



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Caracterización de las propiedades hidrofísicas de los suelos del Centro Agropecuario Marengo CAM y su incidencia en su capacidad productiva**

**Viviana Marcela Varón Ramírez**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá D.C, Colombia

2016



# **Caracterización de las propiedades hidrofísicas de los suelos del Centro Agropecuario Marengo CAM y su incidencia en su capacidad productiva**

**Viviana Marcela Varón Ramírez**

Tesis o trabajo de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería Agrícola**

Director:

Ph.D. Jesús Hernán Camacho Tamayo

Codirectora:

MSc. Janeth González Nivia

Línea de Investigación:

Adecuación de tierras y manejo sostenible

Grupo de Investigación:

Ingeniería de biosistemas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá D.C, Colombia

2016



*Dedicatoria*

*A la paz, aquella con la que soñamos desde  
pequeños.*



## Agradecimientos

A DIOS por su bondad y misericordia.

A mis PADRES por su apoyo incondicional en el camino de la vida.

A mi ABUELA quien me ayuda con sus oraciones en la distancia.

A mis HERMANOS quienes han ayudado a formar mi carácter.

A la UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA porque ha sido mi segundo hogar gran parte de mi vida.

AI INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODÁZZI, entidad que me brindó la oportunidad de formarme como profesional, y la dirección de este trabajo.

A el profesor JESUS HERNÁN CAMACHO y la ingeniera JANETH GONZÁLEZ NIVIA por su paciente dirección y perseverancia, por mostrarme que la dedicación y la disciplina son un camino seguro al éxito.

AI LABORATORIO NACIONAL DE SUELOS y todos sus analistas de laboratorio porque sin la colaboración y financiación este trabajo no hubiese sido posible.

A JHON FREDY GUTIÉRREZ GARCÍA quien con su punto de vista geográfico orientó el componente cartográfico del presente trabajo, y a través del amor y los sueños mantuvo viva la inspiración y las ganas de contribuir a un mejor país.

A DIEGO LEONARDO CORTÉS DELGADILLO porque es el más cierto, en horas inciertas.

## Resumen

Las características físicas del suelo son definidas a través de la interacción entre sus atributos y estos a su vez pueden indicar la calidad física del mismo. El área de estudio la constituye el Centro Agropecuario Marengo, con una extensión de 94,5 ha, subdividido en 17 lotes de uso agropecuario. El objeto de estudio fueron las propiedades características de la capacidad de almacenamiento de agua, estructura y consistencia y compactación del suelo en los dos horizontes superficiales (H1 y H2), con el fin de definir zonas homogéneas a través del análisis clúster e índice de suelo. Propiedades como la resistencia mecánica a la penetración, fueron un indicador de degradación del suelo con valores superiores a 2 MPa en 13 lotes. En consecuencia, la porosidad total, fue moderada a baja en H1 y H2 con predominancia de microporos, que limitaron el agua aprovechable a valores menores al 14%. El resultado del presente estudio, fue la obtención de 2 mapas con 4 zonas homogéneas para cada horizonte, donde la zona 1 representa aquella área donde el suelo es capaz de retener entre el 17 y 21% de agua aprovechable, con densidad aparente alrededor de  $1 \text{ g cm}^{-3}$  y contenidos cercanos al 6% de carbono orgánico. En contraste, la zona 4 representa aquellos sitios donde los suelos son más finos con contenidos superiores al 45% de arcilla, agua aprovechable menor al 11% y problemas de degradación por compactación cercana a los 5 MPa.

**Palabras Clave.** degradación del suelo, compactación, almacenamiento de agua, índice de suelo, y análisis clúster.

## Abstract

The physical characteristics of the soil are defined through the interaction between their attributes and at the same time can be indicators of physical soil quality. The study area is the Marengo Agricultural Center, with an area of 94.5 ha, subdivided into 17 lots of agricultural use. The object of this study was the characteristic properties of the storage capacity of water, structure and consistency and soil compaction in the two superficial horizons (H1 and H2), in order to define homogeneous zones through a cluster analysis and soil index. Properties such as mechanical resistance to penetration, were an indicator of soil degradation with values higher than 2 MPa in 13 lots; therefore, the total porosity was moderate to low in H1 and H2 with a predominance of micropores, which limited the usable water to values less than 14%. The result of this study, was the obtaining of 2 maps with 4 homogeneous zones for each horizon, where zone 1 represents the area where the soil is able to retain between 17 and 21% of usable water, with a bulk density about  $1 \text{ g cm}^{-3}$  and content of organic carbon close to 6%; in contrast, zone 4 represents the area where soils have higher clay content, above 45%, low usable water (less than 11%) and degradation problems due to compactation close to 5 MPa.

**Keywords:** soil degradation, compaction, water storage, soil index, and cluster analysis.



# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>IX</b>
<b>Contenido</b> .....	<b>XI</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XV</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>Marco teórico</b> .....	<b>3</b>
1.1    Importancia del estudio de las propiedades hidrofísicas .....	3
1.2    Variabilidad espacial de las propiedades hidrofísicas .....	9
1.3    Geoestadística .....	13
<b>Metodología</b> .....	<b>19</b>
1.4    Caracterización de la zona de estudio .....	19
1.5    Toma de muestras y análisis de laboratorio .....	21
1.6    Procesamiento de datos .....	23
1.6.1    Retención de humedad .....	23
1.6.2    Porosidad .....	24
1.6.3    Infiltración de agua en el suelo .....	24
1.7    Análisis de datos .....	25
<b>Análisis de resultados</b> .....	<b>30</b>
1.8    Caracterización de las propiedades .....	30
1.8.1    Análisis univariado de propiedades.....	30
1.8.2    Análisis funcional de propiedades.....	35
1.9    Análisis de Correlación.....	46
1.10    Análisis Espacial .....	49
1.10.1    Distribución espacial de propiedades discretas .....	49
1.10.2    Distribución espacial de las propiedades funcionales .....	59
1.11    Definición de zonas homogéneas.....	69
1.11.1    Análisis Cluster .....	69
1.11.2    Índice de suelo (ACP) .....	76
<b>Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>87</b>

1.12	Conclusiones .....	87
1.13	Recomendaciones .....	87
<b>Bibliografía</b> .....		<b>95</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 2-1:</b> Ubicación del Centro Agropecuario Marengo y distribución de lotes .....	20
<b>Figura 2-2:</b> Mapa de suelos del Centro Agropecuario Marengo.....	21
<b>Figura 2-3:</b> Distribución de puntos de muestreo .....	22
<b>Figura 3-1:</b> Texturas. A: Horizonte 1, B: Horizonte 2.....	32
<b>Figura 3-2:</b> Infiltración acumulada para tres grupos de estudio.....	38
<b>Figura 3-3:</b> Curvas de retención de humedad para 3 grupos de estudio en H1 y H2. ....	41
<b>Figura 3-4:</b> Curvas de resistencia mecánica a la penetración.....	45
<b>Figura 3-5:</b> Distribución espacial del contenido de arena en H1 y H2. ....	50
<b>Figura 3-6:</b> Distribución espacial del contenido de limo en el CAM.....	51
<b>Figura 3-7:</b> Distribución espacial del contenido de arcilla en el CAM. ....	52
<b>Figura 3-8:</b> Distribución espacial de la densidad aparente en el CAM. ....	53
<b>Figura 3-9:</b> Distribución espacial de la densidad real en el CAM. ....	54
<b>Figura 3-10:</b> Distribución espacial del índice de plasticidad en el CAM.....	55
<b>Figura 3-11:</b> Distribución espacial del límite líquido en el CAM.....	55
<b>Figura 3-12:</b> Distribución espacial del límite plástico en el CAM. ....	56
<b>Figura 3-13:</b> Distribución espacial del carbono orgánico en el CAM. ....	57
<b>Figura 3-14:</b> Distribución espacial del DMP de los agregados. ....	58
<b>Figura 3-15:</b> Distribución espacial del índice de estabilidad de agregados. ....	59
<b>Figura 3-16:</b> Comparación de curvas de infiltración acumulada observada y predichas mediante GF. A: Curvas observadas, B: curvas predichas.....	60
<b>Figura 3-17:</b> Distribución espacial de la $i_b$ observada y predicha mediante GF.....	61
<b>Figura 3-18:</b> Distribución espacial de la $K_s$ observada y predicha mediante GF.....	62
<b>Figura 3-19:</b> Curvas de Retención de humedad observadas y predichas para H1. A: curvas observadas, B: curvas predichas. ....	63
<b>Figura 3-20:</b> Curvas de Retención de humedad observadas y predichas para H2. A: curvas observadas, B: curvas predichas .....	63
<b>Figura 3-21:</b> Distribución espacial del AA observada y predicha para H1. ....	64
<b>Figura 3-22:</b> Distribución espacial del AA observados y predichas para H2.....	65
<b>Figura 3-23:</b> Distribución espacial de la porosidad total observada para H1 y H2.....	65
<b>Figura 3-24:</b> Curvas de Resistencia Mecánica a la Penetración observadas y predichas. A: Observadas, B: Predichas.....	66
<b>Figura 3-25:</b> Resistencia mecánica a la penetración observada y predicha a 15 cm de profundidad. ....	67

<b>Figura 3-26:</b> Resistencia Mecánica a la Penetración observada y predicha a 30 cm de profundidad.....	68
<b>Figura 3-27:</b> Análisis Cluster para las propiedades de estudio en H1.....	70
<b>Gráfica 3-28:</b> Centroides (k-means) para cada clúster en H1.....	70
<b>Figura 3-29:</b> Zonas homogéneas definidas con análisis Cluster para H1. ....	71
<b>Figura 3-30:</b> Análisis Cluster para las propiedades de estudio en H2.....	73
<b>Gráfica 3-31:</b> Centroides (k-means) para cada clúster en H2.....	74
<b>Figura 3-32:</b> Zonas homogéneas definidas con análisis Cluster para H2. ....	76
<b>Figura 3-33:</b> Zonas homogéneas definidas por 1CP y 2CP en H1. ....	81
<b>Figura 3-34:</b> Zonas homogéneas definidas por 7CP en H1.....	81
<b>Figura 3-35:</b> Zonas homogéneas definidas por 1CP y 2CP en H2. ....	84
<b>Figura 3-36:</b> Zonas homogéneas definidas por 5CP en H2. ....	86

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 2-1:</b> Análisis de laboratorio y pruebas físicas realizadas en cada punto de muestreo .....	23
<b>Tabla 3-1:</b> Estadísticos descriptivos de propiedades discretas para H1.....	30
<b>Tabla 3-2:</b> Estadísticos descriptivos de propiedades discretas para H2.....	31
<b>Tabla 3-3:</b> Comparación de medias para cada una de las propiedades en H1 y H2. ....	32
<b>Tabla 3-4:</b> Distribución de tamaño de agregados para H1 y H2.....	34
<b>Tabla 3-5:</b> Estadísticos descriptivos de los parámetros de los modelos de ajuste para la infiltración de agua en el suelo. ....	36
<b>Tabla 3-6:</b> Grupos de análisis según el contenido de arcilla.....	37
<b>Tabla 3-7:</b> Estadísticos descriptivos para los parámetros de ajuste al modelo de Van Genuchten.....	40
<b>Tabla 3-8:</b> Parámetros de riego estimados a partir de las CRH para H1 y H2.....	43
<b>Tabla 3-9:</b> Geoestadísticos para las propiedades de estudio en H1.....	49
<b>Tabla 3-10:</b> Geoestadísticos para las propiedades de estudio en H2.....	50
<b>Tabla 3-11:</b> Geoestadísticos del AA observada y predicha. ....	63
<b>Tabla 3-12:</b> Geoestadísticos para la RMP observada y predicha. ....	67
<b>Tabla 3-13:</b> Características de las zonas homogéneas definidas por análisis clúster para H1. ....	72
<b>Tabla 3-14:</b> Características de las zonas homogéneas definidas por análisis Cluster para H2. ....	75
<b>Tabla 3-15:</b> Componentes principales para H1. ....	77
<b>Tabla 3-16:</b> Componentes principales para H2. ....	78
<b>Tabla 3-17:</b> Características de las zonas homogéneas definidas por IS en H1.....	82
<b>Tabla 3-18:</b> Características de las zonas homogéneas definidas por IS en H2. ....	85



# Introducción

La tasa de formación de suelo ha sido estudiada por diversos autores y ésta depende de las condiciones de formación del mismo. En general, según la enciclopedia de los problemas del mundo, citado por Malagón (2016), el suelo se forma a una tasa de 3,4 Ton ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, tasa relativamente corta en relación con la velocidad de degradación de este recurso.

La FAO (2016) define la degradación del suelo como un cambio en la salud del mismo y una disminución de la capacidad de este para brindar beneficios tan vitales como la producción de alimentos. Problemas como la erosión, salinización y compactación son procesos de degradación del suelo (Malagón, 2016), que podrían ser mitigados mediante el monitoreo (IDEAM, 2014) y la implementación de prácticas y tecnologías basadas en el conocimiento de las características físicas, químicas, biológicas y mineralógicas de cada suelo.

Las características físicas del suelo son definidas a través de la interacción entre sus atributos y estos a su vez pueden indicar la calidad del mismo (Schoenholtz et al., 2000). La interacción entre estos atributos definen la capacidad y habilidad del suelo para ser parte componente de sistemas de producción en ambientes ecológicamente saludables y sustentables (Shoenholtz et al., 2000).

La diversidad de suelos y la variabilidad espacial de la distribución de las propiedades físicas, químicas, biológicas y mineralógicas de los mismos, son el resultado de la interacción de los factores formadores y de varios procesos pedogenéticos (He et al., 2010; Jaramillo, 2011; Cucunuba-Melo et al., 2011). Adicionalmente, la variabilidad espacial de las propiedades físicas puede alterarse debido a la vegetación y al manejo de este recurso en los sistemas de producción (Polo et al., 2003; Jaramillo, 2009). Estudiar la variabilidad espacial y correlacionarla con procesos de producción constituye la base

de la agricultura de precisión que tiene como fin establecer sistemas de producción más eficientes y sostenibles (Valbuena, 2008; Freitas et al., 2012).

Según Molín et al. (2008), la aplicación de la agricultura de precisión en el manejo de cultivos se debe orientar hacia aquellos factores que presentan mayor variabilidad, con alto impacto sobre la producción y que pueden ser controlados. El CAM actualmente posee estudios de suelos zonificados que han ayudado al desarrollo de la investigación. Sin embargo, la posibilidad de implementar prácticas de manejo de suelos basadas en el estudio de las propiedades hidrofísicas y su comportamiento espacial en toda la extensión del centro permitirá hacer un uso más eficiente y sostenible del recurso suelo. La delimitación de zonas homogéneas y su implementación a través de un software SIG, permitirá al CAM desarrollar investigaciones que tengan por objetivo la aplicación de la agricultura de precisión para así, seguir contribuyendo con soluciones óptimas y reales a los problemas del sector agropecuario, que estén a la vanguardia de los desarrollos tecnológicos actuales.

Por lo anterior, el objetivo de la presente tesis es caracterizar las propiedades hidrofísicas de los suelos del Centro Agropecuario Marengo en cuanto a su comportamiento en el espacio, delimitación de zonas homogéneas y la conformación de una geodatabase en un software SIG que pueda brindar a terceros la información recopilada producto de este trabajo.

# **1. Marco teórico**

## **1.1 Importancia del estudio de las propiedades hidrofísicas**

El suelo se considera un cuerpo natural trifásico no consolidado, que se diferencia de su material inicial (material parental) como un resultado de adiciones, pérdidas, translocaciones y transformaciones de materia y energía en el tiempo y que adicionalmente es capaz de soportar plantas en un ambiente natural (USDA, 2014). El suelo representa una mezcla compleja de materiales inorgánicos (arenas, limos y arcillas), materiales orgánicos, microorganismos, agua y aire que en conjunto con factores climáticos como la temperatura, luz y presión total, interactúan y caracterizan este sistema fundamentalmente por un dinamismo intensivo (Gavande, 1972) y este a su vez determina las propiedades físicas, químicas, biológicas y mineralógicas de cada suelo (Volke et al., 2005).

La condición física de un suelo se debe principalmente a la interacción de las tres fases del mismo que a su vez determina propiedades como la aireación, capacidad de soporte para el crecimiento vegetal, capacidad de drenaje, de almacenamiento de agua y retención de nutrientes (Rucks et al., 2004). El estudio de la condición física de los suelos, permite establecer y determinar su capacidad de uso, la influencia en los sistemas de producción agropecuaria y la posibilidad de ser modificados mediante la intervención de las actividades humanas.

La textura del suelo es una herencia del material parental como factor formador de un suelo. El tamaño de partículas y su cantidad relativa constituyen la textura de un suelo y tienen un impacto directo sobre el abastecimiento de nutrientes, agua y aire (Van Deuren et al., 2002). Por esto, el estudio de la textura del suelo es importante desde el punto de vista agronómico, pues la distribución de los tamaños de las partículas minerales del

suelo tiene influencia sobre el movimiento y disponibilidad de humedad del suelo, disponibilidad de nutrientes, penetración de las raíces, agregación y susceptibilidad a la degradación (FAO, 2002).

El flujo de agua en el suelo es un proceso dinámico que afecta las condiciones químicas, físicas y biológicas del suelo, e influyen en la nutrición, el desarrollo vegetativo y el almacenamiento de agua en el suelo y la degradación del mismo (Hincapié y Tobón, 2012).

La infiltración al ser un atributo hidrodinámico, se encuentra estrechamente relacionado con los procesos de capilaridad y fuerzas asociadas con la adhesión y cohesión de las partículas del suelo (Forero, 2000), por lo que las demás propiedades físicas que explican la distribución y el comportamiento de las partículas minerales del suelo, tienen relación directa con la tasa de infiltración y están fuertemente correlacionadas. En consecuencia, se puede decir que las tasas de infiltración de agua en suelos arcillosos desciende rápidamente, puesto que las partículas de arcillas tienden a expandirse y a desprenderse de partículas más grandes por lo que cierran los poros del suelo impidiendo así el movimiento de agua incluso en la superficie del suelo. Caso contrario sucede con las arenas, estas conservan su tamaño y estabilidad en sus poros, teniéndose así tasas altas de infiltración durante tiempos prolongados.

La creciente demanda de alimentos y en consecuencia el aumento en la producción agrícola, exige el uso racional y eficiente del recurso agua (Orjuela – Matta et al., 2012). La infiltración de agua en el suelo depende de las características del medio como la materia orgánica, la textura, la porosidad y el contenido de humedad (Rodríguez-Vásquez et al., 2008). Adicionalmente conocer el comportamiento del movimiento del agua en un suelo entendido como la capacidad de retención de agua y la tasa de infiltración, son factores determinantes en el diseño de sistemas de riego y drenaje (Silva, 2007).

En sistemas de riego debe proveerse al suelo la lámina de agua necesaria, a una tasa que no exceda la velocidad de infiltración del mismo y de esta manera evitar encharcamientos, pérdidas de agua por percolación profunda o lavado de fertilizantes

(Forero, 2000). En contraste en el diseño de sistemas de drenaje conocer los regímenes climáticos (precipitación) y la forma en que el suelo es capaz de infiltrar agua, es determinante a la hora de diseñar el tamaño y la separación entre canales de drenaje para de esta forma evitar pérdidas de suelo por erosión hídrica.

La disponibilidad de agua y solutos en el suelo pueden ser estudiados a partir del movimiento de agua en el suelo (García y Medina, 2009), por esto Nielsen y Wendroth (2003) citado por Timm et al. (2006), consideran la curva de retención de humedad (CRH) la propiedad hidráulica más importante.

La determinación y el estudio de las curvas de retención de agua en el suelo, están fuertemente ligadas a la textura del mismo en función de la superficie específica total de las partículas del suelo (Gavande, 1972). Las curvas de retención son fundamentales a la hora de entender las necesidades hídricas de los cultivos y no someterlos a situaciones de estrés que afecten los rendimientos de producción y en consecuencia los rendimientos económicos. Se sabe entonces que para poder satisfacer o garantizar una lámina de agua rápidamente aprovechable en el suelo deben conocerse los puntos de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) que son obtenidos a partir de las curvas de retención de humedad y son diferentes para cada suelo en función de su textura, presentando mayores cantidades de agua los suelos arcillosos que los arenosos en el punto de marchitez permanente (Gavande, 1972), por lo que se puede decir que los suelos arcillosos gracias a sus fuerzas de adhesión y gran superficie específica requiere láminas de riego menores pero con mayor frecuencia que un suelo arenoso.

Las fracciones texturales (arena, limo y arcilla) ante la acción de fuerzas naturales y a sustancias derivadas de exudados de las raíces y de la actividad microbiana, se unen formando unidades secundarias llamadas agregados (Malagón, 2016). Montenegro y Malagón (1990), indican que los agregados resultantes y las características de los mismos son el resultado de los procesos genéticos y del desarrollo del perfil durante su historia evolutiva. Estudiar la estabilidad de estos agregados ayuda a predecir el comportamiento en la arquitectura de la fracción sólida y del espacio poroso cuando este se somete a la acción de fuerzas originadas por la acción del agua o los esfuerzos mecánicos externos (Kay, 1990).

Los agregados son constituidos por un grupo de partículas que tienen una mayor fuerza de adhesión entre sí en comparación con las partículas adyacentes (Cabria et al., 2002). La configuración de estos agregados y el espacio poroso entre ellos definen la estructura de un suelo. Según FAO (2000), el Diámetro Medio Ponderado (DMP) óptimo para la germinación de las semillas está entre 0,5 y 2 mm, pues esto garantiza que la semilla tenga suficiente superficie de contacto con el suelo y además las raíces puedan tener mayor espacio poroso para explorar el suelo.

De acuerdo con FAO (2000), después de las labores de preparación de suelos arcillosos, el diámetro medio debería ser entre 4 a 5 cm de diámetro y debido al comportamiento plástico y líquido de estos suelos con las lluvias o la aplicación del riego, estos agregados llegarán fácilmente al diámetro óptimo de germinación entre 0,5 y 8 mm. La conservación de estos agregados del suelo es importante, pues la estructura de los mismos tiene relación directa con el movimiento de agua superficial y subsuperficial y la aireación del suelo. Según Volveras y Amezcua (2009), una buena estructura del suelo debe contar con alta proporción de macroagregados estables (2-10 mm de diámetro) y una buena proporción de poros con diámetros mayores a 75  $\mu\text{m}$  para que en épocas de lluvia el suelo tenga un buen desagüe y una buena aireación. Por otra parte, el estudio de problemas de erosión, según Márquez et al. (2004), también se estudia a partir de la cantidad y distribución de agregados estables e inestables.

La estabilidad de los agregados es una característica dinámica, pues está condicionada a la acción del agua y las prácticas de uso del suelo (Volveras y Amezcua, 2009), por tanto es un indicador sensible de tendencias a la recuperación o degradación de los suelos (Gabioud et al., 2011). La estabilidad de los agregados está relacionada con la actividad de los coloides, la materia orgánica (Consentino et al., 2006), el laboreo del suelo y la rotación de cultivos (Novelli et al., 2010). En consecuencia, su estudio es un buen indicador de la calidad física del mismo (Alvear et al., 2007; Aravena et al., 2007; Pulido – Moncada et al., 2009).

La relación entre el espacio poroso y la porción sólida que conforman los agregados generalmente es estudiada a través de la densidad aparente del suelo. Esta propiedad según Malagón (2016), para suelos de familias francosa-fina hasta gruesas está

alrededor de  $1,54 \text{ g cm}^{-3}$  y para familias finas y muy finas, alrededor de  $1,39 \text{ g cm}^{-3}$ . Valores mayores a los citados anteriormente generan problemas para el desarrollo radicular, pues la fuerza o el impedimento mecánico para que las raíces exploren el perfil del suelo es mayor y la extensión y la configuración del espacio poroso se altera ocasionando problemas principalmente de poca movilidad de agua en el suelo y por tanto de solutos y baja aireación e intercambio de gases (Yi et al., 2016).

Adicionalmente, la densidad aparente juega un papel importante en la conservación y el almacenamiento del carbono orgánico en el suelo (Li et al., 2016). Según la FAO (2002), el suelo es la mayor reserva de carbono orgánico (CO) en el ciclo del mismo, ya que, puede jugar un papel importante en la conservación del medio ambiente mientras este sea capaz de capturar el CO y no ser un emisor de  $\text{CO}_2$ .

Cuando el suelo no tiene una buena estructura y estabilidad de la misma, se generan problemas de compactación que dificulta el desarrollo vegetativo de los cultivos. En general la compactación es causada por el tránsito frecuente de maquinaria agrícola y por el pisoteo de animales (Medina et al., 2012). Sin embargo, los suelos pueden llegar a compactarse naturalmente (adensamiento) como consecuencia de procesos genéticos principalmente de translocación de arcillas (iluviación) de un horizonte superior a uno adyacente (USDA, 2014).

Al igual que la estructura, la consistencia es otro parámetro de gran importancia tanto en la caracterización como clasificación taxonómica de los suelos (identificación de epipedones) (USDA, 2014). Montenegro y Malagón (1990) definen la consistencia como una característica que da cuenta del grado de adhesión entre partículas o la resistencia de estas a la deformación o ruptura.

La consistencia del suelo es evaluada en laboratorio por medio de los Límites de Atterberg. Esta prueba establece la cantidad de agua que requiere un suelo para que este cambie de un estado plástico a un estado líquido. Yalcin (2007), indica que la consistencia del suelo puede ser evaluada mediante los límites de Atterberg y estos pueden expresar la estrecha relación con el comportamiento mecánico del suelo.

Según Hemmat et al. (2010), el contenido de arcilla influye directamente en los límites líquido (LL) y plástico (LP) de un suelo. Por otra parte, Curtaz et al. (2014), indica que hay una fuerte correlación entre la consistencia y la capacidad de agregación del suelo y el contenido carbono orgánico, hecho que confirma también Stanchi et al. (2015).

El estudio de la consistencia del suelo a través de los límites de Atterberg, son importantes en la planeación de la mecanización agrícola y el manejo de la compactación en el suelo (Keller y Dexter, 2012) y en el estudio de la vulnerabilidad o susceptibilidad del suelo a la erosión y la remoción en masa (Stanchi et al., 2015).

El carbono orgánico en el suelo corresponde principalmente a los residuos poco alterados de materiales animales y vegetales y microorganismos (Martínez et al., 2008). El carbono orgánico en el suelo es un indicador de la calidad del mismo (Carter, 2002), pues este es un factor determinante en la estructuración del suelo y esta a su vez en las demás propiedades físicas.

A través de la agregación y la estabilidad de los agregados del suelo, el carbono orgánico influye en la distribución del espacio poroso y la capacidad de retención de agua y su disponibilidad (Acevedo y Martínez, 2003). Adicionalmente, el espacio poroso en el suelo permite la aireación del mismo y una mayor superficie específica para ser explorada por las raíces de los cultivos establecidos.

La compactación del suelo se genera por la reducción del espacio poroso como consecuencia de una aplicación de fuerza externa (Kulli, 2002 citada por Matínez et al., 2008). Al ser el CO una propiedad que mantiene la estabilidad estructural, en consecuencia es una propiedad a ser tomada en cuenta para evitar problemas de compactación al igual que la erosión.

Los problemas que trae la compactación de los suelos se refieren básicamente a problemas de porosidad, movimiento de agua en el suelo, poco intercambio gaseoso, desarrollo de la edafofauna y principalmente en el desarrollo vegetativo (Carrara et al., 2003; Febo y Pessina, 2002).

Según Tormena et al. (2007), un buen indicador de la calidad física del suelo es la resistencia mecánica a la penetración (RMP), pues es fácil de medir e interpretar y se correlaciona con otras propiedades como la porosidad, densidad y puede dar cuenta del movimiento de agua y solutos en el suelo. Al medir esta propiedad en campo se puede cuantificar el grado de compactación y estimar directamente la fuerza que requieren las raíces para deformar la estructura del suelo o penetrar los poros y poder alcanzar aquellos lugares donde puedan absorber agua y nutrientes para su crecimiento vegetativo (Medina et al., 2012).

Debido a la compleja relación de las propiedades físicas del suelo, todas las propiedades pueden medirse directamente o verse representadas en muchas otras con las cuales tengan relación. Sin embargo, medir directamente cada una de las propiedades y correlacionarlas entre sí resulta más ventajoso, pues el comportamiento de cada suelo es único según las condiciones climáticas, relieve y la influencia de la actividad humana que en él intervenga.

## **1.2 Variabilidad espacial de las propiedades hidrofísicas**

La variabilidad en los suelos se puede atribuir a dos factores importantes: génesis y manejo. El primero de ellos se traduce en los factores de formación del suelo siendo el material parental y su ubicación en el relieve quienes generan mayor variabilidad, pues al actuar en él, el clima, y los microorganismos en el tiempo da origen a los suelos (Montenegro y Malagón, 1990)

La intervención del hombre, el uso de maquinaria y la aplicación de fertilizantes alteran la variabilidad espacial de las propiedades de un suelo. Jaramillo (2011) y Araujo (2011) reportan que dicha variabilidad espacial no solo depende del suelo, si no de la propiedad que específicamente se analice, presentando las propiedades físicas menor variabilidad respecto de las químicas.

La variabilidad espacial se puede estudiar a través de técnicas geoestadísticas. Estas analizan la dependencia espacial de un número de datos (atributos) que corresponden a ubicaciones específicas de un área continua, con el fin de estimar y predecir el comportamiento de dichos atributos en un lugar no muestreado (Giraldo, 2002; Deutsch,

2006) y de este forma apoyar, por ejemplo, prácticas de manejo de cultivos como la aplicación de fertilizantes y pesticidas (Goovaerts, 1998), optimizando así la eficiencia productiva desde el punto de vista agronómico, económico y ambiental (Corwin y Lesch, 2010).

La distribución espacial del contenido de arena, arcilla y el limo, representan uno de los objetivos principales de los estudios de suelos, pues según Mzuku et al. (2005), los resultados de estos juegan un papel fundamental a la hora de proponer y delimitar zonas de manejo por sitio-específico o correlacionar dichas fracciones con rendimientos de cultivos, ya que la distribución de las fracciones texturales influyen directamente sobre otras propiedades físicas, químicas e hidráulicas, así como en prácticas de laboreo del suelo.

Iqbal (2005), en un estudio en cultivos de algodón encontró una dependencia espacial fuerte para los contenidos de arena y arcilla en el horizonte superficial. Sin embargo en el mismo estudio encontraron una distribución aleatoria con altos valores de alcance de las mismas propiedades para el horizonte subsuperficial y el profundo, lo que indica la influencia de la labranza superficial y la estratificación de horizontes. Sin embargo, en algunos casos la aleatoriedad observada en los semivariogramas pueden indicar la necesidad de muestrear a escalas más pequeñas, donde pueda observarse en mejor detalle la estructura espacial de las fracciones texturales del suelo (He et al., 2010).

Según varios autores, las mejores estimaciones de la conductividad hidráulica son aquellas que se miden directamente en campo, pues en los análisis de laboratorio se contemplan muestras de suelo muy pequeñas que pueden contener redes de poros o fisuras que no representen el suelo de estudio, que en laboratorio influyen considerablemente en dicha propiedad, para la cual se estaría dando un resultado erróneo (Basile et al., 2003; Buczko et al., 2006; Kumar et al., 2010).

Por otra parte, la conductividad hidráulica presenta alta correlación con propiedades como la porosidad y la densidad aparente al igual que con la textura y el contenido de materia orgánica del suelo (Rienzner y Gandolfi, 2014). Adicionalmente las actividades bióticas son factores que pueden estar fuertemente correlacionadas con las mediciones

de la conductividad hidráulica, como la descomposición de raíces muertas o la presencia de fauna del suelo como lombrices que pueden genera conductos y redes de macroporos que influyen directamente en el movimiento de agua en el suelo. (Chan, 2001; Wuest, 2001; Lichner et al., 2011).

En cuanto a la variabilidad espacial, según Wang et al. (2009), la conductividad hidráulica es una propiedad de alta heterogeneidad espacial, quien en su estudio al evaluar esta propiedad para dos profundidades obtuvo coeficientes de variación de 206% y 135% para la capa superficial y subsuperficial respectivamente. En este mismo estudio, se evaluó también parámetros como la pendiente y la cobertura vegetal y concluyo que estos parámetros con altos coeficiente de variación (entre 43 y 245%) afectan la variabilidad de la conductividad hidráulica principalmente en la capa superficial del suelo. Gómez et al. (2005) en su estudio de la influencia del laboreo (arado de disco) en la variabilidad de la conductividad hidráulica, muestra una condición de anisotropía para esta propiedad. En este estudio se encontró una fuerte correlación espacial y altos valores de alcance para la conductividad hidráulica evaluada en dirección del laboreo y un efecto pepita puro en dirección perpendicular.

La agregación del suelo es el proceso mediante el cual las partículas primarias (arena, limo y arcilla) se unen formando unidades secundarias denominadas agregados (Gabioud et al., 2011). Así, en el estudio de la estabilidad de los agregados del suelo se busca estimar la capacidad del suelo para mantener la arquitectura de la fracción sólida y del espacio poroso, cuando este se somete a la acción de fuerzas originadas por la acción del agua o los esfuerzos mecánicos externos (Kay, 1990).

La estabilidad de los agregados depende de la etapa de crecimiento y desarrollo del sistema radicular, del manejo del suelo y de las condiciones climáticas. De igual forma, varios autores incluyen el material parental y la ubicación en el paisaje a los factores influyentes en la agregación y estabilización del suelo (Barthes et al., 2000; Krull et al., 2003; Hoyos y Comerford, 2005). Adicionalmente se tienen en cuenta factores importantes en la formación de agregados como la actividad de los coloides, la materia orgánica y la actividad microbiana (Chenu et al., 2000; Sasal et al., 2006; Consentino et al., 2006).

Mohammadi y Motaghian (2011), en su estudio acerca de la relación del contenido de carbono orgánico con la estabilidad y el tamaño de los agregados en Irán, encontró mayores índices de estabilidad (84%) para agregados de diámetros grandes (> 2 mm) con bajos coeficiente de variación (13%), resultados encontrados también por Rodríguez – Rodríguez et al. (2002) quienes encontraron índices de estabilidad de agregados de 96% para diámetros mayores a 2 mm. En consecuencia, Mohammadi y Motaghian (2011) encontraron índices de estabilidad para diámetros medianos (1-2 mm) y pequeños (< 2 mm) de 23 y 14% respectivamente para los cuales obtuvo altos coeficiente de variación (65 y 68%).

La tasa de infiltración de agua en el suelo es una de las propiedades hidrofísicas de mayor importancia para los sistemas productivos con o sin riego (Machiwal et al., 2006). Gracias al estudio del comportamiento del movimiento vertical y horizontal del agua en el suelo, es posible diseñar sistemas de riego eficientes, en los cuales se pueda aplicar láminas de riego que en su gran mayoría se infiltren y no se pierdan por escorrentía o puedan causar daño por erosión y degradación del suelo (Chowdary et al., 2006; Machiwal et al., 2006; Silva, 2007)

Varios autores exponen que los patrones de vegetación dependen de la tasa de infiltración de un suelo y de la escorrentía del mismo y que a su vez este patrón de vegetación influye directamente en la cantidad y la variabilidad espacial de la infiltración en determinada área (Arnau-Rosalen et al., 2008; Van Schaik, 2009). Por lo anterior, el estudio de la variabilidad permitirá implementar prácticas de riego por sitio específico con el fin de gestionar sosteniblemente el recurso agua.

Varios autores han tratado de correlacionar la infiltración con propiedades como textura, densidades y porosidad (Silva et al., 2007). Así pues, en dichos estudios se ha podido concluir que el contenido de arcilla tiene una correlación inversa a la tasa de infiltración y la densidad aparente, y estrecha relación con la porosidad (Machiwal et al., 2006; Rodríguez-Vásquez et al., 2008).

El tráfico de maquinaria agrícola y el pisoteo de animales puede causar la compactación del suelo y una alta variabilidad en la estructura del mismo (Medina et al., 2012).

Adicionalmente, Carrara et al. (2007) exponen que dicha variabilidad puede tener tendencia espacial en dirección al tránsito de maquinaria específicamente.

### 1.3 Geoestadística

La geoestadística resuelve el problema de la predicción espacial de una variable continua en el espacio (Giraldo, 2009). La geoestadística es un método usado para describir la heterogeneidad de cualquier variable continua en el espacio (Gallardo, 2006). La geoestadística analiza la dependencia espacial de un número de datos (atributos) que corresponden a ubicaciones específicas de un área continua, con el fin de estimar y predecir el comportamiento de dichos atributos en un lugar no muestreado (Deutsch, 2006).

Matheron (2011), indica que aplicó por primera vez las técnicas geoestadísticas con el fin de estimar la distribución de oro en las explotaciones mineras en Sur África y posteriormente en la industria petrolera. Debido a las muchas aplicaciones de esta técnica en la geología, esta recibe el nombre de geoestadística, sin embargo esta técnica se ha expandido a otras disciplinas como la hidrología, monitoreo ambiental, procesamiento de imágenes de satélite y el tema de discusión del presente trabajo y las propiedades hidrofísicas del suelo.

El uso de la geoestadística en la ciencia del suelo en principio se aplicó para estimar y determinar la variabilidad de las propiedades del suelo y su comportamiento en una determinada área (Rajesh, 2003). Posteriormente, la geoestadística se aplicó para determinar problemas de contaminación en suelos, medición de la incertidumbre de la calidad física de los suelos y modelamiento de procesos espacio – temporales (Goovaerts, 1998).

El procedimiento para el análisis geoestadístico se divide en dos etapas, en la primera de ellas se analiza la estructura espacial de una propiedad continua en el espacio y posteriormente se estima el comportamiento de dichas propiedades en lugares no muestreados (Giraldo, 2002). En el primer paso, la estructura espacial se analiza a través de semivariogramas experimentales que dan cuenta de la similitud de los valores de una propiedad medida en distintos puntos, separados a una distancia determinada. Para el

segundo, por medio de la técnica de Kriging se hace uso de los parámetros del variograma experimental para interpolar los valores de la propiedad que se está estudiando.

La construcción de un semivariograma se hace a través de la representación Figura de la media de las variancias entre las mediciones de pares ordenados, separados a una distancia específica en función de dicha distancia (Gallardo, 2006). En la interpretación de los semivariogramas se parte del criterio de que a menor distancia los datos son más similares y a mayor distancia, son menos similares (Giraldo, 2002). Por esto, se espera que en la función de semivariograma a distancias pequeñas se obtenga valores en la coordenada Y (varianzas) también pequeños y conforme la distancia se incrementa, la varianza aumente hasta un punto para el cual dicha distancia ya no presenta correlación entre el par ordenado de puntos que se está analizando.

Teóricamente el semivariograma se calcula para un número determinado de pares ordenados separados a una misma distancia y a su vez se analizan diferentes distancias. En la práctica, debido a la irregularidad de los muestreos y por ende en las distancias analizadas, es común adoptar intervalos de distancias, así en el semivariograma se ve representado un valor medio de las distancia entre pares ordenados y no una distancia específica (Giraldo, 2002). Debido a lo anterior, se hace necesario el ajuste de modelos teóricos que generalicen lo observado en el semivariograma experimental. Según Warrick et al. (1986), estos modelos pueden dividirse en modelos no acotados (lineal, logarítmico y potencial) y acotados (esférico, exponencial y gaussiano), para estos últimos se garantiza que la covarianza de los incrementos es finita, por tanto es posible establecer los parámetros para la interpolación, por lo que son ampliamente usados.

Por lo general se construyen semivariograma omnidireccionales para los cuales se tiene un comportamiento isotrópico para la variable de estudio. Sin embargo, en ocasiones los semivariogramas pueden tener comportamiento anisotrópico, es decir, la variación de los valores de la propiedad es dependiente de la dirección en que esta sea medida (Goovaerts, 1999). La anisotropía puede ser geométrica o zonal, la primera de ellas se presenta cuando los semivariogramas calculados en varias direcciones tienen igual meseta pero varían en el rango, en el segundo caso todos los semivariogramas

direccionales tienen igual rango pero diferente meseta (Giraldo, 2002). En cualquiera de los casos es conveniente estudiar dicha anisotropía y establecer qué dirección tiene mayor estructura espacial, para que en la interpolación por Kriging se le de al semivariograma en dicha dirección un mayor peso ponderado.

Como segundo paso en el análisis geoestadístico, ya conociendo el comportamiento y la estructura espacial de la propiedad de estudio, se aplica la técnica de interpolación de Kriging. Esta técnica se basa en los parámetros del semivariograma isotrópico y anisotrópico, para obtener una capacidad de predicción de la variable en los puntos no muestreados (Gallardo, 2006). Según Petitgas (1996), los pesos asignados a los valores muestrales en la técnica del Kriging son propiamente determinados por la estructura espacial de correlación establecida en la construcción de los semivariogramas experimentales y por la configuración de muestreo.

La técnica de interpolación de Kriging encierra un conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamenta en la minimización del error cuadrático medio de predicción (Giraldo, 2002; Goovaerts, 1999). El tipo de predictor usado en la interpolación por Kriging puede ser lineal (simple, ordinario o universal) o no lineal (indicador, probabilístico, Log normal y disyuntivo). Los primeros predictores son los mejores linealmente insesgados, condición en la cual la esperanza  $E$  de un predictor es igual a la esperanza  $E$  de la variable.

En los predictores lineales se parte del supuesto de que se puede estimar el valor de una variable en un punto no muestreado a través de la combinación lineal de las  $n$  variables aleatorias con un peso o ponderación para cada una, el cual se estima en función de la distancia del punto muestreado y el punto donde se hará la predicción (Giraldo, 2002). En la estimación de los pesos ponderados se busca que estos minimicen la varianza del error de predicción, característica que hace de la técnica de interpolación de Kriging la más adecuada.

Para la interpolación de Kriging se conocen dos métodos, puntual o por bloques. En la interpolación puntual se estima el valor de una variable en un punto específico, mientras que el análisis de bloques busca el valor promedio de puntos en un área alrededor del punto que se está analizando, generalmente este último método correlaciona mejor con

los valores verdaderos siendo más exacto que la interpolación puntual (Isaaks y Srivastava, 1989).

Con el fin de evaluar el ajuste del modelo del semivariograma escogido y por tanto de la interpolación de los datos, se hace una validación cruzada. Este método consiste en eliminar un dato muestreado y con los valores restantes y el modelo de semivariograma escogido volver a hacer Kriging al valor de la variable de estudio en el punto que se excluyó, esto se hace con todos los valores muestreados (Gallardo, 2006). El objetivo de la validación cruzada según Giraldo (2002), es obtener un conjunto de errores de predicción estimados para diferentes modelos de ajuste y seleccionar aquel que optimice algún criterio como por ejemplo el del mínimo error cuadrático medio o también hacer un ajuste cualitativo mediante la representación en un gráfico de los valores muestreados y los estimados, en el cual la nube de puntos resultante debe aproximarse a una línea que pasa por el origen.

La estadística y geoestadística multivariada permite establecer el comportamiento en conjunto de un grupo de variables (Jaramillo-Jaramillo, 2016). Según Bourennane et al. (2004), podemos entender las relaciones complejas entre las propiedades del suelo a través de medidas cuantitativas provenientes de un análisis estadístico y geoestadístico multivariado, y de esta forma poder formular hipótesis a cerca de verdaderamente cual es la causa de la variabilidad de una propiedad en un área de estudio determinado (Jaramillo et al., 2011).

El análisis multivariante estudia un conjunto de datos y provee información de las relaciones entre los mismos de forma que la estadística convencional no puede hacerlo. Por esto, el análisis y la interpretación de los resultados del análisis multivariante de las propiedades del suelo permitirá tomar decisiones integrales en cuanto al manejo del mismo (Anggelopoulou et al., 2013).

El análisis factorial, análisis por componentes principales y el análisis clúster son métodos de análisis que determinan nuevas variables no correlacionadas entre sí, que son una combinación lineal de las variables originales de estudio (Vasu et al., 2016), reduciendo así la dimensionalidad del análisis y determinando aquellas variables que

determinan la variación en el suelo para que estas sean tenidas en cuenta en el momento de calificarlo (Uyan, 2016).

Las técnicas estadísticas multivariadas basadas en los métodos de interdependencia han sido estudiadas y aplicadas en muchos estudios del suelo. Guastaferró et al. (2010) estimaron el número de propiedades físicas y químicas del suelo que deben ser tenidas en cuenta para definir zonas de manejo homogéneo en agricultura de precisión por medio del análisis de componentes principales. También, Jaramillo-Jaramillo (2016) por medio del análisis factorial encontró que propiedades químicas como el calcio, magnesio, pH y el contenido de arcilla eran las variables determinantes para definir zonas homogéneas de fertilidad.

Entre las propiedades del suelo estudiadas en el presente trabajo se tienen algunas que describen su comportamiento a través de una función como la retención de humedad, resistencia mecánica a la penetración (RMP) y la infiltración. Estas tres propiedades, al ser datos funcionales, podrán analizarse a través del análisis funcional de datos y ser predichos y descritos espacialmente a través de la geoestadística funcional (Giraldo, 2009).

En la geoestadística funcional cada observación corresponde a una función real medida definida como  $x_i(t)$  donde  $t$  corresponde a un intervalo de tiempo real y por lo tanto  $x_i$  es un punto en alguna función del espacio  $H$  (Ramsay y Dalzell, 1991). Por lo anterior, se entiende que inicialmente se tienen datos discretos correspondientes a un segmento de tiempo dentro de un intervalo de tiempo considerado para la ejecución de cada prueba o ensayo. Sin embargo, para hacer análisis estadístico funcional es necesario llevar este conjunto de datos discretos a un conjunto de funciones que han sido suavizadas a través de técnicas no paramétricas, como por ejemplo a través de regresiones Kernel o por bases de B-splines (Cortés-D, 2015).

Los datos funcionales pueden ser suavizados a través de bases de funciones (B-Splines) las cuales consisten en un conjunto de funciones linealmente independientes que mediante una combinación lineal de estas y un parámetro de expansión en la interpolación se pueden definir curvas con un error admisible (Caballero, 2011).

La predicción de curvas que describen el comportamiento de RMP ha sido estudiada anteriormente mediante la geoestadística funcional. Giraldo (2009) analizó el comportamiento de 32 curvas experimentales de RMP en el Centro Agropecuario Marengo, que fueron ajustadas a través de bases de B-splines y predichas en sitios no muestreados a través del predictor Kriging Funcional. Cortés-D et al. (2016), también aplicó el análisis estadístico y geoestadístico funcional de propiedades hidrofísicas de los suelos en oxisoles y andisoles, obteniendo coeficientes de validación cruzada mayores al 90%, indicando que más del 90% del fenómeno o del comportamiento de cada propiedad era explicada por los modelos propuestos.

## 2. Metodología

### 2.1 Caracterización de la zona de estudio

El Centro de Investigación Agropecuario Marengo (CAM) se desempeña como centro académico, de investigación, de extensión y producción agropecuaria de la Universidad Nacional de Colombia en su sede Bogotá. Este Centro de Investigación permite a los estudiantes materializar y poner en práctica los conocimientos adquiridos en la academia con el fin de acercarse a la realidad del sector agropecuario y así poder formar profesionales integrales.

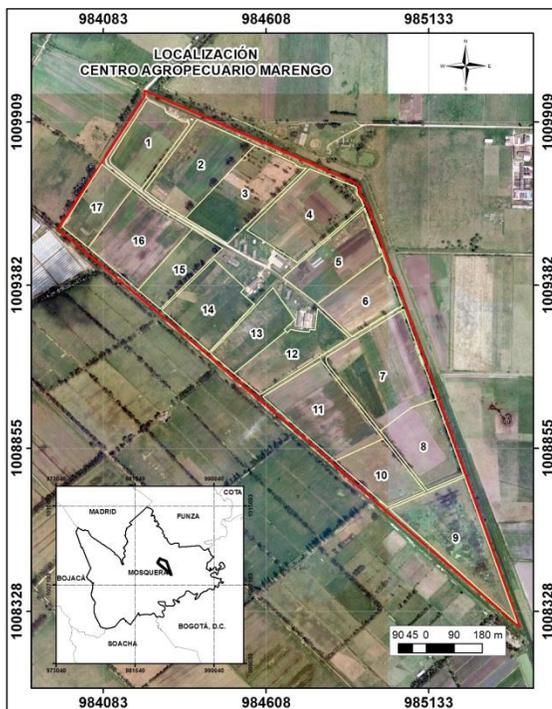
El centro agropecuario se encuentra ubicado en el municipio de Mosquera – Cundinamarca con coordenadas geográficas 4° 42´ de latitud norte, 74° 12´ de longitud oeste y una altitud entre los 2,539 y 2,542 msnm. Este centro se encuentra subdividido en 17 lotes (**Figura 2-1**) con una extensión total de 94,55 ha de las cuales 79,51 ha corresponden al área neta de los lotes y 15,04 corresponde a pantanos, vías, canales y construcciones (Ordóñez y Bolívar, 2014).

En cuanto a las características del medio natural, la distribución de lluvias es de tipo bimodal con picos en los meses de mayo a junio con una media de 128 mm y otro de octubre a noviembre con una media de 156 mm (Ordóñez y Bolívar, 2015). La temperatura media en la zona de estudio es de 12,7 °C, con 19 y 6,5°C de temperatura máxima y mínima respectivamente, presentándose las mayores variaciones en los meses de enero y diciembre que junto con vientos débiles y condiciones de baja humedad relativa favorecen la presencia de heladas.

De acuerdo a lo anterior, la zona estudiada por características de precipitación y temperatura se clasifica como zona de vida según Holdrige como bosque seco montano bajo (bs-MB) y por clima como Frío Seco (FS).

Los suelos del CAM han sido formados a partir de tres tipos de materiales parentales a saber, arcillas lacustres, cenizas volcánicas y sedimentos aluviales. El tipo de relieve corresponde a terrazas y planos de inundación específicamente en planos de terraza y planos de desbordamiento como forma del terreno respectivamente.

**Figura 2-1:** Ubicación del Centro Agropecuario Marengo y distribución de lotes



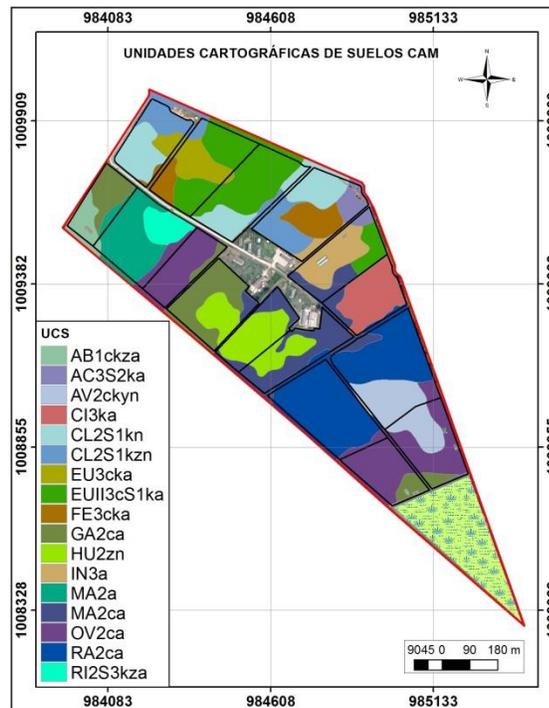
Fuente: IGAC, 2015

Según Ordóñez y Bolívar (2015), el área de estudio corresponde a tres órdenes de suelos, Inceptisoles, Mollisoles y Andisoles, con una participación de 59, 28 y 13% del área de lotes respectivamente. Los inceptisoles se caracterizan por su grado medio a bajo de evolución, presentan epipedones úmbricos, ócricos y algunos mólicos. Los mollisoles presentan en algunos de sus horizontes altos contenidos de sodio y en la mayoría de sus componentes condiciones de endosaturación y episaturación y finalmente los Andisoles son profundos y bien drenados.

Adicionalmente, el régimen de humedad para el 72% de los suelos es ácuico presentando moteos (reducción) asociados al drenaje imperfecto o pobre de los planos de inundación, donde el 28% corresponden a suelos con régimen de humedad ústico ubicados en los sitios con mayor altitud generalmente en geformas de planos de

terrazza, en la **Figura 2-2**: Mapa de suelos del Centro Agropecuario Marengo se puede observar el mapa de suelos del CAM y la clasificación taxonómica en el anexo A.

**Figura 2-2:** Mapa de suelos del Centro Agropecuario Marengo

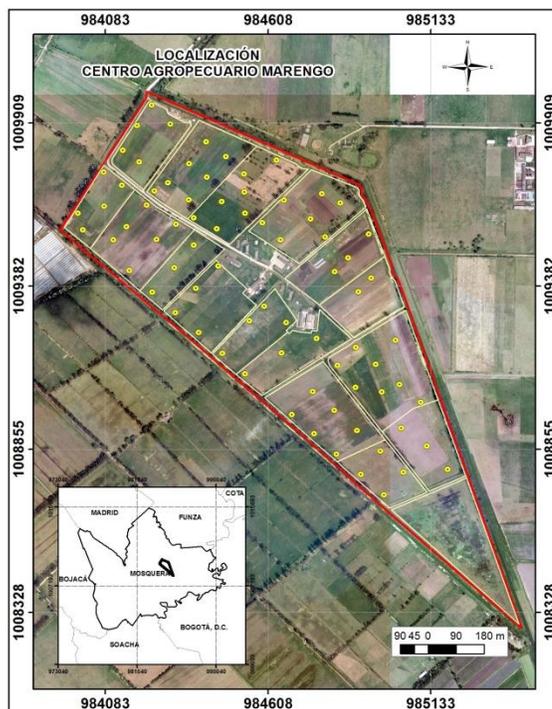


Fuente: IGAC, 2015

## 2.2 Toma de muestras y análisis de laboratorio

Se realizaron pruebas de campo y muestreo para análisis de laboratorio por medio de cajuelas en 77 sitios georeferenciados con GPS cubriendo el área neta de lotes del CAM como se observa en la **Figura 2-3**.

En cada sitio se hizo una cajuela, en la cual se tomaron muestras de los dos primeros horizontes según la profundidad descrita en las UCS del estudio semidetallado del CAM realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Anexo B). Para realizar las pruebas físicas de laboratorio y en el mismo sitio se realizaron las pruebas físicas de campo (**Tabla 2-1** **Tabla 2-1**: Análisis de laboratorio y pruebas físicas realizadas en cada punto de muestreo **Tabla 2-1**).

**Figura 2-3:** Distribución de puntos de muestreo

De los 77 puntos muestreados, la información de 16 cajuelas fue proporcionada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi dentro el proyecto del levantamiento agrológico del Centro Agropecuario Marengo (CAM) realizado por Napoleón Ordóñez y Adriana Bolívar durante los años 2012 a 2015

Las 61 cajuelas restantes fueron muestreadas en el marco del presente proyecto en tres jornadas, noviembre de 2014, y febrero y diciembre de 2015. Los códigos F02, F03, F04, F06, F07 y F12 corresponden a los códigos asignados por el laboratorio nacional de suelos, lugar donde fueron realizadas la mayor parte de las pruebas de laboratorio y las curvas de retención de humedad fueron realizadas en el laboratorio de riego por goteo de el departamento de Ingeniería Civil y Agrícola.

**Tabla 2-1:** Análisis de laboratorio y pruebas físicas realizadas en cada punto de muestreo

Análisis	Método	Parámetros
<b>Curva de retención de Humedad</b>	Ollas de presión (0, 101,97, 305,92, 611,85, 1019,74, 3059,23, 5098,72, 10197,44, 15296,16 cm H <sub>2</sub> O)	CC (Capacidad de Campo) PMP (Punto de Marchitez permanente) AA ( Agua Aprovechable)
<b>F02: Densidad Aparente</b>	Terrón parafinado	d <sub>a</sub>
<b>F03: Densidad Real</b>	Picnómetro	d <sub>r</sub>
<b>F04: Textura</b>	Pipeta	A (Arena) L (Limo) Ar (Arcilla)
<b>F06: Estabilidad de agregados</b>	Método de Yoder	DMP (Diámetro Medio Ponderado) IEA (Índice de Estado de Agregación) Calificación
<b>F07: Límites de Atterberg</b>	Cazuela de Casagrande	LL (Límite líquido) LP (Límite Plástico) IP (Índice de Plasticidad)
<b>F12: Infiltración</b>	Anillos de Muntz	Ajuste Kostakiov: a, b, t <sub>b</sub> (tiempo básico) e i <sub>b</sub> (infiltración básica) Ajuste Philip: S (Sortividad) y K <sub>s</sub> (Conductividad hidráulica saturada)
<b>Resistencia Mecánica a la Penetración</b>	Penetrologger Eijkelkamp	RMP
<b>Carbono Orgánico</b>	Walkley Black	CO

## 2.3 Procesamiento de datos

Los análisis de laboratorio fueron organizados en una tabla de Excel según horizonte con la información de identificación, ubicación y cada uno de los análisis de laboratorio. El ajuste a modelos teóricos de propiedades funcionales, como la retención de humedad y la infiltración de agua en el suelo se presentan a continuación.

### 2.3.1 Retención de humedad

Se obtuvieron las curvas de retención de humedad calculadas a partir de 8 tensiones (0, 101,97, 305,92, 611,85, 1019,74, 3059,23, 5098,72, 10197,44, 15296,16 cm H<sub>2</sub>O). Estas curvas se ajustaron al modelo teórico de Van Genuchten (1980), la cual relaciona el grado de saturación efectivo (Se) con la succión h (**Ecuación 2-1**). El ajuste se realizó mediante el programa RETC (Van Genuchten et al., 2009).

**Ecuación 2-1** 
$$S_e = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (ah)^n]^m}$$

Donde:

$\theta_r$ : Contenido volumétrico de agua residual ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )

$\theta_s$ : Contenido volumétrico de agua saturado ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )

$h$ : Succión ( $\text{cm H}_2\text{O}$ )

$a, n, m$ : Parámetros adimensionales de ajuste, donde  $m = 1 - (1/n^{-1})$

El contenido de humedad a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) como el contenido de humedad a una succión de 305,92 y 15296,16  $\text{cm H}_2\text{O}$  respectivamente (Forero, 2001).

Adicionalmente se calcula el agua aprovechable (AA) en el suelo como se muestra en la **Ecuación 2-2** (Forero, 2001):

**Ecuación 2-2** 
$$AA(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}) = CC(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}) - PMP(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$$

### 2.3.2 Porosidad

Se calculó la porosidad total (PT), macroporos y microporos de acuerdo a los parámetros de la CRH y la densidad aparente ( $d_a$ ) como se muestra en las **Ecuación 2-3**, **Ecuación 2-4** y **Ecuación 2-5**. (IGAC, 2014):

**Ecuación 2-3:** 
$$PT(\%) = \left(1 - \frac{d_a}{d_r}\right) 100$$

**Ecuación 2-4:** 
$$\text{Macroporos}(\%) = (\theta_s - CC) * \left(\frac{PT}{\theta_s}\right)$$

**Ecuación 2-5:** 
$$\text{Microporos}(\%) = PT - \text{Macroporos}$$

### 2.3.3 Infiltración de agua en el suelo

Las curvas experimentales de infiltración acumulada se ajustaron por el método de optimización de variables con el software estadístico R 3.1.2 a los modelos propuestos por Kostakov (1932), y Philip (1957), ecuaciones que se describen a continuación:

**Ecuación 2-6:** 
$$i = at^b$$
 Modelo de Kostakov

**Ecuación 2-7:** 
$$I = S t^{\frac{1}{2}} + K_s t$$
 Modelo de Philip

Donde:

$I$ : Infiltración acumulada como una función del tiempo (cm)

$t$ : Tiempo transcurrido (min)

$a, k$ : Coeficiente que representa la velocidad de infiltración cuando  $t = 1$

$b, c$ : Parámetro adimensional.

$f_0$ : Infiltración básica ( $\text{cm min}^{-1}$ )

$K_s$ : Conductividad hidráulica ( $\text{cm h}^{-1}$ )

$S$ : Sortividad ( $\text{cm h}^{-1/2}$ )

La velocidad de infiltración (**Ecuación 2-8**) se obtiene con la primera derivada de la ecuación de infiltración acumulada:

**Ecuación 2-8:** 
$$I \left( \frac{\text{cm}}{\text{h}} \right) = 60 a b t^{(b-1)}$$

La velocidad de infiltración básica según el servicio de conservación de suelos SCS para el modelo de Kostakiov, la infiltración básica  $i_b$  (**Ecuación 2-9**) se alcanza en el tiempo básico  $t_b$  (**Ecuación 2-10**) definido como el -0,1 de la velocidad de infiltración.

**Ecuación 2-9:** 
$$i_b = 60 a b t^{(b-1)}$$

**Ecuación 2-10:** 
$$t_b = -600 (b - 1)$$

## 2.4 Análisis de datos

Inicialmente se realizó la limpieza y detección de errores o datos atípicos en el conjunto de datos por medio de la representación Figura de frecuencias (histogramas) y diagramas de cajas. También se realizaron las representaciones de probabilidades normales de cada propiedad con los gráficos Q-Q Plot, partiendo del hecho de que las técnicas geoestadísticas funcionan mejor si la distribución de los valores de una propiedad de estudio se acercan a una distribución normal o Gaussiana (Gallardo y Maestre, 2008).

A continuación, se estimaron los parámetros estadísticos descriptivos básicos como media, mediana, mínimo, máximo, asimetría y curtosis con el fin de comprobar la normalidad de la distribución de cada propiedad; adicionalmente, se estimó el coeficiente de variación CV, y se analizó la variabilidad de las propiedades de acuerdo a la clasificación hecha por Warrick y Nielsen (1980), en la que se tiene que suelos con CV

menor a 12% se considera una variabilidad baja, entre 12 y 60% se tiene una variabilidad media y finalmente para un CV mayor a 60% una variabilidad alta. Este análisis estadístico descriptivo se realizó mediante el software SPSS v.20.

Posteriormente por medio del uso de la geoestadística se determinó la estructura y el grado de dependencia espacial de las propiedades en análisis mediante la construcción de semivariogramas experimentales. Dichos semivariogramas fueron ajustados a modelos teóricos acotados como el esférico, exponencial y Gaussiano donde se generalizó lo observado en el semivariograma experimental (Warrick y Nielsen, 1980).

La estructura espacial fue estudiada a partir de tres parámetros, pepita ( $C_0$ ), meseta ( $C_0+C_1$ ) y el alcance (A) los cuales se obtuvieron a través del semivariograma. La pepita ( $C_0$ ) muestra la dependencia espacial no manifestada durante el análisis, la meseta ( $C_0+C_1$ ) muestra el valor de la semivarianza cuando esta se vuelve constante y el modelo teórico se hace estable, por último el alcance (A) señala hasta qué punto o distancia existe una dependencia espacial entre las observaciones (Garzón-Gutiérrez et al., 2010). Adicionalmente, el grado de dependencia espacial (GDE) se estableció mediante la relación entre el efecto pepita y la meseta ( $C_0 / (C_0+C_1)^{-1}$ ) y según Cambardella et al. (1994), si esta es superior al 75% se considera que la dependencia es fuerte, moderada para valores entre 25% y 75% y débil cuando es inferior al 25%.

Finalmente se estimó la distribución espacial de las propiedades estudiadas y su valor para puntos no muestreados mediante la técnica de interpolación de Kriging, la cual encierra un conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamenta en la minimización del error cuadrático medio de predicción (Giraldo, 2002; Goovaerts, 1999). En este proceso se usan predictores lineales que parten del supuesto de que se puede estimar el valor de una variable en un punto no muestreado, a través de la combinación lineal de las  $n$  variables aleatorias, con un peso o ponderación para cada una, el cual se estima en función de la distancia del punto muestreado y el punto donde se hará la predicción (Giraldo, 2002). En la estimación de los pesos ponderados se busca que estos minimicen la varianza del error de predicción, característica que hace de la técnica de interpolación de Kriging la más adecuada.

Para la construcción de los semivariogramas, el ajuste de los mismos y la determinación de sus correspondientes parámetros y la generación de mapas de contorno de las propiedades, se usó el software GS+ (Gamma Design), el cual realiza el proceso de ajuste con base en 3 criterios de selección que son el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), la menor suma de las diferencias al cuadrado (SQR) y el coeficiente de validación cruzada (CVC). Por último, se realizaron los mapas de distribución espacial para las propiedades hidrofísicas estudiadas en el software ArcGis.

Las propiedades de retención de humedad, resistencia mecánica a la penetración (RMP) e infiltración, son descritas por funciones. A pesar de haber obtenido parámetros de las curvas de infiltración ( $t_b$  e  $i_b$ ), AA, Macrop y Microp a partir de las curvas de retención de humedad, y la RMP para cada centímetro hasta una profundidad de 40 cm mediante la geoestadística clásica, sería inviable y poco práctico realizar un ajuste de modelo de semivariograma y un predictor Kriging, para cada profundidad o tiempo de lectura (Cortés-D et al., 2016).

Como una solución a lo anterior, se aplicaron técnicas de suavizado e interpolación para posteriormente aplicar técnicas geoestadísticas funcionales propuestas por Giraldo et al. (2010) con las cuales es posible predecir una curva que describa el comportamiento de una determinada propiedad a partir de datos discretos medidos en campo.

De lo anterior, para las propiedades definidas por funciones, se definieron curvas experimentales a trozos que se unieron de forma suave, formando curvas completas diferenciables que tiene un ajuste óptimo y próximo a los modelos base, de los cuales se parte la interpolación (Bases B-Splines) (Martínez, 2015).

Con las curvas suavizadas se usó el predictor Kriging Funcional y la metodología propuesta por Giraldo et al. (2010), donde cada una de las curvas suavizadas fue retirada y predicha nuevamente. El Kriging funcional estima una curva en un punto observado a partir de dos parámetros ( $s$  y  $\lambda$ ) que dan la influencia de cada curva observada a la curva que se predice (Giraldo et al., 2010). Con lo anterior se realizó un proceso de validación cruzada en el que se comparó la curva observada y suavizada a través de bases B-Splines y la predicha con el fin de evaluar la eficacia del método (Cortés-D, 2015).

El suavizado de curvas y la predicción con Kriging funcional se hicieron implementando la rutina propuesta por Giraldo et al, (2010) y aplicada y modificada por Cortés-D et al. (2016) mediante el uso del software libre R Project.

En la presente tesis se hizo un análisis multivariado para definir zonas homogéneas físicas, para lo cual se aplicaron técnicas de análisis estadístico multivariado, el cual permitió hacer un estudio simultáneo de las propiedades del suelo, ayudando a entender de una forma integral la forma en que estas se comportaron en el espacio, (Aggelopoulou et al., 2013; Rong-Jiang et al., 2014; Jaramillo-Jaramillo, 2016; Raiesi, 2016).

Las zonas de manejo se delimitaron por medio de dos métodos: análisis clúster (AC) y el Índice de Suelo (IS) a través del análisis por componentes principales (ACP). El AC divide un conjunto de puntos en n grupos llamados “clústers” los cuales son agrupados según el comportamiento de las variables en todos los puntos de estudio. Los grupos resultantes son similares entre sí y disimiles con los demás (Lark, 1998; Ortega y Santibañez, 2007; Ferreira, 2011).

Una de las técnicas de agrupación en el AC es la agrupación por k-means, usada frecuentemente en la minería de datos (Martín, 2011; Xia, et al., 2015), esta se basa en la búsqueda de un centroide común para varios puntos, que se agruparan en un clúster (Ferreira, 2011). Una vez se han clasificado los 77 puntos de muestreo en un grupo, estos se especializaron y se mapearon manualmente.

En el ACP se busca reducir el número de variables identificando aquellas que definen y explican la varianza en un conjunto de datos (Raiesi, 2016), a través de componentes principales no correlacionados entre sí (Vasu, et al., 2016). La elección de los componentes principales que describen mejor la variabilidad de un suelo, son aquellos que tienen autovalores altos, generalmente mayores de 1 (Brejda et al., 2000; Rong-Jiang et al., 2014).

El índice de suelo ha sido usado por muchos autores en la delimitación de zonas homogéneas de manejo e índices de calidad en distintos cultivos (Ortega y Santibañez, 2007; Camacho-Tamayo et al., 2013; Uyan, 2016; Vasu, 2016); este método consiste en calcular un índice para cada punto de muestreo en el que se califican aquellos

componentes principales que explican la varianza en el conjunto de datos y la participación de cada punto de muestreo de dicha varianza (**Ecuación 2-11**) (Ortega y Santibañez, 2007):

**Ecuación 2-11:**

$$IS_z = \sum w_i P_{zi}$$

Dónde:

$IS_z$ : Índice de suelo en la posición z.

$w_i$ : Peso de la variable estandarizada.

$P_{zi}$ : Factor score de la variable estandarizada.

Una vez se han calculado los índices de suelo para cada punto, se espacializaron y se interpolaron con la herramienta Spline o Topo to Raster en el software ArcGis. Posteriormente se clasificaron en 4 grupos, según la distribución estadística del IS en base a la media y la desviación estándar.

Posteriormente se consolidó una geodatabase en el software ArcGis con las superficies de distribución de cada propiedad y las zonas homogéneas definidas por cada método.

## 3. Análisis de resultados

### 3.1 Caracterización de las propiedades

#### 3.1.1 Análisis univariado de propiedades

En las **Tabla 3-1** y **Tabla 3-2** se puede observar los estadísticos descriptivos para las variables discretas en estudio en los dos horizontes. En general, podemos observar que el coeficiente de variación de las propiedades indica en principio poca variabilidad en los suelos.

**Tabla 3-1:** Estadísticos descriptivos de propiedades discretas para H1.

	$d_a$ (g cm <sup>-3</sup> )	$d_r$ (g cm <sup>-3</sup> )	A (%)	L (%)	Ar (%)	DMP (cm)	IEA (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CO (%)
<b>Media</b>	1,11	2,31	10,84	44,33	44,49	3,43	80,41	62,49	32,95	28,66	4,31
<b>Mediana</b>	1,13	2,31	11,06	44,58	43,12	3,59	82,99	60,48	32,03	27,35	3,90
<b>Desv. típ.</b>	0,14	0,07	2,65	7,18	8,25	1,06	11,57	10,51	6,17	5,62	2,11
<b>Asimetría</b>	-0,36	-0,02	-0,39	0,11	0,10	-0,32	-1,29	1,41	0,75	1,03	0,98
<b>Curtosis</b>	-0,34	0,28	1,11	0,00	-0,48	-0,30	1,60	2,59	0,63	0,47	1,71
<b>Mínimo</b>	0,77	2,12	3,83	26,56	23,22	1,08	42,90	46,00	22,00	20,00	0,53
<b>Máximo</b>	1,39	2,50	18,65	65,15	62,98	5,75	95,46	97,12	53,91	43,41	12,30
<b>CV (%)</b>	12,77	3,06	24,39	16,19	18,55	30,96	14,39	16,82	18,74	19,61	48,96

Las clases texturales de los suelos son heredadas por el material que dio origen a dicho suelo, partiendo del hecho que el CAM presenta tres tipos de materiales parentales (arcillas lacustres, ceniza volcánica y depósitos aluviales finos) (Ordoñez y Bolívar, 2015), se esperaba una alta a moderada variabilidad en las fracciones de tamaño de partícula, hecho que se confirma con los CV cercanos al 30%. Adicionalmente, las fracciones limo y arcilla predominan sobre la fracción arena (44,33, 44,49 y 10,84% respectivamente) correspondiendo así también a la geomorfología (planos de terraza, planos de inundación y plano de desborde).

**Tabla 3-2:** Estadísticos descriptivos de propiedades discretas para H2.

	$d_a$ (g cm <sup>-3</sup> )	$d_r$ (g cm <sup>-3</sup> )	A (%)	L (%)	Ar (%)	DMP (cm)	IEA (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CO (%)
<b>Media</b>	1,10	2,35	12,83	47,85	39,02	2,78	71,24	58,11	29,95	28,16	3,41
<b>Mediana</b>	1,12	2,34	12,07	48,32	39,40	2,97	79,71	57,32	29,46	27,00	3,30
<b>Desv. típ.</b>	0,15	0,07	3,51	7,61	10,73	1,28	21,93	8,00	5,67	6,96	1,31
<b>Asimetría</b>	-0,49	-0,54	0,96	0,60	-0,69	-0,29	-1,14	-0,15	0,70	0,62	0,32
<b>Curtosis</b>	0,13	1,24	0,83	1,74	1,29	-1,05	0,16	-0,12	3,20	-0,22	-0,24
<b>Mínimo</b>	0,74	2,10	6,31	31,91	8,08	0,35	11,73	38,02	12,65	15,36	0,92
<b>Máximo</b>	1,48	2,49	22,97	72,22	60,63	4,89	94,38	75,38	52,74	45,30	7,00
<b>CV (%)</b>	13,93	2,94	27,37	15,90	27,50	46,29	30,78	13,77	18,95	24,74	38,49

En Marengo predominan las texturas finas con contenidos de arcilla superiores al 35% (**Figura 3-1**) suelos pesados, que con mal manejo pueden influir directamente en procesos de degradación del suelo como la compactación, generando así capas restrictivas al crecimiento de raíces que determinan la profundidad efectiva de un suelo. El adensamiento de un horizonte es causado por la iluviación de arcillas, proceso genético que implica el movimiento de arcillas de un horizonte superior a uno adyacente, característica que se puede ver reflejada en el incremento de arcillas en el horizonte inferior. De lo anterior, y de acuerdo a la **Tabla 3-3** en Marengo ocurre este proceso, pues los valores de la fracción arcilla para los dos horizontes de estudio son estadísticamente diferentes.

La densidad aparente osciló entre 0,77 a 1,39 g cm<sup>-3</sup> y 0,74 a 1,48 g cm<sup>-3</sup> para el primer y segundo horizonte respectivamente, valores similares a los encontrados por Gómez (2011) y Mogollón (2012), para lotes específicos dentro de la zona de estudio y los cuales según Montenegro y Malagón (1990) se clasifican desde muy bajos a medios. La variabilidad de esta propiedad es moderada (12%<CV<60%) indicando que en general esta propiedad tiene un comportamiento moderado en el área de estudio.

Malagón (2016) establece los rangos máximos óptimos para el crecimiento radicular en suelos de distintas clases texturales y en general esta clasificación indica un máximo de 1,49 g cm<sup>-3</sup> para suelos con familias texturales desde francosa-finas hasta gruesas y de 1,3 g cm<sup>-3</sup> para suelos de familias texturales finas y muy finas. Por lo anterior se puede

concluir que en Marengo la densidad aparente es una limitante para el crecimiento radicular en algunos sitios específicos, puesto que las familias predominantes son finas.

Figura 3-1: Texturas. A: Horizonte 1, B: Horizonte 2.

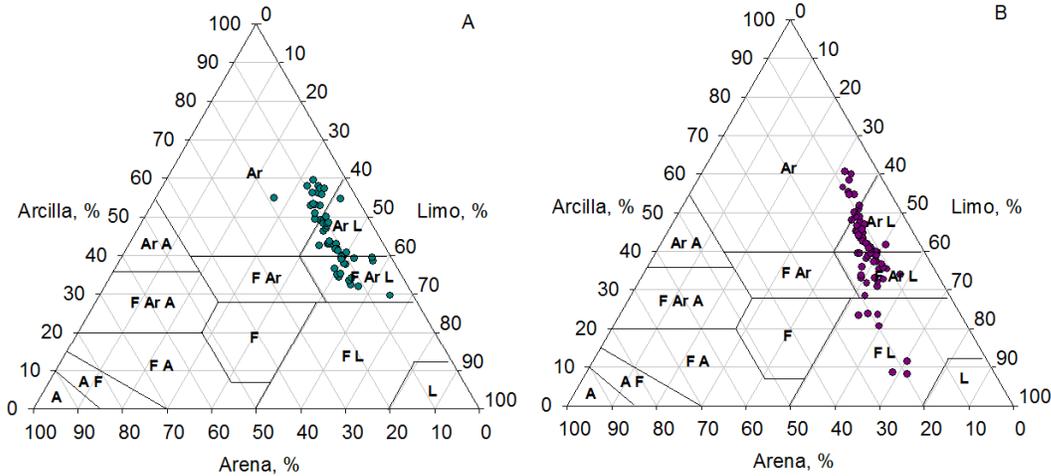


Tabla 3-3: Comparación de medias para cada una de las propiedades en H1 y H2.

	Prueba de Levene		Prueba T para la igualdad de medias						
	F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia	L. Inferior	L. Superior
da	0,195	0,659	0,667	152	0,506	0,016	0,024	-0,031	0,063
dr	0,037	0,847	-3,877	151	<b>0,000</b>	-0,044	0,011	-0,066	-0,021
A	4,725	<b>0,031</b>	-3,917	148	<b>0,000</b>	-1,988	0,508	-2,992	-0,985
L	0,079	0,780	-2,943	151	<b>0,004</b>	-3,519	1,196	-5,881	-1,156
Ar	0,705	0,402	3,538	151	<b>0,001</b>	5,472	1,547	2,416	8,527
DMP	4,787	<b>0,030</b>	3,401	150	<b>0,001</b>	0,650	0,191	0,272	1,028
IEA	26,695	<b>0,000</b>	3,225	150	<b>0,002</b>	9,171	2,844	3,552	14,789
LL	2,440	0,120	2,903	151	<b>0,004</b>	4,380	1,509	1,399	7,361
LP	1,127	0,290	3,127	151	<b>0,002</b>	2,997	0,959	1,103	4,891
IP	3,117	0,080	0,486	148	0,628	0,503	1,037	-1,545	2,552
CO	11,348	<b>0,001</b>	3,171	151	<b>0,002</b>	0,900	0,284	0,339	1,461

Al comparar las medias de las propiedades para los dos horizontes, se puede decir que la densidad aparente tuvo una distribución igual para los dos horizontes de estudio y en consecuencia el valor promedio de esta propiedad es igual tanto para H1 como para H2.

La densidad real tuvo un comportamiento normal, con una media de  $2,35 \text{ g cm}^{-3}$ , considerada una densidad real baja (Montenegro y Malagón, 1990). El coeficiente de variación es bajo, lo que indica con certeza una distribución homogénea de esta propiedad en el área de estudio.

El DMP de los agregados para H1 está entre 1,08 a 5,75 mm, los cuales expresan estructuras moderadamente estables a muy estables (Malagón, 2016). Según FAO (2000), el diámetro óptimo de agregados para la germinación de semillas es de 0,5 y 8,0 mm para suelos arcillosos. En la **Tabla 3-4**, se puede observar el porcentaje de masa de suelo que tiene un determinado DMP. Para H1 el 75% de los sitios muestreados tienen más del 70% de agregados dentro de los rangos óptimos para el desarrollo radicular. Por otra parte, para H2 los agregados se concentran en tamaño menores a 0,425 mm, esto podría representar una ventaja, pues al tener mayor superficie específica los agregados, mayor será la cantidad de nutrientes y área captada y explorada por las raíces de un cultivo ya establecido.

El tamaño de agregados para H2 (rango: 0,35 y 4,85 mm) la media 2,78 mm es estadísticamente diferente al tamaño de agregados de H1, al comparar las medias de esta propiedad (**Tabla 3-3**). El hecho de que el tamaño sea menor puede deberse principalmente a que el carbono orgánico es uno de los principales factores de agregación del suelo, y esta propiedad también es estadísticamente mayor en H1.

El estado de agregación para H1 en promedio es de 80,41 y 71,24 %, valores encontrados también por Ordoñez y Bolívar (2015). Estos porcentajes de agregación indican la porción de suelo que no se dispersó, después de haber sido sometidos a fuerzas externas, en este caso a la acción del agua. Como se dijo anteriormente, el hecho de que el carbono orgánico sea mayor en H1 indica que las fuerzas de adhesión, los enlaces y la cementación son mayores.

Sin embargo, el rango del porcentaje de agregación para los dos horizontes es amplio (42,9 – 45,96% y 11,73 – 94,78% respectivamente), lo que implica que en los lugares donde el porcentaje de agregación es más bajo, ante la acción de una precipitación fuerte, las partículas libres disgregadas podrían sellar los poros entre agregados y generar problemas de encostramiento y adensamiento. Lo anterior se puede comparar

con el hecho que alrededor del 20% de los agregados de H1 tienen un tamaño menor a 0,425 mm, **Tabla 3-4**.

**Tabla 3-4:** Distribución de tamaño de agregados para H1 y H2

Horizonte		DMP (mm)					
		8 a 6.3	6.3 a 4	4 a 2	2 a 1	1 a 0.425	< 0.425
H1	Media	17,03	19,49	18,95	13,19	10,91	20,87
	Mediana	15,69	20,06	19,58	13,01	10,11	17,01
	Desv. típ.	11,96	7,81	5,98	4,02	5,33	14,11
	Asimetría	0,81	-0,10	-0,42	0,13	0,78	1,40
	Curtosis	0,29	-0,01	-0,20	-0,34	-0,07	1,65
	Mínimo	0,00	0,48	2,74	4,84	2,05	4,54
	Máximo	53,39	38,63	31,40	23,78	24,25	69,26
	CV (%)	0,70	0,40	0,32	0,30	0,49	0,68
	Percentil 25	6,83	14,48	15,00	10,24	6,54	11,16
	Percentil 50	15,69	20,06	19,58	13,01	10,11	17,01
	Percentil 75	24,44	23,80	23,15	15,62	13,52	26,91
H2	Media	12,41	14,99	16,38	13,63	12,51	30,09
	Mediana	10,33	15,85	17,28	13,57	11,79	20,30
	Desv. típ.	10,50	8,71	8,41	5,17	5,62	23,00
	Asimetría	0,69	-0,14	-0,20	0,33	0,92	1,04
	Curtosis	-0,48	-1,01	-0,77	0,03	0,99	-0,18
	Mínimo	0,00	0,13	0,58	2,71	3,76	5,62
	Máximo	39,28	30,66	34,21	28,07	31,18	88,27
	CV (%)	0,85	0,58	0,51	0,38	0,45	0,76
	Percentil 25	3,02	6,91	8,81	10,03	7,99	11,64
	Percentil 50	10,33	15,85	17,28	13,57	11,79	20,30
	Percentil 75	21,11	21,18	22,21	16,65	16,01	45,69

Los CV para el porcentaje de agregados de cada diámetro son moderados a altos (0,3 a 0,7), lo que demuestra la necesidad de identificar las zonas con macroagregados, donde se deben hacer programas adecuados de preparación del suelo y lograr diámetros óptimos. Adicionalmente, en aquellas zonas donde la agregación y la estabilidad de los agregados es baja, implementar prácticas que faciliten la agregación y mejoren la estabilidad de la estructura del suelo.

En cuanto a la consistencia del suelo, se encontró que el LL para H1 es en promedio de 62,49 % de contenido de humedad, con un rango entre 46 y 97% y para H2 en promedio es de 58,11%, con un rango de contenidos de humedad inferiores, resultados esperados si se tiene en cuenta que estas propiedades están directamente correlacionadas con el contenido de arcilla y carbono orgánico (Stanchi et al., 2015).

Valores similares a los LL y LP encontrados en este estudio, fueron también hallados por Ordoñez y Bolívar (2015), en la misma área de estudio. Sin embargo, es necesario observar la distribución de dichos valores espacialmente con el fin de establecer zonas de mecanización homogénea, pues esta debe realizarse cerca al LP donde el suelo tiene un comportamiento plástico (Keller, 2004).

El índice de medio es de 28,66 y 28,16% para H1 y H2 respectivamente, índices que indican una alta plasticidad según Montenegro y Malagón (1990), debidos principalmente al alto contenido de arcilla, pues contenidos entre 45 y 70% de este tamaño de partícula generan índices de plasticidad entre 20 y 30% (Malagón, 2016).

El contenido de carbono orgánico para H1 y H2 en promedio es de 4,31 y 3,41% respectivamente. Es de esperarse que el CO sea mayor en H1, pues este es producto de la transformación de los materiales vegetales y animales que se incorporan al suelo. Los coeficiente de variación son moderados (0,49 y 0,38% respectivamente) y se deben principalmente a que en la zona de estudio se tienen diferentes usos y prácticas agrícolas que incorporan diferencialmente material orgánico del suelo.

### **3.1.2 Análisis funcional de propiedades**

#### **Infiltración de agua en el suelo**

De acuerdo con la **Tabla 3-5**, se verifica que los dos modelos evaluados presentan un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) alto, por lo que podría decirse que el comportamiento de la infiltración de los suelos de estudio se puede generalizar con cualquiera de estos. Sin embargo, para el modelo de Philip se encontró que cerca del 16% de las curvas presentaron valores negativos para  $K_s$ , lo cual no tiene razón física, pues como se había explicado anteriormente, este parámetro está muy asociado a la velocidad de infiltración

básica. De acuerdo con Campano (2014), esto ocurre debido a la imposibilidad que tiene el modelo de precisar una  $K_s$  cuando el ensayo se ha terminado justo al inicio de la saturación del suelo.

**Tabla 3-5:** Estadísticos descriptivos de los parámetros de los modelos de ajuste para la infiltración de agua en el suelo.

	Kostiakov					Philip		
	a	b	$t_b$ (min)	$i_b$ ( $\text{cm h}^{-1}$ )	$R^2$	S ( $\text{cm h}^{-1/2}$ )	$K_s$ ( $\text{cm h}^{-1}$ )	$R^2$
<b>Media</b>	4,17	0,66	204,12	24,30	1,00	35,04	16,60	0,99
<b>Mediana</b>	2,35	0,68	191,69	14,99	1,00	22,53	9,74	1,00
<b>Desv. típ.</b>	5,06	0,13	80,82	24,37	0,01	36,69	24,54	0,01
<b>Asimetría</b>	2,45	-0,37	0,37	1,49	-3,02	1,73	0,94	-2,16
<b>Curtosis</b>	7,54	-0,25	-0,25	1,84	12,19	3,36	1,42	5,19
<b>Mínimo</b>	0,07	0,35	2,29	0,24	0,96	0,79	-45,27	0,97
<b>Máximo</b>	28,39	1,00	390,69	111,74	1,00	180,75	97,91	1,00
<b>CV (%)</b>	121,38	20,41	39,59	100,29	0,71	104,68	147,79	0,66

No obstante, según el mismo autor el modelo de ajuste de la infiltración propuesto por Kostiakov-Lewis también presenta valores negativos en su parámetro  $f_0$  y concluyó que al encontrar en menos cantidad valores negativos para el modelo de Philip se podría decir que el modelo de Philip es más representativo cuando los tiempos de los ensayos son relativamente cortos, pues estos valores negativos de  $K_s$  presentaron en curvas cuyos  $t_b$  según el modelo de Kostakov, duplicaba el tiempo de la prueba, es decir, valores de  $t_b$  cercanos o mayores a 300 minutos para el presente estudio.

En el modelo de Kostakov se encontró que la media del tiempo básico supero al tiempo de ejecución de la prueba en campo, aproximadamente en un 30%, situación que encontró también Orjuela-Matta et al. (2010), donde este infiere que los ensayos terminaron antes de la saturación del suelo y debido a esto se encuentra una variabilidad alta en los parámetros de los modelos.

Las curvas de infiltración acumulada se clasificaron en 4 grupos según el contenido de arcilla y la familia textural como se muestra en la **Tabla 3-6**.

**Tabla 3-6:** Grupos de análisis según el contenido de arcilla.

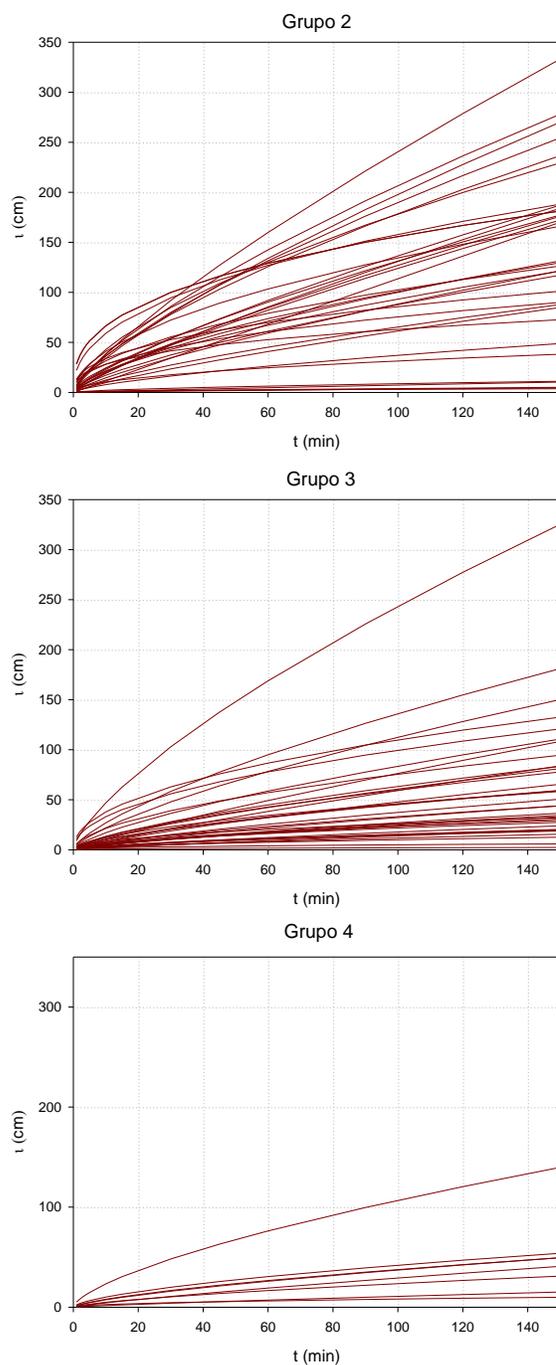
Grupo/ Familia textural	1	2	3	4
	%Ar>60	60>%Ar>45	45>%Ar>35	%Ar<35
	Muy Fina	Fina	Fina	Francosa- fina
H1	1	33	35	8
H2	2	17	36	22

En la **Figura 3-2**, se pueden observar las infiltraciones para cada uno de los tres grupos. En cuanto a la infiltración acumulada, se puede observar una marcada diferencia en cada grupo de curvas, siendo las correspondientes a las texturas con mayor contenido de arcilla aquellas que alcanzaron una mayor lámina infiltrada en un tiempo de 150 min.

Lo anterior puede deberse principalmente a que al ser suelos de texturas arcillosas, estas sufren procesos de contracción cuando sus contenidos de humedad son bajos. Por tanto, se supone que una vez ha iniciado la infiltración, estas grietas son las primeras en saturarse almacenando grandes contenidos de agua y posteriormente se satura el espacio poroso del suelo.

Adicionalmente, puede asumirse que al tener un suelo mayor contenido de arcilla (coloide), esta ayudará en la estructuración, la estabilidad y la construcción del sistema poroso, razón por la cual se espera que en estos suelos pueda infiltrarse mayor contenido de agua, almacenarse dentro del perfil y evitar problemas de encharcamientos ante eventos de fuertes precipitaciones.

La velocidad de infiltración de agua en el suelo es un parámetro usado para evitar problemas de encharcamiento durante la aplicación del riego. En la **Figura 3-2**, se puede ver que para la mayoría de las curvas del grupo 2, la infiltración básica no fue alcanzada, pues para un tiempo de 150 min aún presenta una pendiente fuerte (mayor al 10%, lo que comprueba el hecho que las infiltraciones fueron concluidas antes de alcanzar el punto de saturación del suelo ( $t_b = 204,12$  min)).

**Figura 3-2:** Infiltración acumulada para tres grupos de estudio.

Por el contrario, el comportamiento del grupo 4 indica que han llegado a una infiltración acumulada casi constante, donde la pendiente de la curva es leve y la infiltración acumulada es significativamente menor que la de los suelos de texturas más arcillosas

(hasta 60 cm aproximadamente). Esta situación es contraria a la planteada inicialmente, pues se espera que suelos más arenosos infiltren una mayor cantidad de agua, ya que presentan mayor cantidad de macroporos que drenan el agua gravitacional rápidamente. Este podría ser un indicador de compactación del suelo donde se ha reducido el espacio poroso y tanto la infiltración como la conductividad es lenta.

Según la clasificación hecha por Montenegro y Malagon (1990), la  $i_b$  media para los suelos de estudio es rápida a muy rápida y de acuerdo a lo que se esperaba presenta también  $K_s$  rápida según la clasificación dada por USDA.

### **Retención de agua en el suelo.**

Las curvas de retención de humedad fueron ajustadas al modelo empírico de Van Genuchten (1980). En la tabla **Tabla 3-7: Estadísticos descriptivos para los parámetros de ajuste al modelo de Van Genuchten.** **Tabla 3-7** se muestran los parámetros del modelo. Se observa que los parámetros son similares para los dos horizontes.

El factor de ajuste  $a$  y  $n$  en media son de 0,1 y 1,34 respectivamente, valores similares a los encontrados por García y Cabana (2014), quienes estudiaron el movimiento de agua en suelos arcillosos consolidados en el occidente de la sabana de Bogotá. Adicionalmente, Bonilla y Cancino (2001), encontraron también valores similares de estos parámetros en suelos aluviales depositados sobre planos de inundación y de terrazas en la zona central de Chile.

El coeficiente de determinación de todas las curvas ajustadas, tiene un coeficiente de variación moderado y un rango entre 0,35 y 1,0. En los coeficientes de determinación bajos, se entiende que el modelo propuesto no puede explicar adecuadamente la estructura y la variación de los datos. Por el contrario los  $R^2$  cercanos a 1 indican que el modelo puede explicar casi en su totalidad la variabilidad de los datos.

Los  $R^2$  bajos tanto para H1 y H2 obedecen principalmente al ajuste de un grupo de curvas experimentales que se realizaron con muestras de suelos disturbadas y de las cuales se obtuvo únicamente el contenido de humedad volumétrico para 305,92, 1019,74, 5098,72, 15296,16 cm  $H_2O$ . Lo anterior se debe principalmente a que el ajuste en el programa RETC contempla una densidad media según la textura del suelo y al ser

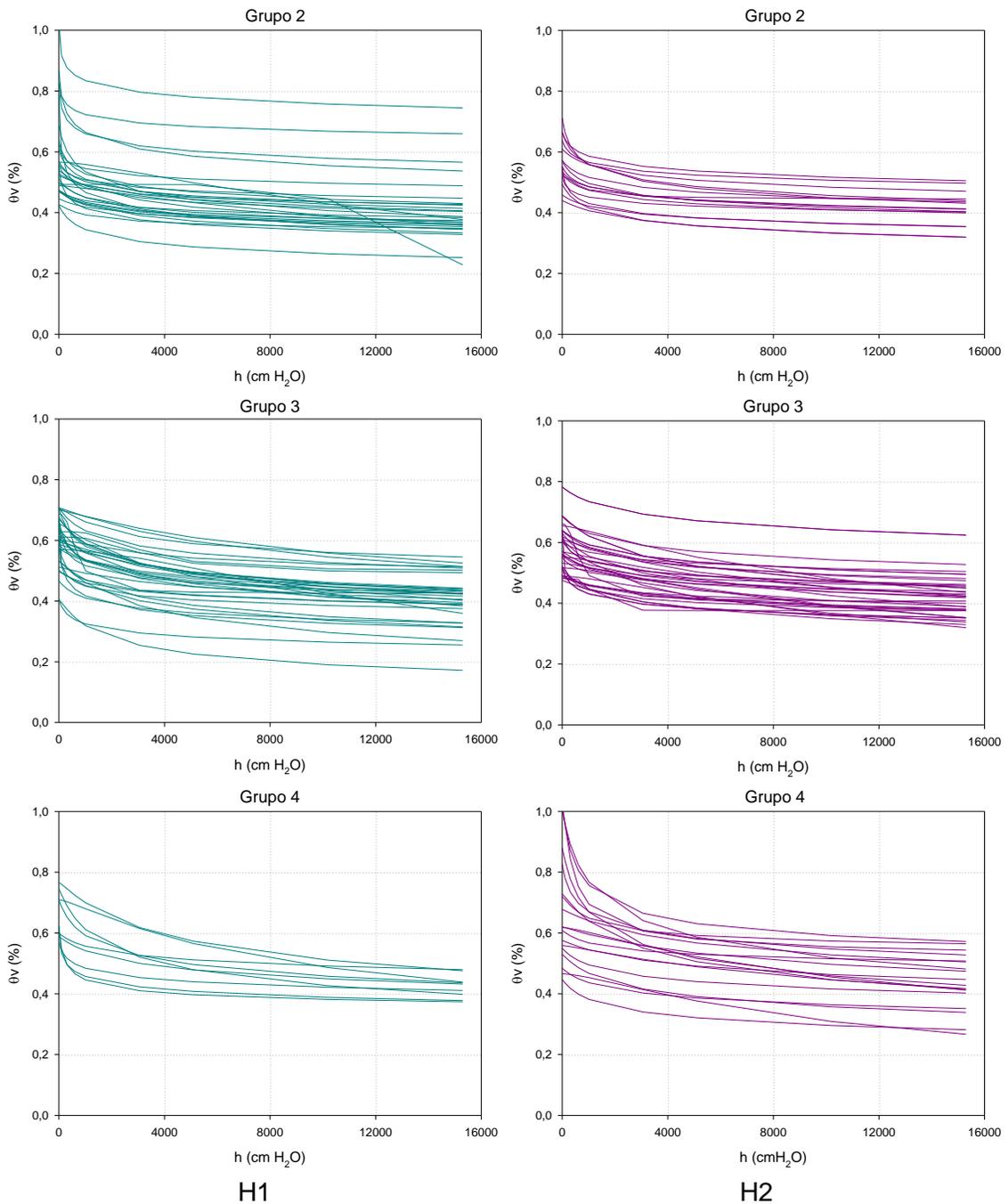
disturbada la muestra, se altera su densidad y a su vez uno de los parámetros de modelación.

**Tabla 3-7:** Estadísticos descriptivos para los parámetros de ajuste al modelo de Van Genuchten.

Horizonte		Modelo de ajuste Van Genuchten				
		$\Theta_r$ (%)	$\Theta_s$ (%)	a	n	R <sup>2</sup>
H1	Media	0,08	0,62	0,10	1,34	0,88
	Mediana	0,00	0,60	0,00	1,12	0,97
	Desv. típ.	0,18	0,16	0,73	0,77	0,20
	Varianza	0,03	0,03	0,53	0,59	0,04
	Asimetría	2,36	1,25	8,69	4,62	-1,66
	Curtosis	5,49	3,72	75,70	23,47	1,00
	Mínimo	0,00	0,15	0,00	1,04	0,35
	Máximo	0,90	1,19	6,35	6,08	1,00
	CV (%)	2,24	0,27	7,50	0,57	0,23
H2	Media	0,07	0,62	0,01	1,30	0,88
	Mediana	0,00	0,57	0,00	1,10	0,96
	Desv. típ.	0,17	0,16	0,03	0,77	0,19
	Varianza	0,03	0,03	0,00	0,59	0,04
	Asimetría	2,39	1,65	8,31	5,26	-1,70
	Curtosis	4,68	2,80	70,22	28,26	1,37
	Mínimo	0,00	0,32	0,00	1,00	0,37
	Máximo	0,75	1,15	0,29	5,67	1,00
	CV (%)	2,45	0,26	4,54	0,59	0,21

Las curvas de retención de humedad, al igual que las de infiltración se clasificaron en 4 grupos según su contenido de arcillas y familia textural.

En la **Figura 3-3** se puede observar que para H1, independientemente del contenido de arcilla, los contenidos de agua en saturación son muy parecidos, resultados similares fueron encontrados por Van der Berg et al. (1997), quienes concluyeron que el contenido de arcilla no tenía una correlación directa con los contenido de humedad entre CC y Saturación.

**Figura 3-3:** Curvas de retención de humedad para 3 grupos de estudio en H1 y H2.

En realidad la única diferencia significativa en el contenido de humedad en saturación se puede observar en la figura del grupo 3 para H2. Allí los contenidos de humedad  $\theta_0$  son superiores al 80%. Sin embargo, se puede ver que la pendiente de estas curvas entre  $\theta_0$  y  $\theta_{305.92}$  es alta, lo que indica que el suelo tiene un mayor contenido de agua gravitacional

que específicamente ocupa los macroporos encargados del drenaje (Flores y Alcalá, 2010).

De lo anterior se puede afirmar que para H2 en aquellos sitios donde el contenido de arcilla es menor al 35%, se tiene un contenido mayor de macroporos que facilitan tanto la aeración del suelo, como el movimiento del agua libre, reduciendo así en estos sitios la saturación continua del suelo y garantizando la disponibilidad de oxígeno en el mismo.

En cuanto a las humedades del suelo en PMP ( $\theta_{15296.16}$ ) están en el rango entre 60 y 30% para los dos horizontes. Por otra parte, para el grupo 3 en H1 se observan los  $\theta_{15296.16}$  en su mayoría por encima del 40%, esto podría indicar que a pesar de poder almacenar un contenido de humedad mayor en esta tensión, esta agua no está disponible debido a que en estos sitios el suelo tiene un mayor contenido de microporos que no son una consecuencia de la textura ( $A_r < 35\%$ ) si no por problemas de compactación.

De las curvas de retención de humedad se establecieron parámetros de riego y la estimación de la porosidad total y la distribución de poros (**Tabla 3-8**).

Además de entender la cantidad de poros, es importante relacionar estos con la estabilidad estructural de los agregados. Según Gavande (1972), en un suelo bien estructurado la mayor parte del agua que sale del suelo por succión, por parte de las raíces o por drenaje, es reemplazada por aire. Caso contrario a un suelo con estabilidad baja donde al ser desalojada el agua se contrae formando terrones grandes y duros.

De lo anterior, se puede decir de Marengo que además de tener una PT moderada a baja, tiene una calificación de estabilidad en promedio estable y moderadamente estable con DMP de 3,43 y 2,78 mm para H1 y H2, que bajo condiciones inadecuadas de riego y mecanización podría causar un proceso de degradación y adensamiento.

Se encontraron valores medios de 3,23 y 48,47% de macroporos y microporos respectivamente, estos valores también fueron reportados por Gómez (2012) para lotes de pasturas sin ningún tipo de preparación a 10 cm de profundidad y para profundidades de 30 cm encontró una mayor cantidad de microporos, situación similar a la expuesta en

la **Tabla 3-8**. Este comportamiento indica la existencia de una capa compactada en la que se ha reducido el tamaño de los poros del suelo por procesos de adensamiento o compactación.

**Tabla 3-8:** Parámetros de riego estimados a partir de las CRH para H1 y H2.

Horizonte		Porosidad del suelo (%)			Parámetros de riego (%)		
		PT	Macrop	Microp	CC	PMP	AA
H1	Media	51,90	3,23	48,47	0,56	0,40	0,15
	Mediana	51,22	2,38	47,57	0,56	0,40	0,14
	Desv. típ.	5,65	2,81	6,27	0,12	0,09	0,06
	Asimetría	0,41	1,33	0,36	0,61	-0,73	0,93
	Curtosis	0,09	1,35	-0,30	4,26	3,64	0,66
	Mínimo	39,62	0,01	35,91	0,14	0,04	0,06
	Máximo	67,51	12,22	63,25	1,06	0,66	0,35
	CV	0,11	0,87	0,13	0,22	0,22	0,39
H2	Media	53,29	2,37	50,36	0,59	0,43	0,14
	Mediana	52,28	1,90	49,95	0,55	0,42	0,13
	Desv. típ.	6,78	1,98	6,27	0,14	0,11	0,06
	Asimetría	0,49	1,57	0,08	1,75	1,92	1,47
	Curtosis	0,24	2,46	0,81	3,86	7,89	2,19
	Mínimo	36,48	0,01	33,74	0,31	0,18	0,06
	Máximo	69,55	9,24	69,55	1,10	0,96	0,33
	CV	0,13	0,84	0,12	0,25	0,25	0,39

El contenido de humedad a capacidad de campo medio fue de 55%, con un CV de 22% lo que indica una variación moderada de dicha propiedad. Estos valores de CC están por encima de los reportados por la literatura tanto para H1 como para H2, para suelos de familias finas y francosa-finas (entre 30 a 45% de Ar) (Allen et al., 2006; Malagón, 2016).

Lo mismo ocurre con el contenido de humedad para PMP con valores medios de 40 y 43% para H1 y H2 respectivamente. Sin embargo, estas estimaciones no son muy aproximadas, pues se basan únicamente en la textura del suelo, desconociendo parámetros importantes como la porosidad y estructura del suelo.

Sin embargo, la humedad aprovechable del suelo para H1 y H2 (15 y 14%, respectivamente), se encuentra en el límite inferior de los rangos reportados por Allen et al., (2006). Pues para suelos con altos contenidos de arcilla se esperan valores de AA alrededor del 20%, pues es un supuesto que los coloides del suelo (arcillas) mejoran la estructura y la proporcionalidad de la porosidad del suelo, facilitando la formación de los mesoporos, encargados de almacenar el agua aprovechable.

Adicionalmente, el AA tiene un CV de 39% lo que indica que el agua útil del suelo para Marengo tiene una variabilidad moderada y en algunos sitios esta propiedad toma sus valores máximos (35 y 33% para H1 y H2, respectivamente). Esto puede obedecer a aquellos lugares donde la estabilidad y la porosidad son altas, o por el contrario lo sitios donde esta propiedad tenga su rango más bajo, allí se presenten problemas de compactación o adensamiento.

En cuanto a la porosidad total, según la clasificación hecha por Montenegro y Malagón (1990) para H1 y H2 la porosidad se califica entre baja (31 - 45%), media (45-55%) y alta (55 – 63%) teniendo en cuenta la desviación alrededor de la media. Valores mayores para la PT fueron reportados por Gómez (2011), quien encontró porosidades entre 58 y 63% para pastos sin ningún tipo de mecanización en los lotes 6, 13 y 15 de la misma área de estudio.

En este sentido, la identificación de la distribución espacial del agua aprovechable en el suelo, toma un papel importante en la planificación del riego, de las prácticas de manejo y definitivamente en la decisión del tipo de cultivo que deba establecerse.

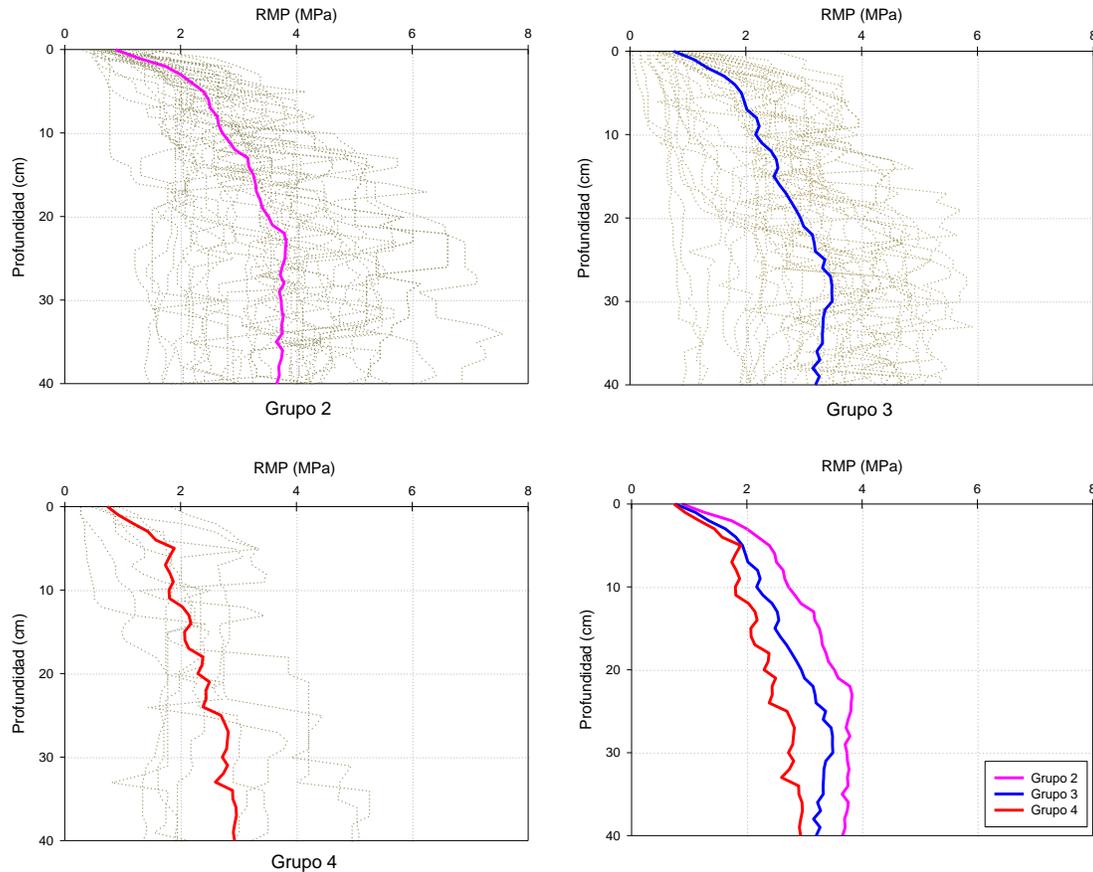
### **Resistencia mecánica a la penetración**

Las curvas de RMP también fueron clasificadas en tres grupos según el contenido de arcilla y familia textural (**Tabla 3-6**). La representación de cada una de las curvas y la curva media de cada grupo se muestran en la **Figura 3-4**.

Como se puede observar, la RMP para los suelos que en su primer horizonte tienen un mayor contenido de arcilla, antes de los 5 cm de profundidad presentan RMP mayor a 2

MPa, mientras que para los suelos de familia francosa-fina (grupo 4) superan los 2 MPa aproximadamente a los 11 cm de profundidad, valores similares a los encontrados por Mogollón (2012), quien estudió la RMP en los lotes 6 y 13 (suelo preparado y pasturas), valores de RMP de 1,56 y 2,36 MPa respectivamente a 10 cm de profundidad.

**Figura 3-4:** Curvas de resistencia mecánica a la penetración.



Los valores de RMP mayores a 2 MPa representan una limitante para el crecimiento radicular (Chan et al., 2006). De acuerdo a lo anterior se podría decir que en general para Marengo existe una limitante para el desarrollo radicular a partir de los 5 cm de profundidad, y de acuerdo con la metodología IGAC para el levantamiento de suelos, se podría decir que en general la profundidad efectiva de los suelos del CAM se puede calificar como muy superficial (0-25 cm) (IGAC, 2014).

La RMP en los tres suelos tiene un comportamiento ascendente desde la superficie hasta 30 cm de profundidad, lugares donde se presentan los mayores valores de RMP

cercanos a 4,0 MPa para el grupo 2, de 3,5 MPa para el grupo 3 y valores cercanos a 3,0 MPa para el grupo 4. Es de esperarse que los suelos con mayor contenido de arcilla alcancen mayores valores de RMP, pues son suelos para los cuales la densidad aparente es mayor.

Las RMP hechas en Marengo, de acuerdo a la clasificación hecha por el IGAC (2014), se encuentran calificadas desde baja hasta muy alta, con valores entre 0,1 – 2,0 MPa baja, 2,0 a 4,0 MPa como alta y entre 4,0 y 8,0 MPa como muy alta.

Adicionalmente, este incremento en la RMP indicaría según el uso del suelo compactación por pisoteo de animales o pie de arado. Esto se determinará en el análisis espacial de esta propiedad. Sin embargo, la existencia de capas adensadas las ha reportado Ordoñez y Bolívar (2015), en la descripción de cuatro unidades cartográficas de suelo, que representan el 35% del área neta de Marengo.

### 3.2 Análisis de Correlación

La correlación lineal de Pearson para las variables representativas para los dos horizontes de estudio se muestran en el Anexo C y D. En principio se resalta la fuerte correlación entre la  $i_b$  (modelo de Kostakiov) y  $K_s$  (modelo de Philip), correlación que se espera, pues la  $i_b$  da cuenta de la tasa de infiltración para un tiempo en el cual la tasa de cambio en la velocidad instantánea es menor al 10% (Holzapfel y Matta, 2005), lo que indica que el suelo se encuentra saturado y hay equilibrio entre el agua que se infiltra y la que se mueve dentro del perfil.

La correlación de la  $i_b$  con la PT es significativa e inversa, pues al tener un suelo mayor cantidad de poros y específicamente microporos (**Tabla 3-8**), más se demora este en saturarse, pues es mayor el trabajo que debe realizar el agua y por tanto esta se moverá a una menor velocidad.

Adicionalmente, la alta variabilidad de la  $i_b$  (**Tabla 3-5**) es un resultado del comportamiento del contenido del limo y arcilla en el primer horizonte (-0,352 y 0,363

respectivamente), condiciones reportadas también por Orjuela-Matta et al. (2010), en oxisoles del piedemonte llanero.

La densidad aparente en el primer horizonte tuvo correlación significativa e inversa con el AA (-0,422), resultado concordante, pues altos valores de densidad aparente son un indicio de problemas de compactación y adensamiento, situación en la cual la porosidad total disminuye (-0,970), incrementa la cantidad de microporos y por tanto aumenta la dificultad del sistema radicular para tomar el agua del suelo. Por tanto, el manejo de esta propiedad mediante la mecanización, es una labor antrópica que influirá directamente en la producción, recuperación y conservación del suelo.

El contenido de arcilla en el suelo, determinó el comportamiento en el estado de agregación (0,386), índice de plasticidad (0,453) y el agua aprovechable (-0,346). La primera relación se puede explicar partiendo del hecho que la arcilla en el suelo actúa como un coloide (Gavande, 1972), que facilita la estructuración del suelo y la permanencia de los agregados ante fuerzas externas. Adicionalmente, la arcilla al generar mayor cantidad de microporos sobretodo en suelo con problemas de compactación (**Figura 3-3**) estos retienen el agua con mayor fuerza.

El CO no tuvo correlación con las propiedades que dan cuenta de la estructura, su grado de desarrollo y aquellos parámetros a los que esta afecta en ninguno de los dos horizontes. Esto se debe principalmente a lo reportado por Ordoñez y Bolívar (2015), autores que indican problemas de salinidad, con aportes de sodio, sulfatos y cloruros, provenientes principalmente del agua de riego suplementario en el área de estudio.

Por lo anterior, los altos valores de RAS y PSI facilita la dispersión de los agregados, daña la estructura, disminuye la porosidad y con ella la infiltración, movimiento y disponibilidad de agua en el suelo (El-Swaify, 2000), condiciones que se asocian a bajos contenidos y juegan un papel antagónico al carbono orgánico en el suelo (Torres y Acevedo, 2008).

La correlación de las propiedades del segundo horizonte. En principio se puede ver que la densidad aparente se relaciona directamente con Ar, DMP, LP, IP (0,613, 0,389, 0,324,

0,315 respectivamente), estas relaciones fueron también reportadas por Mogollón (2012) y Gómez (2011).

En adición, la densidad aparente tuvo correlación inversa con A, AA y PT (-0,562, -0,380 y -0,976 respectivamente), situación reportada también por Mogollón (2012), quien indicó que podrían ser estas variables de fuerte correlación con la densidad aparente un segundo indicador en la compactación del suelo y específicamente la PT.

Para H2, el CO tuvo la mayor correlación con el LL (0,366). Esta correlación se esperaba, sin embargo, no es tan alta y se puede deber a la variación en el contenido de arcilla; Según Moradi (2013), para los suelos con contenidos mayores a 45% de arcilla, el CO se correlaciona en más del 90%, pero para suelos de texturas más gruesas las correlaciones son menores al 50%.

El hecho de que el CO no se relacione con las demás propiedades del suelo en ninguno de los horizontes, se debe a las fluctuaciones del nivel freático en casi toda el área de estudio y la presencia de capas compactadas casi impermeables, que impiden el movimiento y lavado de las sales del suelo cuando hay precipitaciones (Ordoñez y Bolívar, 2015). Por lo anterior, la presencia de sales y sobretodo sodio en el suelo juegan un papel dispersante y antagónico al CO.

En general, se puede observar que para H2 las propiedades se relacionaron en mayor proporción que en H1, esto se debe principalmente al manejo antrópico del suelo, las actividades de mecanización, riego y producción alteran continuamente la condición natural del suelo, especialmente en el horizonte superficial.

### 3.3 Análisis Espacial

#### 3.3.1 Distribución espacial de propiedades discretas

La distribución espacial de las propiedades es importante en el momento de tomar decisiones en el manejo del suelo, la programación del riego, actividades de cosecha, recolección o destinación de áreas a recuperar o conservar.

En la **Tabla 3-9** y **Tabla 3-10**, se muestran los parámetros del ajuste de semivariogramas y evaluación del modelo de interpolación Kriging (CVC) para todas las propiedades de estudio discretas.

**Tabla 3-9:** Geoestadísticos para las propiedades de estudio en H1.

Horizonte		Modelo	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub>	A (m)	R <sup>2</sup>	GDE	CVC
H1	da	Exponencial	1,00E-05	0,02	357	0,73	1,00	0,62
	dr	Esférico	3,26E-04	0,00	319	0,66	0,91	0,84
	A	Gaussiano	3,16E+00	7,49	995	0,76	0,58	0,87
	L	Gaussiano	8,90E+00	78,88	763	0,94	0,89	0,91
	Ar	Gaussiano	1,54E+01	101,60	758	0,93	0,85	0,95
	DMP	Pepita	1,09E+00					
	IEA	Pepita	161E+00					
	LL	Esférico	1,66E+01	151,60	648	0,78	0,89	0,97
	LP	Esférico	9,50E+00	46,18	941	0,89	0,79	0,95
	IP	Esférico	4,40E+00	72,51	603	0,76	0,94	0,86
CO	Pepita	2,46E+00						

Las fracciones texturales del suelo para el primer horizonte se ajustaron al modelo de semivariograma Gaussiano con alcances superiores a los 700 m. Para H2, el contenido de arcilla y limo se ajustaron al modelo exponencial con un alcance superior a los 700 m y el contenido de arena al modelo esférico con alcance de 128 m. La evaluación del modelo de interpolación Kriging fue alta con valores de CVC superiores a 75%.

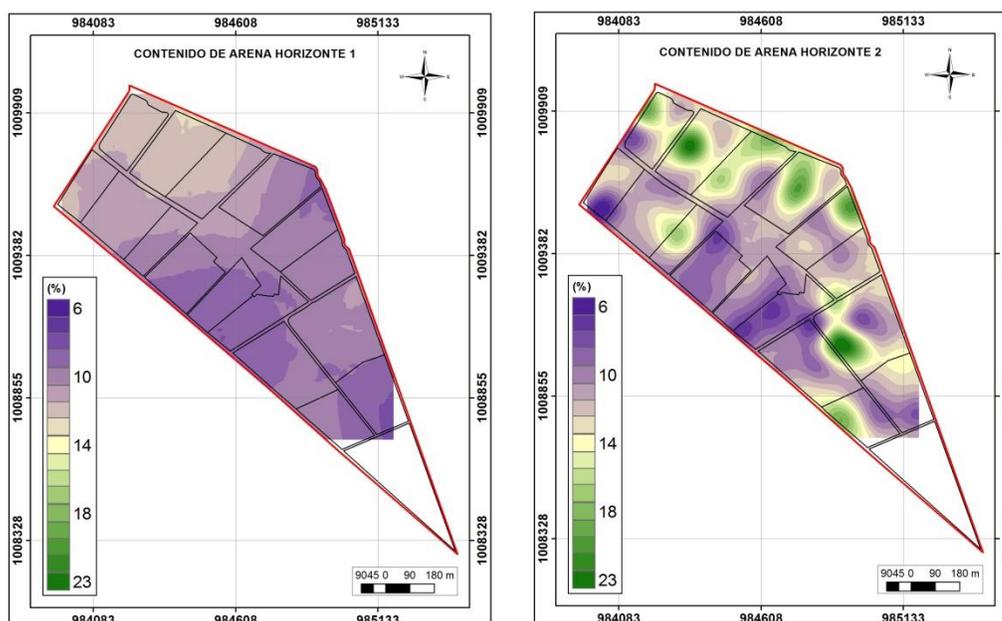
En la distribución espacial de las tres fracciones texturales se puede observar que el contenido de arena es más bajo que los demás tamaños de partículas, esto se debe al material parental que dio origen a los suelos del CAM, pues son arcillas lacustres

producto de la sedimentación de un gran lago que cubría la sabana de Bogotá, en la época pleistocénica del periodo cuaternario (Ordoñez y Bolívar, 2015).

**Tabla 3-10:** Geoestadísticos para las propiedades de estudio en H2.

Horizonte	Modelo	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub>	A (m)	R <sup>2</sup>	GDE	CVC	
H2	da	Exponencial	1,00E-05	0,02	348	0,89	1,00	0,85
	dr	Esférico	1,55E-03	0,00	395	0,62	0,59	0,86
	A	Exponencial	1,00E-02	12,60	128	0,70	0,90	0,58
	L	Esférico	6,90E+00	76,94	649	0,81	0,91	0,87
	Ar	Esférico	4,34E+01	149,00	701	0,81	0,71	0,91
	DMP	Pepita	9,60E-01					
	IEA	Pepita	420E+00					
	LL	Gaussiano	3,86E+01	95,79	950	0,89	0,60	0,89
	LP	Gaussiano	1,37E+01	46,99	1621	0,83	0,71	0,89
	IP	Gaussiano	2,32E+01	68,19	601	0,87	0,66	0,91
CO	Exponencial	3,40E-01	1,52	339	0,56	0,78	0,89	

**Figura 3-5:** Distribución espacial del contenido de arena en H1 y H2.

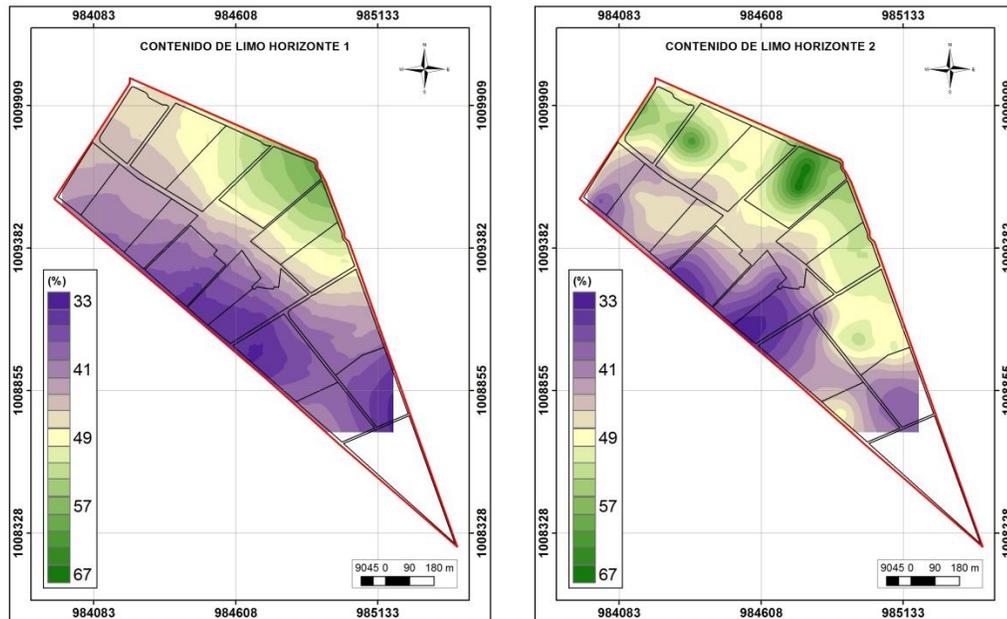


La distribución de la arcilla y el limo en los dos horizontes tienen comportamientos opuestos, ( $r=-0,92$ ) (Figura 3-6 y Figura 3-7). El comportamiento de la arcilla es ascendente en sentido norte-este hacia el sur-oeste y se puede explicar debido a la

sedimentación diferenciada del antiguo lago. INGEOMINAS (2005), reporta la formación Sabana para el área del CAM (Unidad geológica Q1Sa), formación que en sus bordes reporta intercalaciones de arenas finas, limos y turmas, lo que explica mayores contenidos de limo en el área de los lotes 1 a 7.

La densidad aparente, se ajustó al modelo exponencial en los dos horizontes con un rango de 347 y 348 m aproximadamente y un CVC de 0,62 y 0,85 respectivamente. Valores de ajuste al semivariograma y CVC menores en H1 se esperan, pues al ser la  $d_a$  una propiedad sensible a la intervención antrópica y estar el área de estudio dividida en 17 lotes con diferente ocupación, se espera que la variabilidad espacial sea alta.

**Figura 3-6:** Distribución espacial del contenido de limo en el CAM.

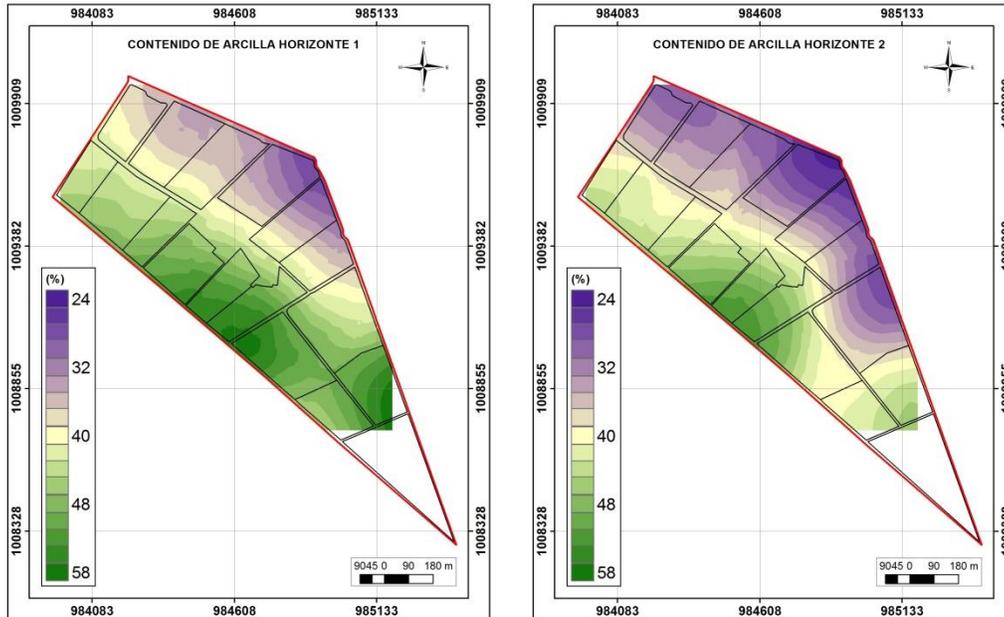


En la **Figura 3-8**, se observa la distribución espacial de la  $d_a$  en H1 y H2. Allí, H1 presenta los mayores valores de  $d_a$  en los lotes 7, 8 y 10, lotes que han sido dedicados a la producción ovina y caprina y los lotes 12, 13 y 17 con ganado vacuno.

Según Taboada (2007), un ovino ejerce sobre el suelo una presión estática entre 48 y 83 kPa mientras que el ganado vacuno entre 98 a 192 kPa cuando se encuentran parados sobre sus cuatro patas. Sin embargo, la densidad de animales por área en la producción

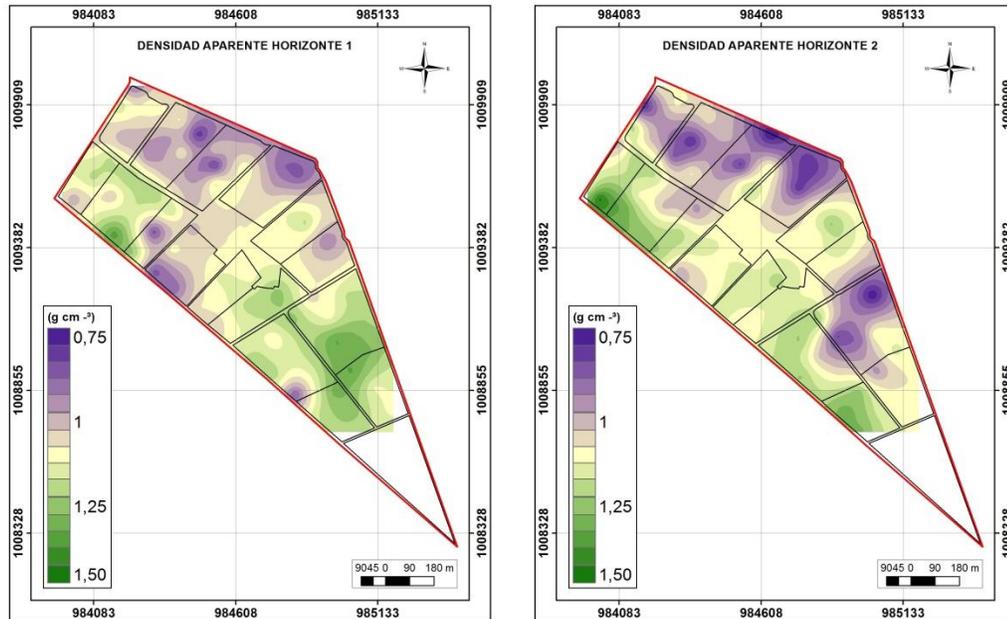
ovina es mayor y el tiempo que a diario se desplazan es mayor en comparación con el ganado vacuno entre 12 y 13 horas por día (Medina, 2016).

**Figura 3-7:** Distribución espacial del contenido de arcilla en el CAM.



Las zonas donde se encuentran los mayores valores de  $d_a$  en su mayoría, sobre todo en los lotes de producción ovina, obedecen a las unidades cartográficas de suelos descritas por Ordoñez y Bolívar (2015), donde hacen uso del sufijo d (adensamiento) en la nomenclatura del primer horizonte.

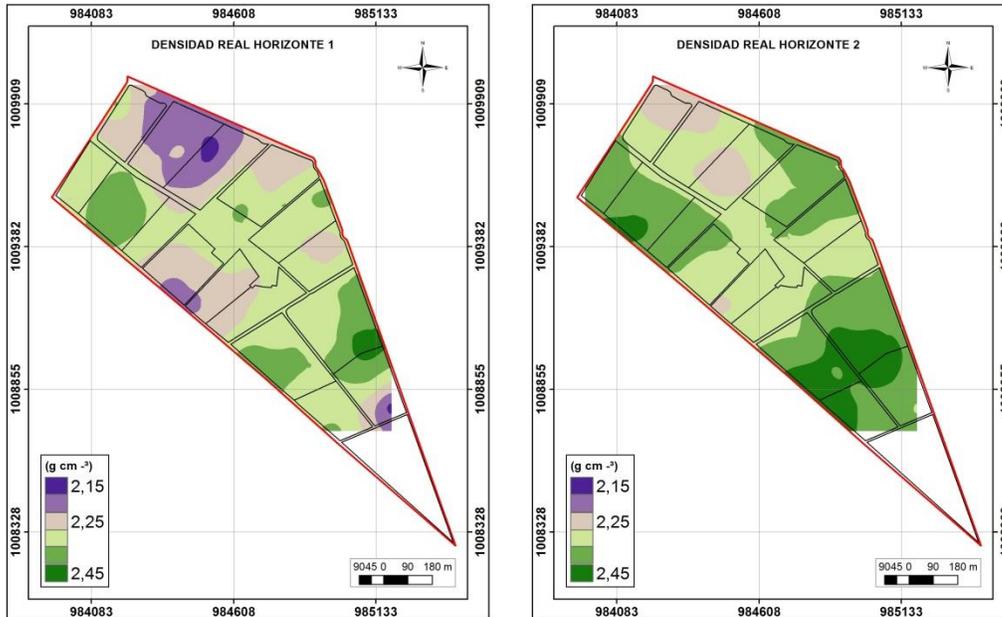
Los valores de densidad aparente más bajos para H1 se encuentran en los lotes 1, 2, 3, 4, 5 y 6, los cuales han sido dedicados a actividades agrícolas principalmente, que requieren preparación del suelo, lo que en principio favorece la estructura del suelo, aumentando el espacio poroso y disminuyendo la densidad aparente. Adicionalmente, en estos mismos lotes se observan los menores contenidos de arcilla en la textura del suelo. Sin embargo, en estos lotes de actividad agrícola, donde se debe tener en cuenta el tránsito de la maquinaria, no se encuentran valores mayores de densidad aparente en H2 aun cuando en las curvas de RMP se puede observar un incremento (hasta 3 MPa aprox.).

**Figura 3-8:** Distribución espacial de la densidad aparente en el CAM.

En la **Figura 3-5** se puede ver que el contenido de arena es mayor en H2 y se puede ver que la densidad aparente presentó una alta correlación con el contenido de arena en H2, lo que podría indicar que a pesar del tránsito de maquinaria, el hecho de tener un mayor contenido de arena el suelo permite conservar en alguna medida el espacio poroso.

La densidad real se ajustó al modelo esférico de semivariograma en los dos horizontes con alcances de 319 y 395 m. Mogollón (2012) encontró un comportamiento espacial similar para la densidad real en H2 en lotes específicos en la misma zona de estudio en donde también la dependencia espacial es fuerte ( $GDE > 0.75$ ). Lo anterior se debe principalmente a que la alterita que dio origen a los suelos del CAM es la misma en toda el área y está compuesta principalmente por arcilla caolinita, en algunas zonas intercalada con ceniza volcánica (Ordoñez y Bolívar, 2015).

En la **Figura 3-9**, se puede observar que los menores valores de densidad real se encuentran predominantemente en los lotes 2 y 3. Esto se debe principalmente a la presencia de andisoles, en donde la predominancia de los materiales constituyentes del suelo, son materiales no cristalizados de origen volcánico.

**Figura 3-9:** Distribución espacial de la densidad real en el CAM.

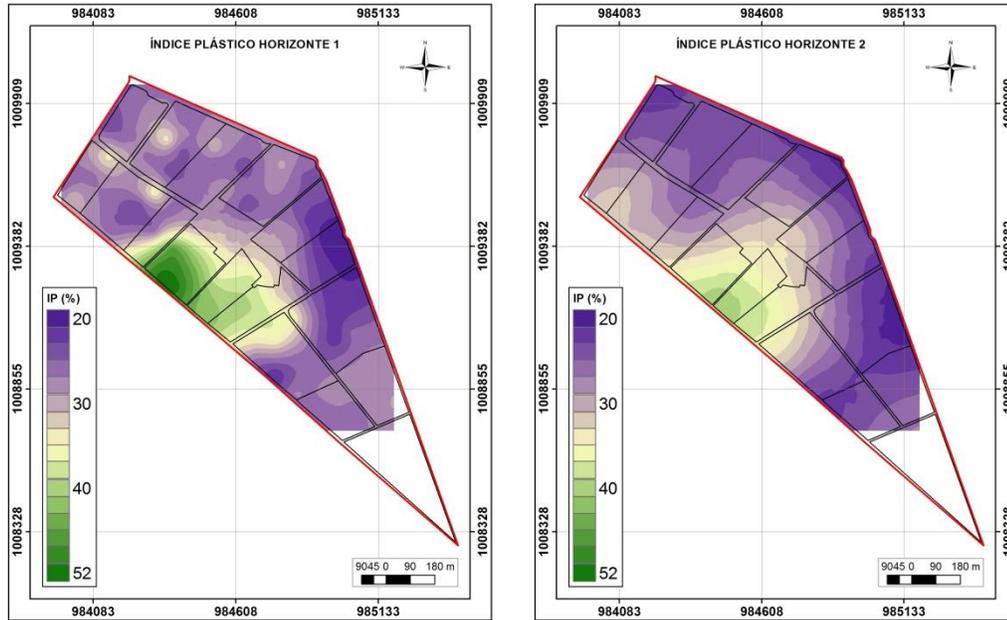
Las zonas de H1 y H2 donde se presentan mayores valores para la densidad real, corresponden a suelos con predominancia mineralógica de arcillas caolinita (1:1) y cuarzo (Ordoñez y Bolívar, 2015), materiales que según Bowles (1982), tienen valores de densidad real entre 2,6 y 2,63  $\text{g cm}^{-3}$  para la caolinita y el cuarzo, respectivamente y son materiales más pesados que arcillas comunes como la vermiculita o la gibsita.

En cuanto al índice de plasticidad, se puede observar que los mayores valores se encuentran hacia los lotes 12 a 15 (**Figura 3-10**), donde se esperaban, pues en estas mismas zonas se presentan las texturas más arcillosas. Como ya se mencionó anteriormente, la mineralogía de las arcillas del CAM corresponde a arcillas caoliníticas (1:1) que presentan un rango menor de plasticidad que si el origen fuera de esmectitas o illitas, donde la capa difusa es más gruesa y permite un rango más amplio entre el comportamiento como fase sólida y fase líquida (Malagón, 2016).

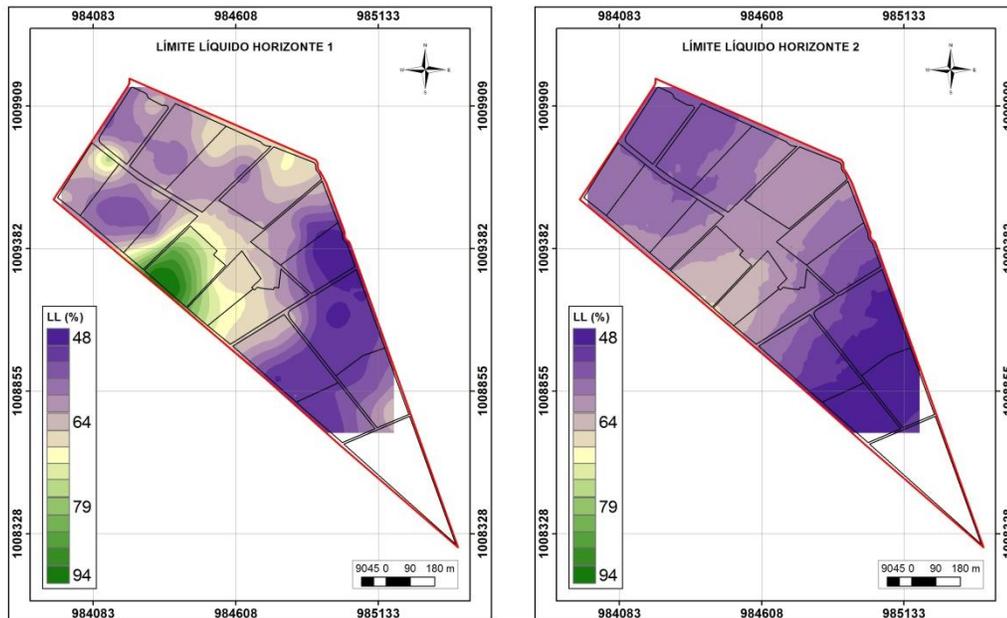
La distribución espacial del límite líquido se puede observar en la **Figura 3-11**, donde se observan los mayores valores en los lotes 12 a 14. Esto se debe principalmente y como se había mencionado anteriormente, a que en estos sitios se presentan los mayores contenidos de arcilla. Adicionalmente, en este sitio se presentan valores medios a altos

de CO, el cual está ligado al límite plástico cuando el suelo tiene más del 45% de arcilla (Moradi, 2013).

**Figura 3-10:** Distribución espacial del índice de plasticidad en el CAM.



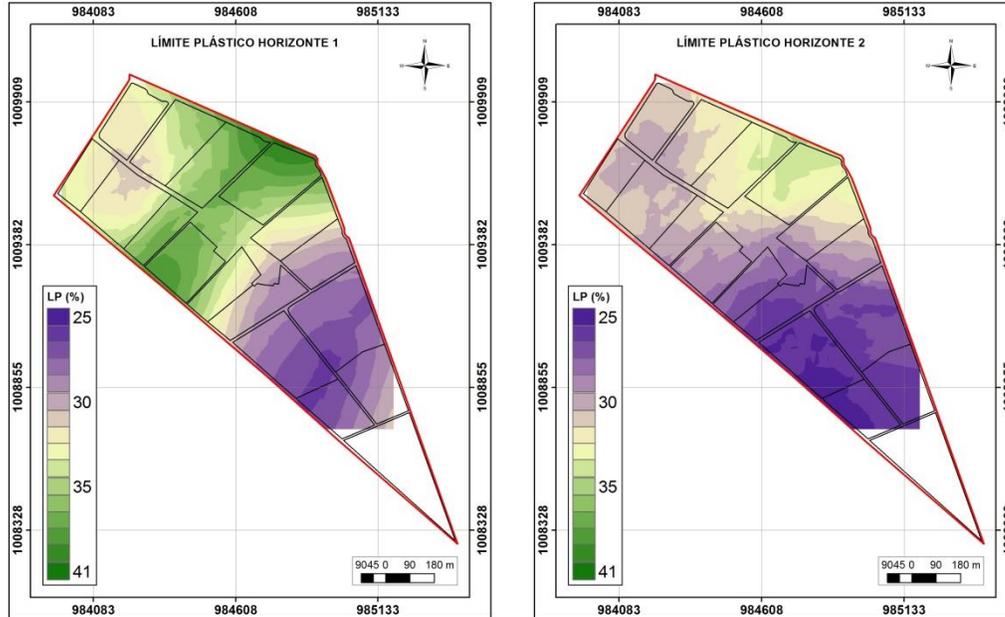
**Figura 3-11:** Distribución espacial del límite líquido en el CAM.



En la **Figura 3-12**, se observa la distribución espacial del límite plástico. Esta propiedad toma gran importancia si se considera para la planificación de las labores de

mecanización, pues el contenido de agua óptimo está ligado a la estructura y tamaño de los agregados después del laboreo (Keller, 2004).

**Figura 3-12:** Distribución espacial del límite plástico en el CAM.

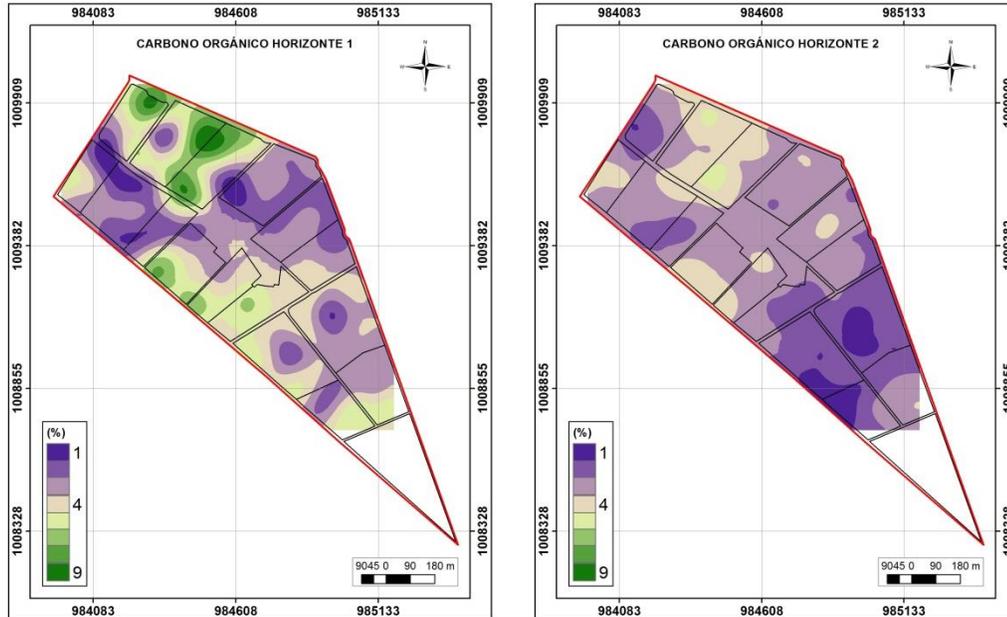


La distribución del carbono orgánico en H1 y H2 se presentan en la **Figura 3-13**, allí se puede observar dos zonas específicas donde se presentan altos contenidos de materia orgánica. El primero de ellos en los lotes 14, 13, 12 y el sur de los lotes 8 y 10 donde según el Modelo de Elevación Digital DEM (Anexo B) corresponden a las zonas más bajas de Marengo, identificadas geomorgológicamente como cubetas de decantación (Ordoñez y Bolívar, 2015), donde los suelos poseen condiciones ácuicas por más de 90 días acumulativos en el año (USDA, 2014), condición que dificulta la mineralización del CO del suelo (Martínez et al., 2008) y se facilita la acumulación de la materia orgánica en forma de humus, según la acidez y la aireación del agua de saturación (Ordoñez y Bolívar, 2015).

La segunda zona, con altos contenidos de materia orgánica ( $CO > 6\%$ ) corresponden a los lotes 1, 2 y 3, donde se encuentran específicamente andisoles alofánicos (Ordoñez y Bolívar, 2015), estos resultados también fueron encontrados por IGAC – COLCIENCIAS, (2006), en donde se estudió las sustancias húmicas y la reserva de carbono orgánico en

andisoles. Esto se debe a que las sustancias húmicas producto de la descomposición de la materia orgánica se estabilizan en el suelo por medio de la adsorción de estas a la alófana y la imogolita en los suelos de este orden (Malagón, 2016).

**Figura 3-13:** Distribución espacial del carbono orgánico en el CAM.



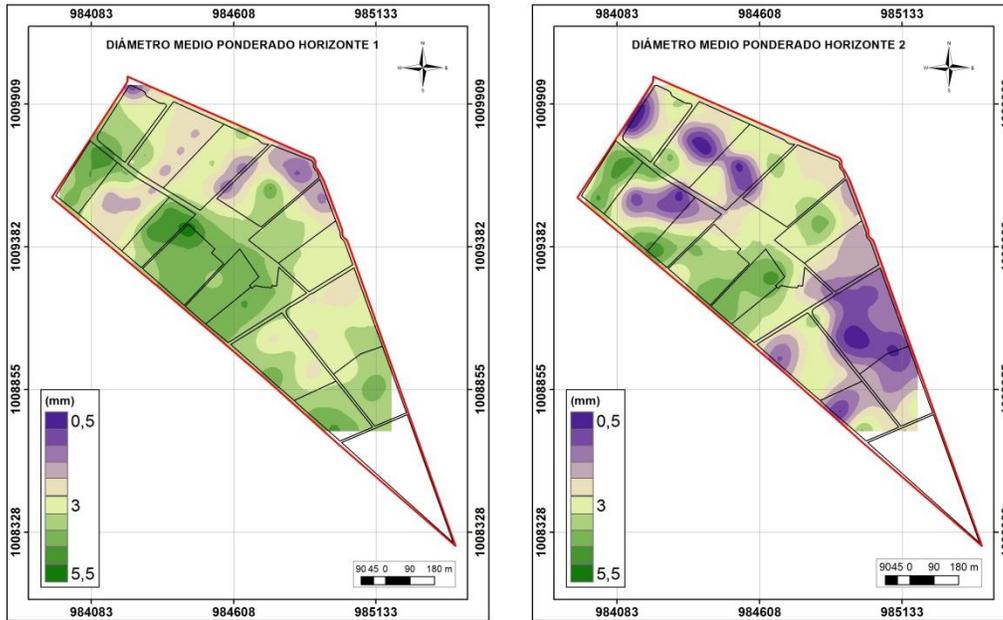
El CO en todo el CAM, según la clasificación hecha por IGAC (1995), se encuentra en niveles desde bajos a muy altos para H1 y niveles medios a bajos para H2. Estos niveles de carbono orgánico altos a muy altos en superficie se esperaban, pues el 72% de los suelos de marengo presentan condiciones ácuicas (Ordoñez y Bolívar, 2015), resultados similares fueron encontrados también por Correa (2008), en suelos mal drenados de la Orinoquia y la región pacífico y suelos del orden Andisol en la región andina.

Los lugares de mayor contenido de CO se asocian a las zonas donde se presentan menores valores de densidad aparente (**Figura 3-8**), indicando una vez más la influencia del CO en la estructuración y la configuración del espacio poroso del suelo (Matínez et al., 2008).

Adicionalmente, en estas mismas zonas donde se presentan los mayores valores de carbono orgánico, se presentan índices de plasticidad altos (**Figura 3-10**), lo anterior se debe a que el CO es un compuesto que al igual que la arcilla trabaja como un coloide en

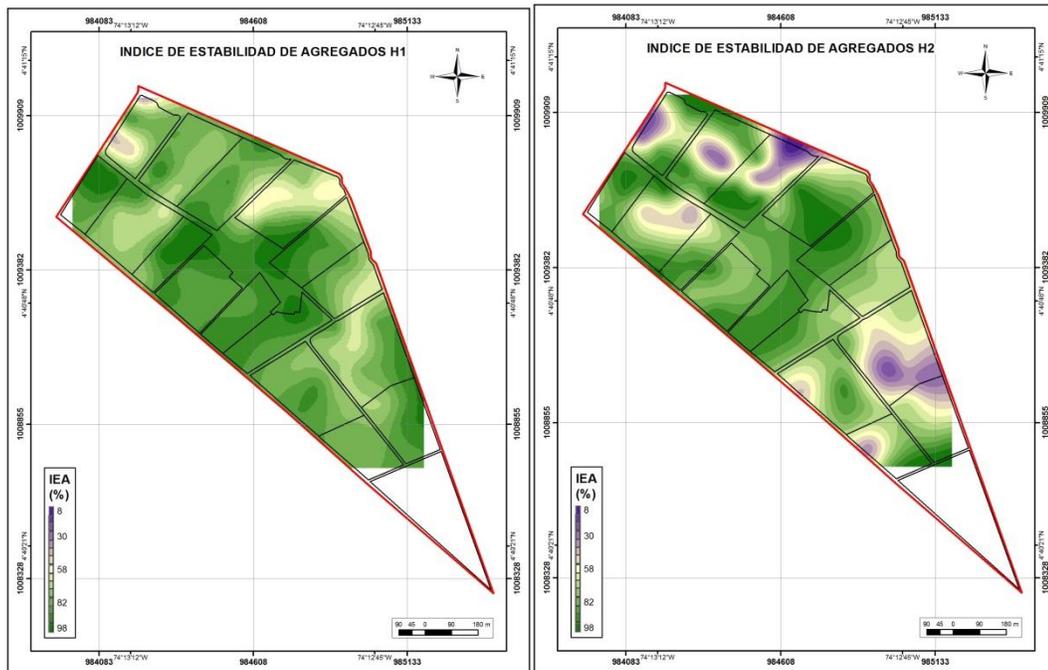
el suelo y genera fuerzas de cohesión, que junto a las de adhesión constituyen la consistencia del suelo (Malagón, 2016).

**Figura 3-14:** Distribución espacial del DMP de los agregados.



En cuanto al DMP, se observa en la **Figura 3-14** que en la mayor parte del área de estudio los agregados son mayores a 3 mm de diámetro, lo que indica estabilidad estructural estable a muy estable (Malagón, 2016). En contraste, para H2 el DMP indica que los agregados son ligeramente estables a muy estables.

En H1, el tamaño de agregados es mayor que en H2 (**Tabla 3-3**) lo que se puede deber a el mayor contenido de carbono orgánico en H1y un mayor contenido de arena en H2 (**Figura 3-5**). Por tanto, en la **Figura 3-15** se observa que en H1 se encontraron mayores IEA debido a la permanencia de los agregados de mayor tamaño ante la acción del agua en H1 posiblemente como una respuesta al contenido de carbono orgánico en H1. En contraste, al encontrarse sitios específicos con mayor contenido de arena en H2, partículas que tienen poca cohesión y adhesión entre ellas facilita la disgregación.

**Figura 3-15:** Distribución espacial del índice de estabilidad de agregados.

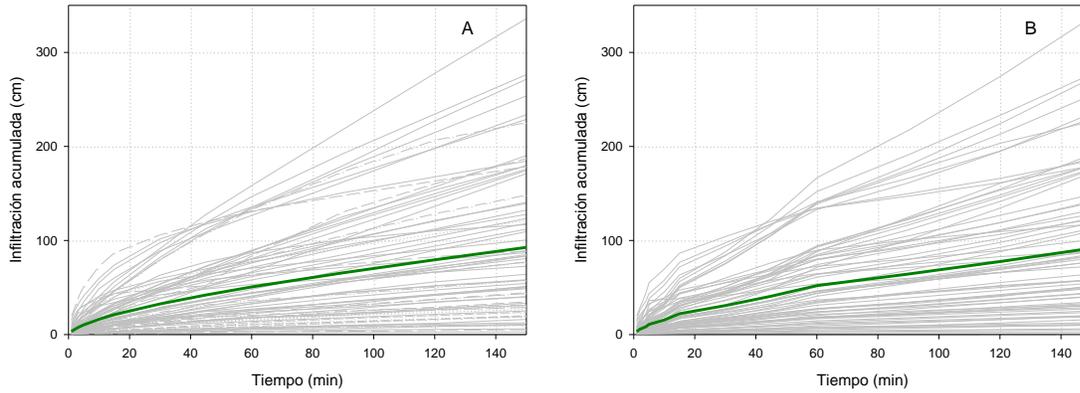
### 3.3.2 Distribución espacial de las propiedades funcionales

#### Infiltración de agua en el suelo

Las curvas de infiltración de agua en el suelo fueron ajustadas y predichas mediante geoestadística funcional con las rutinas descritas por Giraldo (2009) y Cortés-D (2015). En la **Figura 3-16**, se pueden observar que las curvas predichas presentan un patrón de comportamiento similar a las curvas ajustadas observadas, lo que concuerda con lo reportado por Cortés-D (2015) quien encontró un patrón de comportamiento similar en 75 curvas observadas y predichas en los lotes 1 a 3.

Para validar la efectividad del método, se realizó una validación cruzada donde se comparó cada uno de los puntos observados y predichos de cada curva, estimando un coeficiente de determinación cada vez y posteriormente promediando dicho coeficiente. Para el método aplicado el  $R^2$  fue de 0,98 lo que indica que el método de predicción Kriging Funcional utilizado explica más del 98% de la variabilidad de los datos observados.

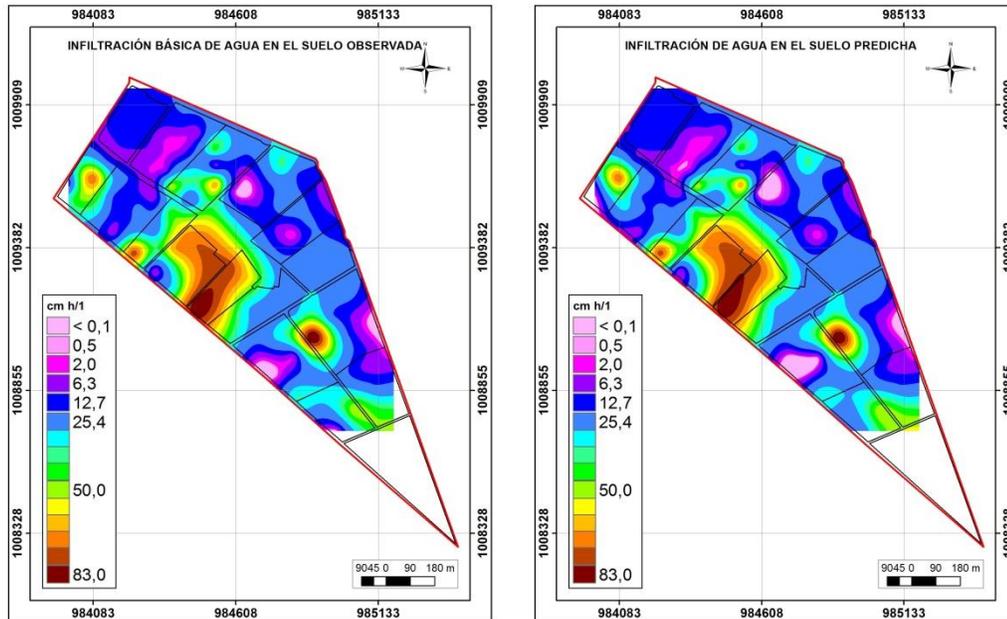
**Figura 3-16:** Comparación de curvas de infiltración acumulada observada y predichas mediante GF. A: Curvas observadas, B: curvas predichas.



Al trazar semivariogramas teóricos para los parámetros descritos, no se encontró estructura espacial en ninguno de ellos (Pepita) (Warrick y Nielsen, 1986). Esto puede deberse principalmente a las condiciones de los suelos en el momento de los ensayos, pues fueron realizados en periodos secos, donde los suelos con características vérticas (Ordoñez y Bolívar, 2015) incrementaron la lámina infiltrada acumulada, generando diferencias significativas entre ensayos muy cercanos.

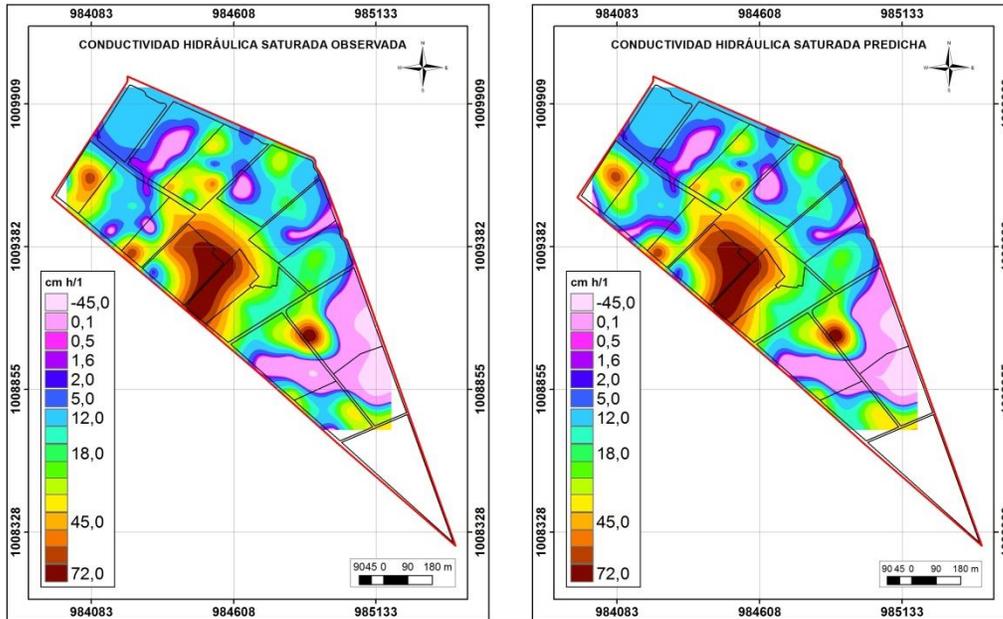
Los mapas de  $I_b$  y  $K_s$  fueron realizados mediante interpolación de datos observados y predichos y se muestran en la **Figura 3-17**. El comportamiento espacial de la  $i_b$  observada y predicha fue similar, debido al óptimo ajuste del modelo. Se puede observar que la infiltración básica en la mayor parte del área de estudio se clasifica como moderadamente rápida a muy rápida ( $i_b > 12,7 \text{ cm h}^{-1}$ ) según la clasificación propuesta por Montenegro y Malagón, (1990). En contraste, algunas zonas presentaron infiltraciones muy lentas ( $i_b < 0,1 \text{ cm h}^{-1}$ ) debido principalmente a la presencia de costras superficiales en el suelo.

Aquellos sitios donde la infiltración básica supera velocidades de  $50 \text{ cm h}^{-1}$ , se debe principalmente a la presencia de grietas en todo el perfil del suelo, factor que afectó significativamente los ensayos de infiltración; por lo anterior, es conveniente realizar estas pruebas al inicio de épocas de lluvias, momento en el cual se hayan cerrado nuevamente las grietas del suelo.

**Figura 3-17:** Distribución espacial de la  $i_b$  observada y predicha mediante GF.

Por otra parte, la  $K_s$  presentó valores negativos (**Figura 3-18**), lo que se debe principalmente a que en aquellos sitios el tiempo de la prueba fue significativamente menor que el  $t_b$ , según el modelo de Kostakov, donde este duplica el tiempo de la prueba, es decir se presentan valores de  $t_b$  cercanos o mayores a 300 minutos. Esta situación también fue encontrada por Campano (2014) quien explica que esto se debe a la imposibilidad que tiene el modelo de precisar una conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ), cuando el ensayo se ha terminado justo al inicio de la saturación del suelo.

En aquellos lugares donde el ensayo cumplió con el  $t_b$  requerido, se presentaron conductividades moderadas a muy rápidas según la clasificación hecha por Montenegro y Malagón (1990). Sin embargo, debido a que el parámetro de  $K_s$  fue derivado del modelo de Philip, en los lugares donde esta propiedad excede valores de  $45 \text{ cm h}^{-1}$  está fuertemente influenciada por la condición antes mencionada de los suelos con grietas.

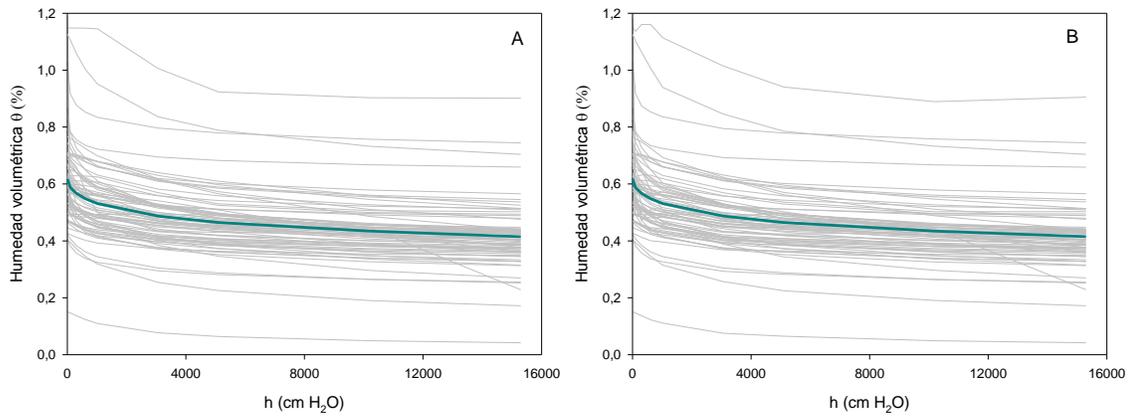
**Figura 3-18:** Distribución espacial de la  $K_s$  observada y predicha mediante GF.

### Retención de agua en el suelo.

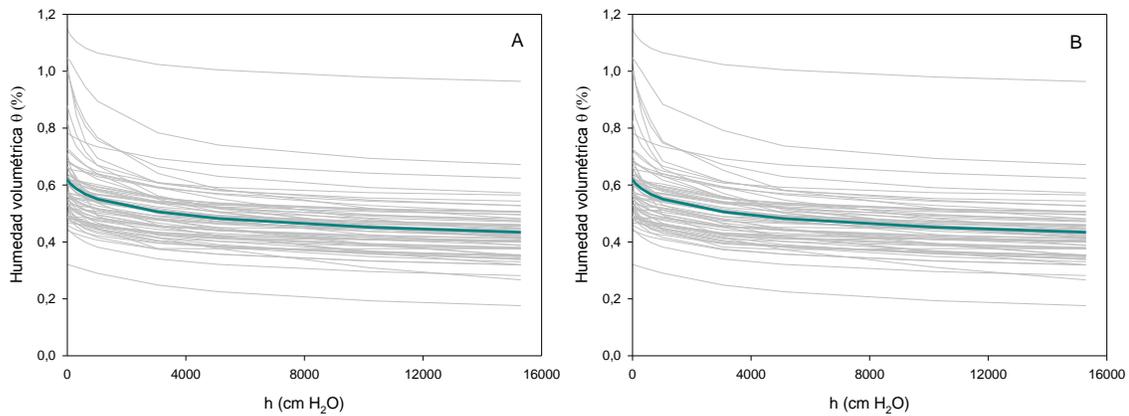
Las curvas de retención de humedad fueron ajustadas al modelo de Van Genuchten (1980) y predichas nuevamente por medio de GF. En la **Figura 3-19** y **Figura 3-20**, se muestran las CRH observadas y predichas para H1 y H2. Allí se observa que el comportamiento de las curvas es similar y el predictor Kriging es capaz de explicar cerca del 99% de la varianza total de los datos, cuando se estima el coeficiente de determinación  $R^2$  para cada curva. Resultados similares fueron encontrados por Cortés-D (2015), quien evaluó el ajuste del Kriging Funcional para 75 CRH encontrando ajustes superiores al 99% para andisoles y 94% para oxisoles.

El AA observada y predicha fue mapeada mediante geoestadística clásica (**Tabla 3-11**). El CVC tanto para los datos observados como predichos es más alto para el AA en H2. Esto puede deberse al manejo antrópico, principalmente en H1. Adicionalmente, esta propiedad mostró un GDE alto ( $GDE > 75\%$ ) obedeciendo específicamente al material parental y las condiciones de compactación del suelo.

**Figura 3-19:** Curvas de Retención de humedad observadas y predichas para H1. A: curvas observadas, B: curvas predichas.



**Figura 3-20:** Curvas de Retención de humedad observadas y predichas para H2. A: curvas observadas, B: curvas predichas



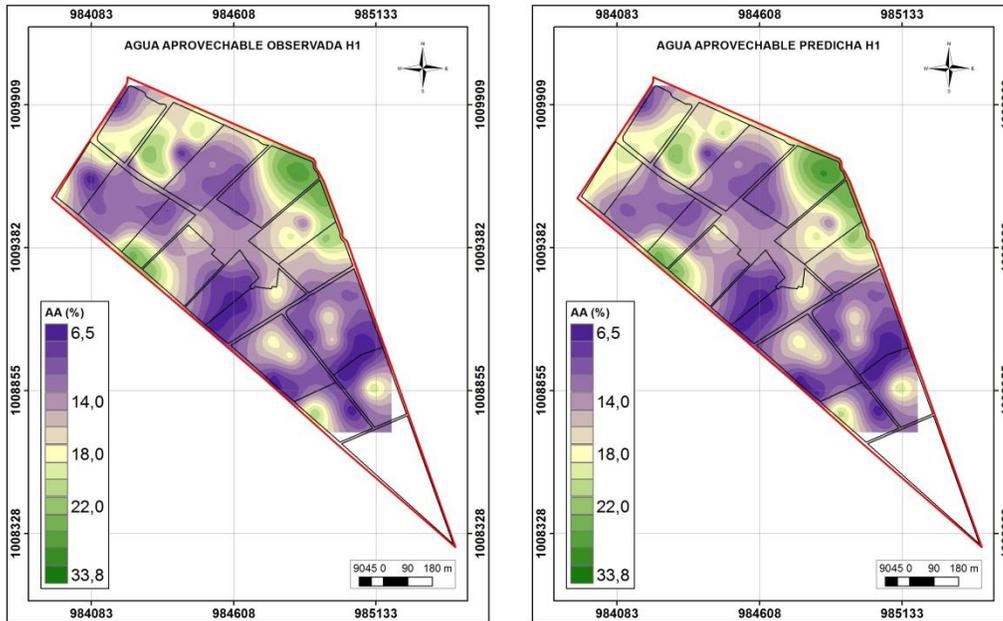
**Tabla 3-11:** Geoestadísticos del AA observada y predicha.

Propiedad	Horizonte	Modelo	$C_0$	$C_0 + C_1$	$A$ (m)	$R^2$	GDE	CVC
AA Observadas	H1	Exponencial	0,100	34,500	402,000	0,772	0,997	0,530
	H2	Exponencial	0,100	38,650	480,000	0,739	0,997	0,759
AA Predichas	H1	Exponencial	0,100	35,960	453,000	0,787	0,997	0,592
	H2	Exponencial	0,100	40,500	489,000	0,736	0,998	0,755

En las **Figura 3-21** y **Figura 3-22**, se puede observar que los suelos de los lotes 1 a 3 presenta valores de AA medios a altos para H1 y H2 (Montenegro y Malagón, 1990). Según Ordóñez y Bolívar (2015), estos suelos corresponden a suelos del orden Andisol, los cuales se caracterizan por su alta capacidad de almacenamiento de agua (Gómez –

Rodríguez et al., 2013). Lo anterior, se debe principalmente a que el material volcánico es capaz de fijar las sustancias húmicas con mayor facilidad (Malagón, 2016) y así mismo facilitar la estructuración del suelo y por tanto su capacidad para almacenar agua (Martínez et al., 2008).

**Figura 3-21:** Distribución espacial del AA observada y predicha para H1.



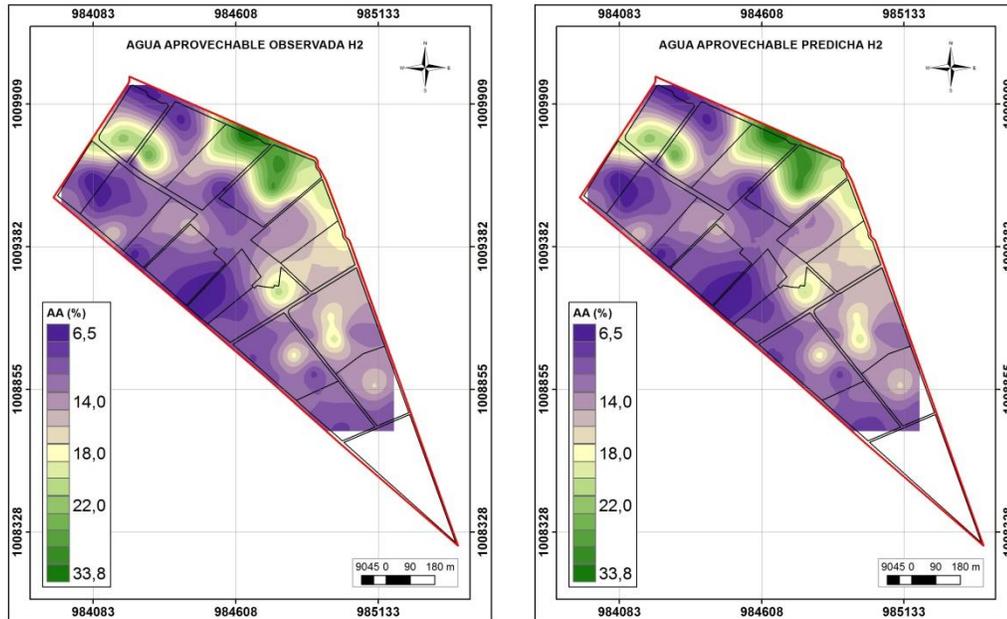
Sin embargo, algunos sitios de los lotes 1 a 3 presentan AA más bajas, debidas principalmente a la compactación del suelo con RMP superior a 2 MPa (Figura 3-25) donde la porosidad es media (Montenegro y Malagón, 1990) (Figura 3-23) y podría deberse el uso del mismo, pues precisamente estas zonas corresponden a las entradas a cada lote las cuales son transitadas por lo menos dos veces al día por el ganado vacuno

Por otra parte, para los lotes 4 a 17 se presentan valores de AA menores a 15% clasificados como bajos según Montenegro y Malagón (1990). Lo anterior se debe principalmente al aumento del contenido de arcilla en la textura del suelo, su densidad aparente y problemas de compactación (Figura 3-7 y Figura 3-8) en los dos horizontes de estudio.

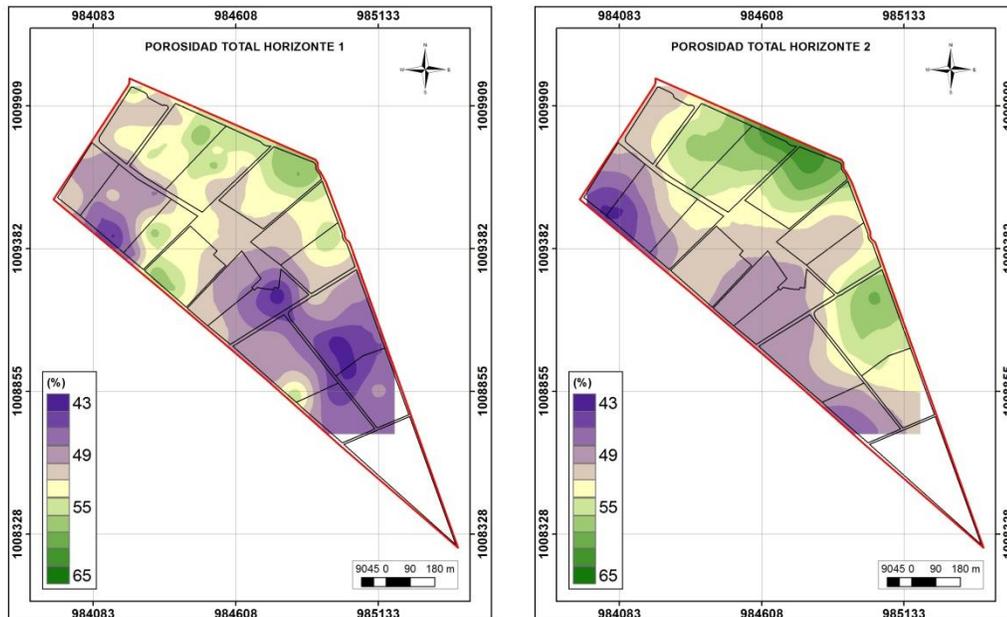
La porosidad total en el horizonte 1 es media a alta ( $PT > 55\%$ ) (Montenegro y Malagón, 1990) para los lotes 1 a 5, debido al material parental de dichos suelos (material volcánico) y baja para los demás lotes, principalmente aquellos dedicados a la ganadería

caprina, donde debe existir un predominio de los microporos los cuales definen principalmente un comportamiento horizontal de las CRH indicando también problemas de compactación en el suelo (Gómez – Rodríguez, 2013; Cortés-D, 2015).

**Figura 3-22:** Distribución espacial del AA observados y predichas para H2.



**Figura 3-23:** Distribución espacial de la porosidad total observada para H1 y H2.

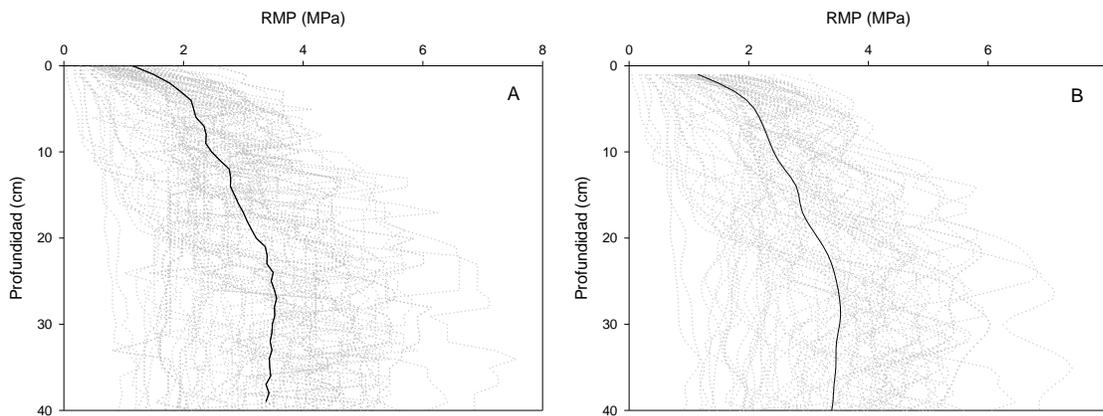


### Resistencia mecánica a la penetración

En la **Figura 3-24**, se tienen las curvas de RMP observadas y predichas; allí se puede observar que las curvas predichas presentan el mismo comportamiento ascendente en la RMP con el aumento de la profundidad que las curvas observadas.

Se calculó un coeficiente de determinación para cada curva predicha respecto de su original. El coeficiente de determinación de las curvas predichas en media es de 0,949 lo que indica que el predictor funcional implementado es capaz de explicar aproximadamente el 95% de la varianza total. Es importante resaltar que algunas curvas que presentaban un incremento irregular de la RMP con la profundidad, arrojaron coeficientes de determinación más bajos ( $R^2$  cercanos a 0,6), situación que pudo haberse presentado por un error en el muestreo, ya que tan solo 4 sitios presentaron esta condición. Sin embargo, valores cercanos a este ajuste fueron encontrados por Cortés-D (2015) al evaluar este predictor en 75 sitios en suelos Oxisoles.

**Figura 3-24:** Curvas de Resistencia Mecánica a la Penetración observadas y predichas. A: Observadas, B: Predichas.



Al igual que las propiedades funcionales anteriores, la RMP fue mapeada mediante la implementación de la geoestadística clásica con los valores de RMP a 15 y 30 cm de profundidades, los estadísticos de los parámetros de ajuste se muestran en la **Tabla 3-12**. La RMP en las dos profundidades de estudio se ajustó a modelos esféricos de semivariograma, ajustes encontrados también por Medina et al. (2012) para profundidades inferiores a los 20 cm, con un GDE moderado para la RMP a los 15 cm y

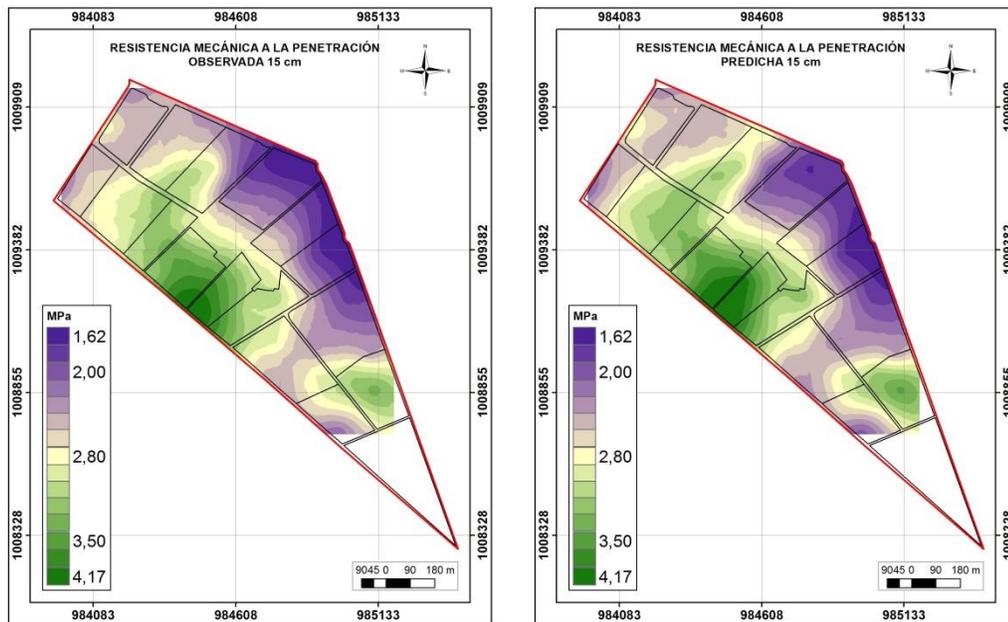
un GDE fuerte para los 30 cm, lo que explicaría la influencia de la intervención (uso y mecanización) en los suelos.

**Tabla 3-12:** Geoestadísticos para la RMP observada y predicha.

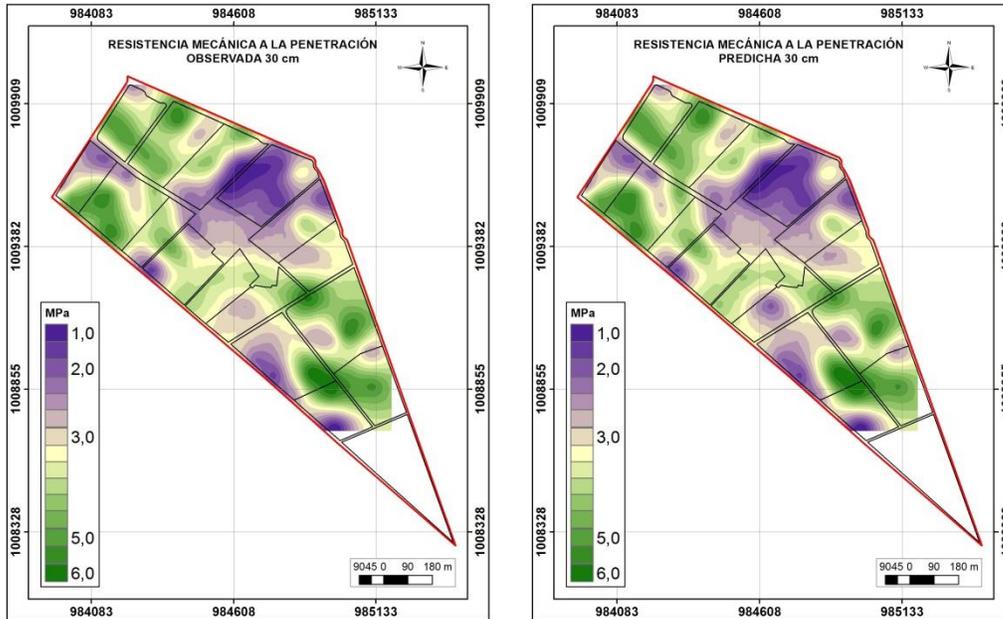
Propiedad	Profundidad (cm)	Modelo	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub>	A (m)	R <sup>2</sup>	GDE	CVC
RMP Observadas	15	Esférico	0,613	1,380	622	0,729	0,556	0,601
	30	Esférico	0,001	1,505	148	0,470	0,990	0,729
RMP Predichas	15	Esférico	0,560	1,407	581	0,751	0,636	0,586
	30	Esférico	0,001	1,558	144	0,444	0,990	0,783

En la **Figura 3-25** y **Figura 3-26** se presenta la distribución espacial de la RMP para las dos profundidades de estudio, se observa que en los lotes 12 a 16 se presentan RMP altas a muy altas, según las clasificación del IGAC (2014), esto, debido al alto contenido de arcillas en esta zona. Además, las UCS reportadas por Ordóñez y Bolívar (2015) indican la presencia de integrados vérticos en estas zonas, característica que indica una condición de consistencia del suelo de dura a extremadamente dura (IGAC, 2014) en épocas donde el suelo se encuentra seco.

**Figura 3-25:** Resistencia mecánica a la penetración observada y predicha a 15 cm de profundidad.



**Figura 3-26:** Resistencia Mecánica a la Penetración observada y predicha a 30 cm de profundidad.



En contraste, en los lotes 4 a 7 se encuentran RMP bajos (IGAC, 2014) menores a 2 MPa, lo que es de esperarse si se tiene en cuenta que estos lotes han sido dedicados a prácticas de cultivos. En adición, se puede decir que estos lotes son óptimos para el desarrollo radicular, teniendo en cuenta que valores superiores a 2 MPa representan una limitación al crecimiento radicular (Chan et al., 2006; Hamza y Anderson, 2005).

En cuanto a la RMP a 30 cm de profundidad, se puede observar que en la mayoría del área se encuentran valores significativamente más altos que en H1, lo que indica la existencia de un pié de arado si se tiene en cuenta que todos los lotes del CAM han sido mecanizados y en algunos de estos el uso ha sido rotativo.

## 3.4 Definición de zonas homogéneas

La definición de zonas homogéneas fue hecha por dos métodos, análisis clúster y análisis por componentes principales. En las dos técnicas se realizó estudios de casos, se agruparon los puntos de muestreo y se mapearon según la técnica.

### 3.4.1 Análisis Cluster

En la **Figura 3-27**, se puede observar dos grupos marcados con una distancia Euclidiana de 20. El primer grupo compuesto por  $I_b$ ,  $K_s$ ,  $S$ ,  $Ar$ ,  $RMP$ ,  $DMP$ ,  $d_a$ ,  $d_r$  y macroporos son propiedades que principalmente determinan el movimiento de agua en el suelo y por tanto, son aquellas que se tendrían en cuenta a la hora de definir zonas de manejo homogéneo para riego.

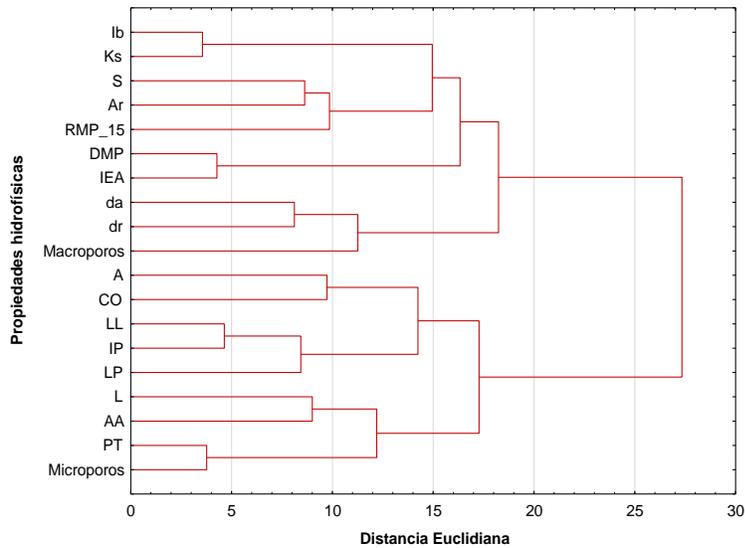
En el segundo grupo se encuentran las demás propiedades. Sin embargo, en este grupo podemos observar dos grupos jerárquicos más específicos que asocian propiedades que describen la consistencia del suelo ( $LP$ ,  $LL$  e  $IP$ ) y su relación con el  $CO$ , las cuales serían parámetros para la definición de zonas de manejo homogéneo para mecanización. De igual manera, otro grupo que describe el almacenamiento de agua en el suelo a través del  $AA$  y los microporos que en los suelos de estudio representan más del 90% de la  $PT$ .

El análisis clúster por puntos de muestreo integrando todas las variables de estudio definió 4 grupos homogéneas para  $H1$ . El clúster 1 se conformó por 28 puntos, el clúster 2 por 12 puntos, el clúster 3 por 18 puntos y el clúster 4 por 12 puntos. Cada propiedad tiene un valor medio en cada clúster las cuales han sido definidas por los puntos pertenecientes a cada uno con un centroide común (**Gráfica 3-28**). Las propiedades de cada zona de manejo se presentan en la **Tabla 3-13**.

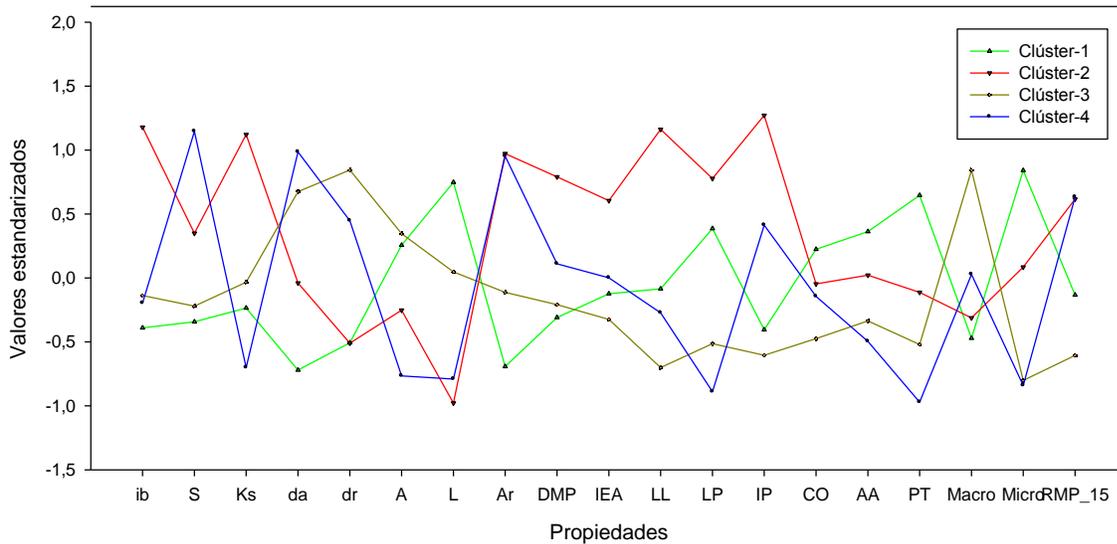
El mapeo de las zonas homogéneas se hizo manualmente según la distribución de los grupos de puntos (**Figura 3-29**). La zona homogénea 1 representa las áreas que cuentan con características de buen drenaje, mayor capacidad de almacenamiento de agua y estructuración óptima del suelo, pues esta zona cuenta con velocidad de infiltración, conductividad hidráulica y agua aprovechable más altos en la zona de estudio. Adicionalmente, en esta zona los valores de densidad aparente en media son de

1,01 g cm<sup>-3</sup>, condiciones que facilitan el desarrollo radicular al inferir una alta porosidad y estructuración del suelo, debida principalmente a que en este grupo se presentan también los mayores contenidos de carbono orgánico.

**Figura 3-27:** Análisis Cluster para las propiedades de estudio en H1.



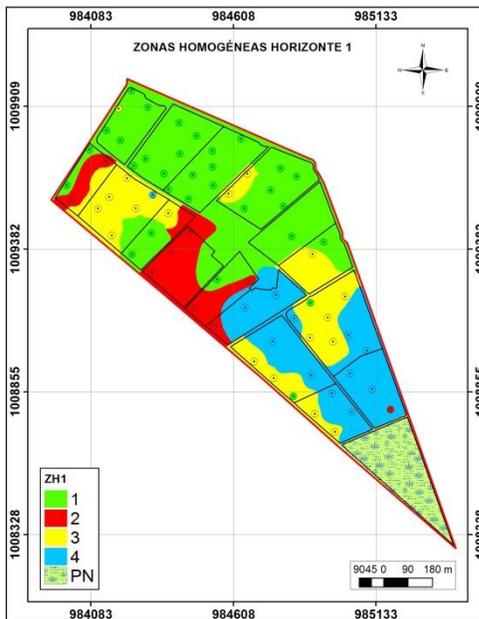
**Gráfica 3-28:** Centroides para cada clúster en H1.



Al comparar la zona homogénea 1 con las UCS de Marengo, se puede observar que aproximadamente más de la mitad del área se clasifican suelos andisoles, molisoles ó

intergradados ándicos en régimen de humedad del suelo ústico (Ordóñez y Bolívar, 2015). Lo que es de esperarse, pues el aporte de materiales volcánicos en el material parental del suelo y los contenidos de carbono orgánico principalmente ácidos húmicos presentes en este orden de suelo, facilitan la estructuración del mismo y por tanto el movimiento y almacenamiento de agua (Malagón, 2016).

**Figura 3-29:** Zonas homogéneas definidas con análisis Cluster para H1.



La zona homogénea 2 presenta los mayores valores de infiltración básica, y conductividades hidráulica muy rápidas; estas propiedades, describen zonas donde inicialmente se podría decir que son características de drenaje excesivo; sin embargo, el alto contenido de arcilla y RMP alta representan condiciones en las cuales el movimiento de agua en el suelo es más lento.

Lo anterior se puede traducir en que las infiltraciones altas están dadas principalmente por la presencia de grietas en el perfil del suelo, pues según Ordoñez y Bolivar (2015), esta zona corresponde a intergradados vérticos con regímenes de humedad ácuicos, lo cual es consecuencia de los altos contenidos de arcilla.

**Tabla 3-13:** Características de las zonas homogéneas definidas por análisis clúster para H1.

Variables	Zona 1		Zona 2		Zona 3		Zona 4	
	Media	CV	Media	CV	Media	CV	Media	CV
<b>I<sub>b</sub></b>	15,08	0,26	53,34	1,46	21,26	1,14	19,81	0,26
<b>S</b>	22,47	0,28	47,88	0,82	26,96	0,70	77,08	2,07
<b>K<sub>s</sub></b>	10,83	0,21	44,13	1,22	15,79	0,92	-0,59	0,93
<b>d<sub>a</sub></b>	1,01	0,55	1,11	0,54	1,21	0,44	1,25	0,31
<b>d<sub>r</sub></b>	2,27	0,54	2,27	0,47	2,37	0,46	2,34	1,54
<b>A</b>	11,52	1,07	10,18	1,51	11,76	0,36	8,82	0,81
<b>L</b>	49,70	0,55	37,31	0,53	44,67	0,37	38,67	0,51
<b>Ar</b>	38,78	0,30	52,51	0,45	43,56	0,36	52,35	0,49
<b>DMP</b>	3,05	1,12	4,26	0,42	3,16	1,09	3,51	0,53
<b>IEA</b>	78,18	1,63	87,51	0,18	75,62	0,85	79,78	0,52
<b>LL</b>	62,03	0,31	76,14	1,08	55,06	0,17	59,90	0,43
<b>LP</b>	35,33	0,57	37,75	1,56	29,77	0,29	27,46	0,18
<b>IP</b>	26,69	0,21	38,48	1,06	25,29	0,18	32,44	0,71
<b>CO</b>	5,03	0,77	4,35	0,64	3,28	0,28	4,11	0,24
<b>AA</b>	0,17	1,20	0,15	1,03	0,13	0,40	0,12	0,74
<b>PT</b>	55,56	0,61	51,27	0,68	48,96	0,45	46,42	0,42
<b>Macro</b>	1,81	0,26	2,26	0,72	5,51	1,60	3,22	0,62
<b>Micro</b>	53,75	0,52	49,01	0,74	43,45	0,39	43,20	0,23
<b>RMP_15</b>	2,64	0,74	3,47	0,99	2,11	0,64	3,49	1,22

Esta zona 2 tiene una menor capacidad de almacenamiento de agua que la zona 1, con índice de plasticidad mayor como consecuencia del LP y por tanto requiere mayor contenido de agua para ser mecanizado en condiciones óptimas.

La zona 3, representa áreas donde la densidad aparente es más alta, producto del alto contenido de arcillas. Además, debido a densidades más altas y porcentaje de poros menor, es capaz de almacenar menor cantidad de agua (13,2%).

Sin embargo, esta zona presenta RMP más bajas en comparación con las demás zonas, debido principalmente a dos factores: el primero de ellos es que estos puntos corresponden a lotes mecanizados o sitios ubicados cerca de canales de riego y drenaje,

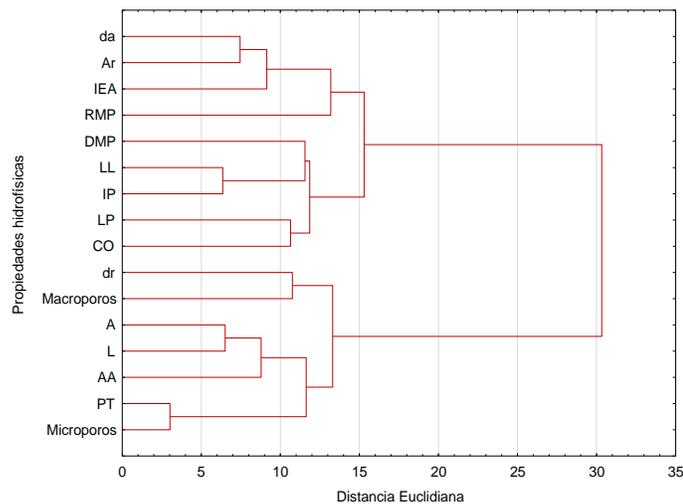
condición en la cual el suelo está saturado y por tanto facilita la ruptura de los agregados por parte del penetrelogger.

Finalmente la zona 4 obedece principalmente a problemas de compactación en el suelo debido al pisoteo de ganado caprino. Este problema de compactación se traduce en densidades aparentes altas, menor cantidad de poros y por tanto menor capacidad de almacenamiento de agua.

En conclusión, puede decirse que las zonas homogéneas están definidas en función de la capacidad de almacenamiento de agua, como una característica de la interacción de todas las propiedades del suelo. Por tanto, el mapa de zonas homogéneas obedece a un mapa de humedad aprovechable.

Para H2 se realizó el análisis clúster de variables en el cual se identificó dos grupos de propiedades con una distancia euclidiana de 16 (**Figura 3-30**). El primer grupo habla de propiedades que dan cuenta de la estructuración del suelo, la estabilidad de los agregados y el carbono orgánico y el contenido de arcilla como uno de los factores más importantes en el desarrollo de la estructura del suelo (Moradi, 2013). El segundo grupo de propiedades definen principalmente la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo a través del AA y la distribución de poros.

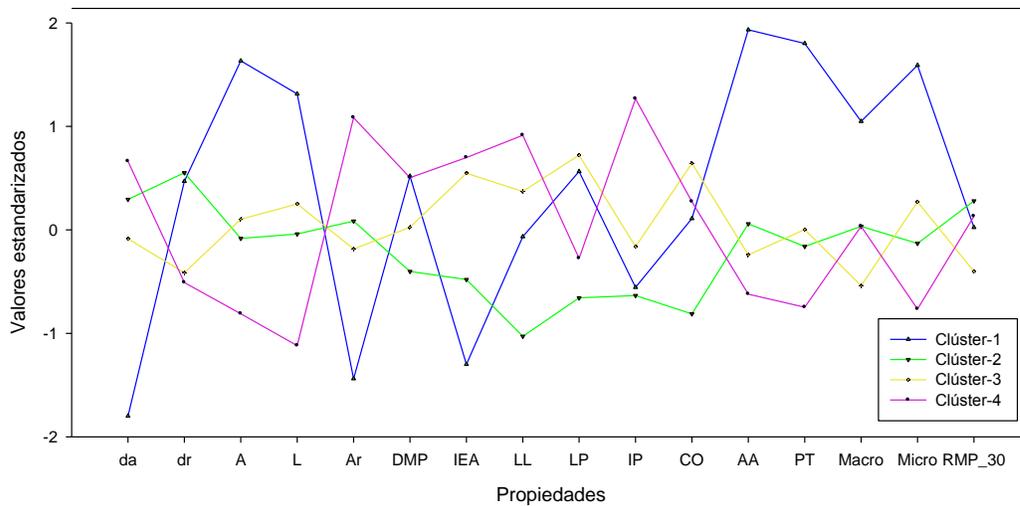
**Figura 3-30:** Análisis Cluster para las propiedades de estudio en H2.



Al igual que en H1 se definieron 4 grupos de puntos con características similares entre; el grupo 1 con 12 sitios, grupo 2 con 24 sitios, grupo 3 con 22 sitios y grupo 4 con 17 sitios. Cada propiedad tiene un valor medio en cada clúster las cuales han sido definidas por los puntos pertenecientes a cada uno con un centroide común (**Gráfica 3-31**).

Las características de cada una de las zonas que fueron mapeadas manualmente según la distribución de los puntos por grupos se muestran en la **Tabla 3-14**.

**Gráfica 3-31:** Centroides (k-means) para cada clúster en H2.



En la (**Figura 3-32**) La zona homogénea 1 describe las áreas donde se presentan las menores densidades aparentes, menores contenidos de arcillas y por tanto mayor capacidad de almacenamiento de agua (29%).

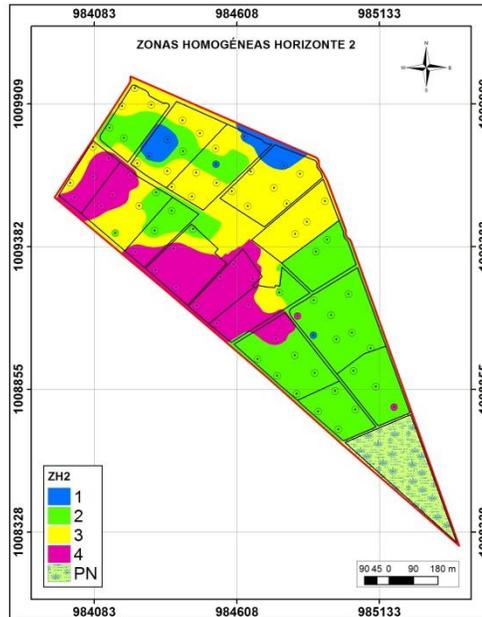
La zona 2 comprende suelo con mayor contenido de arcilla, mayor estabilidad en los agregados del suelo y densidad aparente mayor. Sin embargo, la característica de esta zona la constituyen los altos valores de RMP lo que define una capa compactada en el segundo horizonte podría indicar un pié de arado, si se tiene en cuenta que estas zonas corresponden a los lotes 1, 2, 3 y 4, donde tradicionalmente se han rotado actividades ganaderas y agrícolas en las cuales se ha implementado el uso del tractor (Ordoñez y Bolívar, 2015).

**Tabla 3-14:** Características de las zonas homogéneas definidas por análisis Cluster para H2.

Variables	Zona 1		Zona 2		Zona 3		Zona 4	
	Media	CV	Media	CV	Media	CV	Media	CV
da	0,82	0,14	1,14	0,58	1,08	0,30	1,20	0,50
dr	2,38	0,80	2,39	0,57	2,32	1,01	2,32	0,91
A	18,57	0,97	12,54	0,64	13,19	0,45	9,99	0,29
L	57,85	1,24	47,55	0,39	49,76	0,15	39,34	0,37
Ar	23,58	0,91	39,93	0,31	37,05	0,16	50,67	0,34
DMP	4,13	8,57	2,12	0,25	3,05	0,12	4,10	0,10
IEA	41,72	1,96	60,11	0,82	83,14	0,19	86,53	0,08
LL	57,59	0,36	49,88	0,47	61,08	0,44	65,42	0,50
LP	33,16	1,47	26,22	0,29	34,05	0,83	28,39	0,91
IP	24,29	0,16	23,74	0,39	27,02	0,39	36,97	0,55
CO	3,56	1,98	2,35	0,54	4,26	0,70	3,77	0,62
AA	0,29	1,84	0,16	0,52	0,14	0,35	0,11	0,16
PT	65,50	0,15	52,21	0,51	53,32	0,32	48,23	0,55
Macro	5,16	1,92	2,67	1,03	1,26	0,13	2,67	0,47
Micro	60,34	0,59	49,54	0,84	52,06	0,44	45,56	0,53
RMP_30	3,56	0,85	3,89	1,35	3,00	0,75	3,70	0,87

La zona 3 se caracteriza por la estabilidad de los agregados del suelo como un producto de los altos contenidos de carbono orgánico y arcilla que este tiene (Moradi, 2013). Adicionalmente, aunque los valores de RMP en todo el CAM representan una restricción al crecimiento de raíces ( $RMP > 2$  MPa), esta zona es la que presenta menores valores de RMP en H2, debido a la adecuada estructuración del suelo. En cuanto a las labores de cultivo, estos suelos al igual que la zona 1, son aquellos que requieren mayor contenido de agua para lograr el contenido de humedad óptimo para la mecanización descrito como el límite plástico según (Keller, 2004).

Finalmente, la zona 4 representa aquellos suelos más pesados, adensados, con contenidos mayores de arcilla que debido a la alta microporosidad no es capaz de ceder el agua a las plantas y por tanto poseen baja capacidad de almacenamiento. Sin embargo, estos suelos de texturas finas y próximos a los canales de drenaje concuerdan con lo descrito por Ordóñez y Bolívar (2015) quienes reportan estas zonas con regímenes de humedad ácuico.

**Figura 3-32:** Zonas homogéneas definidas con análisis Cluster para H2.

### 3.4.2 Índice de suelo (ACP)

Se definieron zonas homogéneas para H1 mediante el cálculo de un índice de suelo basados en 7 componentes principales con autovalores mayores a uno los cuales lograron explicar el 83,04% de la variación en las propiedades (**Tabla 3-15**).

El CP1 incluye aquellas propiedades más determinantes en la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. El CP1 es una combinación lineal directamente proporcional a la densidad aparente y el contenido de arcilla e inversamente proporcional al contenido de limo, la porosidad total, la microporosidad y el agua aprovechable. Estas dos últimas propiedades también fueron encontradas en el primer componente principal del análisis, hecho a los lotes 14 y 15 (Mogollón, 2012).

El CP2, expresa principalmente las propiedades de estructuración y consistencia del suelo (DMP, IEA, LL, LP e IP), las cuales describen o explican el 20,23% de la varianza total de las propiedades.

La RMP es principalmente expresada en el CP4, el cual podría ser un componente que describe las condiciones de compactación del suelo. Sin embargo, este componente

explica tan solo el 8,1% de la varianza total, lo que se esperaba pues la RMP para los dos horizontes tiene un comportamiento similar en toda el área de estudio.

**Tabla 3-15:** Componentes principales para H1.

Variables	Componentes Principales						
	1	2	3	4	5	6	7
$i_b$	0,465	-0,478	0,290	-0,011	<b>-0,483</b>	0,468	-0,014
<b>S</b>	0,490	-0,082	-0,391	-0,329	-0,221	0,099	-0,295
$K_s$	0,271	-0,480	<b>0,490</b>	0,142	-0,443	0,442	0,099
$d_a$	<b>0,809</b>	0,372	0,145	0,271	0,068	-0,135	-0,258
$d_r$	0,408	0,488	-0,189	0,336	0,241	0,167	0,372
<b>A</b>	-0,158	0,250	0,132	<b>0,592</b>	-0,472	-0,290	0,094
<b>L</b>	<b>-0,791</b>	0,279	0,116	0,085	0,058	0,270	-0,288
<b>Ar</b>	<b>0,777</b>	-0,347	-0,147	-0,289	0,110	-0,144	0,231
<b>DMP</b>	0,344	<b>-0,509</b>	-0,497	0,408	0,240	0,211	-0,017
<b>IEA</b>	0,247	<b>-0,524</b>	-0,487	0,465	0,138	0,169	-0,100
<b>LL</b>	-0,083	<b>-0,793</b>	0,377	0,149	0,340	-0,171	0,024
<b>LP</b>	-0,486	<b>-0,553</b>	0,264	0,337	0,216	-0,056	-0,132
<b>IP</b>	0,316	<b>-0,700</b>	0,330	-0,083	0,319	-0,207	0,158
<b>CO</b>	-0,209	-0,389	-0,019	0,014	-0,390	<b>-0,593</b>	0,035
<b>AA</b>	<b>-0,533</b>	-0,190	0,087	-0,091	0,282	0,138	-0,445
<b>PT</b>	<b>-0,789</b>	-0,273	-0,216	-0,209	-0,008	0,194	0,396
<b>Macro</b>	0,138	0,423	0,465	-0,184	0,370	0,214	0,258
<b>Micro</b>	<b>-0,734</b>	-0,420	-0,390	-0,097	-0,170	0,071	0,224
<b>RMP_15</b>	0,374	-0,407	-0,053	<b>-0,406</b>	-0,036	-0,080	-0,215
<b>Autovalor</b>	4,775	3,844	1,818	1,542	1,518	1,262	1,020
<b>% varianza total</b>	25,134	20,233	9,567	8,116	7,988	6,644	5,366
<b>% varianza acumulada</b>	25,134	45,367	54,934	63,050	71,038	77,682	83,048

En el mismo sentido, los CP 5 y 6 describen el comportamiento de la infiltración básica y el carbono orgánico en el suelo, explicando el 7,99 y 6,64% de la varianza total respectivamente.

Propiedades como la sortividad y la macroporosidad no fueron claramente expresadas en ningún componente principal, lo que ciertamente indica que dichas propiedades podrían

no tenerse en cuenta para definir zonas homogéneas en H1, pues no representan variación en el área de estudio.

Para H2, fueron estimados 5 componentes principales con autovalor mayor a 1 que explican el 77,37% de la varianza total (**Tabla 3-16**). El CP1 al igual que en H1 describe las propiedades que determinan principalmente la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo como resultado de su composición textural y la porosidad (da, A, L, Ar, AA, PT y Micro).

**Tabla 3-16:** Componentes principales para H2.

Variables	Componentes Principales				
	1	2	3	4	5
<b>da</b>	<b>0,808</b>	-0,405	0,193	0,043	-0,216
<b>dr</b>	-0,313	-0,271	-0,371	<b>0,631</b>	-0,284
<b>A</b>	<b>-0,775</b>	-0,023	0,197	0,011	0,026
<b>L</b>	<b>-0,817</b>	-0,163	0,397	-0,162	-0,071
<b>Ar</b>	<b>0,870</b>	0,127	-0,361	0,114	0,044
<b>DMP</b>	0,098	0,419	-0,439	0,099	-0,035
<b>IEA</b>	0,592	0,437	0,306	0,049	-0,175
<b>LL</b>	0,222	<b>0,867</b>	0,088	0,210	-0,054
<b>LP</b>	-0,403	<b>0,605</b>	0,260	0,045	-0,441
<b>IP</b>	<b>0,611</b>	0,519	-0,114	0,206	0,311
<b>CO</b>	-0,010	<b>0,628</b>	0,281	-0,386	0,322
<b>AA</b>	<b>-0,691</b>	0,021	-0,185	0,109	0,139
<b>PT</b>	<b>-0,845</b>	0,330	-0,264	0,106	0,136
<b>Macro</b>	-0,189	-0,165	0,281	0,511	<b>0,702</b>
<b>Micro</b>	<b>-0,779</b>	0,390	-0,366	-0,078	-0,116
<b>RMP_30</b>	0,087	-0,137	<b>-0,523</b>	-0,641	0,191
<b>Autovalor</b>	5,563	2,735	1,546	1,390	1,146
<b>% varianza total</b>	34,772	17,096	9,661	8,685	7,164
<b>% varianza acumulada</b>	34,772	51,868	61,528	70,214	77,378

El CP2, indica principalmente las propiedades de consistencia del suelo como una respuesta directa del contenido de carbono orgánico en el suelo, propiedades que

mostraron alta correlación entre ellas. Esto anterior también ha sido encontrado por Moradi (2013) en suelos con altos contenidos de arcilla.

La RMP se expresa a través del CP3 y explica el 9,66% de la varianza total de las propiedades en H2. Esto anterior representa una condición importante en el análisis y la definición de las zonas homogéneas de mecanización, pues se evidencia una vez más la presencia de pie de arado en los lotes 1 a 4, como se había mencionado anteriormente.

El CP4, indica que la densidad real explica o genera el 8,68% de la varianza total. Esta propiedad es importante cuando se quiere entender la influencia que tiene el material parental en la distribución de las propiedades del suelo.

Las zonas homogéneas fueron definidas de acuerdo al índice de suelo (IS) estimado como una combinación lineal de los 7 CP para H1 y 5 CP para H2 y como la combinación de 1 CP y 2 CP para los dos horizontes con el fin de comparar las zonas de homogéneas si no se analizaran todas las propiedades. Al igual que en el análisis clúster se definieron 4 zonas homogéneas de acuerdo al análisis de frecuencias de los IS.

En la **Figura 3-33**, se observan las zonas homogéneas definidas por el cálculo de un índice de suelo teniendo en cuenta el CP1 ( $IS_{1CP}$ ). Este componente principal es una combinación de la  $da$ ,  $L$ ,  $Ar$ ,  $AA$ ,  $PT$  y Microporosidad (**Ecuación 3-1**), propiedades que definen la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo como un producto de la composición textural y el espacio poroso del mismo.

**Ecuación 3-1:**  $IS_{1CP} = CP1 = 0,809 da - 0,791 L + 0,777 Ar - 0,533 AA - 0,789 PT - 0,734 Micro + \dots +$

Por lo anterior, las zonas homogéneas 3-1CP y 4-1CP de la **Figura 3-33**, representaran las zonas donde el suelo presenta mayores valores de densidad aparente y contenido de arcilla y por tanto un espacio poroso menor y en consecuencia una menor capacidad de almacenamiento de agua. En contraste, las zonas 1-1CP y 2-1CP representaran aquellos lugares donde el contenido de arcilla es menor, la densidad aparente es baja y por tanto se tiene una mejor distribución de poros y el suelo es capaz de almacenar más agua.

Cuando se definen las zonas homogéneas mediante la integración de los dos componentes principales mayores se definen aquellas zonas que además de tener las características de las zonas definidas con el  $IS_{1CP}$  tienen características de estructuración y consistencia similares (DMP, IEA, LL, LP e IP) (**Ecuación 3-3**).

**Ecuación 3-2:**

$$IS_{2CP} = CP1 + CP2$$

**Ecuación 3-3:**

$$CP2 = -0,509 DMP - 0,524 IEA - 0,793 LL - 0,553 LP - 0,7 IP + \dots +$$

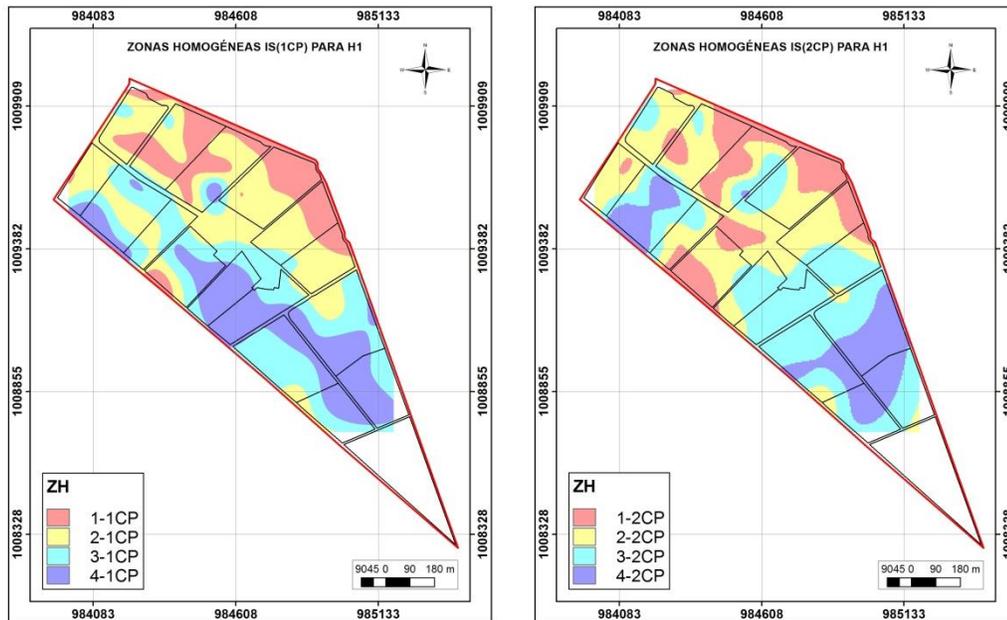
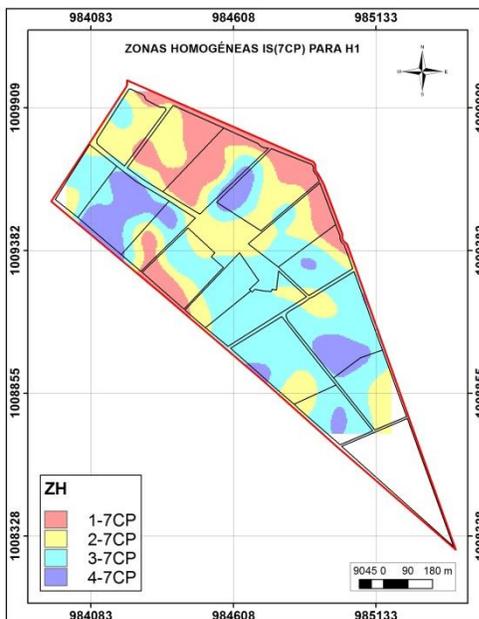
Las zonas 3-2CP y 4-2CP en la **Figura 3-33** además de las características mencionadas anteriormente, presentan, agregados pequeños, estabilidad estructural moderada a baja e índices de plasticidad menores. En adición, las zonas 1-2CP y 2-2CP serán aquellas zonas con las características de las zonas 1-1CP y 2-1CP, presentan estabilidades agregados de un mayor diámetro con estabilidad estructural moderada a alta e índices de plasticidad mayores lo que representa una ventaja en las labores de mecanización.

Finalmente, en la **Figura 3-34**, se muestran las zonas homogéneas definidas mediante la integración de las 16 variables de estudio para H1 y las características de cada zona se resumen en la **Tabla 3-17**.

En estas zonas definidas por los 7 componentes principales (1-7CP, 2-7CP, 3-7CP y 4-7CP), se presentan las características antes mencionadas en combinación con las demás variables de estudio ( $i_b$ , S,  $K_s$ ,  $d_r$  y RMP), propiedades que han sido expresadas en los componentes principales tres a siete.

La zona 4 representa aquellas áreas donde se presenta una menor RMP como producto de densidades aparentes bajas, menores contenidos de arcilla, mayor cantidad de poros y mayor capacidad de almacenamiento de agua. Las zonas 1, 2 y 3 presentan valores similares en la RMP.

En cuanto a las propiedades descritas por las pruebas de infiltración de agua en el suelo ( $i_b$ , S y  $K_s$ ) presentaron los mayores CV en todas las zonas, debido principalmente a la vulnerabilidad de este ensayo a la presencia de grietas y canales que aumentan la tasa de infiltración de agua.

**Figura 3-33:** Zonas homogéneas definidas por 1CP y 2CP en H1.**Figura 3-34:** Zonas homogéneas definidas por 7CP en H1.

En estas zonas definidas por los 7 componentes principales (1-7CP, 2-7CP, 3-7CP y 4-7CP), se presentan las características antes mencionadas en combinación con las demás variables de estudio ( $i_b$ ,  $S$ ,  $K_s$ ,  $d_r$  y RMP), propiedades que han sido expresadas en los componentes principales tres a siete.

La zona 4 representa aquellas áreas donde se presenta una menor RMP como producto de densidades aparentes bajas, menores contenidos de arcilla, mayor cantidad de poros y mayor capacidad de almacenamiento de agua. Las zonas 1, 2 y 3 presentan valores similares en la RMP.

En cuanto a las propiedades descritas por las pruebas de infiltración de agua en el suelo (ib, S y Ks) presentaron los mayores CV en todas las zonas, debido principalmente a la vulnerabilidad de este ensayo a la presencia de grietas y canales que aumentan la tasa de infiltración de agua.

**Tabla 3-17:** Características de las zonas homogéneas definidas por IS en H1.

Variables	Zona 1		Zona 2		Zona 3		Zona 4	
	Media	Cof.var	Media	Cof.var	Media	Cof.var	Media	Cof.var
<b>ib</b>	15,52	0,80	24,83	0,86	28,56	0,95	20,39	1,28
<b>S</b>	26,49	0,90	45,41	1,07	40,25	0,79	25,56	1,15
<b>Ks</b>	10,00	1,17	14,58	1,69	20,02	1,33	14,29	1,74
<b>da</b>	0,92	0,09	1,07	0,07	1,19	0,07	1,25	0,07
<b>dr</b>	2,24	0,02	2,28	0,02	2,33	0,03	2,38	0,02
<b>A</b>	10,95	0,28	11,04	0,32	10,52	0,19	11,51	0,12
<b>L</b>	49,78	0,14	44,62	0,16	41,40	0,15	45,53	0,09
<b>Ar</b>	39,27	0,16	44,35	0,18	48,08	0,15	42,76	0,11
<b>DMP</b>	3,20	0,36	3,29	0,38	3,60	0,21	3,07	0,43
<b>IEA</b>	81,20	0,15	78,53	0,21	80,89	0,11	74,99	0,18
<b>LL</b>	67,60	0,16	61,41	0,13	62,65	0,18	56,81	0,07
<b>LP</b>	38,50	0,12	33,30	0,16	31,12	0,20	30,61	0,11
<b>IP</b>	29,10	0,24	28,15	0,17	31,52	0,24	26,20	0,12
<b>CO</b>	5,87	0,38	4,87	0,35	3,69	0,37	2,90	0,41
<b>AA</b>	0,21	0,34	0,15	0,29	0,14	0,39	0,12	0,22
<b>PT</b>	58,81	0,06	53,02	0,07	48,76	0,08	47,36	0,08
<b>Macro</b>	1,40	1,05	1,92	0,71	3,44	0,75	6,56	0,52
<b>Micro</b>	57,42	0,07	51,10	0,08	45,32	0,07	40,80	0,07
<b>RMP_15</b>	2,78	0,37	2,91	0,39	2,99	0,36	2,01	0,49

Las zonas homogéneas para H2, también fueron definidas progresivamente a través del cálculo del índice de suelo a través de 1CP, 2CP y 5CP (**Tabla 3-16**). El área fue definida en 4 zonas al igual que el análisis Cluster para H2.

En la **Figura 3-35**, se puede observar 4 zonas homogéneas descritas por el primer componente principal, el cual está definido por propiedades que definen características como la capacidad de almacenamiento de agua como una respuesta a la textura y la distribución del espacio poroso del suelo de acuerdo a la **Ecuación 3-4** que corresponde a la combinación lineal de las propiedades para el CP1.

**Ecuación 3-4:**  $IS_{1CP} = 0,808 da - 0,775 A - 0,817 L + 0,87 Ar + 0,611 IP - 0,691 AA - 0,845 PT - 0,779PT + \dots +$

Las zonas 1-1CP y 2-1CP corresponden a aquellas zonas donde las densidades aparentes son menores como producto de altos porcentajes de porosidad debido a un menor contenido de arcillas. En contraste, las zonas 3-1CP y 4-1CP corresponden aquellos lugares donde la densidad aparente es mayor como respuesta a texturas muy finas y cantidad de poros limitada, lo que concuerda con las UCS descritas por Ordoñez y Bolívar (2015), quienes reportan la presencia de horizontes con nomenclatura Bd lo que indica horizontes adensados en las mismas zonas.

Las zonas homogéneas descritas mediante la integración de los dos primeros componentes principales, definen índices de suelo que además de tener las características que describe el CP1, tiene en cuenta las descritas en el CP2 las cuales básicamente expresan la consistencia (LL y LP) del suelo como una respuesta al contenido de carbono orgánico, lo cual se puede corroborar también con la alta correlación entre estas dos propiedades para H2 (**¡Error! No se encuentra el origen de a referencia.**). (**Ecuación 3-6**).

**Ecuación 3-5:**  $IS_{2CP} = CP1 + CP2$

Donde

**Ecuación 3-6:**  $CP2 = 0,867 LL + 0,606 LP + 0,628 CO + \dots +$

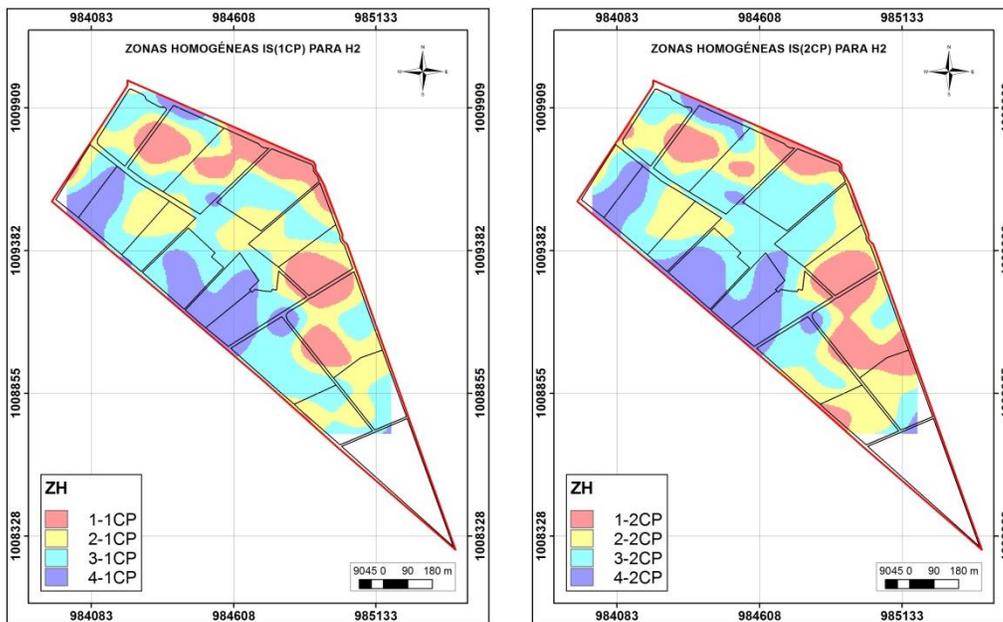
Por tanto, las zonas 1-2CP y 2-2CP en la **Figura 3-35** serán aquellas que además de presentar características óptimas para el almacenamiento de agua, presentan un límite plástico mayor al igual que el contenido de carbono orgánico; en contraste, las zonas 3-2CP y 4-2CP describen LL y LP inferiores al igual que el carbono orgánico; Estas

condiciones toman importancia cuando se planean labores de mecanización, pues aquellas zonas con LL y LP inferiores no podrán ser mecanizadas en épocas de lluvias donde seguramente el suelo estará cerca del LL y tendrá un comportamiento fluido que generaría mayores problemas de compactación y adensamiento.

Finalmente, el índice de suelo de los 5CP ( $IS_{5CP}$ ) con autovalores mayores a la unidad integran las 13 propiedades de estudio en el horizonte 2 en el cual se definieron también 4 zonas homogéneas cuyas características se describen en la **Tabla 3-18** y **Figura 3-36**.

La zona 1-5CP, representa aquellos lugares donde se presentan mayores RMP, estas zonas corresponde a los lotes 7 y 8 principalmente, dedicados a la ganadería caprina. Sin embargo, estos lotes son alternados entre pastos y cultivos, por lo que parte de ellos se han mecanizado, lo que podría inferir un pié de arado en esta zona.

**Figura 3-35:** Zonas homogéneas definidas por 1CP y 2CP en H2.



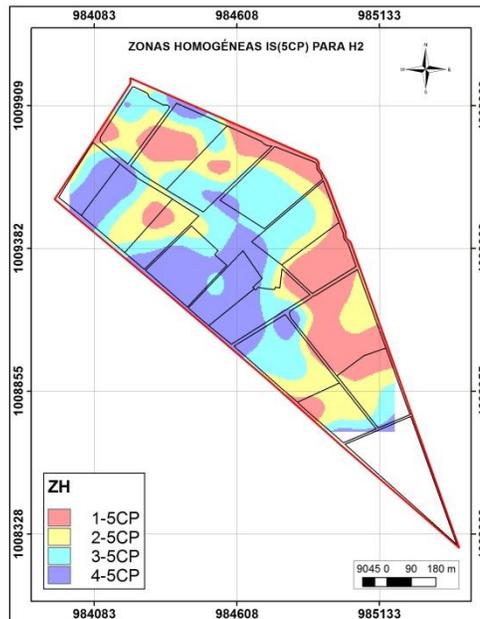
En cuanto a las características de estabilidad estructural del suelo, los agregados de mayor diámetro se encuentran en la zona 3-5CP y 4-5CP y tienen una estabilidad estructural moderada a alta, como respuesta a un contenido de carbono orgánico más alto para H2.

**Tabla 3-18:** Características de las zonas homogéneas definidas por IS en H2.

Variables	Zona 1		Zona 2		Zona 3		Zona 4	
	Media	Cof.var	Media	Cof.var	Media	Cof.var	Media	Cof.var
<b>d<sub>a</sub></b>	0,990	0,166	1,113	0,109	1,119	0,071	1,207	0,092
<b>d<sub>r</sub></b>	2,378	0,027	2,390	0,017	2,315	0,027	2,321	0,030
<b>A</b>	15,131	0,269	13,107	0,234	12,158	0,165	10,188	0,218
<b>L</b>	52,894	0,101	48,911	0,138	47,066	0,084	38,904	0,113
<b>Ar</b>	32,012	0,251	37,985	0,231	40,777	0,129	50,908	0,127
<b>DMP</b>	2,444	1,669	2,615	0,306	3,302	0,247	4,090	0,160
<b>IEA</b>	43,827	0,522	71,937	0,173	84,544	0,123	86,098	0,077
<b>LL</b>	52,205	0,149	54,596	0,120	60,018	0,078	65,162	0,112
<b>LP</b>	30,068	0,253	29,992	0,175	31,027	0,128	27,853	0,200
<b>IP</b>	22,137	0,176	24,663	0,112	28,992	0,135	37,243	0,144
<b>CO</b>	2,666	0,523	3,024	0,407	4,123	0,279	3,713	0,293
<b>AA</b>	0,210	0,437	0,164	0,335	0,123	0,288	0,112	0,246
<b>PT</b>	58,333	0,120	53,408	0,092	51,664	0,065	47,926	0,106
<b>Macro</b>	2,725	0,839	2,080	1,098	1,967	0,741	2,798	0,626
<b>Micro</b>	55,608	0,120	51,328	0,086	49,697	0,069	44,551	0,121
<b>RMP_30</b>	4,098	0,227	3,516	0,428	3,147	0,371	3,488	0,409

Las zonas homogéneas previamente definidas por los dos métodos (clúster e índice de suelo), fueron mapeadas por medio del software SIG (ArcGis), el cual permitirá hacer uso de esta información geográfica para la planeación y ejecución de labores de mecanización o riego en el marco de la implementación de la agricultura de precisión en el Centro Agropecuario Marengo.

Es importante resaltar que las zonas homogéneas definidas por los 3 tipos de índices de suelo ( $IS_{1CP}$ ,  $IS_{2CP}$ ,  $IS_{5CP}$ ) para H2 son semejantes y cambian poco en el espacio, lo que es una respuesta de la alta correlación observada entre las propiedades para este horizonte. Caso contrario sucede con H1, donde las condiciones antrópicas como las prácticas de riego, mecanización y el uso del suelo alteran las condiciones naturales y lo degradan.

**Figura 3-36:** Zonas homogéneas definidas por 5CP en H2.

## **4. Conclusiones y recomendaciones**

### **4.1 Conclusiones**

Los suelos del CAM son superficiales a muy superficiales, producto de la presencia de capas compactadas que representan una restricción al crecimiento radicular.

A pesar del alto contenido de carbono orgánico en el primer horizonte, este no es capaz de cumplir su papel en la agregación y la estructuración del mismo, debido al antagonismo del sodio proveniente del agua de riego.

La degradación de los suelos del CAM se debe principalmente a procesos de compactación y salinización que impiden la adecuada estructuración y capacidad de retención de agua del mismo.

Las superficies de distribución espacial de las propiedades físicas como el contenido de arcilla, carbono orgánico, agua aprovechable y resistencia mecánica a la penetración son un insumo para la delineación de nuevas fases y familias dentro de las unidades cartográficas de suelos del levantamiento detallado del CAM.

### **4.2 Recomendaciones**

Las superficies de propiedades físicas generadas en este trabajo y futuros estudios centrados en las propiedades químicas o mineralógicas son un insumo importante en la delineación de nuevas fases o familias por tamaño de partículas o profundidad efectiva de las UCS del estudio de suelos del CAM con el fin de llevarlo a una escala más detallada.

Es prioritaria la mitigación de la degradación de los suelos del CAM mediante la implementación de prácticas que minimicen el efecto del sodio en el suelo para que así el carbono orgánico pueda estructurarlo, mejorando su porosidad y por tanto su capacidad de almacenamiento de agua.

Los ensayos de infiltración deben realizarse al inicio de la temporada de lluvias, momento en el cual el suelo ha sido capaz de cerrar las grietas en su perfil y no incrementará la lámina de agua infiltrada.

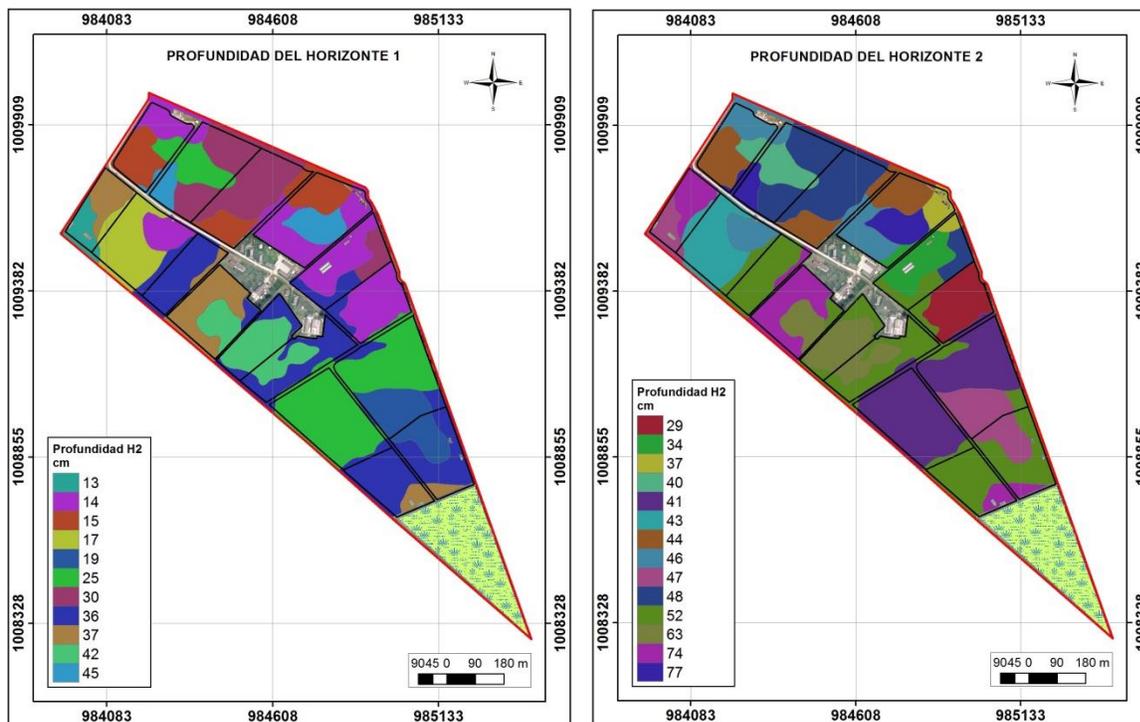
Con la base de datos conformada en la presente tesis podría realizarse diversos estudios de análisis espacial como la implementación del predictor Cokriging, la definición de funciones de pedotransferencia, la huella ambiental de los suelos del CAM en su emisión de CO<sub>2</sub> o incluso su capacidad para actuar como sumidero de este gas.

## A. Anexo: Clasificación Taxonómica de las UCS del CAM

UCS	Clasificación Taxonómica	Área (ha)
EUII3cS1ka	Humic Haplustands, medial, mezclada, isomésica	7,08
EU3cka	Humic Haplustands, medial, mezclada, isomésica	2,25
FE3cka	Andic Humustepts, franca sobre medial, mezclada, superactiva, isomésica	1,59
AC3S2ka	Cumulic Haplustolls, franca fina, mezclada, semiactiva, Isomésica	1,17
CI3ka	Oxyaquic Humustepts, franca sobre arcillosa, mezclada, semiactiva, isomésica	3,09
RA2ca	Aquandic Humaquepts, arcillosa sobre medial, aniso, mezclada, activa, isomésica	11,76
MA2ca	Aquandic Humaquepts, arcillosa sobre medial, mezclada, activa, isomésica	6,43
AV2ckyn	Aquandic Endoaquolls, arcillosa sobre medial, caolinitica, semiactiva, isomésica	3,89
HU2zn	Typic Humaquepts, arcillosa sobre franca, mezclada, activa, isomésica	4,95
OV2ca	Aquandic Humaquepts, arcillosa sobre medial, mezclada, activa, isomésica	3,53
MA2a	Fluvaquentic Humaquepts, arcillosa sobre franca, mezclada, activa, isomesica	4,27
GA2ca	Vertic Epiaquolls, franca sobre arcillosa, caolinita, semiactiva, isomésica	1,67
CL2S1kzn	Aquandic Epiaquolls, franca sobre medial, aniso, mezclada, semiactiva, isomésica	1,96
GA2ca	Vertic Epiaquolls, franca sobre arcillosa, caolinita, semiactiva, isomésica	3,76
EUII3cS1ka	Humic Haplustands, medial, mezclada, isomésica	1,00
FE3cka	Andic Humustepts, franca sobre medial, mezclada, superactiva, isomésica	1,04
CL2S1kn	Aquandic Epiaquolls, franca sobre medial, aniso, mezclada, semiactiva, isomésica	1,23
CL2S1kn	Aquandic Epiaquolls, franca sobre medial, aniso, mezclada, semiactiva, isomésica	2,23
CL2S1kn	Aquandic Epiaquolls, franca sobre medial, aniso, mezclada, semiactiva, isomésica	2,02
CL2S1kzn	Aquandic Epiaquolls, franca sobre medial, aniso, mezclada, semiactiva, isomésica	1,87
GA2ca	Vertic Epiaquolls, franca sobre arcillosa, caolinita, semiactiva, isomésica	0,88
OV2ca	Aquandic Humaquepts, arcillosa sobre medial, mezclada, activa, isomésica	6,39
IN3a	Oxyaquic Humustepts, franca sobre arcillosa mezclada, activa, isomésica	2,68
RI2S3kza	Aquic Haplustolls, franca sobre arcillosa, mezclada, semiactiva, isomésica	1,39
AB1ckza	Vertic Halaquepts, arcillosa sobre franca, aniso, caolinitica, semiactiva, isomésica	1,39

Fuente: IGAC, 2015.

## B. Anexo: Profundidad H1 y H2



Fuente: IGAC, 2015.

## C. Anexo: Correlación lineal de Pearson H1

	ib	K	da	dr	A	L	Ar	DMP	IEA	LL	LP	IP	CO	AA	PT	Map	Mip
<b>ib</b>	1																
<b>K</b>	,914**	1															
<b>da</b>	,188	,084	1														
<b>dr</b>	-,095	-,150	,479**	1													
<b>A</b>	-,071	,027	,115	,112	1												
<b>L</b>	-,352**	-,222	-,313**	-,210	,089	1											
<b>Ar</b>	,363**	,212	,256*	,155	-,418**	-,922**	1										
<b>DMP</b>	,259*	,197	,049	,096	-,165	-,345**	,386**	1									
<b>IEA</b>	,225	,176	-,043	,018	-,031	-,240*	,238*	,866**	1								
<b>LL</b>	,219	,299**	-,236*	-,352**	-,169	-,157	,191	,239*	,218	1							
<b>LP</b>	,051	,177	-,329**	-,292*	,025	,261*	-,213	,089	,142	,763**	1						
<b>IP</b>	,321**	,309**	,084	-,249*	-,243*	-,461**	,453**	,250*	,172	,714**	,049	1					
<b>CO</b>	,148	,183	-,157	-,357**	,142	-,080	,070	,076	,173	,239*	,251*	,049	1				
<b>AA</b>	-,223	-,147	-,412**	-,308**	-,136	,386**	-,346**	-,175	-,113	,225	,352**	-,055	-,047	1			
<b>PT</b>	-,240*	-,138	-,970**	-,255*	-,098	,315**	-,262*	-,031	,051	,156	,280*	-,178	,077	,365**	1		
<b>Map</b>	-,020	,030	,143	,224	-,128	,033	,017	-,245*	-,305*	-,083	-,213	,004	-,165	-,041	-,094	1	
<b>Mip</b>	-,158	-,098	-,836**	-,351**	,001	,350**	-,326**	,068	,161	,198	,391**	-,151	,189	,339**	,828**	-,534**	1

\*\* . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

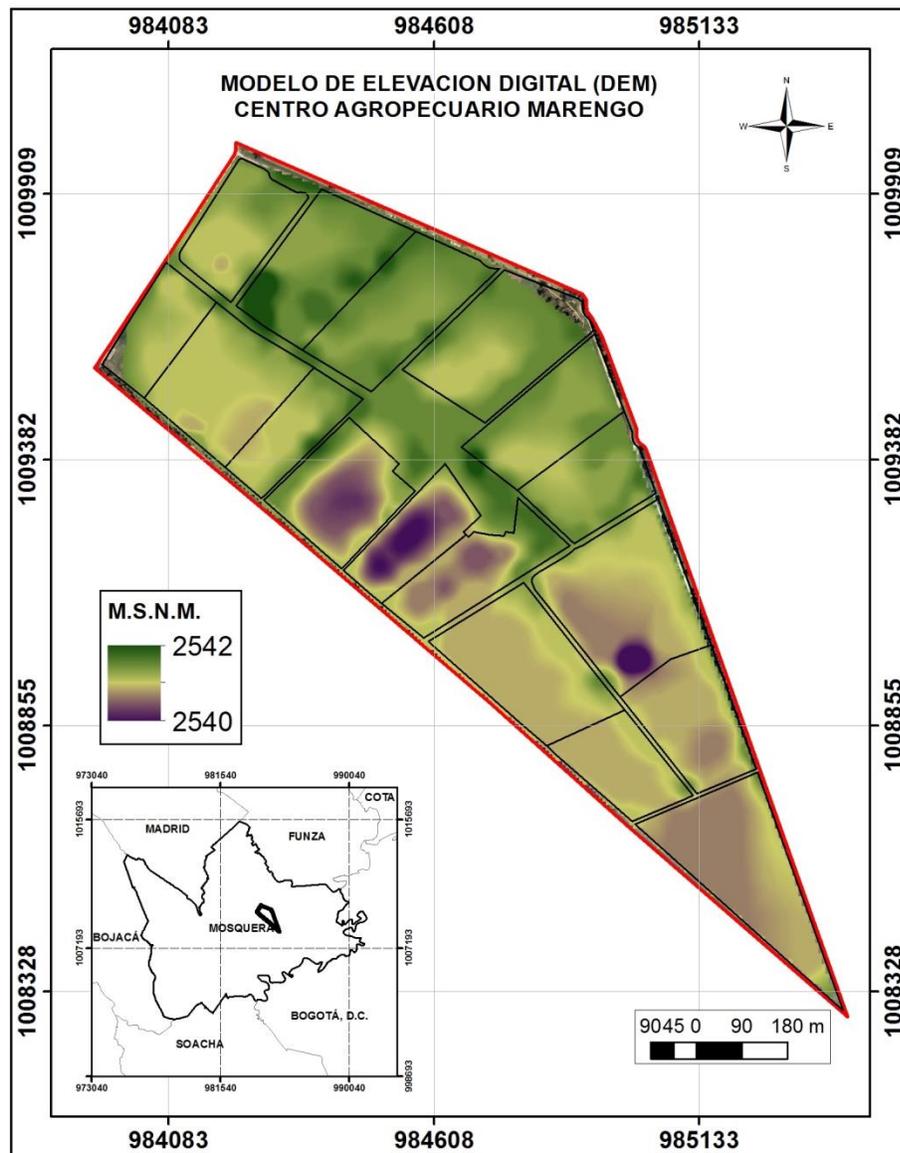
\* . La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

## D. Anexo: Correlación lineal de Pearson H2

	da	dr	A	L	Ar	DMP	IEA	LL	LP	IP	CO	AA	PT	Map	Mip
da	1														
dr	-,122	1													
A	-,562**	,259*	1												
L	-,524**	,081	,687**	1											
Ar	,613**	-,145	-,845**	-,942**	1										
DMP	,389**	-,177	-,411**	-,533**	,545**	1									
IEA	,324**	-,254*	-,417**	-,523**	,514**	,915**	1								
LL	-,035	-,205	-,147	-,249*	,230*	,450**	,445**	1							
LP	-,434**	,005	,291*	,338**	-,358**	,011	,078	,519**	1						
IP	,315**	-,245*	-,418**	-,568**	,565**	,504**	,447**	,718**	-,222	1					
CO	-,195	-,425**	,051	-,001	-,006	,221	,285*	,366**	,215	,244*	1				
AA	-,380**	,269*	,390**	,555**	-,545**	-,257*	-,294*	-,077	,283*	-,321**	-,305*	1			
PT	-,976**	,329**	,586**	,516**	-,613**	-,402**	-,357**	-,005	,426**	-,356**	,100	,436**	1		
Map	-,354**	,115	,183	,191	-,203	-,155	-,286*	-,019	-,031	,001	,038	,173	,365**	1	
Mip	-,902**	,270*	,472**	,414**	-,463**	-,301*	-,197	,057	,445**	-,307**	,154	,344**	,926**	,039	1

\*\* . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).  
 \* . La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

## E. Anexo: Modelo de Elevación Digital CAM.



Fuente: IGAC, 2015



## Bibliografía

Acevedo, E.; Martínez, E. (2003). Sistema de labranza y productividad de los suelos, en Acevedo, E.: Sustentabilidad en Cultivos Anuales. Santiago, Universidad de Chile, Serie Ciencias Agronómicas 8, 13-25.

Aggelopoulou, K.; Castrignanò A. M.; Gemtos, T.; De Benedetto, D. (2013). Delineation of management zones in an apple orchard in Greece using a multivariate approach. Computers and Electronics in Agriculture 90, 119–130.

Allen, R.; Pereira, L.; Raes, D.; Smith, M. (2006). FAO. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua en el cultivo. Organización de las naciones Unidad para la Agricultura y la alimentación. Roma.

Alvear, M.; Reyes, F.; Morales, A.; Arrigada, C.; Reyes, M. (2007). Actividad biológica y agregados estables al agua en dos tipos de formaciones vegetales de un bosque templado del Centro-Sur de Chile con perturbación antrópica. Ecología Austral. 17, 113-122.

Araujo, M. (2011). Variabilidad Espacial de las Propiedades Físicas, Químicas y Biológicas de dos Suelos Agrícolas de la Provincia de Quebec, Canadá. Departamento de Ingeniería, Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Zulia. Revista Facultad de Agronomía. Venezuela. Revista Facultad de Agronomía. 28, 223-241.

Aravena, C.; Diez, M. C.; Gallardo, F.; Mora, M. L.; Valentín, C. (2007). Utilización de lodo de la industria de celulosa y su efecto sobre las propiedades físico-químicas en suelos volcánicos degradados. Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal. 7, 1-14.

Arnau-Rosalén, E.; Calvo-Cases, A.; Boix-Fayos, C.; Lavee, H.; Sarah, P. (2008). Analysis of soil surface component patterns affecting runoff generation. An example of methods applied to Mediterranean hill slopes in Alicante (Spain). *Geomorphology* 101, 595-606.

Barthes, B.; Azontonde, A.; Boli, B. Z.; Prat, C.; Roose, E. (2000). Field-scale run-off and erosion in relation to topsoil aggregate stability in three tropical regions (Benin, Cameroon, Mexico). *European Journal of Soil Science* 51, 485–495.

Basile, A.; Ciollaro, G.; Coppola, A. (2003). Hysteresis in soil water characteristics as a key to interpreting comparisons of laboratory and field measurement hydraulic properties. *Water Resource Research*. 39, 1355.

Bonilla, M.; Cancino, V. (2001). Estimación del contenido de humedad del suelo mediante el empleo de funciones de pedotransferencia. *Agricultura Técnica Chillán* 61. 326 - 338.

Bourennane, H.; Nicoullaud, B.; Couturier, A.; King, D. (2004). Exploring the spatial relationships between some soil properties and wheat yields in two soil types. *Precision Agriculture* 5, 521-536.

Brejda, J.J.; Moorman, T.B.; Karlen, D.L.; Dao, T.H. (2000). Identification of regional soil quality factors and indicators. I. Central and Southern High Plains. *Soil Science Society of America Journal* 64, 2115–2124.

Buczko, U.; Bens, O.; Hu"ttl, R. F. (2006). Tillage effects on hydraulic properties and macroporosity in silty and sandy soils. *Soil Science Society of America Journal* 70, 1998–2007.

Caballero G, W. (2011). Tesis de Maestría. Kriging Universal para datos funcionales. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Estadística. Bogotá D.C.

Cabría, F.; Calandroni, M.; Monterubbianesi, G. (2002). Tamaño y estabilidad de agregados y su relación con la conductividad hidráulica saturada en suelos bajo labranza convencional y praderas. *Ciencia del Suelo* 20, 69-80.

Camacho-Tamayo, J.H.; Rubiano Sanabria, Y.; SANTANA, L. M. (2013). Management units based on the physical properties of an Oxisol. *Journal Soil Science and Plant Nutrition* 13, 767-785.

Cambardella, C.A.; Moorman, T. B, Novak, M. J.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Turco, R. F.; Konopka, A. E. (1994). Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society of America Journal* 58, 1501-1511.

Campano F, A. (2014). Tesis de Maestría. Estudio comparativo de la infiltración en áreas degradadas y naturales de la localidad de Saldaña (Palencia). Universidad de Valladolid.

Carrara, M.; Comparetti, A.; Febo, P.; Morello, G.; Orlando, S. (2003). Mapping soil compaction measuring cone penetrometer resistance. In: Werner, A.; Jarfe, A. (Eds.), *Libro resumen 4th Conferencia Europea de Agricultura de Precisión* (Berlin, Alemania). Holanda. Wageningen Academic Publishers.

Carrara M.; Castrignano, A.; Comparetti, A.; Febo, P.; Orlando, S. (2007). Mapping of penetrometer resistance in relation to tractor traffic using multivariate geostatistics. *Geoderma*. 142, 294 – 307.

Carter, M. R. (2002). Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal*. 94, 38-47.

Chan, K. Y. (2001). An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity—implications for functioning in soils. *Soil & Tillage Research*. 57, 179–191.

Chan, K.; Oates, A.; Swan, A.; Hayes, R.; Dear, B.; Peoples, M. (2006). Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. *Soil & Tillage Research*. 89, 13–21.

Chenu, C.; Le Bissonnais, Y.; Arrouays, D. (2000). Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 64, 1479-1486.

Chowdary, V.M.; Damodhara, R. M.; Jaiswal, C. S. (2006). Study of infiltration process under different experimental conditions. *Agricultural Water Management* 83, 69-78.

Correa, S. A. (2008). The Organic Matter of the soils of the Paramos of Chingaza, Sumapaz and Neusa. Bogotá D. C. Editor Thomas Van de Hammen.

Cortés-D, D. L. (2015). Tesis de Maestría. Aplicación de la estadística funcional en el estudio de algunos atributos hidrofísicos del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Bogotá D. C.

Cortés-D, D. L.; Camacho-Tamayo, J. H.; Giraldo, R. (2016). Spatial prediction of soil penetration resistance using functional geostatistics. *Scientia Agricola* 73, 455 - 461.

Corwin, D. L.; Lesch, S. M. (2010). Delineating site-specific management units with proximal sensors. In: *Geostatistical applications for precision agriculture*. Estados Unidos. Oliver Mo, editores

Cosentino, D.; Chenu, C.; Le Bissonnais, Y. (2006). Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 38, 2053-2062.

Cucunubá-Melo, J.R.; Álvarez-Herrera, J. G.; Camacho-Tamayo, J.H. (2011). Identification of Agronomic Management Units Based on Physical Attributes of Soil. *Journal of Soil Science* 11, 87- 99.

Curtaz, F.; Stanchi, S.; D'Amico, M.; Filippa, G.; Zanini, E.; Freppaz, M. (2014). Soil evolution after land-reshaping in mountains areas (Aosta Valley, NW Italy). *Agricultural Ecosystems and Environment* 199, 238–248.

Deutsch, C.V. (2006). A sequential indicator simulation program for categorical variable with point and block data: BlockSIS. *Computers and Geosciences* 32, 1669–1681.

El-Swaify, S. A. (2000). Soil and Water Salinity. En: *Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils*. Universidad de Hawaii. Estados Unidos. James A Silva and Raymond S Uchida Editors.

FAO. (2000). Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelo. Boletín de tierras y aguas de la FAO. Roma – Italia. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

FAO. (2002). CAPTURA DE CARBONO EN LOS SUELOS PARA UN MEJOR MANEJO DE LA TIERRA. Roma- Italia. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

FAO. (2016). Degradación del suelo. Portal de suelos de la FAO. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-portal/degradacion-del-suelo/es/>.

Febo, P.; Pessina, D. (2002). Ground pressures exerted by agricultural machines. En: Pagliai, M.; Jones, R. (Eds.), *Sustainable Land Management — Environmental Protection: A Soil Physical Approach*. Catena. 339–350.

FERREIRA, D. (2011). *Estatística Multivariada*. 2da edición. Lavras: ed. UFLA.

Flores, L.; Alcalá, J. (2010). *Manual de Procedimientos Analíticos*. Laboratorio de Física de Suelos. México. Universidad Nacional Autónoma De México.

Forero, J. (2000). Parámetros Hidrodinámicos para Riego. Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá.

Freitas, I.; Dos Santos, F.; Custódio, R.; Da Silva, A.; Correchel, V. (2012). Resistência à penetração em Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes formas de manejo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 16, 1275–1281.

Gabioud, E.; Wilson, M.; Sasal, M. (2011). Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo 129 – 139.

Gallardo A. (2006). Geostatística. Asociación Española de Ecología Terrestre. Ecosistemas 15, 48– 58.

Gallardo, A.; Maestre, F.T. (2008). Métodos geoestadísticos para el análisis de datos ecológicos espacialmente explícitos. En: Maestre, F.T.; Escudero, A. y Bonet, A. Introducción al análisis especial de datos en ecología y ciencias ambientales: Métodos y aplicaciones. Madrid, Universidad Rey Juan Carlos, Editorial Dykinson S.L. pp. 215-272.

García, D.; Cabana, M. (2014). Tesis de grado. Propiedades de retención de arcillas sobreconsolidadas por desecación del occidente de la sabana de Bogotá. Bogotá – Colombia. Universidad Santo Tomás.

García, J.; Medina, H. (2009). Correlaciones entre la curva de retención de humedad y propiedades físico-químicas de los suelos de la Habana. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 18, No. 2, 40 – 46.

Garzón-Gutiérrez, C. A.; Cortés, C. A.; Camacho-Tamayo, J. H. (2010). Variabilidad espacial de algunas propiedades químicas de un entisol. Rev. U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica 13, 87-95.

Gavande, A. (1972). Física de Suelos: Principios y Aplicaciones. México. Limusa - Wiley S.A.

Giraldo, R. (2002). *Introducción a la Geoestadística. Teoría y Aplicación*. Bogotá D. C. Universidad Nacional de Colombia.

Giraldo, R. (2009). Tesis doctoral. *Geostatistical Analysis of Functional Data*. España. Universitat Politècnica de Catalunya

Giraldo, R.; Delicado, P.; Mateu, J. (2010). Continuous time-varying kriging for spatial prediction of functional data: An environmental application. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* 15, 66–82.

Gómez, J.; Vanderlinden, K.; Nearing, M. (2005). Spatial variability of surface roughness and hydraulic conductivity after disk tillage: implications for runoff variability. *Journal of Hydrology*. 143 – 156.

Gómez, K. (2011). Tesis de Maestría. *Incidencia de la compactación ocasionada por el tractor en las propiedades físicas en un Andisol*. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia.

Gómez-Rodríguez, K.; Camacho-Tamayo, J.H.; Vélez-Sánchez, J.E. (2013). Changes in water availability in the soil due to tractor traffic. *Engenharia Agrícola* 33, 1156-1164.

Goovaerts, P. (1998). Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biology and Fertility Soil* 27, 315 – 334.

Goovaerts, P. (1999). Geostatistics in soil science: state of the art and perspectives. *Geoderma* 89, 1– 45.

Gustaferro, F.; Castrignano, A.; De Benedetto, D.; Sollito, D.; Troccoli, A.; Caferelli, B. (2010). A comparison of different algorithms for the delineation of management zones. *Precision Agriculture* 11, 600-620.

Hamza, M.; Anderson, W. (2005). Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and posible solutions. *Soil & Tillage Research* 82, 121-145.

He, Y.; Hu, K.; Chen, D.; Suter, H.; Li, Y.; Li, B.; Yuan, B.; Huang, Y. (2010). Three dimensional spatial distribution modeling of soil texture under agricultural systems using a sequence indicator simulation algorithm. *Computers and Electronics in Agriculture* 71, S24-S31.

Hemmat, A.; Aghilinategh, N.; Rezainejad, Y.; (2010). Long-term impacts of municipal solid waste compost, sewage sludge and farmyard manure application on organic carbon, bulk density and consistency limits of a calcareous soil in central Iran. *Soil & Tillage Research* 108, 43–50.

Hincapié, E.; Tobón–Marín, C. (2012). Dinámica del Agua en Andisoles Bajo Condiciones de Ladera. *Revista Facultad Nacional de Agronomía (Medellín)* 65, 6765-6777.

Holzapfel, E.A.; Matta, C.R. (2005). Infiltración de agua en el suelo. Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería Agrícola. Departamento de Recursos Hídricos. 30p.

Hoyos, N.; Comerford, N. B. (2005). Land use and land-scape effects on aggregate stability and total carbon of Andisols from Colobian Andes. *Geoderma*.129, 268– 278.

IDEAM. (2014). Monitoreo y seguimiento del estado de la calidad de los suelos. Ecosistemas. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/monitoreo-seguimiento-estado-calidad-suelos>.

IGAC. (1995). La materia orgánica y el humus de los suelos de Colombia. En *Suelos de Colombia. Origen, evolución, clasificación, distribución y uso*. Bogotá D.C. Ed. Canal Ramírez Antares.

IGAC – COLCIENCIAS. (2006). Estudio de las sustancias húmicas en Andisoles y Molisoles de Colombia desarrollados bajo ambientes ecológicos diferente. Bogotá. D.C. IGAC.

IGAC. (2014). Manual de códigos para el levantamiento de suelos. Subdirección de Agrología. Bogotá D.C. IGAC.

INGEOMINAS. (2005). Geología de la sabana de Bogotá. INGEOMINAS, 104.

Isaaks, E.H.; Srivastava, R. M. (1989). An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press.

Jaramillo, D.; Anaya, M.; Restrepo, C.; González, H.; Álvarez, F. (2011). Variables físicas que explican a variabilidad de suelo aluvial y su comportamiento espacial. Pesquisa Agropecuária Brasileira 46, 1707-1715.

Jaramillo-Jaramillo, D. (2016). Definición de áreas homogéneas de fertilidad mediante análisis factorial y geoestadística. Boletín de Ciencias de la Tierra 39, 5-11.

Kay, B. D. (1990). Rates of change of soil structure under different cropping systems. Advances in Soil Science 12, 1-52.

Keller, T. (2004). Soil Compaction and soil tillage – studies in agricultural soil mechanics. Departamento de Ciencias del Suelo. Uppsala. Swedish University of Agricultural Sciences.

Keller, T.; Dexter, A.R.; (2012). Plastic limits of agricultural soils as functions of soil texture and organic matter content. Soil Researchs 50, 7–17.

Kulli, B. (2002). Tesis de doctorado. Analysis of flow patterns. The influence of soil compaction and soil structure on the infiltration pathways of dye tracer solutions and the quantitative evaluation of flow patterns, Swiss Federal Institute of Technology.

Kumar, S.; Sekhar, M.; Reddy, D. V.; Mohan-Kumar, M. S. (2010). Estimation of soil hydraulic properties and their uncertainty: comparison between laboratory and field experiment. *Hydrology Processes*. 24, 3426–3435.

Krull, E. S.; Baldock, J. A.; Skjemstad, J. O. (2003). Importance of mechanisms and processes of the stabilization of soil organic matter for modeling carbon turnover. *Functional Plant Biology*. 30, 207–222.

Lark, R.M. (1998). Forming spatially coherent regions by classification of multivariate data: an example from the analysis of maps of crop yield. *International Journal of Geographical Information Science* 12, 83–98.

Li, X.; He, N.; Yu, G. (2016). Methods of evaluating soil bulk density: Impact on estimating large scale soil organic carbon storage. *Catena* 144, 94–101.

Lichner, L.; Eldridge, D. J.; Schacht, K.; Zhukova, N.; Holko, L.; Štěr, M.; Pecho, J. (2011). Grass cover influences hydrophysical parameters and heterogeneity of water flow in a sandy soil. *Pedosphere* 21, 719–729.

Machiwal, D.; Jha, M.; Mal, B. (2006). Modelling Infiltration and quantifying Spatial Soil Variability in a Wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems Engineering* 95, 569 -582.

Malagón, D. (2016). Suelos y Tierras de Colombia. Tomo 2. Subdirección de Agrología. Bogotá, Colombia. 2016. IGAC.

Martín, J.A. De Lope, J.D. Maravall. (2011). Robust high performance reinforcement learning through weighted k-nearest neighbors, *Neurocomputing* 74, 1251–1259.

Martínez, N. (2015). Tesis Doctoral .Curvas y superficies B-Splines. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Huajuapán De León, Oaxaca. México.

Martínez, E.; Fuentes, J.; Acevedo, E. (2008). Carbono Orgánico y propiedades del suelo. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 8, 68-96.

Matheron G. (2011). Tesis de Doctorado. Las variables regionalizadas y su estimación. , Facultad de Ciencias, Universidad de Paris, Francia.

Medina, C.; Camacho-Tamayo, J. H.; Cortés, C. (2012). Soil penetration resistance analysis by multivariate and geostatistical methods. *Engenharia Agrícola* 32, 91-101.

Medina, M. C. (2016). Efectos de la compactación de suelos por le pisoteo de animales, en la productividad de los suelos: Remediaciones. *Revista Colombiana de Ciencias Animales* 8, 88-93.

Mogollón, M. R. (2012). Tesis de Maestría. Comportamiento espacial de la resistencia mecánica a la penetración y su relación con propiedades físicas del suelo en áreas con diferentes ocupaciones en la sabana de Bogotá. Universidad Nacional de Colombia.

Mohammadi, J.; Motaghian, M. (2011). Spatial Prediction of Soil Stability and Aggregate – Associated Organic Carbon at the Catchment Scale Using Geostatistical Techniques. *Pedosphere* 21, 389-399.

Molin, J.P.; Leiva, F.R.; Camacho-Tamayo, J.H. (2008). Tecnología de la agricultura de precisión en el contexto de la sostenibilidad. En: Leiva, F.R. Ed.. *Agricultura de precisión en cultivos transitorios*. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia. p.13-41.

Montenegro, G.H.; Malagón, C. D. (1990). *Propiedades Físicas de los Suelos*. Subdirección de Agrología. IGAC.

Moradi, S. (2013). Impacts of organic carbon on consistency limits in different soil textures. *International Journal of Agriculture and Crop Science* 5, 1381-1388.

Mzuku, M.; Khosla, R.; Inman, D.; Smith, F.; MacDonald, L. (2005). Spatial Variability of Measured Soil Properties across Site-Specific Management Zones. *Soil Science Society of America Journal* 69, 1572–1579.

Novelli, L.; Caviglia, O.; Wilson, M. G.; Sasal, M. C. (2010). Impacto de la frecuencia de soja sobre la agregación y el almacenaje de C en Molisoles y Vertisoles de Entre Ríos. En: Anales del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario, Argentina. Trabajo en CD.

Ordóñez, N.; Bolívar, A. (2015). Levantamiento Agrológico del Centro Agropecuario Marengo (CAM). Bogotá D. C. Universidad Nacional de Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Orjuela-Matta, H. M.; Rubiano-Sanabria, Y.; Camacho-Tamayo, J. H. (2012). Spatial Analysis of Infiltration in an Oxisol of the Eastern Plains of Colombia. *Chilean Journal Agricultural Research* 72, 404-410.

Ortega, R. A.; Santibañez, O. A. (2007). Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility. *Computers and Electronics in Agriculture* 58, 49–59.

Petitgas, P. (1996). *Geostatistics and Their Applications to Fisheries Survey Data*. *Computers and Fisheries Research*. Chapman-Hall. 5, 114-142.

Polo, M.; Lafuente, P; Giráldez, J. (2003). Variabilidad espacial de la conductividad hidráulica saturada en suelos de olivar y su influencia en el balance hidrológico global. *Estudios de la zona no saturada del suelo* 6, 209 – 213.

Pulido - Moncada, M. A.; Lobo-Lujan, D.; Lozano-Pérez, Z. (2009). Asociación entre indicadores de estabilidad estructural y la materia orgánica en suelos agrícolas de Venezuela. *Agrociencia* 43, 221-230.

Raiesi, F.; Kabiri, V. (2016). Identification of soil quality indicators for assessing the effect of different tillage practices through a soil quality index in a semi-arid environment. *Ecological Indicators* 71, 198–207.

Rajesh, J. P. (2003). Chapter 5: Introduction to Geostatistics. *Developments in Petroleum Science*. 51, 85 – 95.

Ramsay, J.; Dalzell, C. (1991). Some tools for functional data analysis. *Journal Royal Statistical Society* 53, 539–572.

Rienznner, M.; Gandolfi, C. (2014). Investigation of spatial and temporal variability of saturated soil hydraulic conductivity at the field-scale. *Soil & Tillage Research* 135, 28-40.

Rodríguez-Rodríguez, A.; Guerra, J. A.; Gorrín, S. P.; Arbelo, C. D.; Mora, J. L. (2002). Aggregate stability and water erosion in Andosols of the Canary Islands. *Land Degradation and Development* 13, 515–523.

Rodríguez-Vásquez, A.F.; Aristizabal-Castillo, A.M.; Camacho-Tamayo, J.H. (2008). Variabilidad espacial de los modelos de infiltración de Philip y Kostiakov en un suelo andico. *Engenharia Agrícola Jaboticabal* 28, 64-75.

Rong-Jiang, Y.; Jing-Song, Y.; Tong-Juan, Z.; Gao, P.; Xiang-Ping, W.; Li-Zhou, H.; Mao-Weng, W. (2014). Determination of site-specific management zones using soil physico-chemical properties and crop yields in coastal reclaimed farmland. *Geoderma* 232-234, 381-393.

Rucks, L; García, F; Kaplán, A; Ponce de León, J; y Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República.

Sasal, M. C.; Andriulo, A.; Taboada, M. (2006). Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian pampas. *Soil Tillage Research* 87, 9-18.

Schoenholtz, S.; Van Miegroet, H.; Burguer, J. (2000). A Review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management* 138, 335 – 356.

Silva, L.L. (2007). Fitting infiltration equations to centre-pivot irrigation data in a mediterranean soil. *Agricultural Water Management* 94, 83-92.

Stanchi, S.; D'Amico, M.; Zanini, E.; Freppaz, M. (2015). Liquid and plastic limits of mountain soils as a function of the soil and horizon type. *Catena* 135, 114 – 121.

Taboada, M.A. 2007. Efectos del pisoteo y pastoreo animal sobre suelos en siembra directa. 4º Simposio de Ganadería en Siembra Directa:1-13

Timm, L. C.; Pires, L. F.; Roveratti, R.; Robson, C.; Richardt, K.; Martins de Oliveira, J. C. Santos, O. (2006). Field Spatial and temporal patterns of soil water content and bulk density changes. *Scientia Agricola* 63, 55-64.

Tormena, C.; Araújo, M.A. Fildalski, J.M. 2007. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico sob sistemas de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 31, 211-219.

Torres, H. A.; Acevedo, H. E. (2008). El problema de salinidad en los recursos suelo y agua que afectan el riego y cultivos en los valles de Illuta y Azapa en el norte de Chile. *Revista Idesia* 26, 31-44.

USDA. (2014). Claves para la Taxonomía de Suelos: Décima segunda edición. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de los Recursos Naturales.

Uyan, M. (2016). Determination of agricultural soil index using geostatistical analysis and GIS on land consolidation projects: A case study in Konya/Turkey. *Computers and Electronics in Agriculture* 123, 402–409.

Valbuena, C.; Martínez, L.; Henao, R. (2008). Variabilidad Espacial del Suelo y su Relación con el rendimiento de Mango (*Mangifera indica* L.). *Revista Brasileira de Fruticultura* 30, 1146-1151.

Van Deuren J.; Lloyd T.; Chhetry, S.; Liou, R.; Peck J. (2002). Remediation Technologies screening matrix and reference guide, 4th edition. Disponible en: [http://www.frtr.gov/matrix2/top\\_page.html](http://www.frtr.gov/matrix2/top_page.html). Fecha de consulta: junio 2006.

Van den Berg, G.J.; Van Ours, J. C. (1997). Eyeballing state dependence and unobserved heterogeneity in aggregate unemployment duration data. *Research in Labor Economics* 16, 369-394.

Van Genuchten, M.T.; Simunek, J.; Leij, F. J.; Sejna, M. (2009). RETC versión 6.02. Disponible en <http://www.pcprogress.com/en/Default.aspx?retc-downloads>.

Van Schaik, N.L. (2009). Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed. *Catena* 78, 36-47.

Vasu, D.; Kumar, S.; Kumar Ray, S.; Perumal, D.; Tiwary, P.; Chandran, P.; Nimkar, M.; Anantwar, S. G. (2016). Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. *Geoderma* 282, 70–79.

Volke, T.; Velasco, J. A.; De la Rosa, D. A. (2005). Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. México. Instituto Nacional de Ecología.

Volveras, B.; Amezquita, E. (2009). Estabilidad estructural del suelo bajo diferentes sistemas y tiempo de uso en laderas andinas de Nariño, Colombia. *Acta Agronómica* 58, 35-39

Wang, Q.; Chen, H.; Li, H.; Li, W.; Wang, X.; Mchugh, A.D.; He, J.; Gao, H. (2009). Controlled traffic farming with no tillage for improved fallow water storage and crop yield on the Chinese Loess Plateau. *Soil & Tillage Research* 104, 192–197,

Warrick, A.W.; Nielsen, D.R. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field, In: *Applications of soil physics*, New York: Academic Press, p.319-44.

Warrick, A. W.; Myers, D. E.; Nielsen, D. R. (1986). Geostatistical Methods Applied to Soil Science. Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods-Agronomy Monograph 9, 53 - 81.

Wuest, S.B. (2001). Earthworm, infiltration, and tillage relationships in a dryland pea-wheat rotation. Applied Soil Ecology - Journal 18, 187–192.

Xia, S.; Xionga, Z.; Luoa, Y.; WeiXub.; Zhanga, G. (2015). Effectiveness of the Euclidean distance in high dimensional spaces. International Journal for Light and Electron Optics 126, 5614–5619

Yalcin, A. (2007). The effects of clay on landslides: a case study. Applied Clay Science 38, 77–85

Yi, X.; LI, G.; Yin, Y. (2016). Pedotransfer Functions for Estimating Soil Bulk Density: A Case Study in the Three-River Headwater Region of Qinghai Province, China. Pedosphere 26, 362–373.