) es un método más preciso que el muestreo aleatorio simple especialmente cuando la población es muy heterogénea. ( Giraldo y Mendoza 2003).
- Muestreo sistemático no alineado: Este diseño combina las ventajas de la cuadrícula regular y la aleatorización.

Muestreo a una distancia constante no es estrictamente necesario en los casos anteriores, desde que se conozca la posición relativa de cada muestra. Estos dos métodos facilitan los cálculos y análisis futuros, y tienen grandes ventajas sobre el muestreo al azar principalmente por mantener constante una intensidad de muestreo en toda el área (Silva et al, 1989).

**2.4.5 Muestreo en conglomerado.** Este método de muestreo constituye una muestra aleatoria simple en la cual cada unidad de muestreo es una colección o conglomerado de elementos. Se utiliza cuando se estudian grandes



extensiones y no se dispone de los recursos ni el tiempo para abarcar toda el área.

**2.4.6 Muestreo anidado.** Este diseño es útil cuando las escalas espaciales de los patrones de suelo no son conocidas o no pueden ser deducidos fácilmente por la superficie y el relieve; en otras palabras hay desconocimiento sobre la población que se va a estudiar.

## **2.5 METODOS DE INTERPOLACIÓN.**

La interpolación ponderada, relacionada con la estructura cuantitativa de la variabilidad espacial de los valores de un parámetro (Kriging), fue presentado originalmente en 1966 por Krige, en la evaluación de vetas mineras y posteriormente extendido su uso a situaciones de suelos cultivados, principalmente por Webster y Burgess, (1980). Nielsen et al, (1983) y Vieira et al, (1982), citados por Buitrago (1995) involucran procesos geoestadísticos de interpolación conocidos con los nombres de Kriging (interpolación simple) y Cokriging (interpolación compuesta). Con la información derivada de los semivariogramas ajustados (amplitud, umbral, varianza aleatoria), se pueden estimar valores en los sitios no muestreados utilizando el proceso de interpolación conocido como Kriging puntual, generándose diagramas de las estimaciones y errores asociados a la estimación.

**2.5.1. Kriging.** Es una técnica de interpolación que usa la dependencia espacial que existe entre las observaciones para estimar valores de una variable en lugares no muestreados, sin sesgo y con mínima varianza. Es un procedimiento semejante al de interpolación por media móvil ponderada, excepto que aquí los pesos son determinados a partir de un análisis espacial, basado en el semivariograma experimental (Cámara, 2002). El kriging engloba un conjunto de métodos de estimación, incluyendo procedimientos estacionarios (Kriging simples y ordinarios), no estacionarios (kriging universal,

funciones intrínsecas de orden  $k$ ), univariados y multivariados (Co-kriging, etc). Las formas simples de kriging envuelven estimación de valores puntuales (kriging puntual, siendo la técnica más utilizada en los trabajos de ciencia del suelo) o áreas (kriging bloque) y asume que los datos muestreados son estacionarios y presentan distribución normal (Trangmar *et al*, 1985). Co-kriging es el procedimiento usado cuando una variable no puede ser suficientemente muestreada (dificultades experimentales, altos costos de muestreo, etc) para proveer una precisión aceptable en la estimación. La precisión en la estimación puede ser mejorada por la utilización de la correlación espacial entre la variable poco muestreada (primaria) y otra covariable más frecuentemente muestreada (Trangmar *et al*, 1985).

Los mapas iso-rítmicos basados en la interpolación ponderada Kriging se sitúan entre las técnicas de separación de unidades de suelo de relativa homogeneidad en relación con la variabilidad espacial de los valores de algún parámetro.

## **2.6 ANALISIS MULTIVARIADO**

La homogeneidad multivariada de un sistema natural cualquiera, está referida al grado de simplicidad estructural y de frecuencia de ocurrencia espontánea de los flujos de intercambio de materia, energía e información dentro y entre los sistemas y el ambiente circundante, que tiene lugar durante el desarrollo de los mismos. De esta manera, se asume a este tipo de homogeneidad como una variable de estado termodinámica, toda vez que para estimar el comportamiento homogéneo de los sistemas macroscópicos, apreciables a una escala real es necesario relacionar como un todo los atributos más simples o macroscópicos, esto es, las características que permiten identificar y describir dichos sistemas (Jaimes y Elizalde, 1991, citados por Jaimes y Arellano, 1998).

El análisis multivariado de datos es un conjunto de técnicas estadísticas de tipo exploratorio, a través de las cuales se busca simplificar la estructura de

los datos originales en procura de visualizar las propiedades del sistema de manera integral; es decir, como un todo y no de forma fragmentada. Las técnicas se resumen en dos grandes categorías: los métodos factoriales y los métodos de clasificación (Baena, 2002)

Los métodos factoriales son la representación sobre ejes (factores) y planos de los objetos que se quieren describir (individuos, variables, modalidades). Para el caso de variables cuantitativas, la técnica de más frecuente uso es el análisis de componentes principales cuyo objetivo es generar nuevas variables (sintéticas, independientes y no correlacionadas), que resuman el comportamiento de los datos originales, mediante una reducción de la dimensionalidad del problema de tal manera que se facilite el análisis e interpretación de resultados. La variabilidad de los datos originales es retenida en la varianza de los componentes principales, correspondiendo la máxima al primero y decreciendo en orden de importancia con el segundo, tercero, etc. Componente (Giraldo, 2003)

Los métodos de clasificación tienen por objeto formar grupos (clusters) de suelos con base en propiedades cualitativas o cuantitativas, de tal manera que se garantice la mayor homogeneidad dentro del grupo (o cluster) y la mayor heterogeneidad entre grupos.

**2.6.1 Índice de homogeneidad multivariado (IHM).** El índice de homogeneidad multivariado es un criterio analítico de gran utilidad en los estudios sobre variabilidad espacial de los suelos. Este parámetro se define por la expresión:

$$IHM = \prod_{j=1}^m \delta_j$$

Siendo:

$\delta_j$ : Valor propio del j-ésimo componente principal cuya magnitud sea mayor o igual a 1

$\pi$ : Operador productoria

m: Número de componentes principales cuyos valores propios son mayores o iguales a 1.

Este parámetro se define como el producto de los valores propios (eigenvalues) mayores o iguales a uno; es decir con la fracción de la varianza total representada en los componentes principales de mayor relevancia. En la medida que el IHM sea mayor, el suelo se considera más heterogéneo.

## **2.7 AGRICULTURA DE PRECISIÓN**

La variabilidad espacial de las propiedades del suelo y de los rendimientos de los cultivos ha sido reconocida desde los inicios de la agricultura. Dicha variabilidad espacial está determinada por factores intrínsecos, como los procesos de formación del suelo, y extrínsecos como el manejo histórico de las explotaciones.

En el pasado, no existían las herramientas necesarias para que los productores agrícolas pudieran medir efectivamente la variabilidad espacial o localizar los sectores con problemas de productividad dentro de los lotes. La Agricultura de Precisión o Manejo por Sitio-Específico, surgió gracias a la aplicación de tecnologías que permiten medir y manejar la variabilidad espacial para, potencialmente, aumentar la eficiencia productiva y disminuir el impacto ambiental.

La definición más simple de Agricultura de Precisión establece que esta corresponde a un grupo de tecnologías tales como sistemas de información

geográfica (SIG), sistemas de posicionamiento global (GPS), computadores, maquinarias, etc., que permiten la aplicación de insumos agrícolas, tales como fertilizantes, semillas, plaguicidas, etc., en forma variable dentro de un lote, de acuerdo a los requerimientos y/o potencial productivo de varios sectores homogéneos, pre-definidos dentro del mismo.

Una visión más completa la define como "un conjunto de actividades que incluyen la recolección y manejo de información que permiten tomar decisiones económica y ambientalmente apropiadas para la producción de cultivos". La recolección de información se hace espacialmente, con la ayuda de sistemas de posicionamiento global (GPS) que facilita la localización instantánea (latitud y longitud) de cada sector del lote, mientras que el manejo de la misma, se realiza a través de sistemas de información geográfica (SIG), en forma de mapas georeferenciados.

El Manejo Sitio-Específico implica la aplicación de manejos en forma diferencial, de acuerdo al conjunto único de condiciones que cada sector del área de interés posee. Los diferentes sectores definidos deben tener características homogéneas y pueden representar unidades desde un metro cuadrado hasta un sitio completo, dependiendo del nivel de detalle a que se trabaje.

Según el Consejo Nacional de Investigación de EE.UU., la Agricultura de Precisión corresponde a una estrategia de manejo que utiliza tecnologías de información para recolectar datos desde distintas fuentes para apoyar decisiones asociadas a la producción de cultivos. Además establece que la Agricultura de Precisión reconoce que la producción agrícola depende del suelo, del clima y del manejo pasado y varía en el espacio y en el tiempo. Por lo tanto, las decisiones de manejo deben ser sitio y tiempo específicos y no rígidamente programados, como ocurre en la actualidad.

El área de mayor desarrollo dentro de la Agricultura de Precisión es el Manejo de Nutrientes Sitio Específico, también llamado Tecnología de Dosis Variables, que corresponde a la aplicación variable de dosis de fertilizantes de acuerdo al nivel de fertilidad de cada sector de manejo homogéneo dentro del lote, lo cual significa que no se trabaja, necesariamente con una sola dosis de fertilizante, sino con tantas dosis como áreas significativamente homogéneas existan en la explotación.

Las prácticas de Manejo de Sitio Específico serían recomendables en situaciones donde, en el lote, exista una alta variabilidad de los factores de producción (fertilidad, malezas, agua, etc.) y los rendimientos varíen en función de ellos.

Según Sawyer (1994) citado por Grupo de Investigación y Transferencia en Agricultura de Precisión del Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile, la Tecnología de Dosis Variables podría ser utilizada cuando:

- i) Los lotes varían ampliamente en propiedades del suelo que afectan el rendimiento.
- ii) Los rendimientos efectivamente varían en respuesta a la variación de las propiedades del suelo.

Bajo estas condiciones, idealmente debieran aplicarse manejos diferenciales dentro del sitio en términos de fertilización, control químico de malezas, etc., en vez del tradicional manejo promedio utilizado en la actualidad.

Anteriormente se decía que la Agricultura de Precisión partía del análisis de los primeros mapas de rendimiento logrados. Luego de años de trabajo, evolución y experiencia se sabe que la variabilidad expresada en el rendimiento de un cultivo en forma espacial depende de una diversidad de factores y que su análisis e interpretación es una tarea compleja, resultando muy difícil extraer

conclusiones directas para un manejo sitio específico de insumos. Bragachini *et al* (2002),

La idea fundamental en que se basa la Agricultura de Precisión es aplicar los insumos en la cantidad que se puedan aprovechar con eficiencia para que cada área del lote exprese su máximo potencial económicamente posible, conservando los recursos naturales. Según esto, se ahorraría insumos en las áreas de bajo rendimiento potencial sin disminuir el rendimiento, para trasladarlos a las áreas con mayor potencialidad que pueden aumentar la producción aprovechando los insumos eficientemente. Lo anterior busca cambiar la metodología de aplicación de insumos bajo la suposición de que los lotes presentan potenciales de rendimiento homogéneos en toda el área, por otra de mayor exactitud de aprovechamiento de los insumos basada en el conocimiento de la variabilidad de respuesta dentro del lote, que permita maximizar la respuesta económica en cada sitio del mismo. Bragachini *et al* (2002),

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 LOCALIZACION

El trabajo se desarrolló en la Granja Experimental de la Universidad del Magdalena, Santa Marta D.T.C.H, Departamento del Magdalena, ubicada entre las coordenadas  $74^{\circ} 07'$  Y  $74^{\circ} 12'$  de longitud oeste y a los  $11^{\circ} 11'$  y  $11^{\circ} 15'$  de latitud norte con respecto al ecuador ( figura 2).

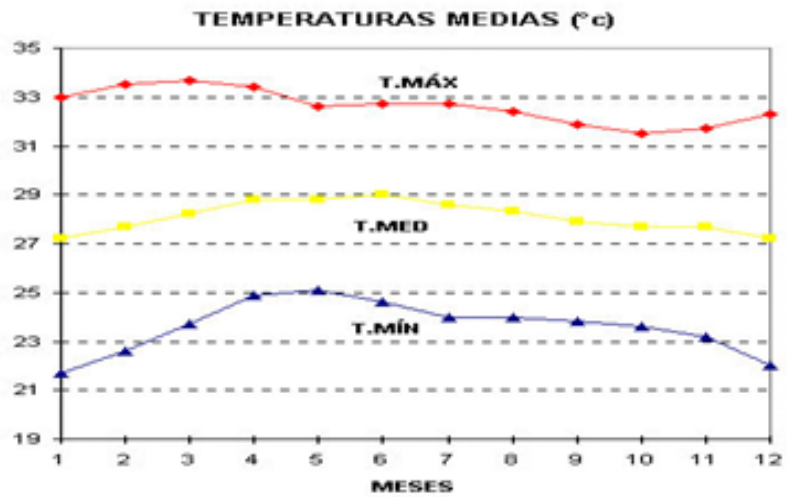
La zona está situada a 15 m.s.n.m, El clima se clasifica como estepario tropical cálido y la formación vegetal se cataloga como bosque tropical seco, con vegetación xerofítica. Precipitación promedio anual de 674mm, de carácter unimodal con lluvias entre abril y noviembre, la temperatura varía poco con promedio de  $28.5^{\circ}\text{C}$ , (figuras 3-5), además presenta humedad relativa promedio de 75%, y los vientos que imperan en la zona son los alisios del hemisferio norte, soplando en gran parte del año en dirección nor este (IDEAM, 2001).



**Figura 2.** Imagen satelital de la Granja Experimental.

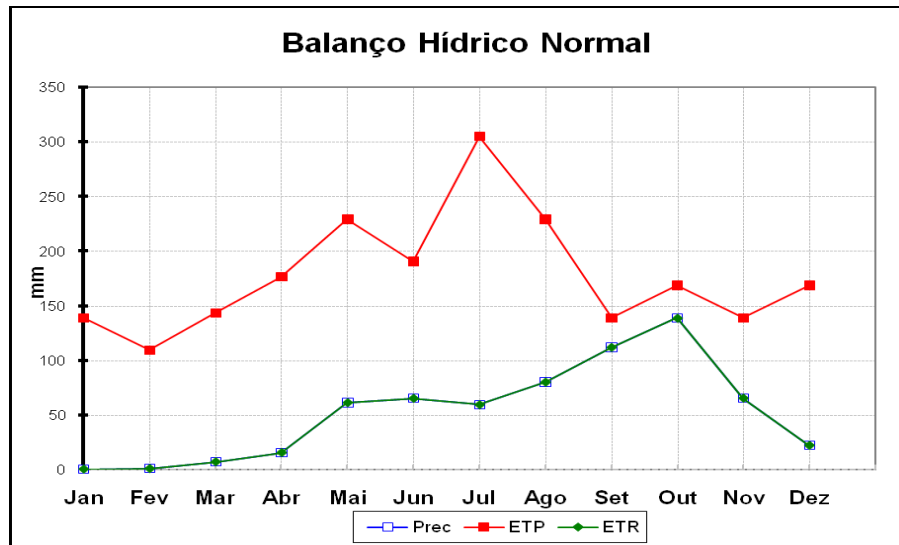
**Fuente:** Google earth





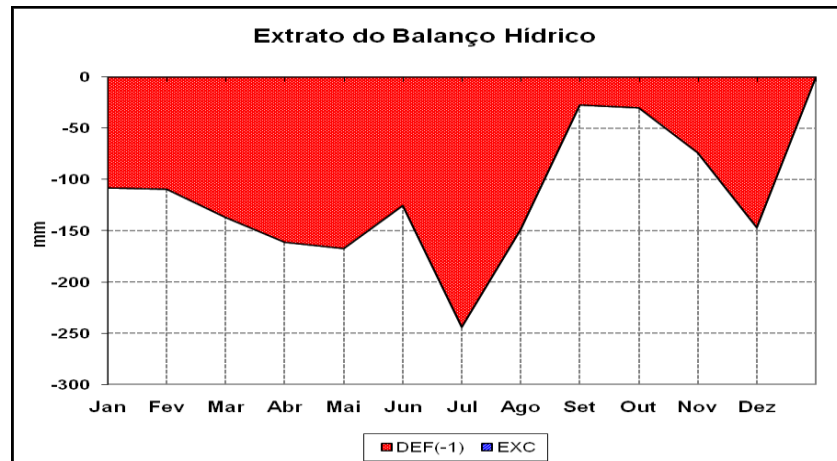
**Figura 3.** Temperatura Máxima, Media, Mínima. Estación Aeropuerto Simón Bolívar Lat. N= 11°07 y Long. W= 74°03.

Fuente: IDEAM disponible en [www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co)



**Figura 4.** Balance hídrico *por metodo Thornthwaite & Mather (1955)*, Estación Universidad del Magdalena: Lat. N= 11°14' y Long W= 74°13'

Fuente: IDEAM disponible en [www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co)



**Figura 5.** Tabla de Deficiencia y exceso Hídrico según *Thornthwaite & Mather (1955)*, Estación Universidad del Magdalena: Lat. N= 11°14' y Long W= 74°13'

**Fuente:** IDEAM disponible en [www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co)

**3.1.1 Suelos.** Los suelos de la granja son de origen aluvial pertenecientes a aluviones recientes que se formaron en el cuaternario más cercano, esto es, en el Holoceno (Granados 1968, citado por Lobato 2002). Situados en la serie Mamatoco, rodeada por el sur-este con formaciones del batolito Santa Marta y por el sur-oeste con los esquistos de Gaira (Cabrales 1968, citado por Lobato 2002).

Se considera un suelo poco evolucionado con predominio de texturas gruesas, su contenido podológico corresponde al de los ENTISOLES suborden PSAMMENTS, debido a que reposan sobre una gruesa capa de arena (Lobato 2002).

En estas planicies dominan los grupos textuales gruesos y moderadamente gruesos, asociados al bajo grado evolutivo de los suelos, que aún conservan rasgos del material sedimentario a partir del cual se originaron, aunque la ocurrencia de texturas gruesas es baja en suelos originados a partir de sedimentos coluvio-aluviales gruesos y de granito. La mayoría de los suelos de

la Granja se caracterizan por tener una estructura de bloques subangulares, en profundidad los suelos presentan esta estructura la cual desaparece para dar paso a un horizonte sin estructura (masiva o de grano suelto).

La tensión de humedad a 0.33bars se halla entre 13,47 y 49,35, predominando en los suelos de textura moderadamente gruesa las tensiones bajas, a 15 bars alcanzan tensiones de 33,57 en suelos de texturas medias y esta disminuye paulatinamente en texturas moderadamente gruesas y gruesas hasta un mínimo de 4,32%.

El pH es un reflejo de la influencia de los materiales parentales bajo un clima que permite el enriquecimiento del medio en bases como el calcio, magnesio y el potasio, predominando los suelos neutros, ligera y medianamente alcalinos.

La mayoría de los suelos tienen valores de CIC medios entre 10-20 cmol/kg de suelo, medios a bajos contenidos de carbono orgánico. En consideración los suelos de estas áreas calidas tienen fertilidad moderada a baja ya que la fracción gruesa del suelo presenta cantidades moderadas a altas de feldespatos y en algunos casos biotita, la fracción fina del suelo está integrada principalmente por proporciones bajas de caolinita, presencia de vermiculita y micas. IGAC 1995.

Tolosa y Paba, 1991, citados por Lobato 2002, utilizando la técnica de Fassbender e Igue, determinaron que la capacidad de fijación de fósforo en suelos de la Sierra Nevada de Santa Marta y granja de la Universidad del Magdalena, la capacidad de fijación de fósforo varió entre 75 y 95%, siendo el pH y el contenido de **Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**, los factores que mas la afectaron.

La fijación de fósforo consiste en la transformación de los fosfatos de un fertilizante en forma menos solubles debido a reacciones que ocurren entre el fósforo liberado del fertilizante y el suelo. La causa de este fenómeno se atribuye a la presencia de cargas electropositivas originadas en la materia

orgánica, arcillas o hidróxidos del suelo; de este modo los iones  $H_2PO_4$  producidos al solubilizarse el fertilizante son adsorbidos por el complejo coloidal, por otra parte debido a la presencia de iones de Ca y Mg en suelos básicos, y de Fe y Al en suelos ácidos, se forman fosfatos simples con estos iones, los que precipitan, o bien se forman fosfatos complejos de baja solubilidad. Todo esto determina que una escasa proporción del P aplicado al suelo esté disponible para las plantas, quedando la mayor parte fijado en el suelo.

**3.1.1.1 Geología.** Estos suelos presentan una marcada influencia del macizo triangular de la Sierra Nevada de Santa Marta limitado por fallas y rodeado por cuencas terciarias y por la fosa estructural de los ríos Cesar y Ranchería y con alturas cercanas al nivel del mar. La geología es compleja por ser el resultado de tres orogénesis principales y por lo menos tres periodos de callamiento.

Estos suelos pertenecen a la provincia geotectónica de Santa Marta, que comprende el batolito del mismo nombre, el cual está formado por dos franjas metamórficas paralelas de igual rumbo. La franja exterior consta de esquistos verdes del grupo Taganga. La franja interior consta de esquistos anfibolíticos del grupo Gaira, los cuales fueron metamorfoseados durante el Jurásico e intruidos longitudinalmente por el batolito de Santa Marta. Entre las principales rocas alrededor de la Sierra Nevada de Santa Marta encontramos, metamórficas (neis bandeados, esquistos micáceos y mármoles, esquistos anfibolíticos, neis horblendicos). Sedimentarias (arcillas, limonitas y calizas marinas y limonitas con inclusiones de rocas volcánicas). Ígneas intrusitas (cuarzodiorita, cuarzomonzonita y granitos). Ígneas extrusivas (brechas ignibríticas). IGAC 1995.

**3.1.1.2 Geomorfología.** Los suelos están ubicados en un paisaje de planicie poco evolucionados a partir de materiales sedimentarios en un relieve ligeramente plano marcado por formaciones aluviales del cuaternario

derivados del gigantesco tetraedro aislado (Sierra Nevada de Santa Marta), este paisaje es relativamente pequeño en el flanco norte y hace parte de la gran planicie fluvio marina. El límite entre el macizo y la planicie es muy marcado, la planicie en este sector se ha dividido en terrazas y llanuras. Las terrazas han sido recortadas por los ríos y solo quedan pequeños restos muy pedregosos y fuertemente discretos. La llanura es el área más extensa, localizada entre los ríos Palomino y Buritaca, formada por sedimentos fluvio-marinos de composición variada, hacia el contacto con el macizo predominan los materiales finos a medios, en tanto que hacia el litoral dominan los materiales arenosos. IGAC 1995

### 3.2. MUESTREO PRELIMINAR

Se establecieron dos transectos de 40m de longitud en direcciones ortogonales y a intervalos de 5m se hicieron determinaciones de densidad aparente, pH y materia orgánica) con el fin de allegar la información necesaria para la estimación del tamaño de muestra requerido, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$n = \frac{t^2 S^2}{E^2} = \frac{t^2 CV^2}{E^2 (\%)}$$

Donde:

- **t**: es el valor de t en la tabla de t Student para 10 gl y el nivel de confianza deseado en la estimación de la media verdadera de la característica (para el caso consideremos un 95% de confianza)
- **S<sup>2</sup> y CV%** son respectivamente la varianza y el coeficiente de variación de la variable de interés
- **E** es el error permisible y se define como la diferencia entre la media de la muestra (promedio del número de puntos de muestreo a evaluar en el trabajo definitivo) y la media verdadera de la característica en todo el

lote (parámetro a estimar). Para el caso de MO si se supone que la media verdadera debe estar entre  $0.76 \pm 0.10$ ., entonces el valor de **E** es 0.10. De otra manera si se aspira a que la diferencia entre la media de la muestra y la media verdadera expresada como porcentaje de la media verdadera no sea mayor del 5% entonces **E%=5%**

Bajo estas consideraciones se calculó el tamaño de muestra requerido para estimar la media verdadera de cada una de las características evaluadas en el muestreo preliminar

**Tabla 1.** Cálculo del tamaño de muestra

Descriptor	pH	MO	da
Promedio	7,94	0,85	1,43
Desviación estándar	0,33	0,26	0,12
Coefficiente de variación %	4,21	30,59	8,18
n con E=5% (aprox.)	4	184	13

Para un error permisible **E(%)** del 5% y tomando como base el coeficiente de variación para la MO por ser la propiedad más variable, según los valores obtenidos en el muestreo preliminar, se estimó un tamaño de muestra de 184 sitios, los cuales fueron distribuidos en el área en forma sistemática, utilizando un intervalo de muestreo de 29m\*29m (Figura 6).



**Figura 6:** Demarcación de los sitios de muestreo

**Fuente:** Adaptado por Lugo (2009) de Google earth.

### 3.3. RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para efecto del muestreo se realizó un diseño grid regular (29m\*29m), sobre el mapa base del Campo Experimental. En campo los puntos de muestreo se ubicaron mediante estacas utilizando herramientas topográficas. Las observaciones se tomaron en las intersecciones de la cuadrícula. Los 184 puntos se georeferenciaron con GPS (12 XL GARMIN)

En los puntos de muestreo (184) se midieron las propiedades: físicas (humedad, textura, densidad aparente, conductividad hidráulica y resistencia a la penetración) y químicas (MO, pH, CIC, N.P.K, Ca, Mg, Na, Cu, Zn, Fe, Mn, B)

El muestreo se concentró en los primeros 25 cm de profundidad debidos a que: La mayoría de especies cultivadas en la granja presentan su mayor concentración de raíces en este rango de profundidad y a esta profundidad disminuye la intervención o disturbación del suelo por efecto de la mecanización.

**3.3.1 Fase de campo.** Entre enero y febrero de 2008, se realizó la medición in-situ de las siguientes variables:

- Resistencia a la penetración: Se determinó, utilizando el penetrómetro de cono Eijkelkamp, metodología descrita en el manual IGAC 2006
- Para el posterior análisis de esta propiedad se tomaron muestras de suelo para determinar la humedad gravimétrica al momento de muestreo. Metodología descrita en el manual IGAC 2006
- Se tomaron muestras de suelo para los análisis en laboratorio.

**3.3.2 Fase de laboratorio.** Entre febrero y septiembre de 2008, se evaluaron los siguientes parámetros:

**Propiedades Físicas:**

- Textura: Se determinó por el método del hidrómetro y con eliminación de materia orgánica (IGAC 2006)
- Densidad aparente en seco: método de terrón parafinado, utilizando la metodología propuesta por el manual (IGAC 2006).



- Humedad al muestro: Se utilizó la metodología propuesta por Montenegro y Malagón (1990, p89-91).
- Conductividad Hidráulica Saturada, Método del Permeámetro de cabeza constante (IGAC 2006).

### Propiedades químicas

- Bases intercambiables ( $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ) Acetato de Amonio 1N y pH 7 y determinación por Espectrofotometría de absorción atómica.
- pH se realizó, por el método del potenciómetro con electrodo de vidrio en relación 1:1 (suelo-agua),
- La determinación de los elementos menores (*Cu*, *Zn*, *Fe* y *Mn*) espectrofotometría de absorción atómica y B (Azometina H).
- Materia Orgánica, se empleó el método Walkley – Black.
- Fósforo, se utilizó el método de Olsen, en el cual la extracción se efectúa con una mezcla de 0.03N  $NH_4F$  y de 0.1  $NHCl$ .

### 3.4 ANALISIS DE LA INFORMACION: ENFOQUE UNIVARIADO

Para cada una de las propiedades (físicas y químicas) evaluadas se estimaron los parámetros de tendencia central y de dispersión o variabilidad, con el fin de identificar aquellas variables con mayor poder de discriminación entre las diferentes tipologías de suelos que se presentan en la granja.

### **3.5 ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO**

La base de datos se corrió en el programa GS+ (Geostatistics for the Environmental Sciences Versión 5.1 de Gamma Design Software), posteriormente se obtuvo el semivariograma experimental para cada propiedad y mediante un proceso iterativo en donde se modifica el lag activo y el step, se estableció el modelo teórico de mejor ajuste, teniendo en cuenta como parámetros de decisión el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la suma de cuadrados de los residuales (RSS), para lo cual el primero debe ser el más cercano a 100% y el segundo el menor dentro de las situaciones planteadas.

Posteriormente se realizó el análisis de validación cruzada, de importancia en la estimación de valores en sitios no muestreados, mediante el método de interpolación Kriging puntual, debido a que las muestras provienen de puntos y no de combinaciones o mezclas. Esta interpolación es la base para la construcción de los mapas temáticos que permiten visualizar la variabilidad espacial de las propiedades.

### **3.6 ANALISIS MULTIVARIADO**

La base de datos se corrió en el programa SAS, para realizar el análisis factorial de componentes principales y el análisis de clasificación o Cluster Análisis (método jerárquico).

Se seleccionaron los componentes principales con valores propios mayores o iguales a uno, los cuales explican el mayor porcentaje de la variación total de los datos.

Para el análisis de clasificación se utilizó el algoritmo de Ward (mínima inercia), con el fin de conformar grupos de suelos con características físicas lo más

semejantes posible. Trazando el mapa con base en los clusters obtenidos en el análisis de clasificación, permitiendo la delimitación de zonas homogéneas.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION.

### 4.1 ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD: ENFOQUE UNIVARIADO

En la tabla 2 se describen los indicadores estadísticos asociados a cada una de las propiedades físicas y químicas evaluadas en el estudio de variabilidad espacial.

De acuerdo con el grado de variabilidad de cada propiedad, definido en términos del coeficiente de variación CV% se pueden establecer cuatro categorías de variables:

1. Relativamente homogéneas ( $CV\% < 20\%$ ): Densidad aparente y pH.
2. Moderadamente heterogéneas ( $20 < CV\% < 40\%$ ): Composición textural y Ca.
3. Normalmente heterogéneas ( $40 < CV\% < 60\%$ ): Resistencia a la penetración, Conductividad hidráulica, MO, Mg, Cu y B
4. Extremadamente heterogéneas ( $CV\% > 60\%$ ): Humedad, K, Na, CIC, P, Zn, Mn, Fe y B.

De lo anterior se deduce que con excepción del Ca y el pH, las propiedades químicas de los suelos de la granja presentan niveles de variación altos, asociados con una evidente heterogeneidad en toda el área de estudio. Esto confirma la importancia de hacer un mapa temático de cada propiedad y un mapa global considerando todas las características en su conjunto, que sirvan de guía para establecer un adecuado manejo de suelos.

**Tabla 2.** Estimadores de los parámetros estadísticos para cada una de las propiedades de los suelos de la granja.

VAR	MEDIA	MEDIANA	MODA	C.V.	MINIMO	MAXIMO
H	2.34	1.50	1.50	179.76	0.60	44.20
Da	1.45	1.50	1.50	11.41	1.20	1.80
A	55.80	56.40	56.40	20.42	24.38	75.88
Ar	23.67	22.89	32.32	26.06	11.40	42.55
L	20.53	19.18	18.79	34.08	4.85	43.73
Res	2.10	2.20	3.00	48.18	0.20	6.00
KH	1.58	1.54	1.65	54.13	0.26	7.10
pH	8.27	8.22	8.30	6.07	6.80	9.70
MO	3.09	2.92	1.30	54.53	0.01	7.39
Ca	11.38	11.38	11.00	25.03	4.70	18.20
Mg	3.26	3.04	2.30	43.04	1.00	10.70
K	0.90	0.80	0.73	66.33	0.01	3.43
Na	1.04	0.44	0.01	157.62	0.00	9.20
CIC	11.43	10.10	8.30	101.11	4.60	159.00
P	158.12	27.75	53.00	212.66	0.00	1785.0
Cu	2.03	1.80	1.00	50.78	0.20	6.00
Zn	1.71	1.00	0.10	207.13	0.00	36.20
Mn	30.56	27.10	11.00	70.74	1.40	153.30
Fe	20.23	7.35	2.10	179.58	0.10	274.00
Bo	0.71	0.67	0.81	46.22	0.07	2.45

A continuación se discuten algunos aspectos relativos al comportamiento general de las propiedades físicas y químicas:

**4.1.1 Propiedades Físicas.** Los valores de densidad aparente determinados por el método del terrón parafinado (IGAC 2006) en promedio pueden considerarse de normales a ligeramente altos para suelos de textura media (Malagón, 1985); sin embargo, la propiedad no tiene una variación significativa entre sitios de muestreo, posiblemente debido al efecto del uso y manejo del suelo y a las condiciones de la época seca en que se realizó el muestreo.

Con respecto a la textura se observa que 69.6 % de los sitios presentan una textura media, con predominio de la franco arcillo arenosa, lo cual evidencia que son suelos que han ido intergradando de texturas gruesas o livianas a medias, propiedad de los suelos de origen aluvial (Lobato, 2002), tal como se indica en la tabla 3.

**Tabla 3.** Distribución porcentual de las clases texturales.

Suelos	Clase textural	Porcentaje
Livianos	FA	29.9
Medianos	F	2.7
	FArA	60.4
	FAr	6.5
Pesados	Ar	0.5

El promedio de Humedad del 3% evidencia claramente las condiciones climáticas imperantes en la época seca en que se efectuó el muestreo. El contenido de humedad estuvo por debajo del punto de marchitez permanente en concordancia con la clase textural predominante. Esta propiedad presenta un nivel de variabilidad relativamente alto debido a: diferencias en la textura en diferentes zonas de la granja, factores climáticos (época seca en el mes de Enero) y antrópicos (riegos) predominantes.

La resistencia a la penetración con promedio de 2.1 MPa se presenta en niveles relativamente limitantes para el suelo (Salamanca, 2000) y la conductividad hidráulica con promedio de 1.58cm/h se califica como lenta a moderada.

Con base en los valores obtenidos para el C.V%, Warrick y Nielsen 1980, citados por Obando y Villegas (2005), se pueden calificar las propiedades físicas en las siguientes categorías: baja variación (CV menor 12%) para densidad aparente, variación media (CV entre 12-60%) para arena, arcilla,

limo, resistencia a la penetración y conductividad hidráulica y alta variación (CV mayor del 60%) para humedad gravimétrica.

Con excepción de las variables Da, Humedad, KH las correlaciones entre las demás propiedades físicas del suelo resultaron no significativas. Cabe destacar además que los componentes texturales del suelo están estrechamente correlacionados.

**4.1.2 Propiedades Químicas.** De acuerdo con las consideraciones de Ortega 1987 y del Manual de Laboratorio del ICA 1992, el pH osciló entre ligeramente alcalino y alcalino, con un máximo de 9.7 considerado como muy alcalino, situación extremadamente limitante para el desarrollo adecuado de los cultivos. Este sitio en particular está ubicado en el extremo noroccidental de la granja experimental en las coordenadas 11.13'.21.8"N y 74.11'.15.3"W, donde por acción antrópica se extrajo el horizonte A del suelo para rellenar un camino que bordea un sector de la granja. Estos suelos al momento del muestreo se encontraban sin cobertura vegetal, sometidos a altas temperaturas por un largo periodo de tiempo durante la época seca. El valor mínimo de pH fue de 6.8 considerado como neutro y corresponde a un sitio de muestreo (No. 150) ubicado en el extremo sur-oriente de la granja en las coordenadas 11. 27'.14.3" N y 74.10'. 59"W.

De acuerdo con los valores promedio, las propiedades químicas se pueden estratificar de la siguiente manera:

1. Contenido bajo a medio: MO, Fe
2. Contenido medio: Cu, Zn, CIC.
3. Contenido alto: Bases, P, Mn, B.

Según Warrick y Nielsen 1980, citados por Obando y Villegas, (2005), se encontró una baja variación (CV menor 12%) para el pH, una variación media

(CV entre 12-60%) para MO, Ca, Mg, Cu y B y una alta variación (CV mayor del 60%) para los contenidos de K, Na, CIC, P, Zn, Mn y Fe. En general Los coeficientes de variación, de la tabla 1, se encuentran en los rangos característicos para las propiedades estudiadas, reportados por Trangmar *et al*, 1985.

El contenido de P presentó el mayor coeficiente de variación con valor de 212 %, lo cual concuerda con varios trabajos reportados en la literatura. (Ovalle 1991, Paz, Gómez y Taboada 1996 Melchiori y Echeverría 1998 Ponce de León *et al*. 1999, Sadeghian *et al*.2001, Jaramillo 2002, Silva *et al*.2003. Citados por Obando y Villegas 2005)

Se encontraron correlaciones positivas y significativas en la mayoría de las variables químicas excepto para la variable Zn. Es importante resaltar la correlación encontrada entre las variables Na y pH lo que lleva a pensar sobre alta influencia de los contenidos de Na en los valores del pH y la del Fe con Cu, CIC y pH en donde los mayores valores de estas propiedades están condicionados por los valores más bajos del pH a lo largo del lote. Lo que se corresponde con las definiciones sobre los efectos del pH en los contenidos nutricionales de los suelos. (Lora Rodrigo 2003).



## 4.2 ANALISIS DE LA VARIABILIDAD. ENFOQUE GEOESTADISTICO

En la tabla 3 se registran los parámetros de los semivariogramas teóricos de mejor ajuste obtenidos para cada una de las propiedades estudiadas.

**Tabla 4.** Parámetros geoestadísticos.

	Lag (m)	Step (m)	Modelo	Efecto Nugget Co	Sill Co+C	Rango Efectivo (m)	Nugget Rel(%)	R <sup>2</sup>	RSS
<b>VAR</b>									
<b>H</b>	80.00	16.00	Esferico	10.75	21.51	210.90	50.00	0.96	0.167
<b>Da</b>	432.20	43.20	Exponencial	0.02	0.05	910.90	50.00	0.81	9.08E-06
<b>A</b>	386.00	29.69	Esferico	49.90	136.80	155.20	0.63	0.92	449
<b>Ar</b>	285.00	18.50	Esferico	9.21	40.75	109.00	77.00	0.97	26.6
<b>L</b>	482.00	47.20	Esferico	33.30	66.61	697.20	50.00	0.90	66.9
<b>Res</b>	262.30	26.30	Exponencial	0.85	1.72	594.30	50.00	0.68	0.0263
<b>KH</b>	482.00	48.20	Esférico	0.55	1.11	1010.90	50.00	0.80	0.0197
<b>pH</b>	502.00	50.20	Exponencial	0.20	0.40	1048.00	50.00	0.76	1.10E-03
<b>MO</b>	482.00	48.29	Esferico	1.34	5.68	1010.90	75.00	0.98	9.90E-02
<b>Ca</b>	232.00	23.20	Esférico	1.90	8.98	151.00	77.00	0.98	9.20E-01
<b>Mg</b>	322.00	32.29	Esférico	1.00	2.00	348.00	50.00	0.88	8.80E-02
<b>K</b>	432.00	43.20	Exponencial	0.19	0.41	109.70	53.00	0.97	7.21E-04
<b>Na</b>	152.00	15.20	Esférico	1.99	3.99	387.00	50.00	0.51	4.14E-01
<b>CIC</b>	482.90	48.20	Gausiano	84.00	478.90	639.30	82.00	0.64	1.75E+04
<b>P</b>	482.00	48.20	Gausiano	45.00	208.00	300.80	78.00	0.88	2.74E+09
<b>Cu</b>	352.90	35.20	Exponencial	0.20	1.12	47.80	77.00	0.94	1.23E-02
<b>Zn</b>	382.00	38.20	Esférico	6.18	17.85	810.90	65.00	0.65	1.99E+01
<b>Mn</b>	482.00	48.20	Exponencial	3.60	7.50	963.00	51.00	0.86	3.68E+03
<b>Fe</b>	482.00	48.20	Esférico	8.89	20.68	1010.90	57.00	0.72	1.42E+05
<b>Bo</b>	372.90	37.29	Exponencial	0.08	0.15	370.90	50.00	0.57	1.07E-03

En condiciones ideales se espera que el efecto nugget sea igual a cero; no obstante, debido a la microvariabilidad, no detectada a la longitud de muestreo utilizada, siempre será mayor. Trangmar *et al* (1985) citados por Giraldo y Mendoza 2003, trabajando con diferentes espaciamientos de muestreo para una misma propiedad obtuvieron diferentes valores para el efecto nugget y el alcance. Al relacionar este efecto con el umbral o sill puede establecerse que la

dependencia espacial disminuye a medida que aumenta la variación a corto alcance.

Cambardella, *et al.*, (1994), citados por Oliveira (1999) y Mejía (2007) proponen la siguiente calificación para la dependencia espacial:

- Fuerte dependencia espacial o de rango corto: nugget menor de 25%.
- Moderada dependencia espacial o de rango medio: nugget entre 25 y 75%.
- Débil dependencia espacial o de rango alto: nugget mayor del 75%.

El separado Arena presentó una fuerte dependencia espacial lo cual es válido si se tiene en cuenta que los cambios texturales entre muestras vecinas son mínimos. Con excepción de las propiedades Ca, CIC, P y Cu con débil dependencia espacial, las propiedades restantes presentaron porcentajes de nugget relativo entre 25%-75% que corresponde a una moderada dependencia espacial (Tabla 4).

El alcance o rango efectivo, dentro del cual se mantiene la dependencia espacial varió de una propiedad a otra. La densidad aparente, la resistencia a la penetración, limo, conductividad hidráulica, pH, MO, CIC, Zn, Mn y el Fe presentan mayor alcance a la máxima longitud del lote y por tanto la dependencia espacial para estas propiedades se manifiesta a lo largo y ancho del lote.

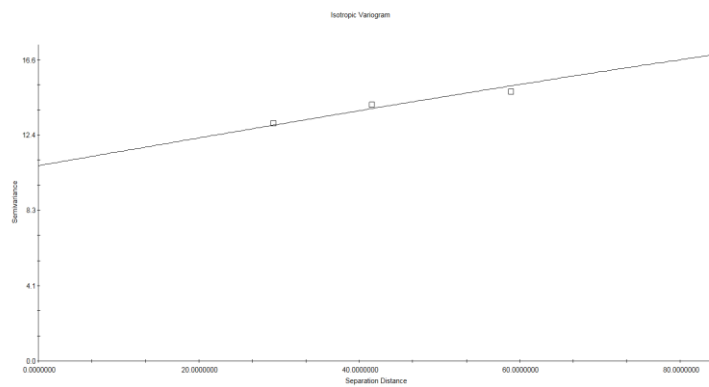
Hay que tener en cuenta que la magnitud de los rangos o alcances dependen de la escala de observación y de la interacción espacial de los procesos del suelo que afectan cada propiedad a la escala de muestreo utilizada. Rogowski y Wolf (1994) citados por Mejía (2007), encontraron que la escala de trabajo cambiaba las propiedades de los semivariogramas, presentándose más ruido

o dispersión en la distribución de los datos y mayor ciclicidad en el semivariograma a medida que se aumenta el espaciado entre muestras.

Los semivariogramas para propiedades físicas y químicas se muestran en la figura 7 y en el anexo 1. En general se observa que todos presentan estructuras diferentes de dependencia espacial, puesto que en ningún caso la semivarianza es constante en función de la distancia. Se observan además diferencias en los parámetros geoestadísticos y un patrón de comportamiento característico de poblaciones entremezcladas (Reichert, 1985), debido a la presencia de condiciones de suelo diferentes a nivel de detalle en el área de estudio.

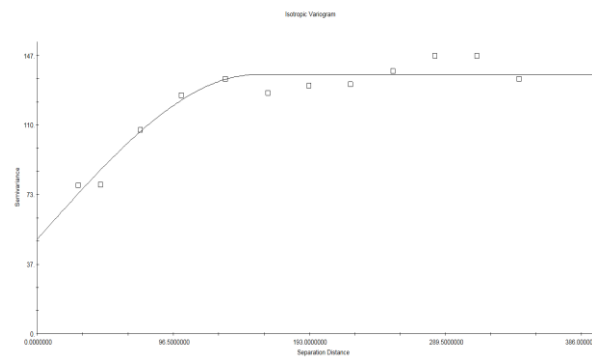
Los modelos teóricos de mejor ajuste en la mayoría de los casos fueron el esférico y el exponencial (tabla 3), lo cual permite afirmar que las variables estudiadas cumplen con la hipótesis de estacionalidad fuerte, dado que sus modelos son acotados (Biau *et al.*, 1997; Samper y Carrera, 1990). En general los modelos ajustados a los semivariogramas reportan coeficientes de determinación por encima de 0.50, lo que confiere adecuada interpolación por kriging.

La capacidad predictiva de los modelos se probó a través del análisis de validación cruzada, que establece la relación entre los valores observados de las propiedades físicas con sus respectivos valores estimados. La eficiencia del modelo se mide en términos del coeficiente de regresión, la desviación estándar, el coeficiente de determinación, el intercepto con el eje  $Y$  y la desviación estándar de predicción (tabla 5). Los diagramas de validación cruzada para todas las propiedades se presentan en las figuras 13 (propiedades físicas) y anexo 2.



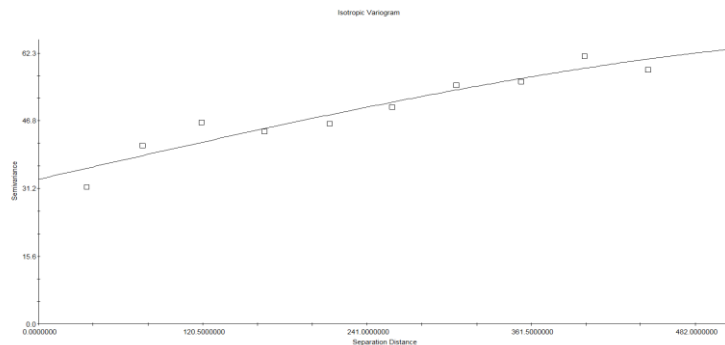
Spherical model (Ca = 10.7500, Cn = C = 21.5100, A0 = 210.9000000, c2 = 0.959, RSS = 0.197)

a)



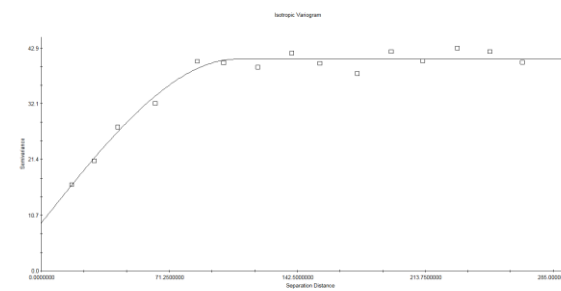
Spherical model (Ca = 49.9000, Cn = C = 136.8000, A0 = 155.2000000, c2 = 0.926, RSS = 445)

b)



Spherical model (Ca = 33.3000, Cn = C = 66.6100, A0 = 667.2000000, c2 = 0.906, RSS = 66.9)

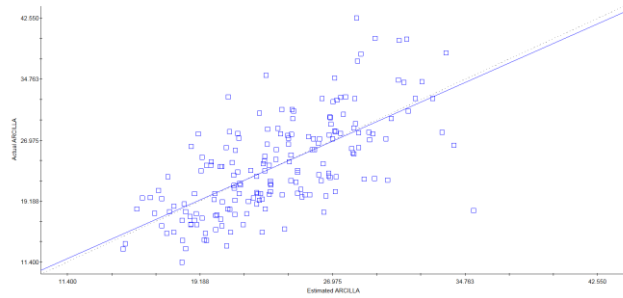
c)



Spherical model (Ca = 3.2100, Cn = C = 45.7050, A0 = 109.0000000, c2 = 0.932, RSS = 26.6)

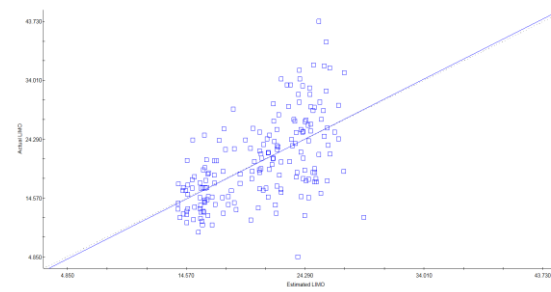
d)

Figura 7. Semivariogramas para las propiedades físicas: a) Arcilla, b) Limo, c) Arena, d) Humedad Gravimétrica



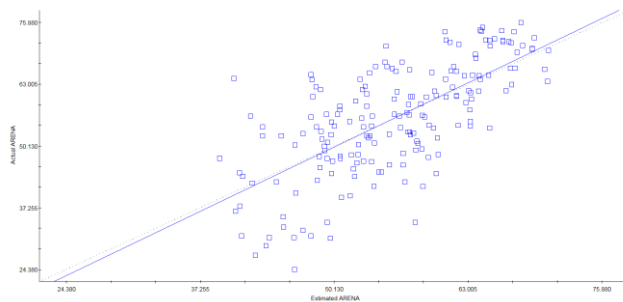
Regression coefficient = 0.964 (SE = 0.037),  $t = 10.446$ ,  
 y intercept = 0.022, SE Prediction = 4.577

a)



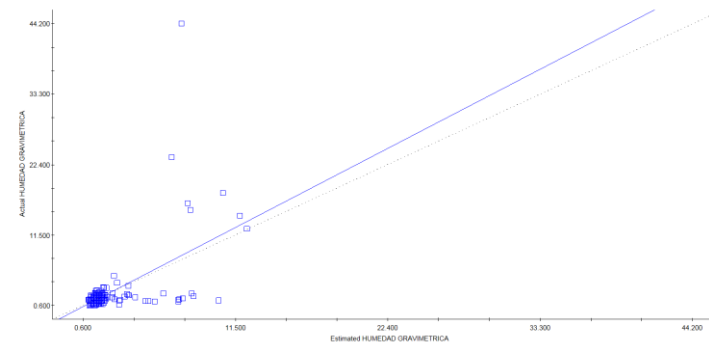
Regression coefficient = 1.022 (SE = 0.106),  $t = 10.340$ ,  
 y intercept = 0.011, SE Prediction = 6.884

b)



Regression coefficient = 1.043 (SE = 0.081),  $t = 10.474$ ,  
 y intercept = -2.380, SE Prediction = 8.260

c)



Regression coefficient = 1.125 (SE = 0.125),  $t = 9.300$ ,  
 y intercept = -0.304, SE Prediction = 3.465

d)

**Figura 8. Validación cruzada para las propiedades físicas: a) Arcilla, b) Limo, c) Arena, d) Humedad Gravimétrica.**

**Tabla 5.** Indicadores estadísticos de la validación cruzada.

PROPIEDAD	COEFICIENTE REGRESION	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE DE DETERMINACION
H	1	0.12	0.309
Da	0.85	0.16	0.13
A	1	0.08	0.47
Ar	0.96	0.079	0.44
L	1	0.1	0.34
Res	1	0.16	0.16
KH	0.9	0.15	0.15
pH	1	0.17	0.18
MO	0.98	0.082	0.44
Ca	0.9	0.06	0.44
Mg	1	0.09	0.42
K	0.95	0.1	0.2
Na	0.88	0.18	0.11
CIC	0.33	0.25	0.01
P	1	0.07	0.56
Cu	0.91	0.1	0.29
Zn	0.42	0.21	0.02
Mn	0.92	0.14	0.17
Fe	0.94	0.18	0.13
Bo	0.97	0.14	0.2

Los coeficientes de regresión entre los valores actuales y estimados estuvieron aproximados al valor teórico 1.0 con excepción de la CIC. En general los semivariogramas donde el efecto nugget es menor tienden a ser más eficientes en la validación cruzada.

Cabe anotar que la validación cruzada ejecutada con el programa GS+ parte de un modelo teórico de la forma  $y=a+bx$  con:  $y$  (valores observados) y  $x$  (valores ajustados), y los resultados obtenidos los confronta con un modelo ideal de la forma  $y=x$ .

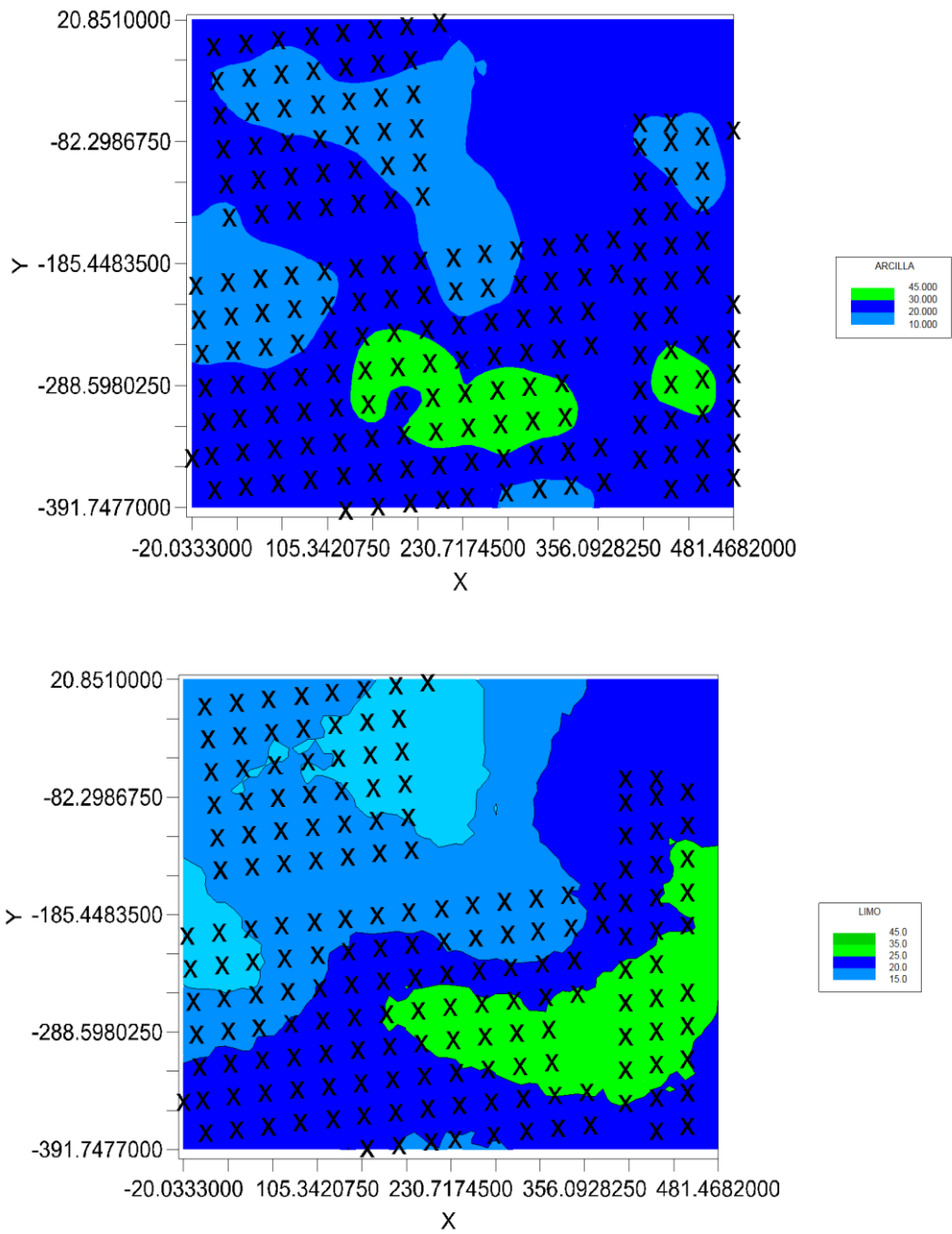
Este procedimiento es cuestionable puesto que el modelo teórico debería ser de la forma  $y=bx$  dado que el primer modelo con intercepto en  $a$ , considera que para un valor ajustado de  $x=0$  el valor observado tiende a  $a$ , lo que desde el

punto de vista real resulta inverosímil. Lo razonable es que para  $x=0$  entonces  $y=0$  tal como se desprende del modelo  $y=bx$ . (Giraldo y Mendoza (2003).

Los gráficos de isoclinas elaborados mediante la técnica de interpolación y predicción como el “Kriging”, (Journel y Huijbregts, 1978; Vieira *et al.*, 1981), muestran el comportamiento de las diferentes propiedades en toda el área motivo de estudio.

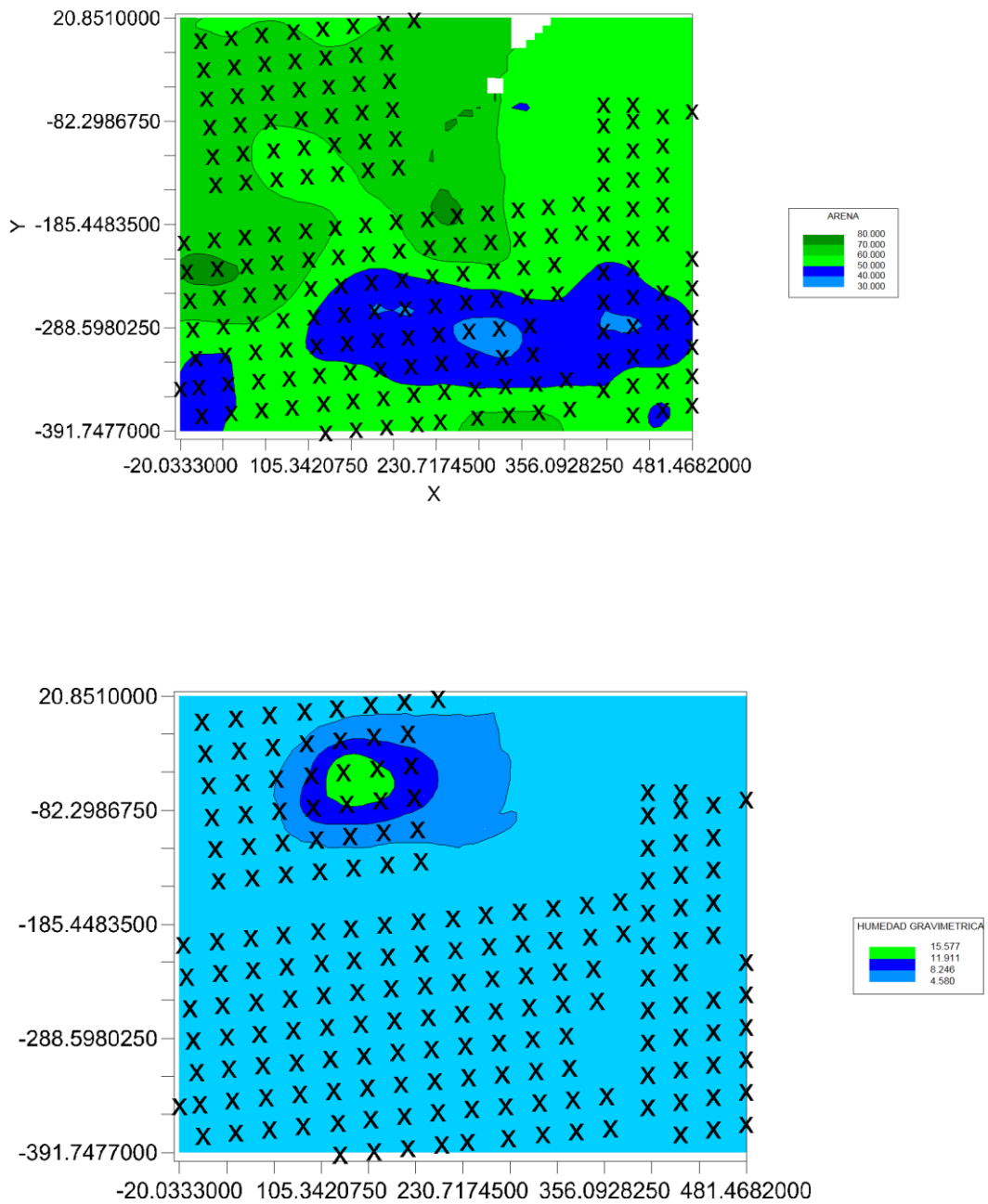
En los mapas para contenido de arcilla y arena (figura 9 y 10 ), se identifican dos grandes zonas contrastantes, la primera que ocupa la mayor parte del área posee los más altos contenidos de arena y bajos contenidos de arcilla, una segunda más pequeña y ubicada hacia el sureste del lote presenta los mayores contenidos de arcilla. Por otro lado la distribución del contenido de limo (figura 9 ) delimita a su vez tres zonas, dos de las cuales presentan contenidos medios a bajos y una zona más pequeña con los mayores contenidos de limo, la que coincide en gran parte con la zona de mayor contenido de arcilla. Según (Lobato 2002) el área de mayor contenido de limos y arcillas corresponde a la zona más baja donde en el pasado se presentaron inundaciones por el desbordamiento de la quebrada Tamacà derivada del río Manzanares. Para esta zona la clase textural más frecuente es la franco arcillo arenosa (Tabla 3)

El mapa para Humedad Gravimétrica (figura 10) muestra una relativa uniformidad, consecuente con la época seca del muestreo y la ausencia de cultivos con riego en alto porcentaje del área del lote. La zona con mayores contenidos de humedad corresponde al área sembrada con hortalizas que recibe suministro de riego en forma periódica.



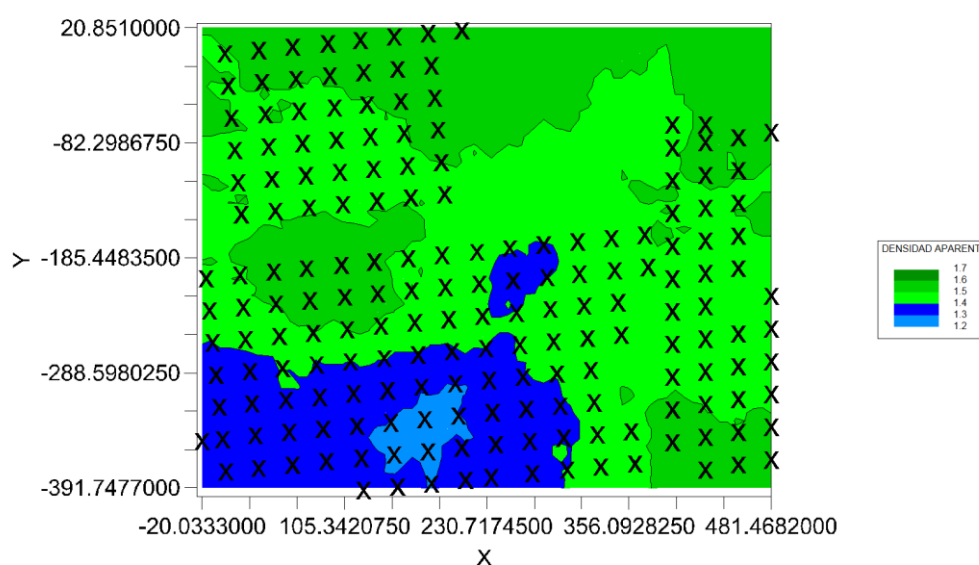
**Figura 9.** Mapas iso- rítmicos para los contenidos de Ar y L





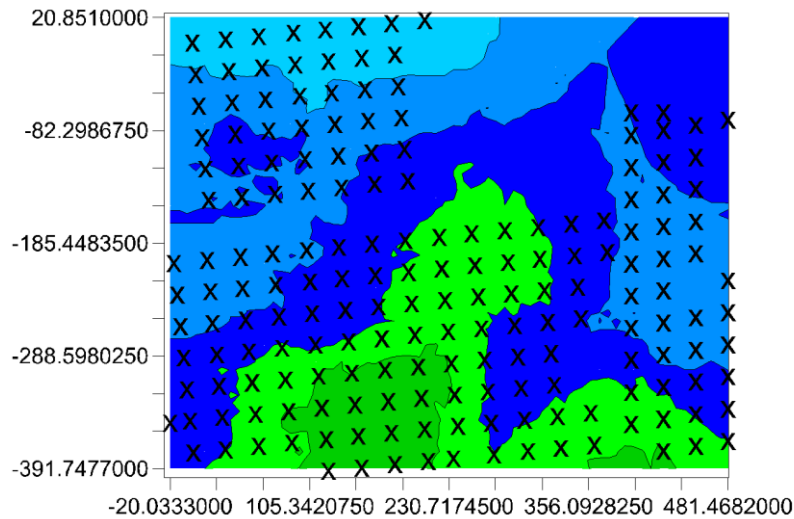
**Figura 10.** Mapa isorritmico para el contenido de Arena y Humedad.

En el mapa de densidad aparente (figura 11) los mayores valores de densidad (1.45 y 1.70Mg.m<sup>-3</sup>), coinciden con la zona de más alto contenido de arena. Niveles altos de densidad en la zona arcillosa pueden estar relacionados con algún problema de compactación o con la presencia de un factor causal de cementación. La condición de densidad alta en el lote, sugiere la realización de labores de labranza adecuadas para un buen desarrollo de los cultivos.



**Figura 11.** Mapa isorritmico para la densidad aparente.

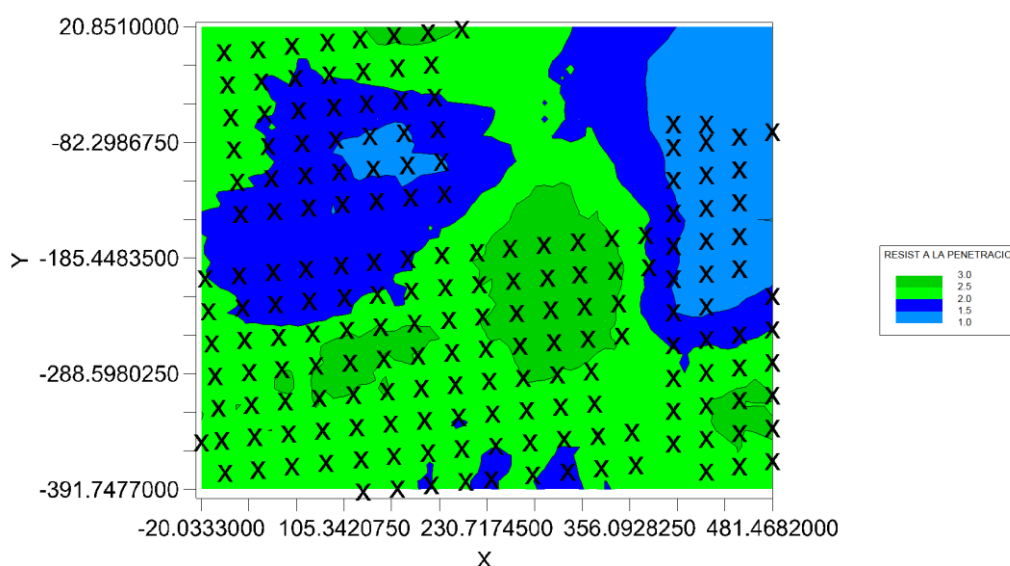
En el mapa de conductividad hidráulica saturada (figura 12) se pueden distinguir dos grandes zonas, la de tonalidad verde que oscila de moderada a rápida, coincidiendo con la zona de valores de densidad aparente más bajos lo cual debe reflejarse en mayor porosidad total y la zona de tonalidades azules que va de moderada a lenta. Es importante resaltar que en las zonas de mayor contenido de arena se presentaron valores de conductividad hidráulica que la catalogan como moderadamente lenta en contraste con el mayor tamaño de poros característicos de suelos de textura gruesa; posiblemente debido al efecto de compactación evidenciado por los valores de resistencia a la penetración.



**Figura 12.** Mapa isorritmico. Conductividad Hidráulica

En el mapa de resistencia a la penetración (figura 13) se observan zonas con valores MPa variando desde: nulos (0-1), bajos (1-2), medios (2-3) hasta altos 3-4), de acuerdo con la clasificación de Salamanca (2000). Este parámetro resulta ser limitante para valores entre 2-5 Mpa.

En la mayor parte del área evaluada se encuentran valores limitantes de resistencia a la penetración debido en buena medida a la condición seca del lote y por la presencia de una capa dura entre los 20 y 30 cm de profundidad, en muchos puntos de muestreo. La zona que se siembra con mayor frecuencia y la zona sometida a riego periódico presentan los mejores registros de resistencia para el desarrollo radical.

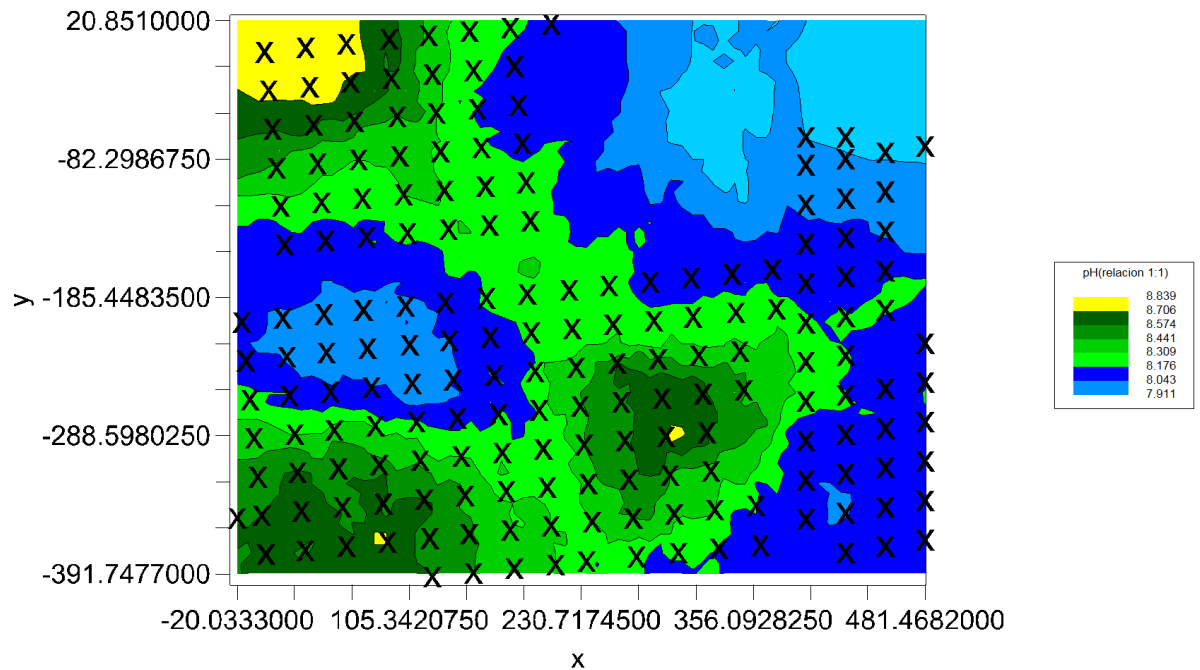


**Figura 13.** Mapa isorritmico. Resistencia a la Penetración.

En la zona con mayor contenido de arcilla se presentan dos situaciones con respecto a la resistencia a la penetración: una en la que la resistencia está en los rangos nulo y bajo, situación asociada con el contenido de humedad, puesto que la resistencia a la penetración disminuye a medida que se incrementa la humedad, y otra relacionada con el uso y manejo del suelo, que para cultivos de ciclo corto (en este caso hortalizas) implica la realización de labores periódicas de mecanización. Zonas de resistencia a la penetración media y alta, están asociadas a bajos contenidos de humedad y poca remoción del suelo.

El mapa temático para pH (figura 14) muestra áreas que van de neutras (azules), alcalinas (verdes) hasta fuertemente alcalinas (amarillas). En general, más del 50% del área presentó valores de pH por encima de 8, típico de suelos alcalinos; en asociación con altos contenidos de metales alcalino térreos (cationes básicos) como Na, Ca, Mg, y K (García, 2003). Es importante resaltar que el área con valores de pH más bajos coincide en gran parte con el área de mayor contenido de Materia Orgánica (figura 15), lo que sugiere como

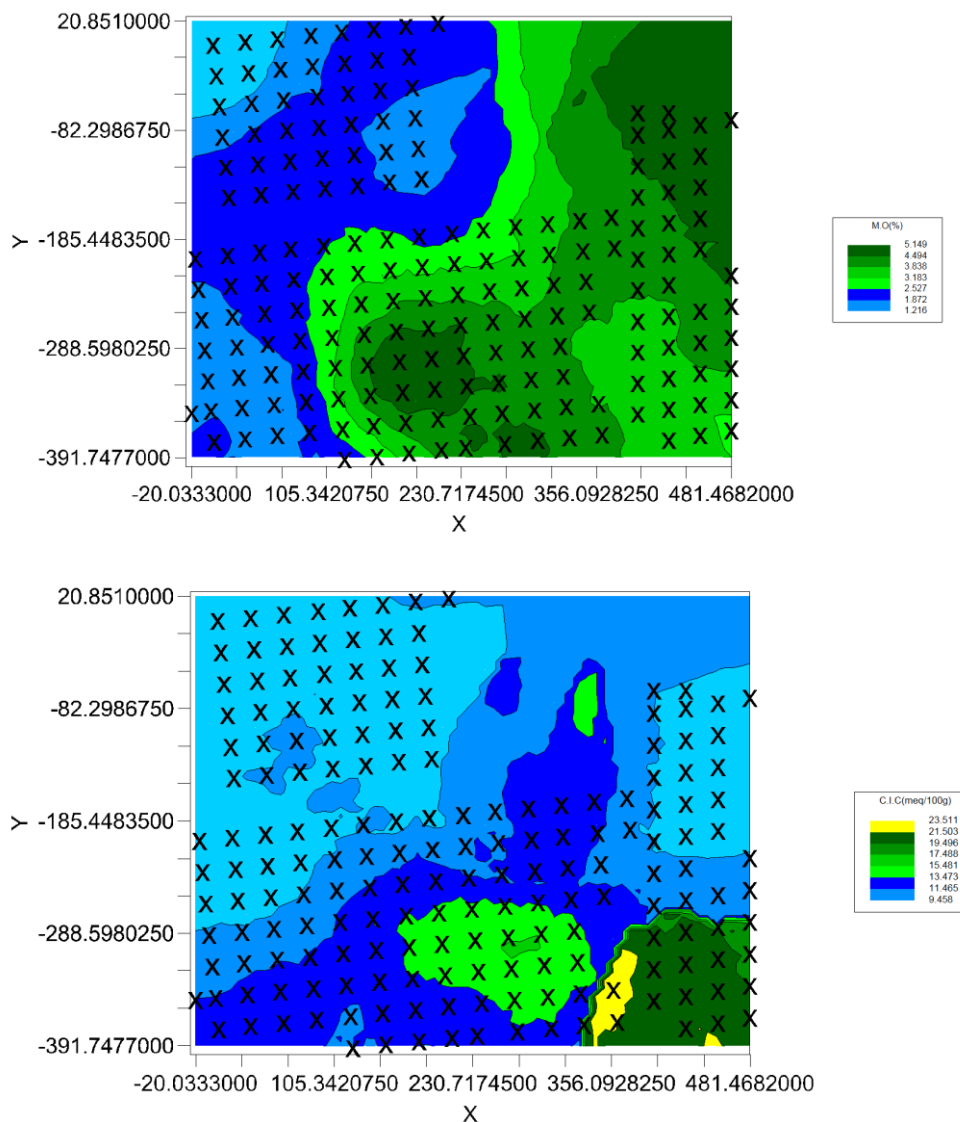
estrategia para un adecuado manejo de estos suelos, la incorporación de la misma.



**Figura 14.** Mapa isorrítmico de pH.

Comparando el mapa de materia Orgánica ( figura 15 ) con el de CIC, se observan tendencias relativamente similares, lo cual lleva a suponer que el contenido de materia orgánica contribuye de manera significativa en el incremento de la capacidad de intercambio catiónico o de otra manera, la CIC depende en gran medida del contenido de materia orgánica y de arcilla, dado que los niveles más altos de CIC se presentan en las zonas más arcillosas. En términos generales los niveles medios a bajos de CIC son consistentes con el orden Entisoles propio del área objeto de estudio (Guerrero citado por Lobato, 2002).

En estudios similares sobre variabilidad espacial, realizados por Castillo y Gómez (1995) se detectó una especial relación entre el contenido de materia orgánica y la CIC; ésta siempre fue mayor en sitios con alto contenido de materia orgánica.



**Figura 15.** Mapa isoritmico para MO y CIC

En general los mapas para las propiedades Ca, Mg, K y Na (figuras 16 y 17) coinciden en las zonas de mayor concentración de cada elemento, específicamente hacia la parte centro sur y occidente del lote, condición limitante no solo por el contenido de dichos elementos sino por la gran extensión que ocupa. Sumado a los altos valores de pH se evidencian claramente altas fijaciones de P y K, como también concentraciones limitantes

de algunos elementos menores. Por otra parte los altos contenidos de Ca y Mg explican la pérdida de estructura, aireación y permeabilidad a lo largo del lote.

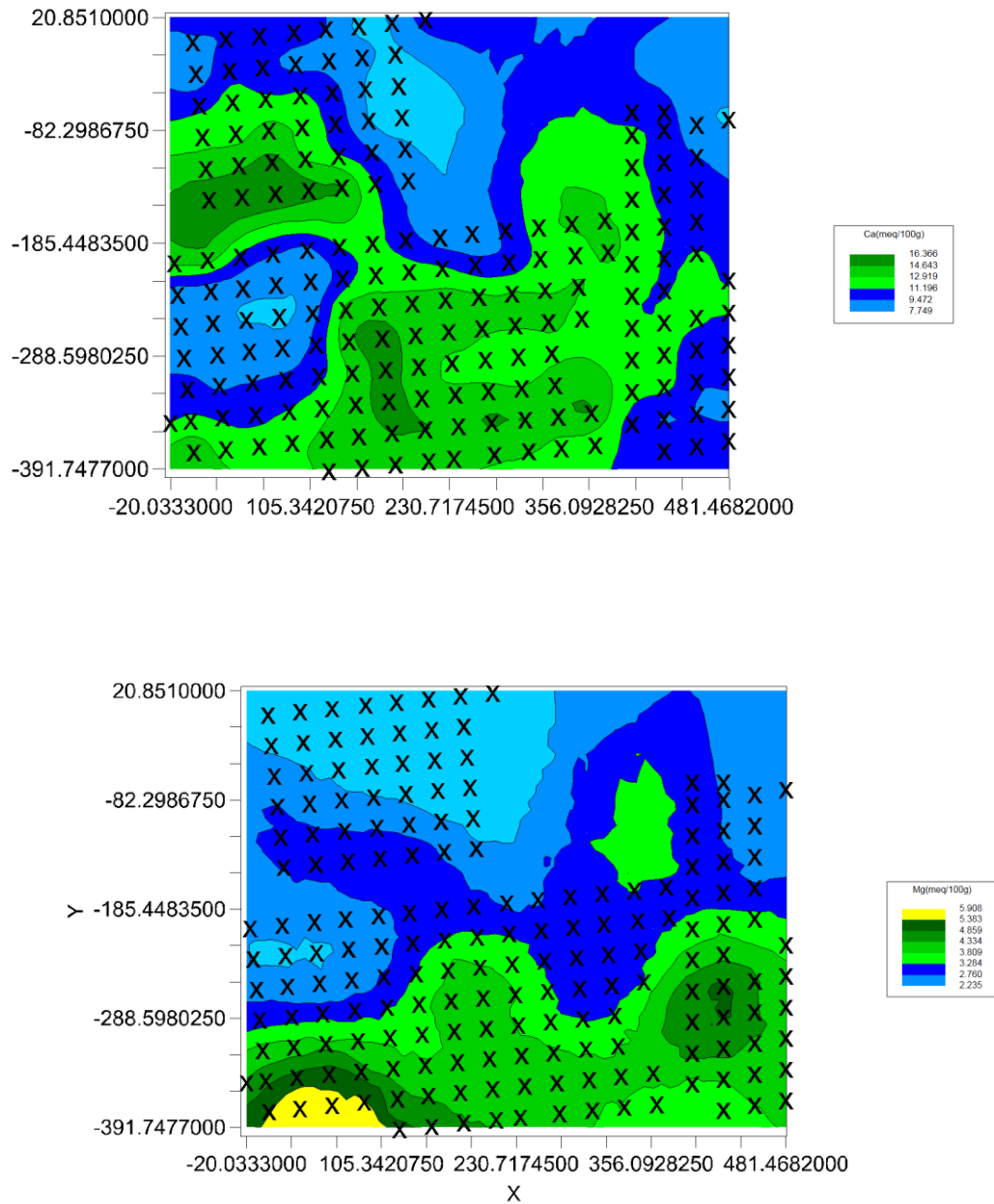
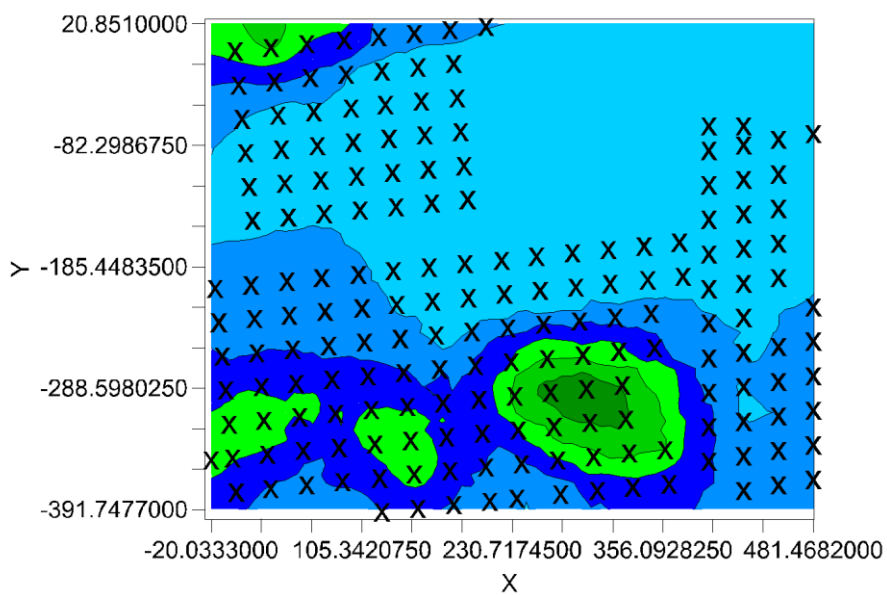
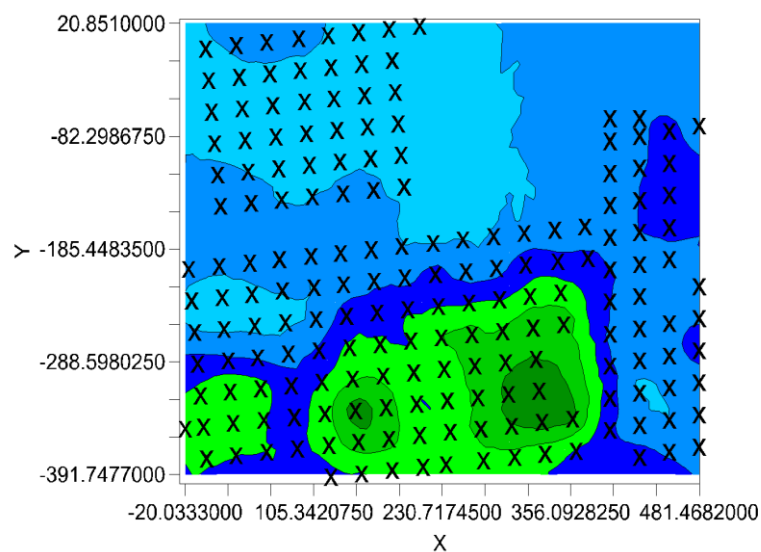


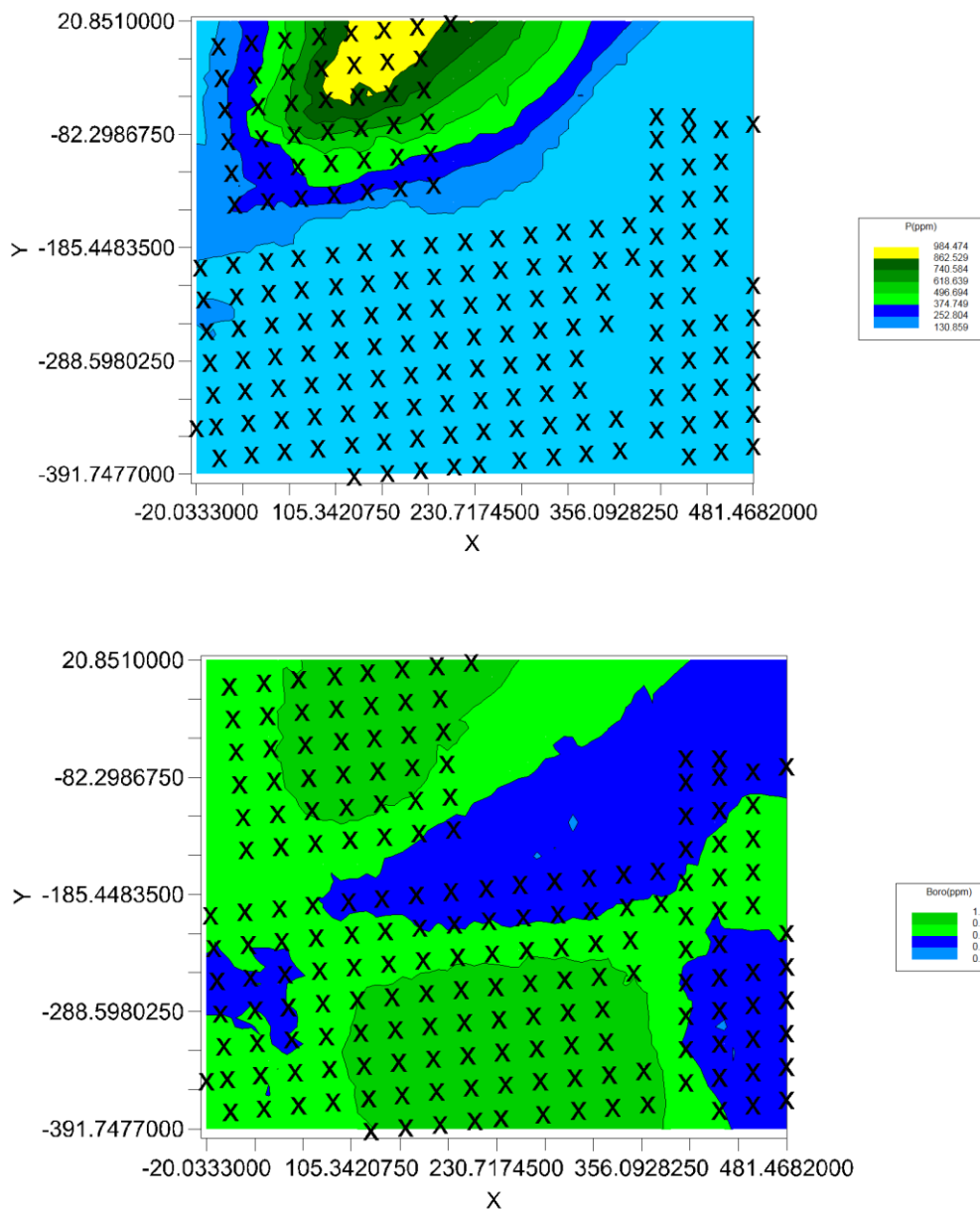
Figura 16. Mapa isorritmico para el contenido de Ca y Mg.



**Figura 17.** Mapa isoritmico para K y Na.

El mapa de P (figura 18) presenta una relativa homogeneidad y una débil dependencia espacial (nugget > 75%) marcada por una alta fijación como consecuencia de los elevados valores de pH (Tolosa citado por Lobato 2003).



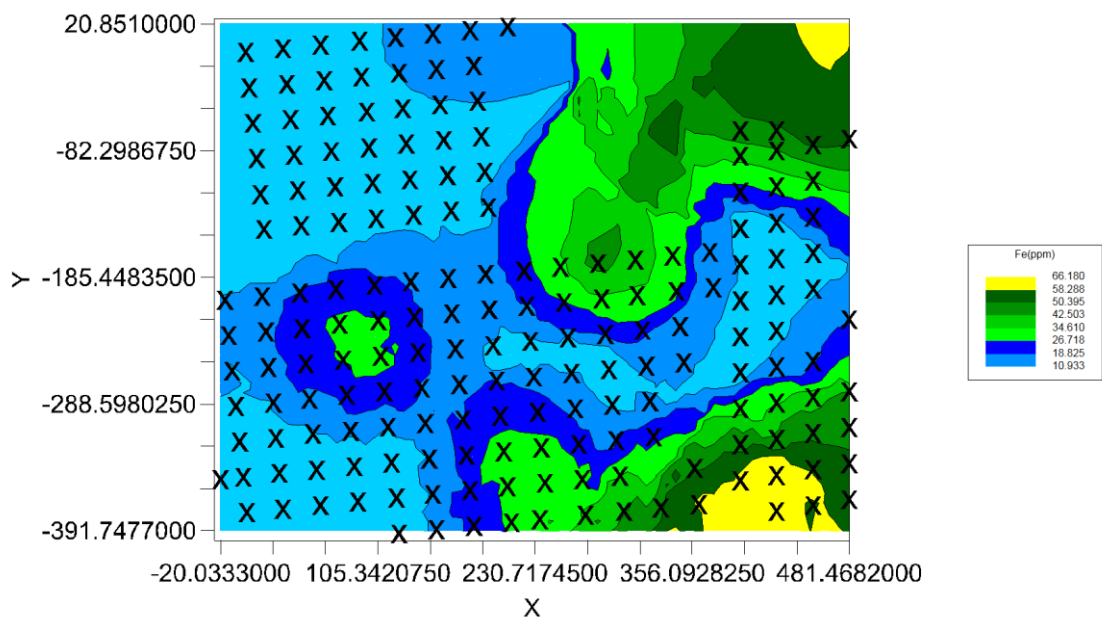


**Figura 18.** Mapa isoritmico para P y B

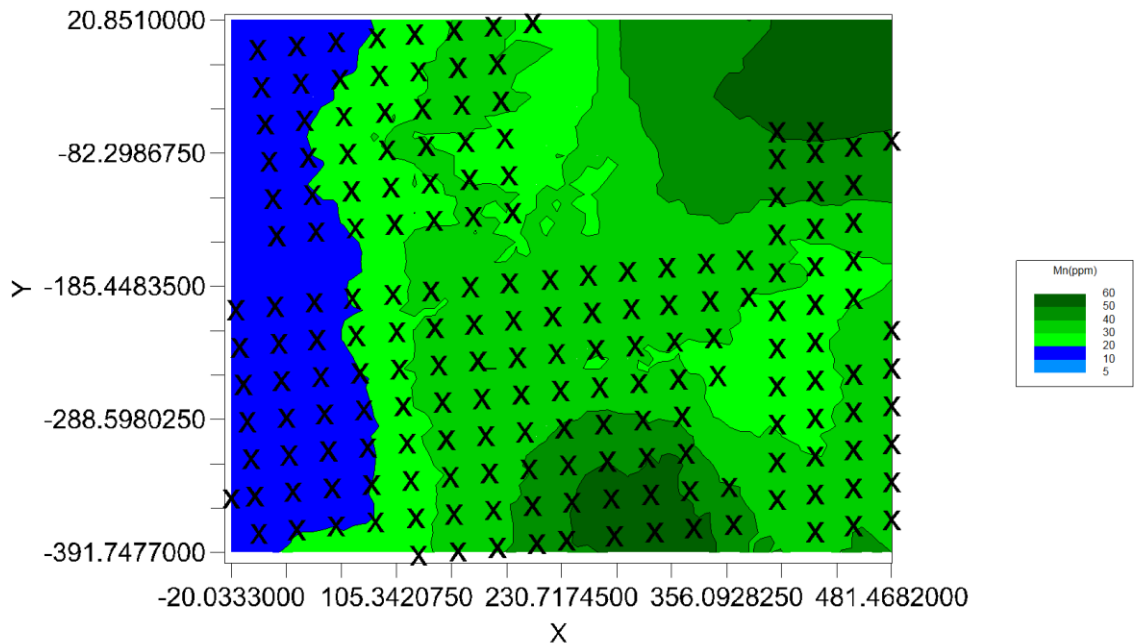
El mapa de Boro (figura 18) presenta dos grandes zonas contrastantes, la menor de tonalidad azul con valores en el rango medio a bajo y la de tonalidad verde que ocupa la mayor parte del lote con rango medio a alto.

En el mapa de Fe (figura 19), se distinguen a su vez tres zonas, la primera y más grande de tonalidades azules que representa contenidos bajos de Fe (10-25 mg/Kg) a lo largo del lote, especialmente en la zona occidental y en el eje central que se extiende hacia el oriente; una segunda zona más pequeña de tonalidades verde claro ubicada entre el nororiente y sur-oriente del lote con valores medios (25-50 mg/Kg ) y por último una muy pequeña zona de tonalidades verde oscuro y amarillo, poco representativa con un nivel alto por encima de 50 mg/Kg.

La distribución del Mn y Zn es relativamente homogénea a lo largo del lote (figuras 20 y 21), predominando valores por encima de 10 ppm para el caso del Mn, niveles considerados como altos para las condiciones de suelo estudiadas, y valores medios a bajos de Zn (menores de 3 mg/Kg) en casi la totalidad del terreno (ICA, 1992).



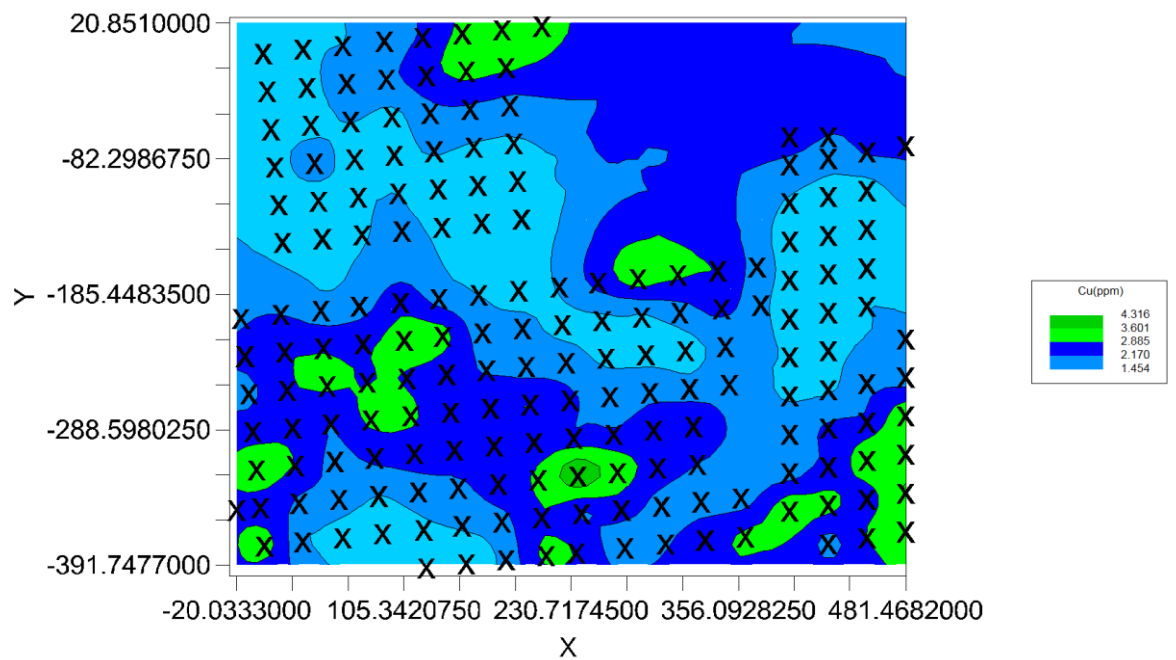
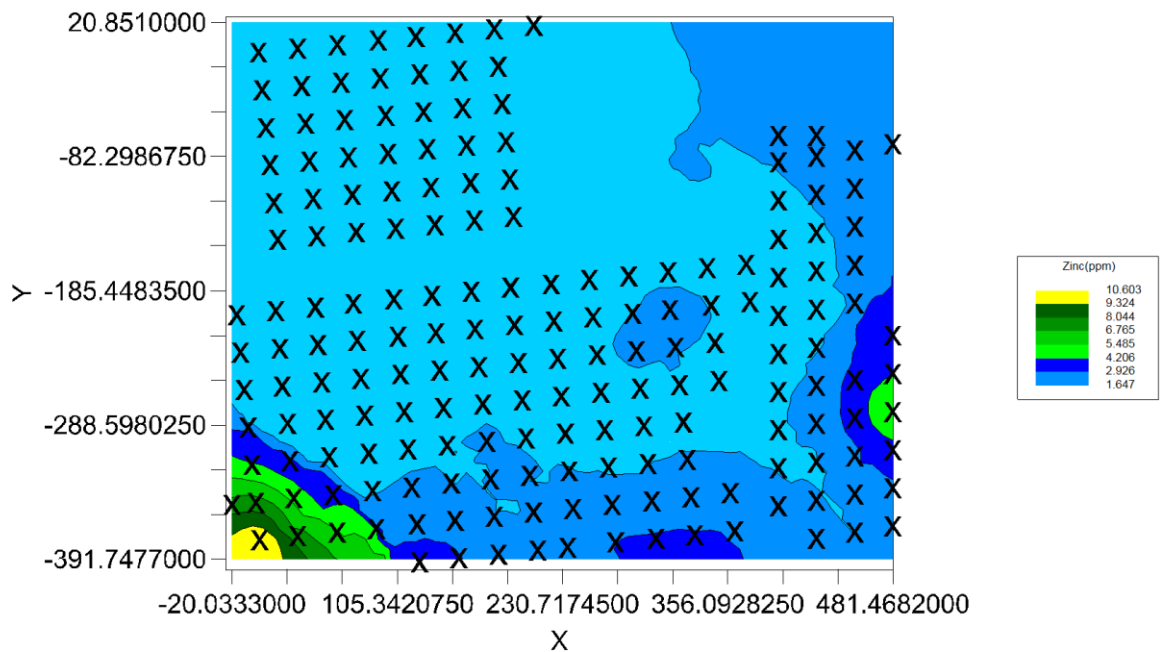
**Figura 19.** Mapa isorritmico para Fe.



**Figura 20.** Mapa isorritmico para Mn.

En el mapa de distribución del Cu (figura 21), se pueden diferenciar dos grandes zonas, la primera que abarca más del 80% del total del área con rango promedio entre 1-3 ppm considerados dentro de un nivel medio (ICA, 1992); y una segunda muy pequeña y dispersa a lo largo del lote en pequeños islotes de tonalidades verdes con valores que superan las 3 mg/Kg; esta situación es consistente con lo planteado por (Guerrero, 2000) quien afirma que las cantidades de cobre en los suelos son muy variables por lo general comprenden valores entre 0,1 y 3 mg/Kg.

En términos generales la época seca, la ausencia de cobertura vegetal, el uso inadecuado de la maquinaria agrícola, el deterioro evidente de las propiedades físicas y las condiciones de escasa o casi nula humedad al momento del muestreo se constituyeron en factores determinantes de los rangos limitantes de propiedades como pH, alto contenido de bases y alta fijación de P.



**Figura 21.** Mapa isoritmico para Zn y Cu.

Estudios realizados por Tolosa y Paba determinaron la capacidad de fijación de fósforo en suelos de la Sierra Nevada de Santa Marta y en la Granja de la Universidad del Magdalena encontrando una capacidad de fijación entre el 75 y 95 % , siendo el pH y el contenido de  $Fe_2 O_3$ , los factores que más la afectaron.

### 4.3 ANÁLISIS MULTIVARIADO

**4.3.1 Análisis Factorial por componentes principales.** El análisis Factorial por Componentes Principales permitió reducir el conjunto original de variables de la siguiente manera.

- Variables físicas: Se retuvieron tres variables sintéticas (Factor 1, 2 y 3 cuyos valores propios fueron mayores de 1) que explican en conjunto, el 72% de la variabilidad total presente en la matriz original de observaciones (tabla 6).
- Variables químicas: Se retuvieron cuatro variables sintéticas (Factor 1, 2, 3 y 4 cuyos valores propios fueron mayores de 1) que explican en conjunto, el 66% de la variabilidad total presente en la matriz original de observaciones (tabla 7).

**Tabla 6.** Valores propios para los componentes principales asociados con las propiedades físicas.

FACTOR	VALOR PROPIO	Proporción	Acumulado
1	2.629	37.56	37.56
2	1.274	18.20	55.77
3	1.124	16.06	71.83
4	0.814	11.63	83.46
5	0.723	10.33	93.79
6	0.434	6.21	100
7	0	0	100

**Tabla 7.**Valores propios para los componentes principales asociados con las propiedades químicas

<b>Factor</b>	<b>Valor Propio</b>	<b>Proporción</b>	<b>Acumulada</b>
1	3.00	23.06	23.06
2	2.65	20.4	43.46
3	1.61	12.42	55.88
4	1.36	10.45	66.33
5	0.94	7.23	73.56
6	0.80	6.14	79.70
7	0.72	5.56	85.26
8	0.49	3.78	89.05
9	0.40	3.05	92.10
10	0.35	2.71	94.81
11	0.25	1.94	96.75
12	0.24	1.83	98.58
13	0.18	1.42	100

En la tabla 8 se registran los coeficientes de correlación entre las propiedades físicas y los componentes principales (CP), valores de correlación mayores a 0.7, indican que las propiedades físicas están altamente correlacionadas con los componentes principales, de acuerdo al criterio utilizado por Buitrago, citado por Giraldo y Mendoza (2003). Las propiedades físicas con la mayor contribución a la conformación del primer componente principal (Factor 1) fueron: contenido de arena, limo y arcilla. Este Factor 1 sintetiza la variación de los suelos en su composición textural. Las propiedades físicas con la mayor contribución a la conformación del segundo componente principal (Factor 2) fueron Da y KH. Mientras que el Factor 3 está explicado en mayor proporción por las variables Humedad y Resistencia a la penetración.

**Tabla 8.** Matriz de correlación entre propiedades físicas y componentes principales.

VAR	Factor1	Factor2	Factor3
HUMED	-0.32	0.37	<b>-0.52</b>
Da	-0.21	<b>-0.69</b>	-0.33
ARENA	<b>-0.98</b>	0.04	0.19
ARCILLA	<b>0.86</b>	0.06	0.04
LIMO	<b>0.83</b>	-0.11	-0.34
REPENET	0.20	-0.36	<b>0.73</b>
K.H.	0.19	<b>0.72</b>	0.25

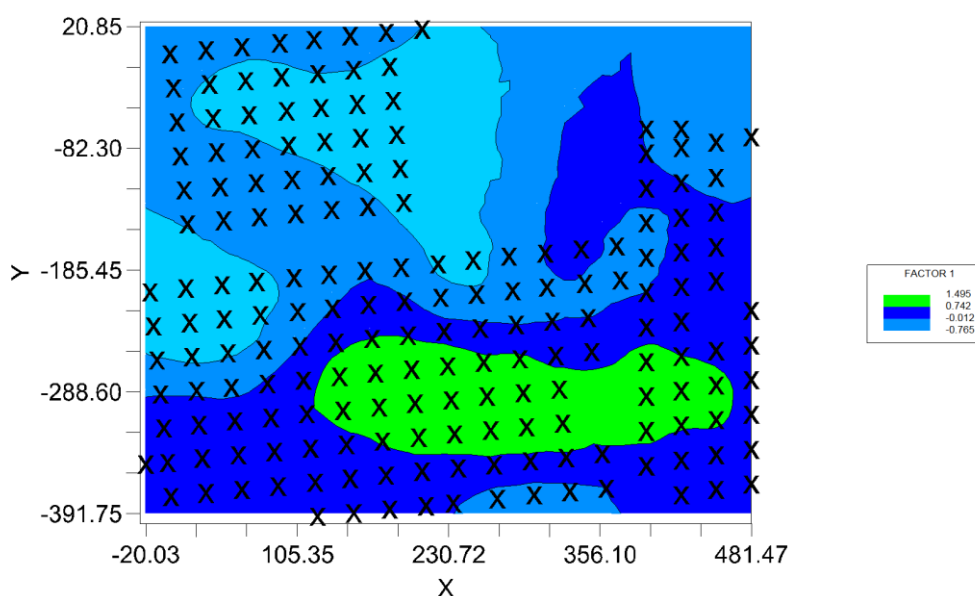
En cuanto a los coeficientes de correlación entre las propiedades químicas y los componentes principales (Factores 1, 2, 3,4 en la tabla 9), las variables de mayor importancia en la construcción del primer eje principal (Factor 1) fueron Fe, Cu, Mn, CIC y Materia Orgánica (en sentido directo) y el pH (en sentido inverso). Las variables de más peso en la construcción del segundo componente (Factor 2) a su vez fueron: Ca, K y B (en sentido directo). En el Factor 3, Na (en sentido directo) y Mg (en sentido inverso) son las de mayor peso y por último las variables P en sentido inverso y en sentido directo Na y CIC, para el Factor 4.

**Tabla 9.** Matriz de correlación entre propiedades Químicas y componentes principales.

VARIABLES	Factor1	Factor2	Factor3	Factor4
pH	<b>-0.77</b>	0.28	0.12	0.32
MO	<b>0.66</b>	0.49	-0.04	-0.25
Ca	0.04	<b>0.71</b>	-0.39	-0.22
Mg	0.16	0.46	<b>-0.59</b>	0.25
K	0.00	<b>0.86</b>	0.19	0.12
Na	-0.32	0.48	<b>0.56</b>	<b>0.47</b>
CIC	<b>0.54</b>	-0.04	0.14	<b>0.48</b>
P	-0.18	-0.34	0.48	<b>-0.51</b>
Cu	<b>0.62</b>	-0.12	0.32	0.20
Zn	0.34	0.23	0.08	-0.11
Mn	<b>0.68</b>	0.21	0.07	-0.26
Fe	<b>0.75</b>	-0.28	0.24	0.32
Bo	-0.06	<b>0.59</b>	0.57	-0.38

**4.3.2 Análisis Geoestadístico de los Componentes principales.** Con la información georreferenciada de los componentes principales para las propiedades físicas y químicas se realizaron análisis geoestadísticos y se obtuvieron mapas de distribución espacial.

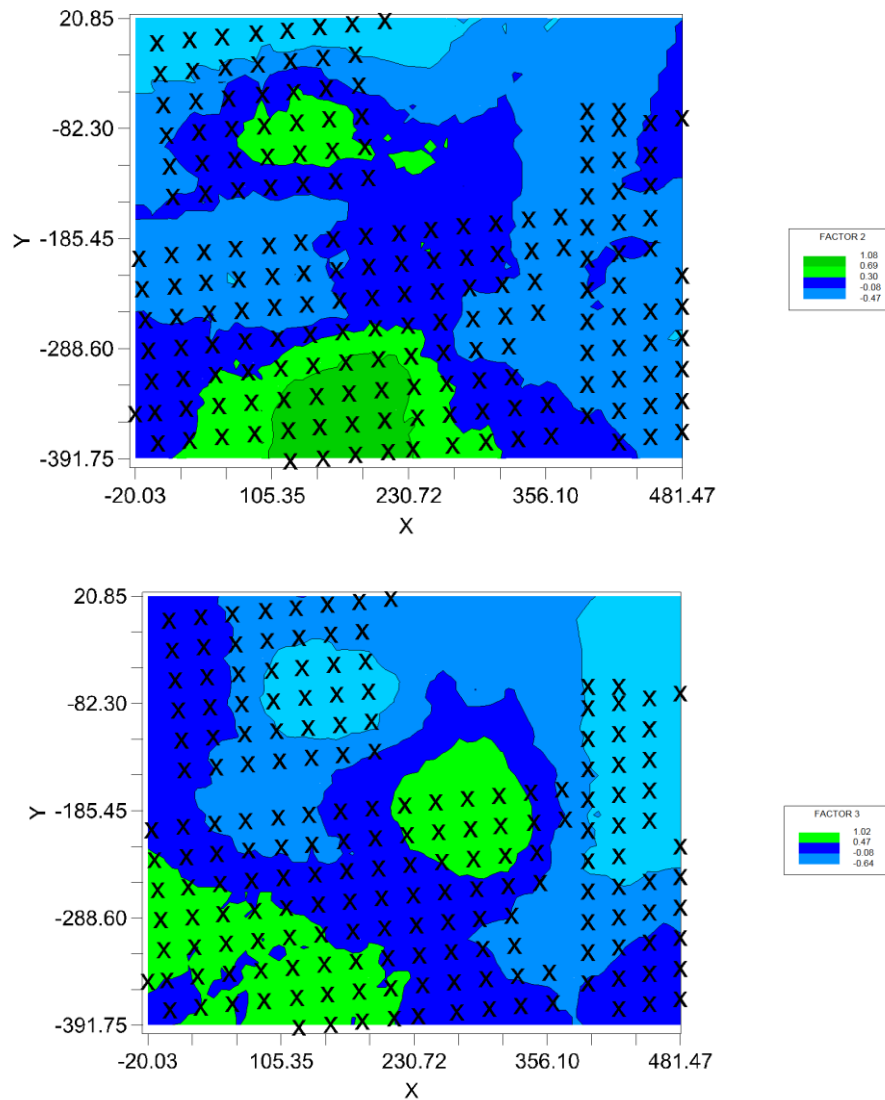
**4.3.2.1 Propiedades físicas.** El mapa de distribución del componente uno (figura 22), describe claramente la composición textural de la Granja Experimental de la Universidad del Magdalena observando una zona hacia la parte sur (en color verde) con los mayores contenidos de Arcilla y Limo; en contraste con la parte norte donde se encuentran los mayores contenidos de arena (tonalidades azules).



**Figura 22.** Mapa isorritmico del Factor 1 relacionado con la composición textural de los suelos de la granja

El mapa del segundo componente principal (figura 23) explica dos zonas marcadas con los mayores valores de KH (tonalidades verdes), y gran parte del lote con valores bajos, en donde se espera encontrar valores considerables de  $D_a$ , influenciado principalmente por el predominio de texturas medianas a gruesas en todo el lote.

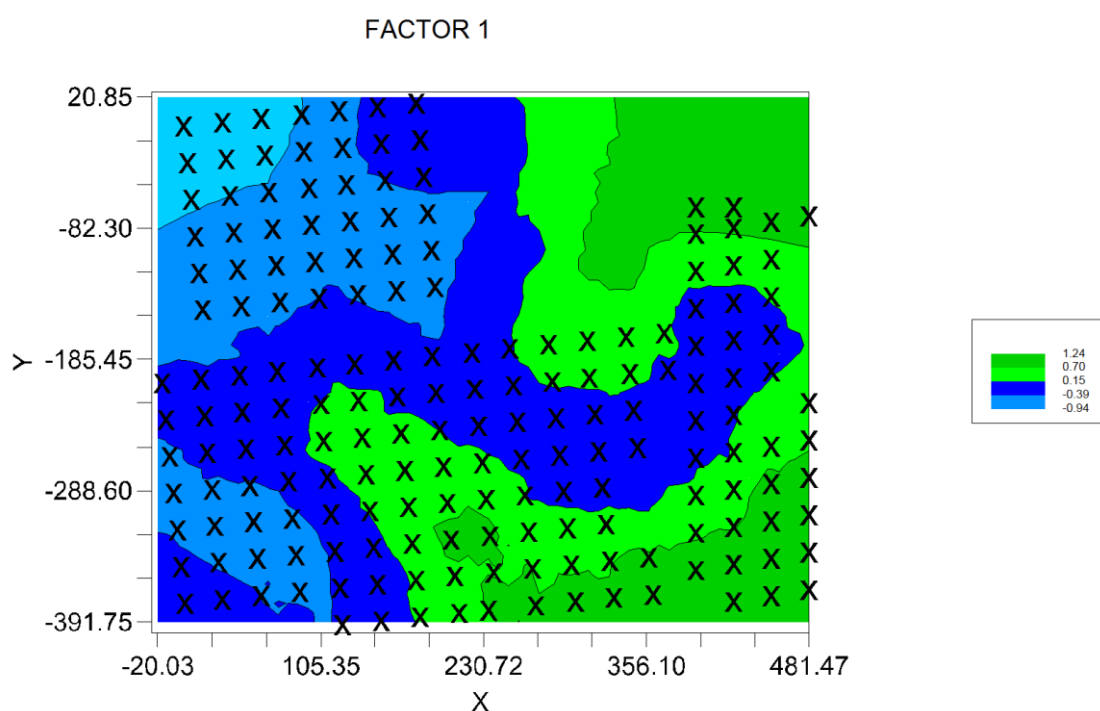




**Figura 23.** Mapa isorrítico de los Factores 2 y 3.

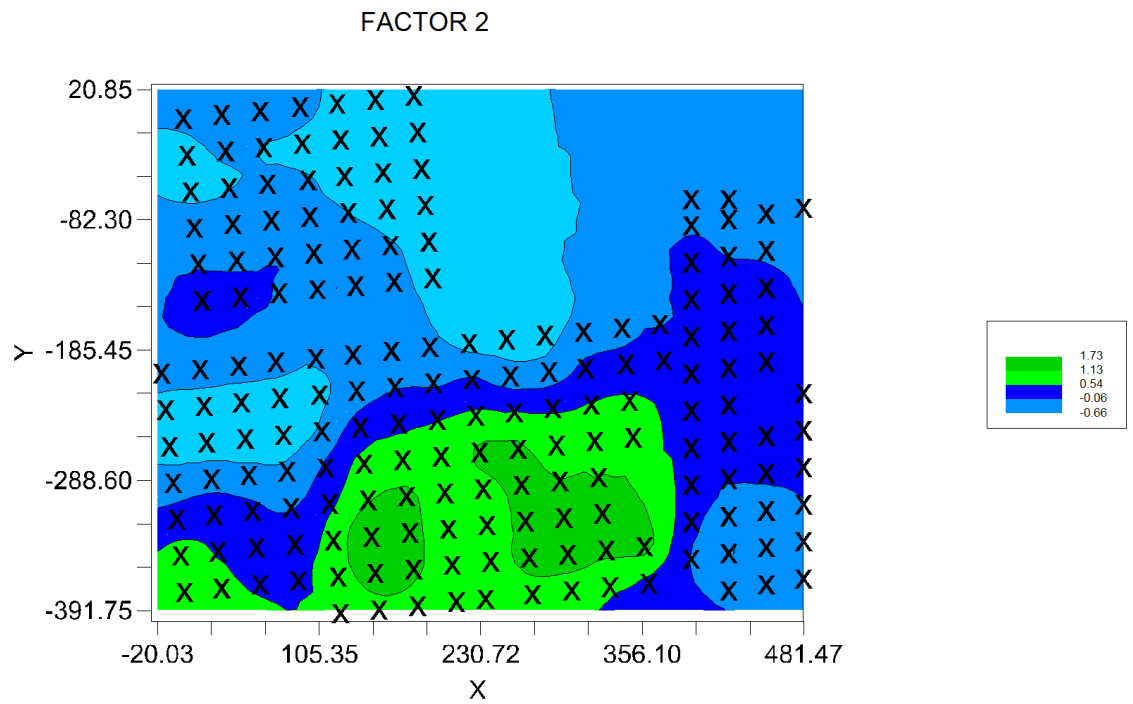
El mapa del tercer componente (figura 23) relaciona claramente altos valores de Resistencia a la penetración con contenidos bajos de humedad, destacando que para la zona central los valores altos de resistencia a la penetración están relacionados a su vez con posibles problemas de compactación.

**4.3.2.2 Propiedades químicas.** El mapa del componente uno (figura 24) indica que valores de pH cercanos a la neutralidad están asociados en gran parte con altos contenidos de Mn, Fe, Cu CIC y altos contenidos de MO. Esto sugiere como estrategia de manejo, elevar los contenidos de materia orgánica en las zonas de tonalidades azules, especialmente hacia los sectores nor y sur occidental a fin de atenuar el efecto de los altos valores de pH limitantes en la actividad agrícola.



**Figura 24.** Mapa isoritmico del Factor 1

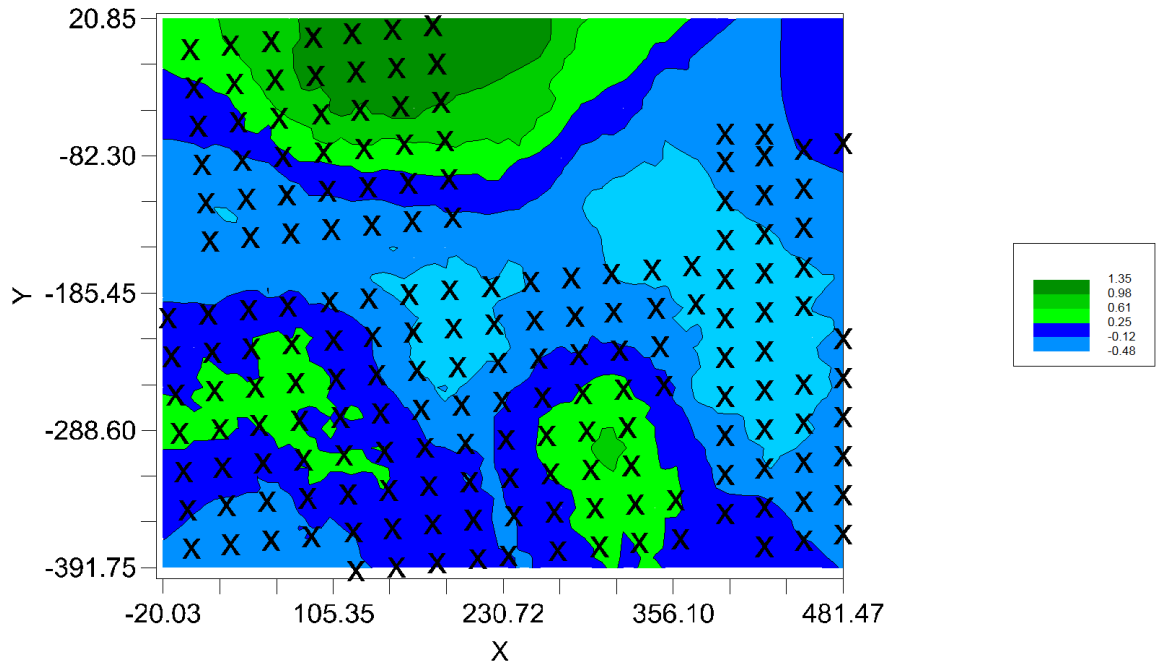
El mapa del componente dos (figura 25) define una zona bien marcada de tonalidades verdes con los mayores contenidos de K, Ca y B, hacia la zona sur.



**Figura 25.** Mapa isorritmico del Factor 2.

El mapa del componente tres (figura 26) relaciona altos contenidos de Na, con bajos contenidos de Mg y el mapa del componente cuatro (figura 26) explica los valores más bajos de P con altos contenidos de Na

FACTOR 3



FACTOR 4

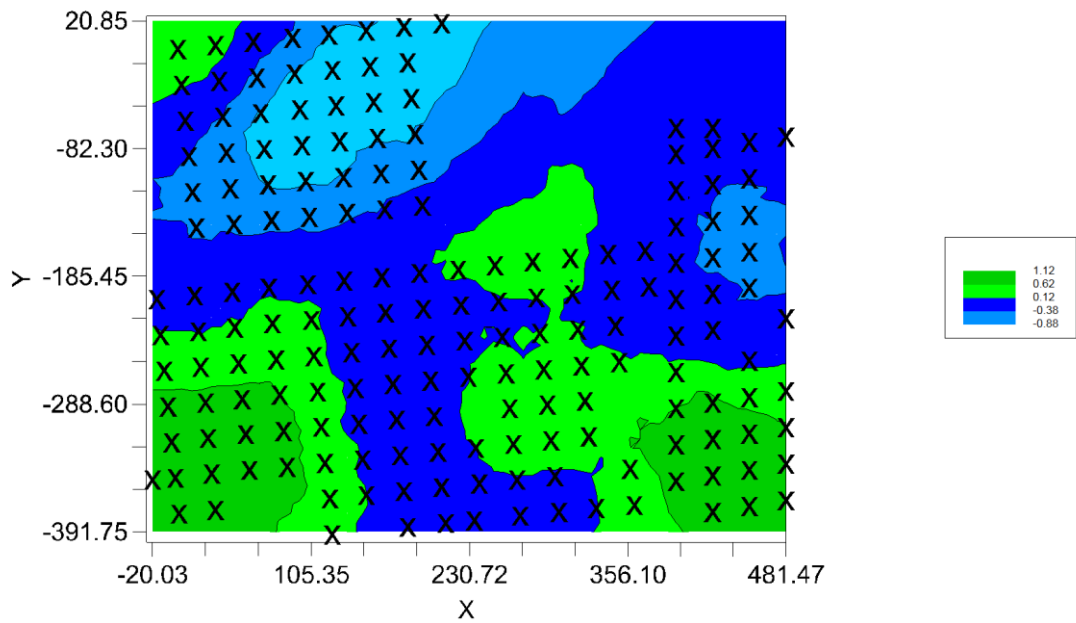


Figura 26. Mapa isoritmico del Factor 3 y 4.

**4.3.3 Estimación del índice de homogeneidad multivariado (IHM).** El índice de homogeneidad multivariado es un indicador de la fracción de la varianza generalizada contenida en los componentes principales (CP) con valor propio mayor o igual a uno. Para los suelos de la Granja Experimental este índice arrojó un valor relativamente bajo de 3.74, para las propiedades físicas y relativamente alto (17,43) para las propiedades químicas.

La diferencia entre el índice de homogeneidad multivariado (IHM) y el índice de homogeneidad multivariado parcial (IHMp), mide la contribución de cada variable a la heterogeneidad del lote (tabla 10). En su orden las propiedades físicas con mayor contribución a la heterogeneidad del suelo son: Textura (Arena 2.2, Limo 1.84, Arcilla 1.63), Conductividad Hidráulica (1.47), Densidad Aparente (1.45) Contenido de humedad gravimétrica (1.22) y Resistencia a la penetración (1.21), (tabla 10).

**Tabla 10.** Contribución relativa de los parámetros físicos a la homogeneidad del lote.

<b>PROPIEDAD</b>	<b>IHMp</b>	<b>IHM-IHMp</b>
<b>H</b>	3.24	1.22
<b>Da</b>	3.01	1.45
<b>A</b>	2.26	2.20
<b>Ar</b>	2.83	1.63
<b>L</b>	2.62	1.84
<b>Res</b>	3.25	1.21
<b>KH</b>	2.99	1.47

Por su parte las propiedades químicas con mayor contribución a la heterogeneidad del suelo son en su orden: Na (6.53), B (5.84), Fe (4.92), K (4.74), pH (4.7), Ca (4.3), MO (4.16), Mg (3.9), P (3.8), Mn (3), Cu (2.84), CIC (2.8) Zn (0.6). (Tabla 11).

**Tabla 11.** Contribución relativa de los parámetros químicos a la heterogeneidad del lote.

PROPIEDAD	IHMp	IHM-IHMp
pH	12.73	4.70
MO	13.27	4.16
Ca	13.13	4.30
Mg	13.47	3.96
K	12.69	4.74
Na	10.90	6.53
CIC	14.63	2.80
P	13.62	3.81
Cu	14.59	2.84
Zn	16.75	0.68
Mn	14.42	3.01
Fe	12.51	4.92
Bo	11.59	5.84

**4.3.4 Análisis de clasificación para la determinación de zonas homogéneas** En un primer intento por definir zonas relativamente homogéneas con base en los componentes principales retenidos tanto para propiedades físicas como para las propiedades químicas se realizó el análisis de clasificación, utilizando el método de Ward (inercia mínima).

Se definieron cuatro categorías de suelos o zonas relativamente homogéneas coloreando de un mismo tono los individuos agrupados dentro de cada cluster (figura 28), al particionar el dendograma a una altura o nivel de similaridad entre categorías del 7.5%, dado por el criterio  $R^2$  semiparcial el cual mide el porcentaje de la variación total que se retiene después de la agrupación (figura 27).

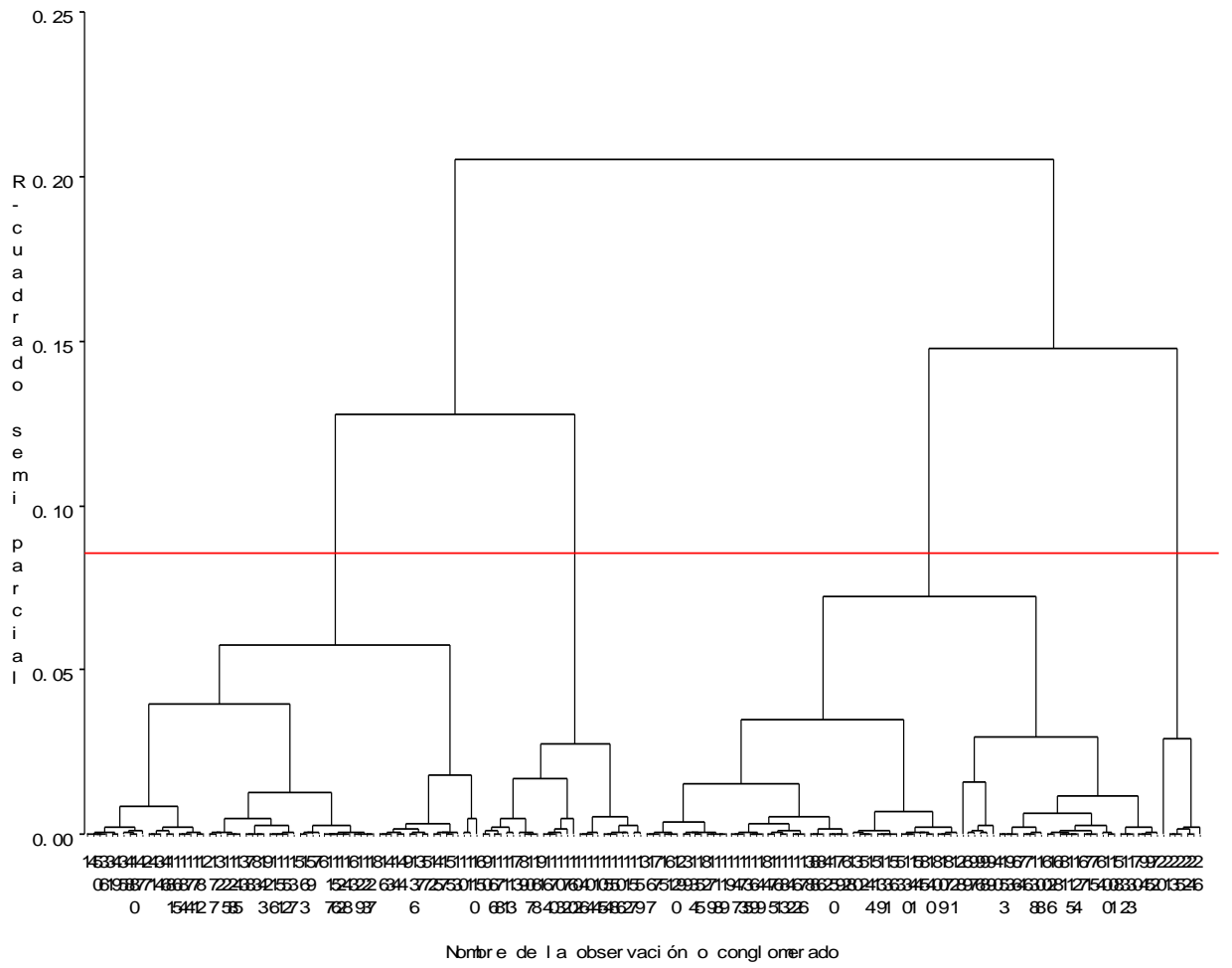
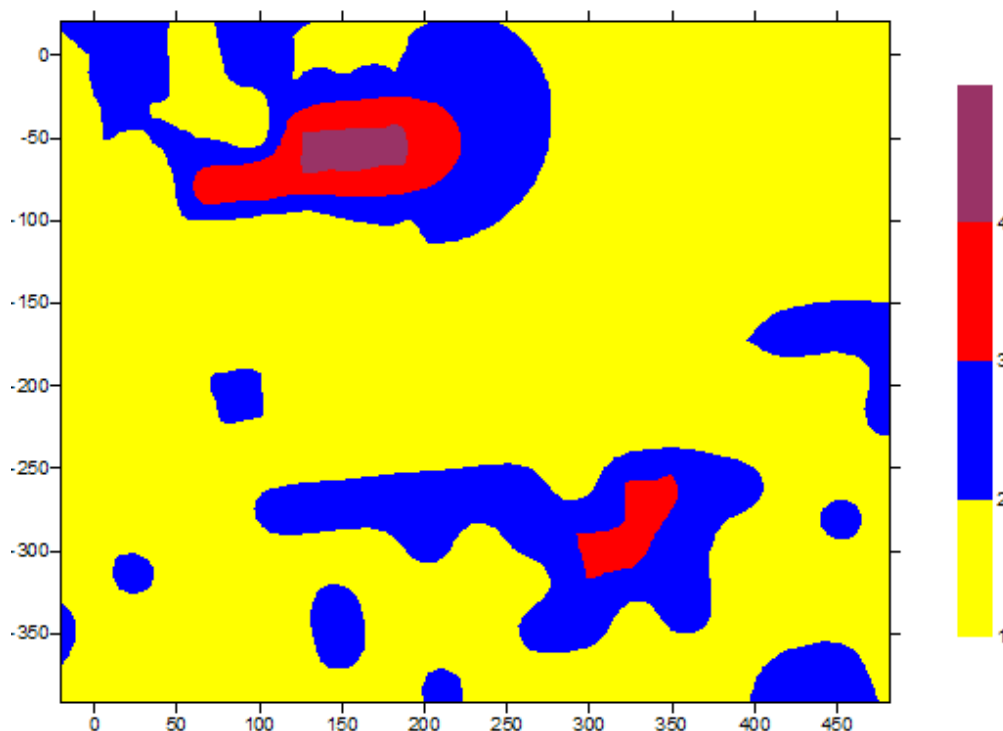


Figura 27. Dendrograma



**Figura 28.** Zonas Resultantes del Análisis de Clasificación.

A continuación se presenta una descripción de las principales características de cada grupo, con base en los resultados que se registran en el anexo 3.

**CLUSTER 1:** Esta zona agrupa 116 puntos de muestreo donde predomina la textura Franco Arcillo Arenosa, los contenidos de humedad presentes son muy bajos, la densidad aparente se encuentra en valores un poco limitantes para el desarrollo de raíces, la conductividad hidráulica es considerada de velocidad moderada. En cuanto a las propiedades químicas se presenta pH moderadamente alcalino lo que afecta la disponibilidad de nutrientes para la mayoría de los cultivos, no obstante hacia la zona este se presentan valores de pH con tendencia a la neutralidad; se presentan además contenidos medios de materia orgánica debido a incorporaciones recientes, presencia de contenidos altos en el complejo de cambio de Ca, Mg y K, P, Mn y B, contenidos medios de Cu, Zn, Fe, que bajo las condiciones de pH de esta zona se comprometen en su disponibilidad para las plantas, al formar en muchos casos compuestos



poco solubles que se precipitan, la capacidad de intercambio catiónico es considerada media y los contenidos de Na intercambiable son bajos.

**CLUSTER 2:** Esta zona agrupa 29 puntos de muestreo donde predomina la textura Franco Arenosa, los contenidos de humedad presentes son muy bajos, la densidad aparente se encuentra en valores limitantes para el desarrollo de raíces, la conductividad hidráulica es considerada moderadamente lenta; en cuanto a las propiedades químicas se presenta un pH moderadamente alcalino lo que afecta la disponibilidad de nutrientes para la mayoría de los cultivos, se presentan contenidos bajos de materia orgánica, presencia de contenidos altos de Ca, y K, P, Mn y B, contenidos medios de Mg y Cu (intercambiables) que bajo las condiciones de pH, comprometen su disponibilidad para las plantas al formar en muchos casos compuestos poco solubles que se precipitan, la capacidad de intercambio catiónico es considerada baja al igual que los contenidos de Na, Zn y Fe.

**CLUSTER 3:** Esta zona agrupa 31 puntos de muestreo donde predomina la textura Franco Arcillosa, los contenidos de humedad presentes son muy bajos, la densidad aparente se encuentra en valores limitantes para el desarrollo de raíces, la conductividad hidráulica es considerada moderadamente lenta; en cuanto a las propiedades químicas se presenta un pH fuertemente alcalino lo que afecta la disponibilidad de nutrientes para los cultivos, se presentan contenidos altos de materia orgánica influenciado por el historial de aplicaciones de abono, presencia de contenidos altos de Ca, Mg, K, Na, P, Mn y B, contenidos medios de Zn y Cu (intercambiables) que bajo las condiciones del pH, se compromete su disponibilidad para las plantas al formar en muchos casos compuestos poco solubles que se precipitan, la capacidad de Intercambio catiónico es considerada media y se presentan contenidos bajos de Fe.

**CLUSTER 4:** Esta zona agrupa 8 puntos de muestreo donde predomina la textura Franco Arenosa, los contenidos de humedad son medios y la resistencia a la penetración presenta valores no limitantes debido a la presencia de cultivos con riego en esta zona, al momento del muestreo. La densidad aparente se encuentra en valores un poco limitantes para el desarrollo de raíces, la conductividad hidráulica es considerada moderadamente lenta; en cuanto a las propiedades químicas se presenta un pH moderadamente alcalino lo que afecta la disponibilidad de nutrientes para los cultivos, se presentan contenidos medios de materia orgánica influenciado por las aplicaciones de abono al momento del muestreo, presencia de contenidos altos de Ca, P, Mn y B, contenidos medios de Mg, K, Zn y Cu (intercambiables) que bajo las condiciones de pH se compromete su disponibilidad para las plantas al formar en muchos casos compuestos poco solubles que se precipitan, la Capacidad de Intercambio Catiónico es considerada baja al igual que el Na, Zn y Fe.

En términos generales se recomienda tener en cuenta las cuatro condiciones de suelos delimitadas en la Granja experimental como criterio complementario para determinar el sistema de muestreo y número de muestras por lote, definir el tamaño, la ubicación de unidades experimentales y mejorar la interpretación de los resultados de investigaciones que se realicen en la Granja.

Los niveles de pH predominantes en las cuatro condiciones de suelo limitan la absorción de los nutrientes por los cultivos, en este sentido los valores de los macro y micro nutrientes considerados altos en la descripción de cada cluster se deben analizar con detenimiento y mucho cuidado al realizar cualquier recomendación ya que estos solo representan los contenidos de la fase intercambiable del suelo y podrían enmascarar posibles deficiencias o toxicidades que se manifiesten en los cultivos que se proyecten sembrar, por esta razón, para evaluar la fertilidad física y química de las cuatro condiciones

de suelo agrupadas se recomienda complementar la información determinando los cationes y aniones en solución, contenidos de Carbonatos y Bicarbonatos, Porosidad de aireación, Infiltración, contenidos de Humedad a Capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

## 5. CONCLUSIONES

La variabilidad física y química del suelo puede ser cuantificada y graficada por métodos estadísticos multivariados y geoestadísticos.

La variabilidad espacial de los atributos del suelo en el lote experimental es alta siendo mayor en las propiedades químicas que en las físicas; con excepción del Ca y el pH, las propiedades químicas de los suelos de la granja presentan niveles de variación altos, asociados con una evidente heterogeneidad en toda el área de estudio.

El análisis y mapeo realizado mediante técnicas de geoestadística permitió expresar la varianza debida a la dependencia espacial de las muestras y obtener mapas isoclinas de la distribución de cada variable en el lote.

El separado Arena presentó una fuerte dependencia espacial lo cual es válido si se tiene en cuenta que los cambios texturales entre muestras vecinas son mínimos. Con excepción de las propiedades Ca, CIC, P y Cu con débil dependencia espacial, las propiedades restantes presentaron una moderada dependencia espacial.

La densidad aparente, la resistencia a la penetración, limo, conductividad hidráulica, pH, MO, CIC, Zn, Mn y el Fe presentan un alcance mayor a la máxima longitud del lote (entre 594m y 1010m) y por tanto la dependencia espacial para estas propiedades se manifiesta a lo largo y ancho del lote.

El comportamiento de los suelos está influenciado principalmente por los contenidos de Na, sales de Ca y Mg que influyen directamente sobre la alcalinidad.

Con el análisis de componentes principales de las variables físicas y químicas evaluadas en el presente estudio, se conformaron tres y cuatro componentes principales respectivamente que explicaron el 72% y 66% de la variación, siendo las variables textura, Na y pH las que más influyen en la diferenciación de las condiciones de suelos.

El mapa de zonas homogéneas debe constituirse entonces en la herramienta de ayuda, que sirve de guía a la dirección de la Granja Experimental para orientar las actividades, no sólo para una adecuada demarcación de los lotes experimentales, sino para implementar prácticas de riego, labranza y planes de fertilidad acordes con las características físicas y químicas de cada zona homogénea, descritas en el análisis de clasificación (clusters).

Se debe tener en cuenta en futuros ensayos a realizar en la Granja la implementación de la tecnología de manejo de sitio específico, que asegure una mayor precisión y confiabilidad de los resultados y además un manejo racional de los recursos.

## BIBLIOGRAFIA

- AMARO, R.; COBO, M. y QUIROZ, Z. Comparación de métodos de ajuste en el análisis espacial de experimentos de campo. *Agronomía Tropical*. 47(3): 359-374. 1997.
- BARRIGA, S. validación de la nutrición por sitio específico en una plantación tipo empresarial de cacao en la provincia de Yaguas Ecuador. Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ciencias Agrarias Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira. Colombia. 2005.144p.
- BECERRA, C. Caracterización espacial de la compactación en terrenos de CIAT-Colombia. Tesis de grado para optar el título de ingeniera agrícola. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 2001. 135p.
- BECKETT, P,H,T., and R. WEBSTER. Soil variability: a review soils and Fert. 1971. 34:1-15p.
- BUITRAGO, C. Estudio sobre la variabilidad espacial de las propiedades de un suelo bajo dos condiciones: cobertura de bosque natural y laboreo permanente. Tesis de grado para optar el título de ingeniera agrónoma. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 1995. 95p.
- BUITRAGO, C. Estudio de la variabilidad espacial de las propiedades químicas de algunos suelos de ladera en el Dpto. del Cauca. Tesis de grado para optar al título de Magíster en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 2001. 119p.
- BUOL S.W., HOLE F.D., McCRACKEN R.J. Génesis y Clasificación de Suelos. Ed.Trillas. Méjico. 1983.417 p.

- BURROUGH, P. A. Soil variability: a late 20th century view. *Soils and Fertilizers*, 1986. 56 (5): 529-562.
- BRADY, N.; WEIL, R. The nature and properties of soils. 13 ed. New Jersey: Prentice-Hall. 2002. p. 720 – 725.
- BRAGACHINI, M. Agricultura de precisión para incrementar la productividad. In 7° Congreso Nacional AAPRESID, (8, 1999 Mar del Plata, Arg.) Memorias. Mar del Plata: Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa. 1999. p: 265 - 272.
- BRAGACHINI, M. MARTELLOTTI, E.; RUIZ, S. Agricultura de Precisión: Hacia una mayor producción con sostenibilidad del ambiente productivo. In 6° Congreso Nacional AAPRESID, Argentina. 1998. p: 133 – 158.
- BRAGACHINI, M. MARTÍN, A. V. y MÉNDEZ, A. Agricultura de Precisión/Siembra Variable con Geoposicionamiento Satelital. Artículo. [www.Agriculturadeprecision.org/mansit/VariabilidadEspacial.htm](http://www.Agriculturadeprecision.org/mansit/VariabilidadEspacial.htm). 2002.
- BROUDER, Applying site – specific management in Soil Fertility Research and Developing Management Information for Variable Rate Technologies. In Proceedings of Information Agriculture Conference. Purdue University. 1999. p. 321.
- CABRALES L, GRANADOS M, Estudio de los suelos de la Granja experimental de la Universidad del Magdalena. 1968, 72p.
- CABRERA, A., SOLANO, V., GONZALEZ y MOLINA, R. 1973. Levantamiento detallado de los suelos de la granja de la U.T.M. para fines experimentales. Santa Marta, Tesis de pregrado ingeniería agronómica, Universidad del Magdalena Programa de Ingeniería Agronómica. 82p

- CAMARA, G. Análise espacial de superficies. [Análise Espacial de Dados Geográficos](#). Segunda edición. Brasil. www.dpi.inpe.br. 2002
- CASTAÑEDA, D. La agricultura de precisión en el cultivo de banano. In 2° Seminario Aplicaciones de Sistemas de Información Geográfica en Colombia. (11, 2004 Palmira, Colombia) Memorias. Universidad Nacional de Colombia. s.p. 2005.
- CASTILLO, A. M. y J. S. GÓMEZ. Variabilidad espacial de algunas propiedades físico químicas en el horizonte A hidrofóbico de Andisoles, bajo cobertura de *Pinus patula*. Tesis (Ingeniero Agrónomo). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Medellín. 1995. 116 p.
- CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA (CVC). Estudio detallado de suelos. División de asistencia técnica – Sección suelos. 1978. 39p.
- DORAN, J.W. and PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek and B.A. Stewart (eds) *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* Soil Sci. Soc. Am. Special publication 35. Madison, WI. U.S.A. 1994. p. 3-21
- ESPINOSA, J. Manejo de nutriente en Agricultura por Sitio Específico en cultivos tropicales. In 11th Fertilizer Latin America International Conference. (4, 2000 Cancún, México). Memorias. Cancún: British Sulphur publishing. 2000. p. 13-22.
- FERREIRA, O; ALVAREZ, V y MARCIANO D. C., Liovando. Variabilidade de algumas características físicas e químicas de um podzólico vermelho-amarelo cambico distrófico. Revista Ceres 39(226): (524-541). 1992.



- GARCIA, A. Curso Salinidad de Suelos (en línea). *En prensa*. 2003
- GIRALDO, S. MENDOZA, A. Caracterización de la variabilidad espacial de las propiedades físicas de los lotes experimentales destinados a los cultivos de hortalizas en el CEUNP. 2003. 57p.
- GOMEZ, J. Variabilidad espacial de los suelos de la estación experimental del instituto de la uva-UCLA. *Venesuelos* 2(1): 2-9. 1994
- GONZALES, A. Suelos agrícolas. Notas de laboratorio. Universidad Nacional de Colombia, sede – Palmira. 1979. 201p.
- GONZALES, A. Variabilidad espacial de algunas propiedades físicas en un typic haplustoll, por prácticas de labranza. Tesis de Posgrado para optar al título de magister scientiae en los suelos y aguas. Universidad Nacional de Colombia, sede - Palmira. 1992. 109p.
- GUERRERO, R. Eficiencia de la Fertilización en Colombia. Bogota, 2000 213p.
- GUROVICH, L y STERN J. Variabilidad especial de la velocidad de infiltración del agua en el suelo I. Generación de datos. *Ciencia e Investigación Agraria*. 10(1): 35-42. 1983.
- INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO, Manual del Laboratorio de Suelos y Aguas. 1992.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE HIDROLOGÍA Y METEOROLOGÍA, IDEAM. Sección de meteorología sinóptica aeronáutica. Datos diarios. Estación Simón Bolívar Santa Marta, Magdalena: IDEAM (mimeografiado). 2001.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION, ICONTEC. Compendio. Tesis y otros trabajos de grado, Edición actualizada. Bogotá. 2006.

- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Bogotá: IGAC, Subdirección Agrologica, 4ª edición. 1990. 502 p.
- INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. 2006. 400p.
- JAIMES, E. y ARELLANO, R. Homogeneidad edáfica relacionada con la biomasa herbácea. Subcuenca baja del río Castán, estado Trujillo, Venezuela. Agronomía tropical. 48(3): 305-333. 1998.
- JARAMILLO, D. Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2003. p 553-572
- JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, Ch. J. Mining geostatistic. Academic press, Londres. 1978. 598 p.
- LOBATO, R. Mapa taxonómico de los suelos de la Universidad Del Magdalena.2002. 36p.
- LOGSDON, S. D. y JAYNES, D. B. Variabilidad espacial de la conductividad hidráulica en un campo cultivado en diferentes épocas. Soil Science Society of American Journal. 60: 703-709. 1996.
- MADERO, E; HERRERA, O. y CASTAÑO, A.. La variabilidad espacial en el estudio de la condición física del suelo. Acta agronómica 50(3-4): 38-43. 2000.

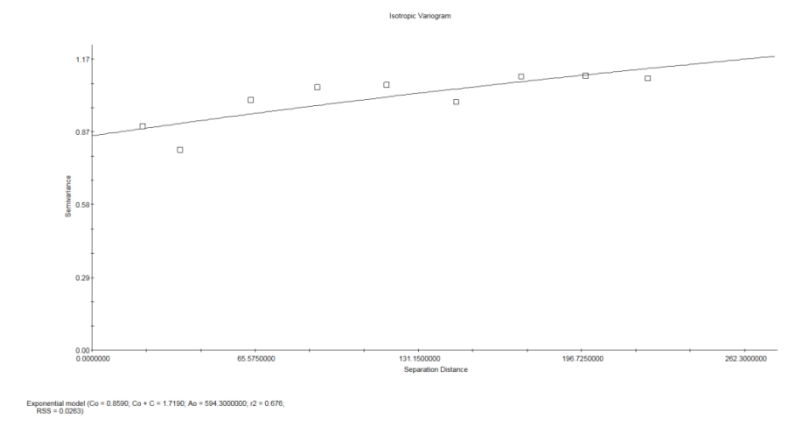
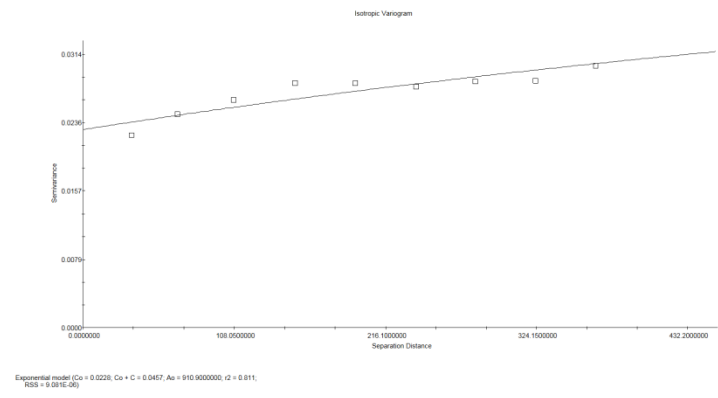
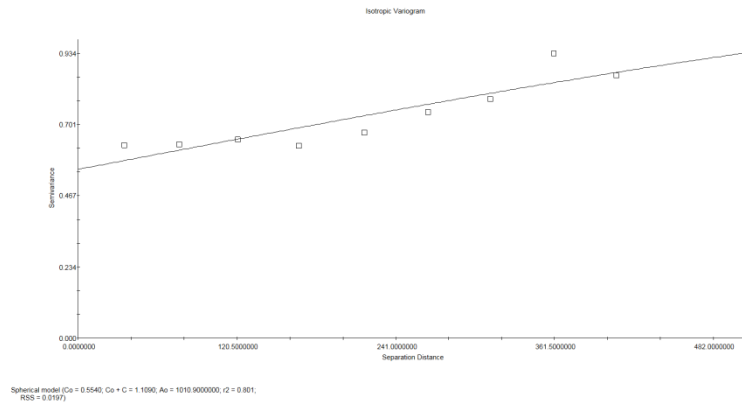
- MALAGÓN C, D., PULIDO, C; LLINAS R, RD.; CHAMORRO B, C; FERNÁNDEZ L, J. Suelos de Colombia. Santa Fé de Bogotá: IGAC (ed), 1995. 632 p.
- MEJIA, A. Variabilidad espacial de las Propiedades Físicas y Químicas en n área productiva de palma africana ( *Elaeis guineensis* L) Tesis de grado para optar al título de Magíster en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia. Pasto. 2007. 171p
- MELCHIORI, R. J. M; GARCÍA, F. O. y ECHEVERRÍA, H. Variabilidad espacial en algunas propiedades del suelo: I asociación con las variaciones en el rendimiento del trigo. Artículo. [www.Agriculturadeprecision.org/mansit/VariabilidadEspacial.htm](http://www.Agriculturadeprecision.org/mansit/VariabilidadEspacial.htm). 2002.
- MONTENEGRO, H y MALAGON, D. Propiedades físicas de los suelos. INSTITUTO GEOGRAFICO “AGUSTÍN CODAZZI”. Bogotá. 1990. 813p.
- McBRATNEY, A. B. y WEBSTER,R. How many observations are needed for regional estimation of soil properties?. *Soil Science*. 135(3): 177-183. 1983.
- NIELSEN, D.R.; TILLOTSON, P.M. and VIEIRA, S.R. Analysing field measured soil water properties. *Agr.Water.Manag.* Amsterdam. 1983. v 6, p.93-109.
- OBANDO, F. VILLEGAS, A. Variabilidad Espacial De Propiedades Químicas y Físicas En Un Typic Udivitrands, Arenoso De La Región Andina Central Colombiana, *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín*. 2005. 45p.

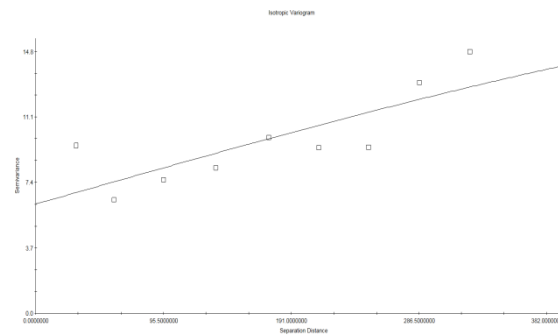
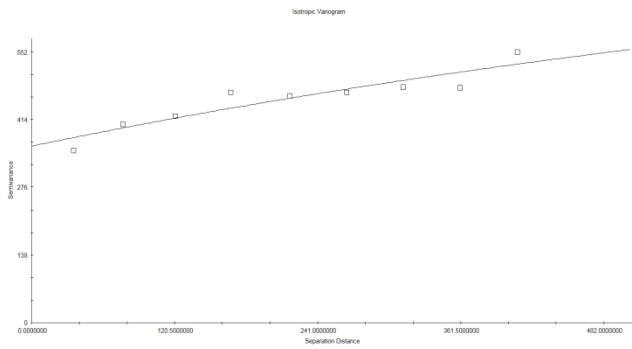
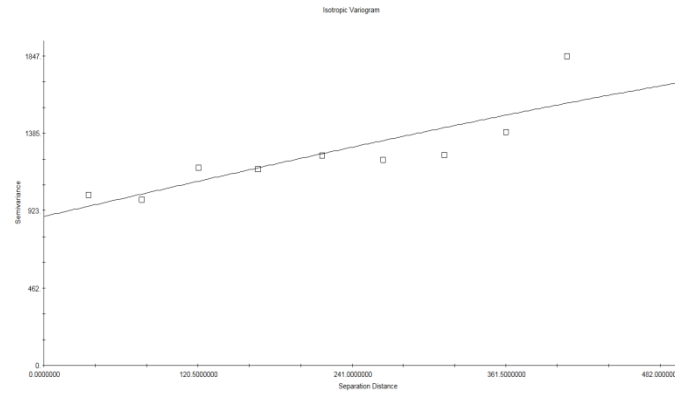
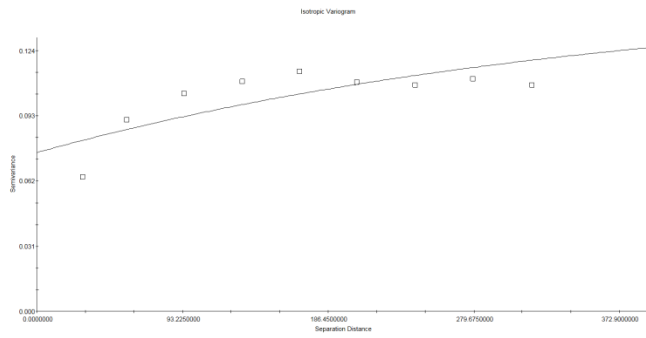
- OLIVEIRA, J. J. et al. Variabilidad espacial de propiedades químicas en un solo salino-sódico. Revista Brasileira de Ciencia do Solo. 23: 783-789. 1999.
- ORTEGA, R.; FLORES L. Introducción al manejo sitio - específico. Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. (ed.) In Agricultura de precisión. CRI Quilamapu-Chile. 1999. p13-46.
- ORTIZ, G. Qué son los Sistemas de Información Geográfica. Tipos de SIG y modelos de datos. Un artículo introductorio para entender las bases de los SIG. 2004. <http://recursos.gabrielortiz.com>
- OVALLES, F. Memorias del curso de Geoestadística Aplicada a Estudios Ambientales con Énfasis en Suelos. Universidad de Caldas. Manizales. 2001.
- OVALLES, F. Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad. FONAIAP-CENIAP-IIAG. Maracay. 1992. 44 p.
- OVALLES, F.A. Evaluación de la variabilidad interna de los suelos a nivel de parcela para el establecimiento en lotes experimentales en el estado de Cojedes. Agronomía Tropical 41(1 – 2): 5-22. 1991.
- OVALLES, F.A y NÚÑEZ, M. C. Métodos estadísticos para evaluarla variabilidad de suelos dentro de unidades de capacidad de uso en la depresión del lago de Valencia. Agronomía Tropical 44(1): 23-40. 1994.
- OVALLES, F.A. y REY, J. Variabilidad interna de las unidades de fertilidad en suelos de la depresión del Lago de Valencia. Agronomía Tropical 44(1): 41-65. 1995.

- PORTA, J. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 1994. 799p.
- REETZ, H. Las muchas facetas del sistema de información geográfico (GIS). Fertilizantes (Santo Domingo) no. 2000. 78: 33 – 35.
- REICHART, C. Variabilidad espacial (e Temporal) de solos. Procesos de transferencia no Sistema Solo-Planta-Atmosfera. Cuarta edición. Fundacao Cargill. 1985. p391-417.
- ROGOWSKI, A. S. and J. K. WOLF. Incorporating variability into soil map unit delineations. Soil Sci. Soc. Am. 1994. J.58: 163-174.
- SALAMANCA, A. Influencia de las características físicas del suelo y su interacción con las condiciones climáticas en el comportamiento y calidad del *Desmodium heteracarpum subsp. Ovalifolium* (OHASHI) en tres regiones el Colombia. Tesis de grado para optar el título de ingeniero agrónomo. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 2000. 170p
- SAMPER, J y CARRERA L. Geoestadística, CIMNE, Barcelona, España. 1990. 484p.
- SILVA, A. P., LIBARDI, L. y VIEIRA, S.R. Variabilidad espacial da resistencia a penetracao de um latossolo vermelho escuro ao longo de uma trasecao. Revista Brasileira de Ciencia do Solo. 13: 1-15.
- TRANGMAR, B., YOST, R. S. y UEHARA, G. Application of geostatistics to spacial studies of soil properties. Advances in Agronomy. 38: 45-94. 1985.
- TRUJILLO, M. P.; MENDEZ I. y CASTILLO, A.. Variabilidad espacial en ensayos de campo. Agrocienca. 30(4): 533-540. 1996.

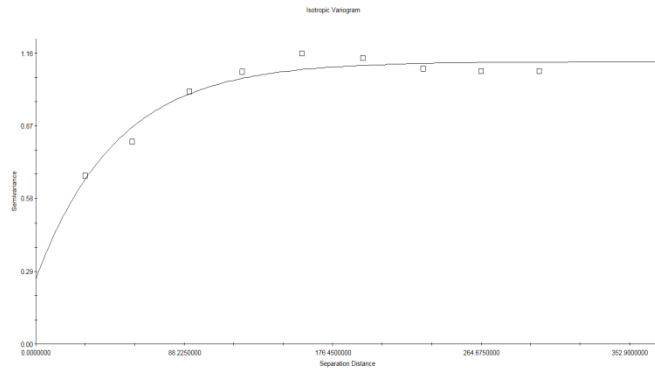
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, USDA; NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE AND NATIONAL SOIL SURVEY CENTER. Soil Survey Laboratory. Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No.42. Version 3.0. January 1998. 716 p.
- UNLU, K.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. y MORKOC, F. Caracterización de parámetros estadísticos de la variabilidad espacial de propiedades hidráulicas de un suelo seleccionado. Soil Science Society of American Journal. 54: 1537-1547. 1990.
- UTSET, S.A.; M. E. RUIZ; R. IRARRAGORRI y L. TORRES. Estructura espacial de las propiedades del suelo. III: Análisis bidimensional. Ciencias de la Agricultura. 1989. 37-38: 124-129.
- VIERA, R. S., NIELSEN, R. D. y BIGGAR, W. J. Spatial variability of field-measured infiltration rate. Soil Sci Soc Am J. 45: 1040-1048. 1981..
- WARRICK, A. W. y NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. Application of soils physics. In: HILLEL, D.; ed.. New York. 1980. p319-344.
- WEBSTER, R y BURGUES, T. M.. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties III. Changing drit and universal Kriging. J. of soil Sci. 31: 505-524. 1980
- \_\_\_\_\_. Tecnología de aplicación variable de insumos (vrt) Proyecto Agricultura de Precisión INTA Manfredi Argentina. s.p. 2000.
- . ----- . Estudio semidetallado de suelos en la Sierra Nevada de Santa Marta y municipios aledaños. Bogotá: 1995 IGAC, Subdirección Agrológica. 1988. 215 p.

# Anexo 1. SEMIVARIOGRAMAS PARA ALGUNAS DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS DE LA GRANJA

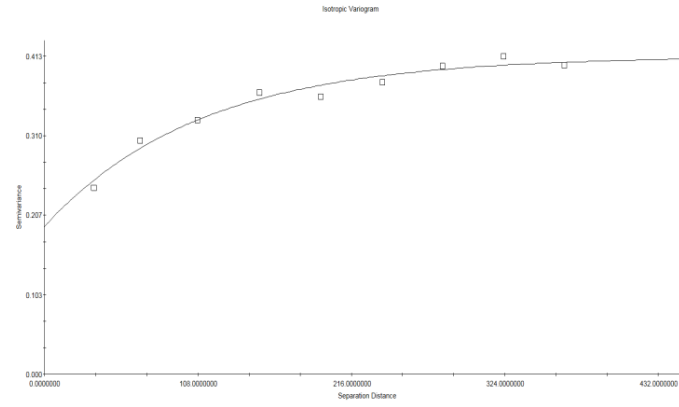




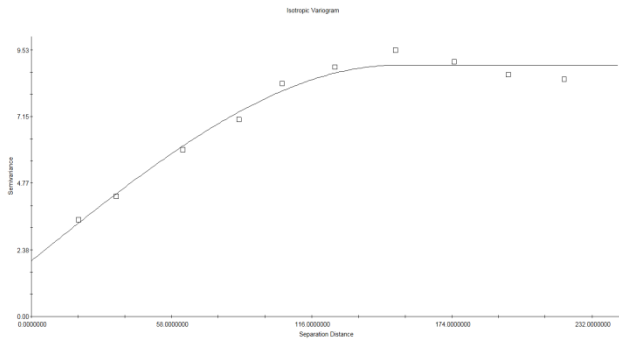




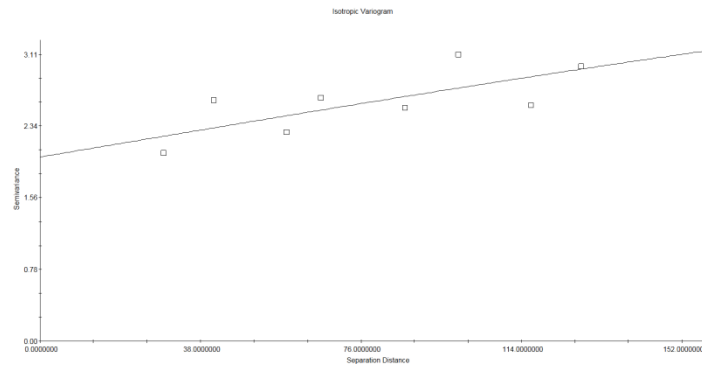
Exponential model (Cs = 0.2580, Co = C = 1.1230, A0 = 47.8000000,  $\rho^2 = 0.944$ ,  
RSS = 0.0103)



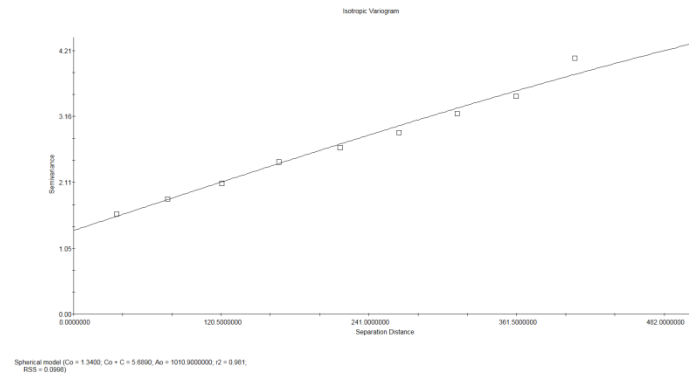
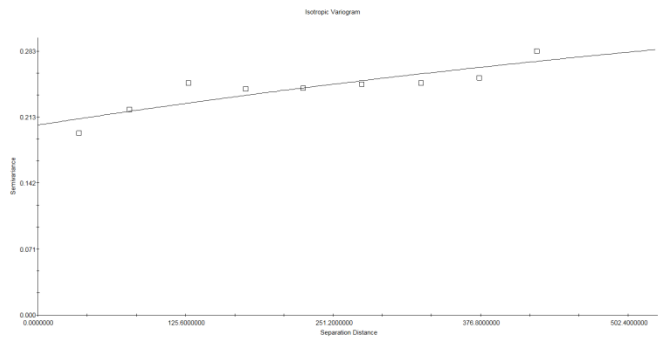
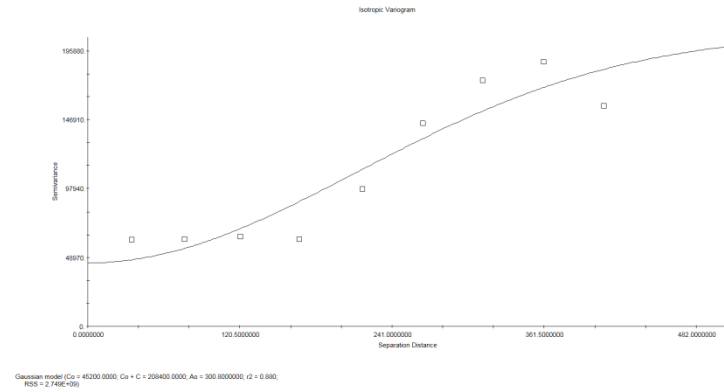
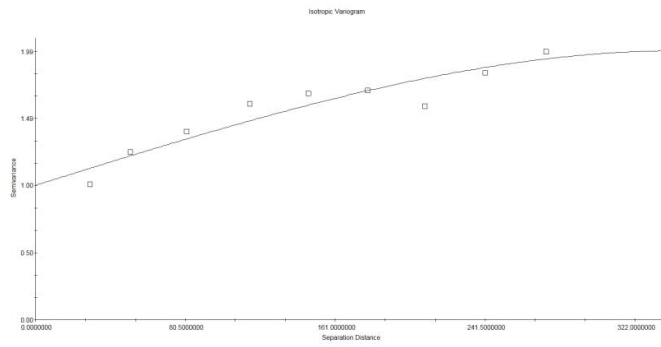
Exponential model (Cs = 0.1820, Co = C = 0.4130, A0 = 109.7000000,  $\rho^2 = 0.971$ ,  
RSS = 7.219E-04)



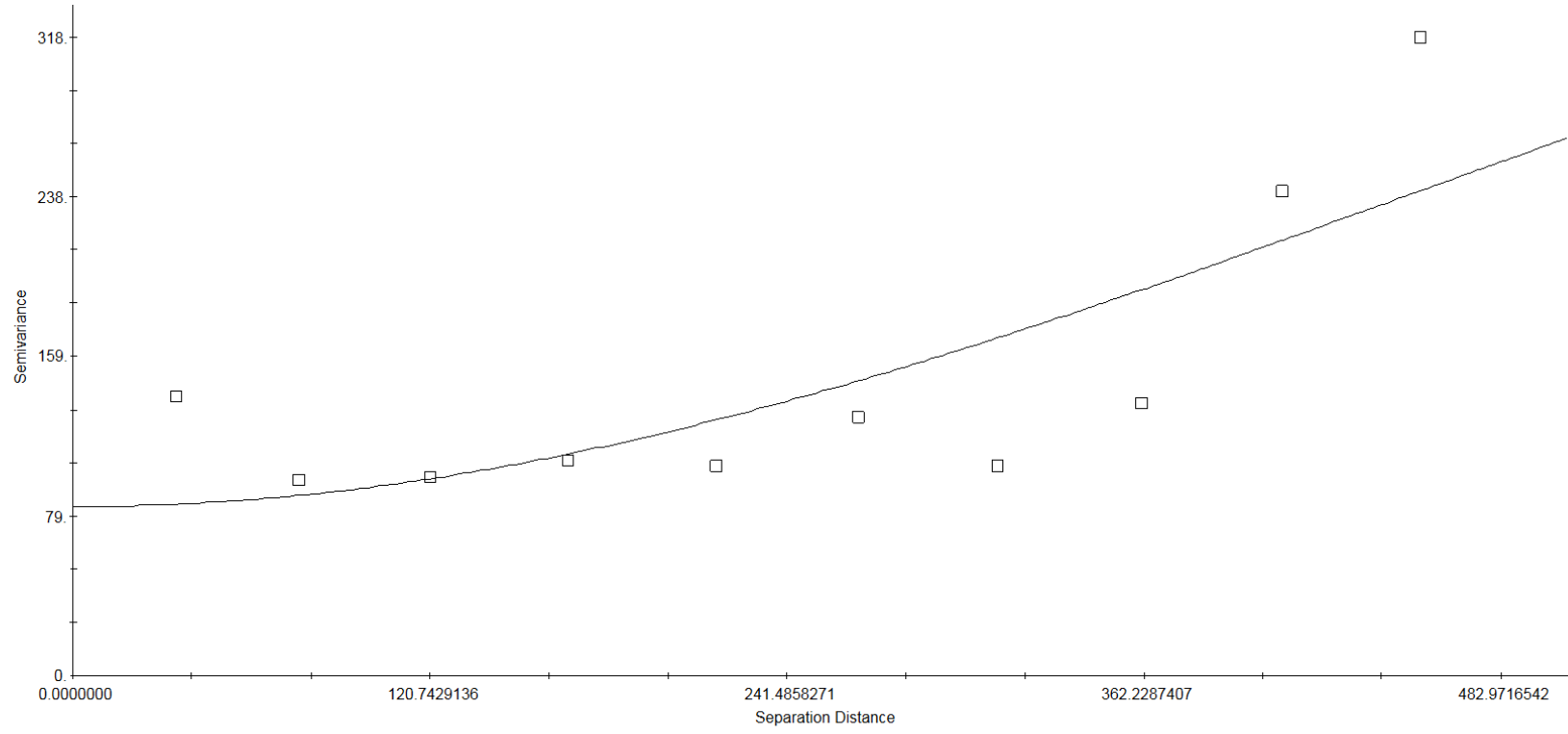
Spherical model (Cs = 1.9900, Co = C = 8.9900, A0 = 151.0000000,  $\rho^2 = 0.979$ ,  
RSS = 0.019)



Spherical model (Cs = 1.9900, Co = C = 3.9900, A0 = 387.7000000,  $\rho^2 = 0.508$ ,  
RSS = 0.414)

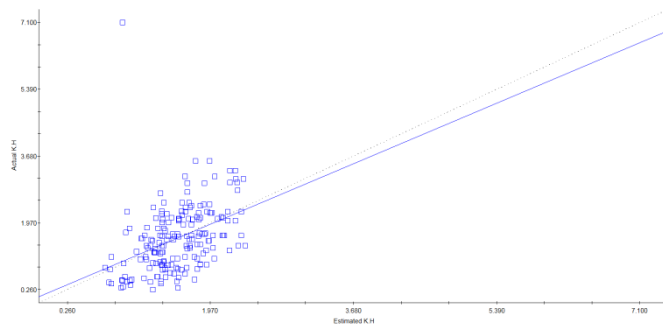


Isotropic Variogram

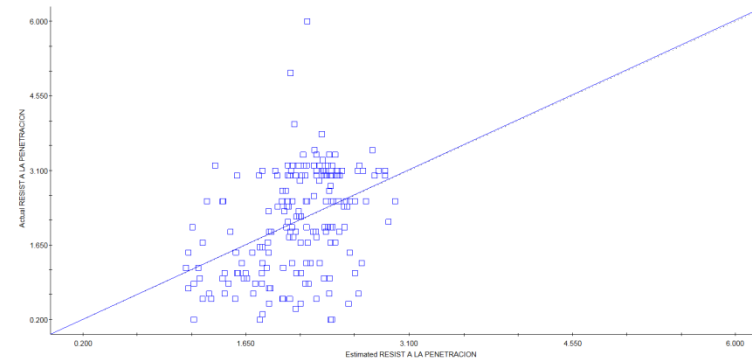


Gaussian model (Co = 84.0000; Co + C = 478.9000; Ao = 639.3000000; r2 = 0.642;  
RSS = 17532.)

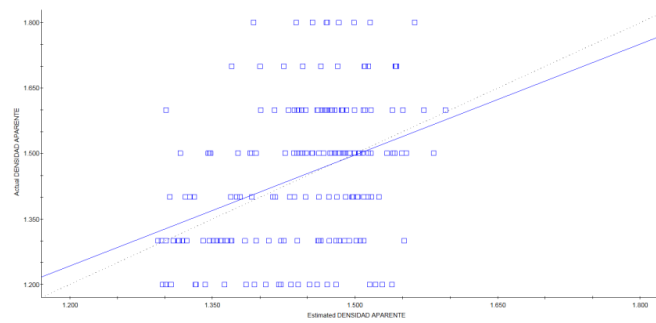
## Anexo 2. DIAGRAMA QUE MUESTRA LA RELACIÓN ENTRE VALORES OBSERVADOS Y AJUSTADOS EN EL PROCESO DE VALIDACIÓN CRUZADA



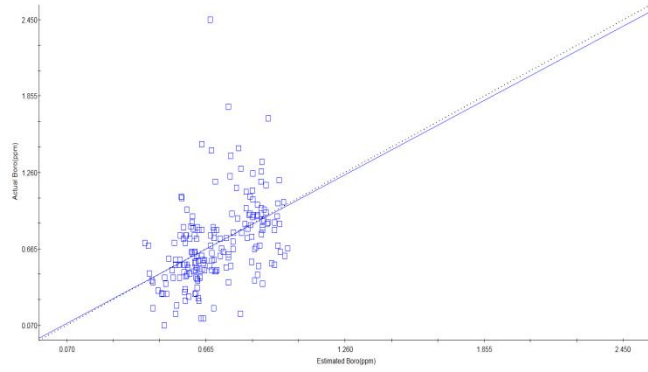
Regression coefficient = 0.906 (SE = 0.154,  $t_2 = 0.180$ ,  
y intercept = 0.149, SE Prediction = 0.712)



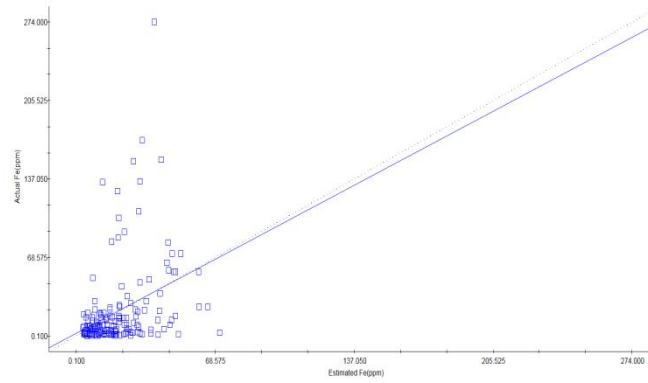
Regression coefficient = 1.005 (SE = 0.160,  $t_2 = 0.162$ ,  
y intercept = -0.002, SE Prediction = 0.928)



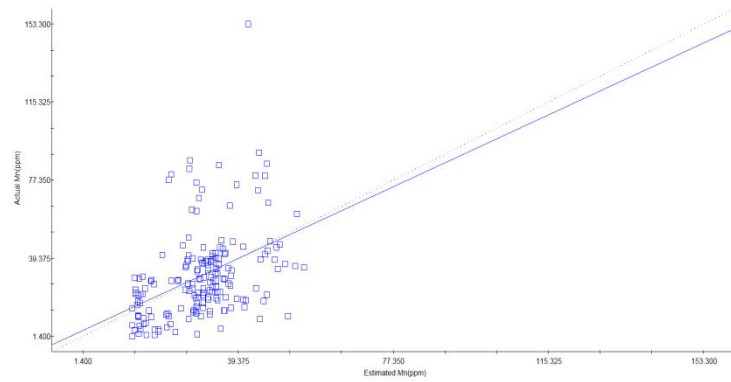
Regression coefficient = 0.949 (SE = 0.102,  $t_2 = 0.131$ ,  
y intercept = 0.223, SE Prediction = 0.154)



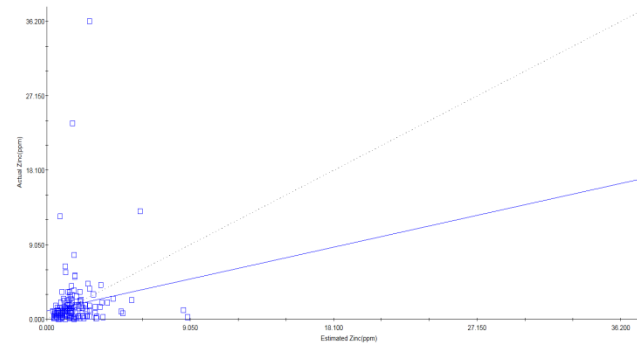
Regression coefficient = 0.972 (SE = 0.143,  $r^2 = 0.202$ ,  
y intercept = 0.019, SE Prediction = 0.292)



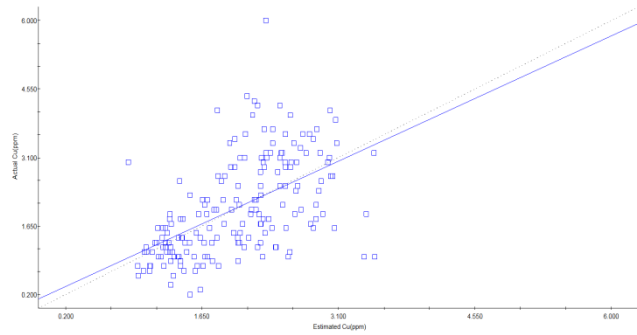
Regression coefficient = 0.343 (SE = 0.189,  $r^2 = 0.132$ ,  
y intercept = 2.073, SE Prediction = 33.852)



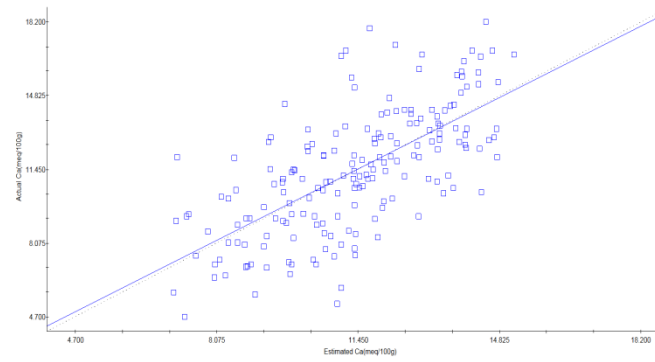
Regression coefficient = 0.921 (SE = 0.146,  $r^2 = 0.179$ ,  
y intercept = 2.796, SE Prediction = 19.586)



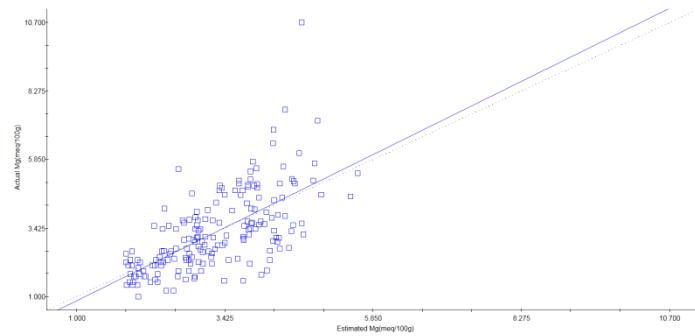
Regression coefficient = 0.427 (SE = 0.216,  $r^2 = 0.021$ ,  
y intercept = 1.315, SE Prediction = 3.502)



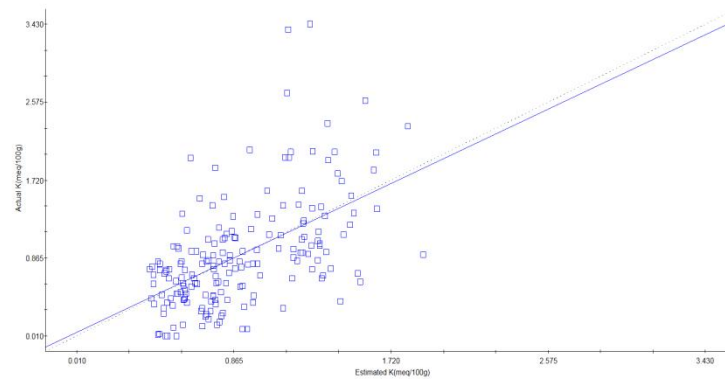
Regression coefficient = 0.914 (SE = 0.105,  $t = 0.202$ ,  
 y intercept = 0.165, SE Prediction = 0.869)



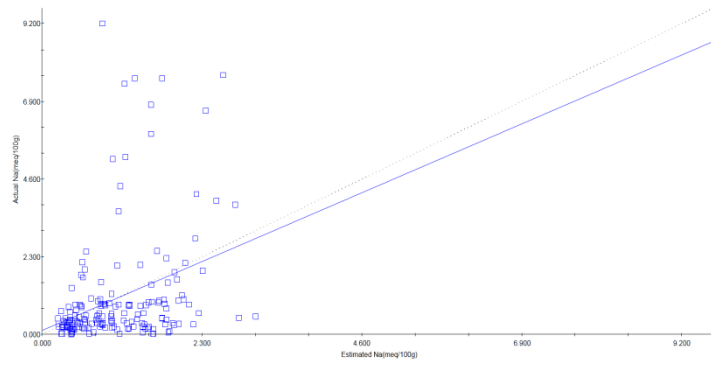
Regression coefficient = 0.969 (SE = 0.030,  $t = 0.447$ ,  
 y intercept = 3.373, SE Prediction = 2.115)



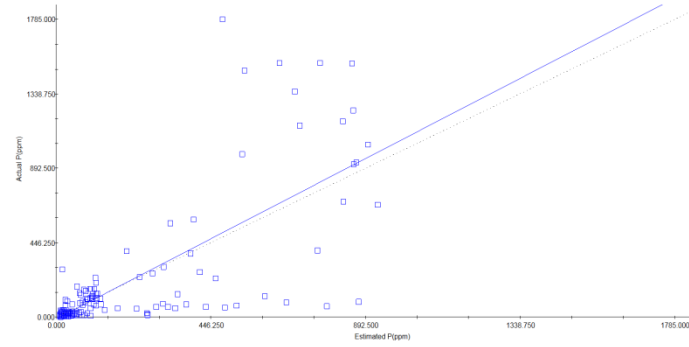
Regression coefficient = 1.000 (SE = 0.002,  $t = 0.426$ ,  
 y intercept = -0.222, SE Prediction = 1.054)



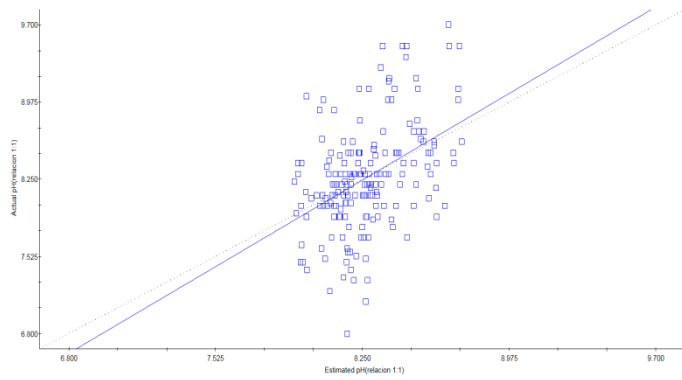
Regression coefficient = 0.954 (SE = 0.109,  $t = 0.299$ ,  
 y intercept = 0.039, SE Prediction = 0.497)



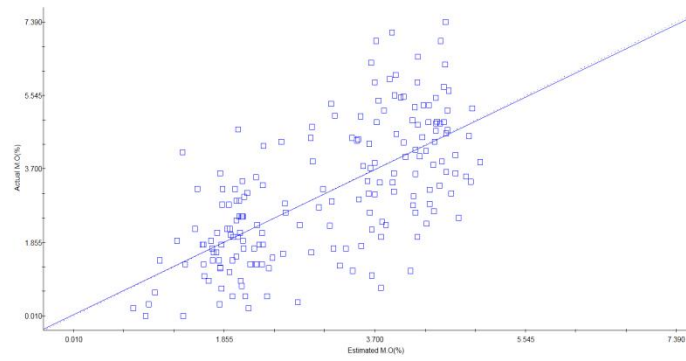
Regression coefficient = 0.885 (SE = 0.180,  $r^2 = 0.116$ ,  
 y intercept = 0.120, SE Prediction = 1.536)



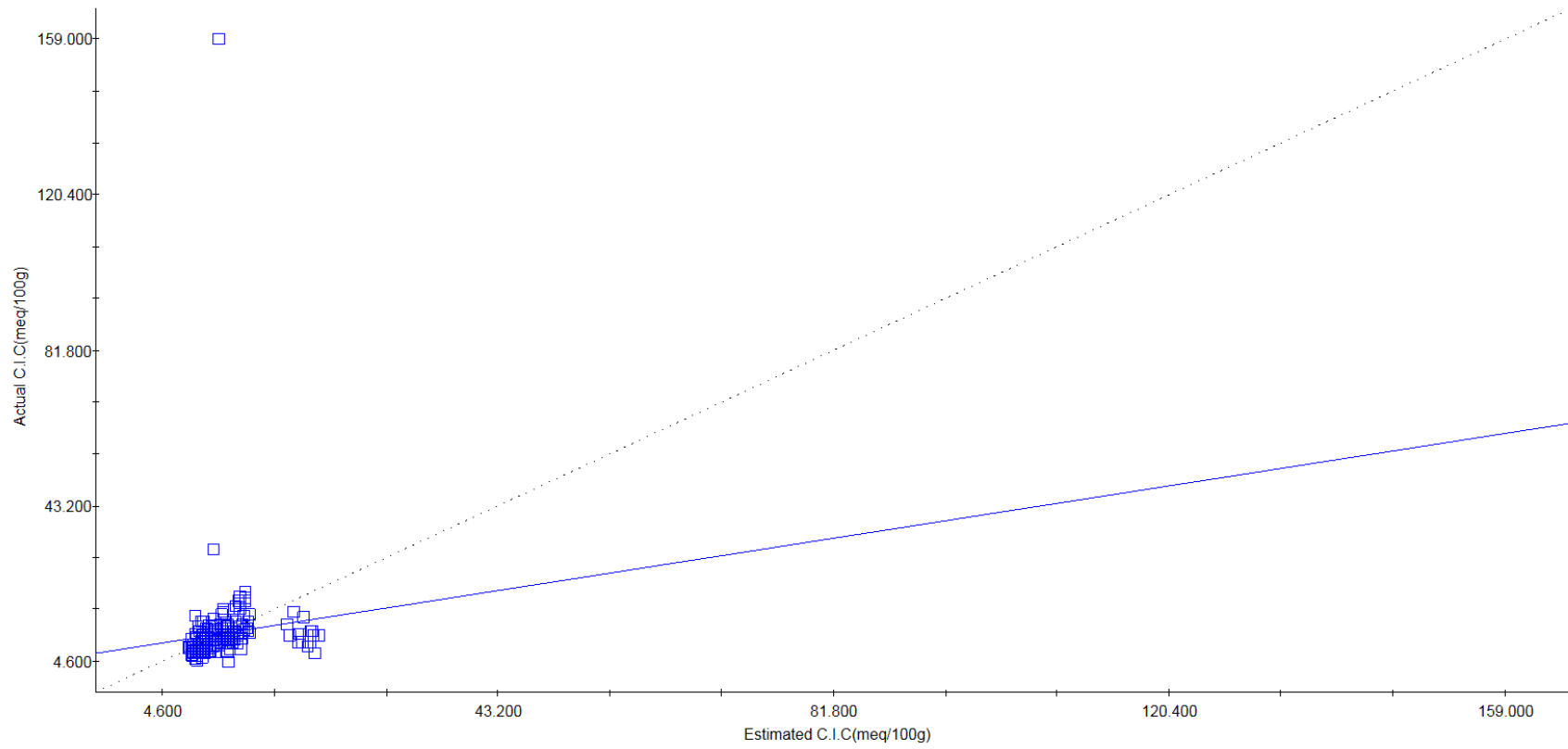
Regression coefficient = 1.077 (SE = 0.079,  $r^2 = 0.569$ ,  
 y intercept = -11.345, SE Prediction = 220.785)



Regression coefficient = 1.122 (SE = 0.173,  $r^2 = 0.168$ ,  
 y intercept = -1.014, SE Prediction = 0.462)



Regression coefficient = 0.860 (SE = 0.082,  $r^2 = 0.440$ ,  
 y intercept = 0.025, SE Prediction = 1.260)



Regression coefficient = 0.336 (SE = 0.251 , r2 =0.010,  
y intercept = 7.593, SE Prediction = 11.495)



### Anexo 3. CLASIFICACION EN GRUPOS O CLUSTER

Propiedades	CLUSTER			
	1	2	3	4
H	1.6	1.8	6.5	1.5
Da	1.4	1.5	1.5	1.4
A	58.4	46.2	66.9	47.2
Ar	22.2	28.3	18.7	28.1
L	19.4	25.5	14.4	24.7
RP	2.1	2.4	2.0	1.9
KH	1.6	1.8	1.1	1.8
pH	8.4	7.9	8.1	8.6
MO	2.7	4.1	2.3	4.1
Ca	11.9	10.5	8.4	13.1
Mg	3.4	3.9	1.8	3.5
K	0.8	0.7	0.5	1.7
Na	0.7	0.5	0.5	3.1
CIC	9.3	18.6	8.5	13.5
Po	65.3	30.5	729.4	73.1
Cu	1.5	3.1	2.5	2.3
Zn	1.1	2.4	1.1	3.2
Mn	24.7	45.5	26.7	37.8
Fe	8.5	65.5	19.6	10.4
Bo	0.6	0.6	0.8	1.1
TEXTURA	FArA	FAr	FA	FArA

VAR	CLUSTER 1	CLUSTER 2	CLUSTER 3	CLUSTER 4
H	MUY BAJA	MUY BAJA	BAJA	MUY BAJA
Da	NORMAL	UN POCO LIMITANTE	NORMAL	UN POCO LIMITANTE
RP	UN POCO LIM	LIMITANTE	UN POCO LIMITANTE	NORMAL
KH	MODERADAMENTE LENTA	MODERADA	MODERADAMENTE LENTA	MODERADA
pH	MODERADAMENTE ALCALINO	MODERADAMENTE ALCALINO	MODERADAMENTE ALCALINO	FUERTEMENTE ALCALINO
MO	MEDIA	ALTA	MEDIA	ALTA
Ca	ALTO	ALTO	ALTO	ALTO
Mg	ALTO	ALTO	MEDIO	ALTO
K	ALTO	ALTO	ALTO	ALTO
Na	BAJO	BAJO	BAJO	ALTO
CIC	BAJA	MEDIA	BAJA	MEDIA
P	ALTO	MEDIO	ALTO	ALTO
Cu	MEDIO	ALTO	MEDIO	MEDIO
Zn	BAJO	MEDIO	BAJO	ALTO
Mn	ALTO	ALTO	ALTO	ALTO
Fe	BAJO	ALTO	BAJO	BAJO
B	ALTO	ALTO	ALTO	ALTO
TEXTURA	FArA	FAr	FA	FArA