



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO Y MULTIVARIADO DE ATRIBUTOS
FÍSICOS DE UN SUELO EN CULTIVO DE BANANO FINCA MÁRQUEZ
LA PEAÑA CANTÓN PASAJE

CUEVA RIVERA EDISON IVAN
INGENIERO AGRÓNOMO

MACHALA
2020



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGRÓNOMICA

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO Y MULTIVARIADO DE
ATRIBUTOS FÍSICOS DE UN SUELO EN CULTIVO DE BANANO
FINCA MÁRQUEZ LA PEAÑA CANTÓN PASAJE

CUEVA RIVERA EDISON IVAN
INGENIERO AGRÓNOMO

MACHALA
2020



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGRÓNOMICA

TRABAJO TITULACIÓN
TRABAJO EXPERIMENTAL

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO Y MULTIVARIADO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UN
SUELO EN CULTIVO DE BANANO FINCA MÁRQUEZ LA PEAÑA CANTÓN
PASAJE

CUEVA RIVERA EDISON IVAN
INGENIERO AGRÓNOMO

CHABLA CARRILLO JULIO ENRIQUE

MACHALA, 16 DE MARZO DE 2020

MACHALA
2020

Análisis geoestadístico y multivariado de atributos físicos de un suelo con cultivo de banano, finca Marquéz, La Peaña, Cantón Pasaje

INFORME DE ORIGINALIDAD

0%

INDICE DE SIMILITUD

0%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

0%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias

< 50 words

Excluir bibliografía

Apagado

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

El que suscribe, CUEVA RIVERA EDISON IVAN, en calidad de autor del siguiente trabajo escrito titulado ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO Y MULTIVARIADO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UN SUELO EN CULTIVO DE BANANO FINCA MÁRQUEZ LA PEAÑA CANTÓN PASAJE, otorga a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tiene potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

El autor declara que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

El autor como garante de la autoría de la obra y en relación a la misma, declara que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asume la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.

Machala, 16 de marzo de 2020



CUEVA RIVERA EDISÓN IVAN
0705637148

DEDICATORIA

A mis queridos y admirables padres: Freddy Cueva y Mariana Rivera que siempre me apoyaron y brindaron las oportunidades necesarias para dedicarme a mis estudios, por la plena confianza que tuvieron en mí, siendo ellos mi pilar fundamental.

A mis abuelos: José Cueva, Esperanza Morales y Silvia Rivera quienes me han sabido aconsejar en mi día a día, siendo mi motivación y ejemplo a seguir de perseverancia y constancia.

A mis hermanos quienes han ayudado a conquistar cada meta que me forjo.

Edison Ivan Cueva Rivera

AGRADECIMIENTO

En el presente trabajo agradezco a la
“Universidad Técnica de Machala” por
acogerme en sus aulas y haberme formado como
profesional.

De manera muy especial agradezco a mi tutor
de tesis, al Ing. Julio Chabla Carillo. PhD, por
darme la oportunidad de aprender de su
experiencia profesional y académica Al Ing.
Salomón Barrezueta, PhD, Ing. Eduardo Luna
Romero, MSc por los conocimientos impartidos
al realizar mi proyecto de investigación.

Al Abogado Víctor Chabla por prestar los
predios de la finca “Márquez” para la
realización de este trabajo de investigación.

A mis amigos Ing. Michael Amaya, Cristian
Arias, y Jessica Chapín, Miguel Quezada por la
ayuda brindada en toda la etapa de
investigación.

A todas las personas que de una u otra manera
colaboraron en este proyecto.

Edison Ivan Cueva Rivera

RESUMEN

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO Y MULTIVARIADO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UN SUELO EN CULTIVO DE BANANO, FINCA “MÁRQUEZ” LA PEAÑA, CANTÓN PASAJE

Autor:

Edison Ivan Cueva Rivera

Tutor:

Julio Chabla Carrillo PhD.

La variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo agrícola es originada por procesos de formación de suelo o son inducidas por prácticas de manejo del cultivo. Dada la necesidad de entender el comportamiento de la variación de algunas propiedades físicas asociadas al cultivo de banano se realizó técnicas de estadística multivariada con el fin de optimizar los procesos productivos, la presente investigación se llevó a cabo, en el cantón Pasaje, parroquia la Peaña finca “Márquez”. Se estudió la variabilidad espacial de las siguientes propiedades, textura, densidad real (Dr), densidad aparente (Da), porosidad total (Pt), capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP). Se realizó un muestreo sistemático grilla 70 x 70 dando un total de 15 puntos de interés, las muestras se tomaron en un perfil de 50 cm de profundidad en estratos cada 10 cm, estableciendo 5 niveles para el muestreo de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 y 40-50 cm procesando un total de 75 muestras en 6.24 ha. El análisis de las propiedades físicas que se realizaron en el laboratorio de la Universidad Técnica de Machala son: textura, Dr, Da y Pt, la CC y PMP se realizó en el laboratorio de física de suelo de la Universidad Estatal de Cuenca. El análisis de datos se realizó en diversos enfoques, univariado (estadística descriptiva) utilizando el software IBM SPSS Statistics 23 y Microsoft Excel 2013, se emplearon gráficos exploratorios como diagramas caja bigote que permitieron apreciar de manera visual el comportamiento de cada variable. En el análisis geoestadístico se usó el software Surfer 16 para la determinación de semivariogramas experimentales, donde se ajustaron modelos teóricos, esférico, gaussiano y exponencial para las distintas profundidades de cada variable, siendo los más precisos y eficientes el modelo esférico y gaussiano, que presentaron un coeficiente de Nash y un coeficiente de determinación (R^2) cercano o

igual a 1, así mismo se obtuvieron los valores más bajo del error medio cuadrático (RMSE). En el software ArcGis 10.3 se utilizó parámetros del semivariograma para la interpolación por el método del kriging que permitió diseñar mapas de variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo. Los resultados evidenciaron la existencia de dependencia espacial moderada para Da y CC en los primeros 10 cm de suelo con esa misma tendencia en el estrato de 20 -30 cm para PMP y el ultimo estrato de 40-50 cm Pt, en cambio se presentó una dependencia espacial fuerte en los primeros 10 cm Arcilla, Limo, Arena, Dr, Pt y PMP, para el estrato de 10-20 cm, Arcilla, Limo, Arena, Dr, Da y Pt, de 20-30 cm mantiene la misma dependencia fuerte del estrato anterior incluyendo la CC de 30-40 cm presenta la misma dependencia espacial fuerte del estrato de 10-20 cm y en el último estrato de 40-50 cm, Arcilla, Limo, Arena, Dr y Da. No presentó en ninguna profundidad una dependencia débil. Los rangos que explican la existencia de una dependencia espacial se encuentran entre 80 a 180 m. Para el análisis estadístico por componentes principales se utilizó el software IBM SPSS Statistics 23, se asociaron 8 variables, Arcilla, Limo, Arena, Dr, Da, Pt, CC, PMP. Los resultados indican que todas las variables se agruparon en tres componentes principales y estas representan el 82.65 % de la varianza. El primer componente obtuvo un mayor coeficiente de correlación para Dr y Arena, el segundo Pt, CC, PMP y el ultimo componente Arcilla. Este método aporta una idea visual de las interacciones entre las variables permitiendo explicar la mayor parte de la información que contienen cada una de ellas.

Palabras claves: Variabilidad espacial, propiedades físicas, geoestadística, kriging, semivariograma, estadística multivariada.

ABSTRACT

GEOSTATISTICAL AND MULTIVARIATE ANALYSIS OF PHYSICAL ATTRIBUTES OF A SOIL UNDER BANANA CULTIVATION, FINCA "MÁRQUEZ" LA PEAÑA, CANTON PASAJE

Author:

Edison Ivan Cueva Rivera

Tutor:

Julio Chabla Carrillo PhD.

The spatial variability of the physical properties of agricultural soil is caused by soil formation processes or induced by crop management practices. Given the need to understand the behavior of the variation of some physical properties associated with the banana crop, multivariate statistical techniques were carried out in order to optimize production processes. The present research was carried out in the canton of Pasaje, parish of La Peaña, "Márquez" farm. The spatial variability of the following properties were studied: texture, true density (D_r), bulk density (D_a), total porosity (P_t), field capacity (CC) and permanent wilt point (PMP). A systematic 70 x 70 grid sampling was performed giving a total of 15 points of interest, the samples were taken in a 50 cm deep profile in strata every 10 cm, establishing 5 levels for sampling of 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 and 40-50 cm processing a total of 75 samples in 6.24 ha. The analysis of the physical properties that were carried out in the laboratory of the Technical University of Machala are: texture, D_r , D_a and P_t , the CC and PMP were carried out in the laboratory of soil physics of the State University of Cuenca. The data analysis was performed in several approaches, univariate (descriptive statistics) using IBM SPSS Statistics 23 and Microsoft Excel 2013 software, exploratory charts were used as mustache box diagrams that allowed to visually appreciate the behavior of each variable. In the geostatistical analysis Surfer 16 software was used for the determination of experimental semivariograms, where theoretical, spherical, Gaussian and exponential models were adjusted for the different depths of each variable, being the most precise and efficient the spherical and Gaussian model, which presented a Nash coefficient and a determination coefficient (R^2) close to or equal to 1, likewise the lowest values of the root mean square

error (RMSE) were obtained. In the ArcGis 10.3 software, parameters of the semivariogram were used for interpolation by the kriging method that allowed the design of maps of spatial variability of the physical properties of the soil. The results showed the existence of moderate spatial dependence for Da and CC in the first 10 cm of soil and with the same trend in the 20 -30 cm stratum for PMP and the last stratum of 40-50 cm Pt, on the other hand a strong spatial dependence was presented in the first 10 cm of clay, Silt, Sand, Dr, Pt and PMP, for the 10-20 cm stratum, Clay, Silt, Sand, Dr, Da and Pt, of 20-30 cm maintains the same strong dependence of the previous stratum including the 30-40 cm CC presents the same strong spatial dependence of the 10-20 cm stratum and in the last 40-50 cm stratum, Clay, Silt, Sand, Dr and Da. It did not present at any depth a weak dependence. The ranges that explain the existence of a spatial dependence are between 80 and 180 m. For the statistical analysis by main components, the software IBM SPSS Estatistics 23 was used, 8 variables were associated, clay, silt, sand, Dr, Da, Pt, CC, PMP. The results indicate that all variables were grouped into three main components and these represent 82.65% of the variance. The first component obtained a higher correlation coefficient Dr and Are, the second, CC and PMP and the last component Clay. This method provides a visual idea of the interactions between the variables, allowing most of the information contained in each of them to be explained.

Keywords: Spatial variability, physical properties, geostatistics, kriging, semivariogram, multivariate statistic

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	12
1.1.	Objetivo General	13
1.2.	Objetivos Específicos.....	13
2.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	14
2.1.	Importancia de las propiedades físicas del suelo	14
2.2.	Relación de las propiedades físicas en la producción de banano	15
2.2.1.	Textura	15
2.2.2.	Densidad aparente	15
2.2.3.	Porosidad total.....	16
2.2.4.	Capacidad de campo	16
2.2.5.	Punto de marchitez permanente	17
2.3.	El suelo como un sistema dinámico	17
2.4.	Variabilidad espacial de suelos	17
2.5.	Sistema de información geográfica y sus aplicaciones en la agricultura	18
2.6.	Geo estadística	19
2.6.1.	Etapas del análisis geoestadístico.....	19
2.6.1.1.	Análisis Exploratorio de Datos (AED).....	20
2.6.1.2.	Análisis estructural.....	20
2.6.1.3.	Semivarianza	20
2.6.1.4.	Semivariograma	21
2.6.2.	Aplicaciones del estudio de la dependencia espacial del suelo.....	24
2.6.3.	Método de interpolación	24
2.6.3.1.	Kriging	24
2.7.	Agricultura de precisión.....	25
2.8.	Análisis de componentes principales	26
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	28
3.1.	Materiales.....	28
3.1.1.	Localización	28
3.1.2.	Caracterización del área en estudio.....	28
3.1.3.	Materiales, equipos y reactivos utilizados en la investigación.....	29
3.2.	Metodología	30
3.2.1.	Variables analizadas.....	30
3.2.2.	Fase de campo	30

3.2.2.1. Diseño de la investigación	30
3.2.3. Fase de laboratorio	32
3.2.3.1. Análisis de las propiedades físicas de suelo	32
3.2.4. Análisis estadístico	32
3.2.5. Análisis geoestadístico	32
3.2.6. Coeficiente de Nash –Sutcliffe.....	32
3.2.7. Coeficiente de determinación (R ²)	33
3.2.8. Error cuadrático medio (RMSE)	33
3.2.9. Análisis de los componentes principales.....	33
4. RESULTADOS.....	34
4.1 Análisis exploratorio de las propiedades físicas del suelo	34
4.2. Análisis de variabilidad espacial de suelos	41
4.2.1. Análisis estructural de las propiedades físicas del suelo.....	41
4.2.2. Creación de mapas temáticos de las propiedades físicas del suelo.	44
4.3. Análisis Multivariado.....	51
4. CONCLUSIONES	53
5. BIBLIOGRAFÍA	54
ANEXOS	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Condiciones climatológicas del sector.....	29
Tabla 2: Métodos utilizados en las propiedades físicas.....	32
Tabla 3: Prueba de normalidad para cada profundidad	39
Tabla 4: Estadística descriptiva de las propiedades físicas de suelo	41
Tabla 5: Clasificación del coeficiente de variación de las propiedades físicas	41
Tabla 6: Parámetros del variograma aplicando kriging ordinario para las variables de estudio.....	43
Tabla 7: Matriz de correlación de Pearson de las propiedades físicas del suelo.	51
Tabla 8: Componentes principales de las propiedades físicas.....	52

ÍNDICES DE FIGURAS

Figura 1: Semivariograma Adaptado de Golden Software, 2012.....	22
Figura 2: Etapas de la agricultura de precisión y componentes tecnológicos usados en cada una de estas.....	26
Figura 3: Ubicación del predio en estudio.....	28
Figura 4: Levantamiento planímetro finca “Márquez”	31
Figura 5: Diagrama de caja y bigote de porcentaje de Arcilla en 5 profundidades de estudio.....	34
Figura 6: Diagrama de caja y bigote de porcentaje de Limo en 5 profundidades de estudio.....	35
Figura 7: Diagrama de caja y bigote de porcentaje de Arena en 5 profundidades de estudio.....	35
Figura 8: Diagrama de caja y bigote de Densidad real en 5 profundidades de estudio	36
Figura 9: Diagrama de caja y bigote de Densidad aparente en 5 profundidades de estudio.....	37
Figura 10: Diagrama de caja y bigote de Porosidad total en 5 profundidades de estudio	37
Figura 11: Diagrama de caja y bigote de Capacidad de Campo en 2 profundidades de estudio.....	38
Figura 12: Diagrama de caja y bigote de Punto de Marchitez Permanente en 2 profundidades.....	39
Figura 13: Semivariograma ajustado de D_a ($g.cm^{-3}$) en un perfil de 50 cm.	42
Figura 14: Distribución espacial de la Arcilla en un perfil de 50 cm.....	44
Figura 15: Distribución espacial del Limo en un perfil de 50 cm.	45
Figura 16: Distribución espacial de Arena en un perfil de 50 cm.	46
Figura 17: Distribución espacial de D_r en un perfil de 50 cm.....	47
Figura 18: Distribución espacial de D_a en un perfil de 50 cm.	48
Figura 19: Distribución espacial de P_t en un perfil de 50 cm.	49
Figura 20: Distribución espacial de CC en un perfil de 50 cm.	50
Figura 21: Distribución espacial de PMP en un perfil de 50 cm.....	50

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Semivariograma ajustado de Arcilla (%) en un perfil de 50 cm.	59
Anexo 2: Semivariograma ajustado de Limo (%) en un perfil de 50 cm.	59
Anexo 3: Semivariograma ajustado de Arena (%) en un perfil de 50 cm.	60
Anexo 4: Semivariograma ajustado de D_r ($g.cm^{-3}$) en un perfil de 50 cm.	60
Anexo 5: Semivariograma ajustado de D_a ($g.cm^{-3}$) en un perfil de 50 cm.	61
Anexo 6: Semivariograma ajustado de Pt (%) en un perfil de 50 cm.	61
Anexo 7: Semivariograma ajustado de CC ($cm^3.cm^{-3}$) en un perfil de 50 cm.	62
Anexo 8: Semivariograma ajustado de PMP ($cm^3.cm^{-3}$) en un perfil de 50 cm.	62
Anexo 9: Grafico de Componentes principales.	62
Anexo 10: Calicata para la toma de muestras.	63
Anexo 11: Determinación de textura.	63
Anexo 12: Determinación de Densidad real.	63
Anexo 13: Distribución de frecuencia de la clase textural agrupada por profundidades.	63

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la agricultura demanda altas inversiones en fertilizantes, mano de obra, agua y demás insumos, agregando la necesidad de obtener productos de calidad. A esto se suma y la presión por disminuir el impacto ambiental, por ello es importante adaptar las tecnológicas basadas en sistemas de posicionamiento global a las prácticas agrícolas para la eficiencia de producción por superficie.

Los factores no controlados como el suelo y el clima en las fincas bananeras tienen una relación directa en su producción, la textura, humedad del suelo, porosidad, densidad aparente, son las que tienen mayor influencia en el crecimiento y desarrollo, permitiendo un buen suministro de agua y la aireación en la rizósfera (Vaquero, 2003).

En este contexto se pueden estudiar las variaciones espaciales del suelo a través de técnicas geoestadísticas que estiman y modelan la variabilidad espacial de las propiedades físicas de suelo a través del uso de métodos de interpolación precisos (kriging) y la semivarianza, son herramientas esenciales de la geoestadística para la creación de mapas y así definir áreas de manejo distintivo. “Los suelos tienen una característica dominante que es su heterogeneidad aún en distancias cortas, resultado de las interacciones entre factores y procesos formadores de suelos” (Andriotti, 2010).

La agricultura de precisión permitirá a los productores, identificar de cada uno de los lotes de su finca, la eficiencia productiva y las causas que diferencia su productividad.

La relación espacial entre las propiedades del suelo y la producción se ha estudiado en cultivos como mango, palma de aceite, maíz, frijol, papa (Barrios & Florentino, 2009), lo que ha posibilitado determinar las variables edáficas que han tenido mayor efecto en la producción de cada lote, y a través del análisis espacial se han definido para cada variable zonas de manejo diferente, conocida esta estrategia como manejo por sitio específico, que ha permitido ser amigable con el ambiente puesto que posibilita mejorar el uso de los insumos (Ritter, 2008).

La variabilidad de las propiedades físicas del suelo están controladas por los factores de formación (clima, material parental, topografía, tiempo, organismos), estas interacciones dan como resultado una alta variabilidad espacial de las propiedades. (Jaramillo D. 2011). Debido a que las fincas bananeras de la provincia de El Oro tienen una alta heterogeneidad resultado de depósitos de material aluvial (Villaseñor et al., 2015), la producción del cultivo cambia dentro de los lotes como resultado de la variación de las propiedades del

suelo, debido a un mal manejo de las prácticas agrícolas no le permite incrementar la productividad y obtener el menor impacto ambiental.

El cultivo de banano es la segunda fuente de ingresos del estado con 161 583 hectáreas sembradas en el país, donde la provincia de El Oro se encuentra el 24.4 % con 46 mil hectáreas cultivadas. (Agrocalidad, 2016), generalmente las prácticas culturales se lo hace de forma tradicional sin tener en cuenta los factores de variabilidad,

Conocer la variabilidad espacial de las propiedades físicas constituye el primer paso para implementar sistemas de producción más eficientes que permitan el uso racional de insumos involucrados en la producción

1.1. Objetivo General

Analizar la variabilidad espacial de los atributos físicos del suelo en productividad de banano en la finca “Marquez” la Peaña mediante técnicas de estadística multivariada con el fin de optimizar los procesos productivos.

1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar la variabilidad espacial de los atributos físicos (textura, Da, Dr, porosidad total, capacidad de campo, punto de marchites permanente), en un perfil de 50 cm.
- Establecer el comportamiento espacial de las propiedades físicas mediante el krigiado con la finalidad de desarrollar mapas que permita mejorar los procesos productivos.
- Determinar la correlación que existe entre las propiedades físicas mediante análisis multivariado con el fin de relacionar las propiedades de mayor interés.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Importancia de las propiedades físicas del suelo

Las características de las propiedades físicas del suelo permiten entender el comportamiento y salud del mismo, estas propiedades interactúan en el desarrollo de la planta, la disponibilidad y movimiento del agua en el suelo, desarrollo adecuado de sus raíces, en conjunto de todas las actividades que el hombre desarrolle en suelos agrícolas. Las principales características físicas son la textura, tamaño de agregados, porcentaje de humedad y densidad aparente (Novillo et al., 2018).

Lo físico que es parte del componente nutricional del suelo casi no se toma en cuenta a pesar de que son los primeros que se logra identificar y lamentablemente se los deja en segundo lugar. La textura es la que más se mide, sin embargo, para una identificación de problemas quizá esta característica resulte muy general. Las tres propiedades físicas más relevantes, por su relación con el aspecto nutricional, son: Profundidad de la capa arable, compactación, contenido de humedad. (Vargas et al., 2015).

Jimenez & Siavosh, (2005) indican que la textura está determinada por la proporción relativa de las partículas minerales cuyos diámetros están entre 20 y 2000 micrómetros, la fracción gruesa del suelo está constituida por las arenas donde sus características es la baja capacidad de retención de humedad, baja retención de nutrientes, drenaje alto, baja capacidad de suministro de agua, susceptibilidad al encostramiento superficial, excesiva aireación, erosión, densidad aparente.

Los suelos que contienen mayores proporciones de limo en términos generales presentan buenas condiciones para la actividad agrícola. La partícula más activa física, química e hidrodinámica de los suelos es la arcilla con diámetros inferior a 2 micrómetros. Las características de los suelos arcillosos son dificultad al laboreo, drenaje deficiente, mayor encharcamiento superficial, mayor retención de agua y nutrientes (Delgado, 2017).

Si la densidad real es muy inferior a $2,65 \text{ gr.cm}^{-3}$, podemos pensar que el suelo posee un alto contenido de yeso o de materia orgánica, si es significativamente superior a $2,65 \text{ gr.cm}^{-3}$, podemos inferir que posee un elevado contenido de óxidos de Fe o minerales ferromagnésicos (Heredia, 2013).

La porosidad depende de la textura, estructura y actividad biológica del suelo, Los macroporos permiten el flujo del aire y el agua, los mesoporos son los que almacenan el

agua es decir es el agua aprovechable para la planta y los microporos es el agua que está fuertemente ligada no es utilizada por las plantas, la porosidad y la textura tienen una relación directa con la humedad donde el análisis se puede realizar bajo dos aspectos diferentes, el primero relacionado a la facilidad con que el agua permite moverse a través del matriz suelo y el segundo es la capacidad de almacenamiento y disponibilidad (Delgado, 2017).

El incremento de la densidad aparente y la reducción de la porosidad generan la compactación, esta es una forma de degradación física de suelo donde se puede extender a través de todo su perfil. Se considera grave la persistencia de la compactación y está asociada a una serie de efectos tales como la reducción en el rendimiento de los cultivos y la productividad del suelo al aumento en los costos de gestión el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero producido por la mala aireación del suelo, vulnerabilidad de los cultivos a las enfermedades y la disminución en la infiltración del agua en el suelo, lo que aumenta la escorrentía y el peligro de erosión (Gutierrez, 2017).

2.2. Relación de las propiedades físicas en la producción de banano

2.2.1. Textura

En banano el monocultivo está provocando cambios sustanciales en este ambiente, entre los cuales está la disminución de la biodiversidad, desequilibrio entre componentes físicos, pérdida del recurso suelo por la erosión. La textura integra los porcentajes de arena, limo y arcilla y según predomine una de estas fracciones influyen en la aireación, permeabilidad, retención de humedad, volumen explorado por las raíces, crecimiento y nutrición de la planta, las prácticas agrícolas en la agricultura convencional producen cambios en el suelo y esto influye en la producción (Villarreal, 2010).

2.2.2. Densidad aparente

De acuerdo a Chabla et al., (2019) la densidad crítica para el cultivo de banano es de $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$. El aumento de la densidad es uno de los factores más importantes en la degradación de suelos bananeros donde su resultado es la limitación del crecimiento de raíces al momento de encontrarse con capas endurecidas lo que incita que el banano emita raíces laterales; fenómeno que está relacionado a un desequilibrio hormonal afectando al desarrollo foliar esto es conocido como arropollamiento y es potencialmente uno de los principales problemas para la producción agrícola ya que dificulta la capacidad de intercambio gaseoso, aireación, retención de agua (Villa et al., 2018).

Cálculos estimativos sobre la disminución del rendimiento en cosechas señalan que por causa de la compactación superficial se puede reducir en un 13%, en la compactación del subsuelo se ha producido una disminución entre un 5 a 35% del rendimiento (Galantini et al., 2006). De manera directa la densidad del suelo afecta la densidad del volumen de raíces, pero esta relación se verá alterada también por las prácticas culturales donde el principal problema en las bananeras es al momento de fertilizar (Coelho et al., 2016).

2.2.3. Porosidad total

Cuando se limita la circulación del oxígeno, se incrementan los procesos de fermentación produciendo la muerte de los ápices de la planta (Turner et al., 2007), autores como (Serrano, 2003) plantean que al perder por planta 110 gramos de raíces funcionales la productividad baja de 60 a 140 cajas de banano/ha/año. La presente investigación sugiere que en las áreas con un elevado porcentaje de microporos tiene una afectación directa en la disponibilidad del K.

De acuerdo al estudio de Amézquita et al., (2002) el óptimo porcentaje para el desarrollo adecuado de las plantas en un suelo con porosidad total de 50%, debe contener un 15% de macroporos o agua drenable, 30 % de mesoporos o agua aprovechable y 5% de microporos o agua que la planta no la puede asimilar. Tomando en cuenta esta interpretación, los suelos que tienen problemas en la productividad se pueden explicar por la baja capacidad que tienen los suelos para almacenar agua aprovechable y de un aporte adecuado de los nutrientes.

2.2.4. Capacidad de campo

La morfología del banano e hidratación de sus tejidos, requiere cantidades abundantes de agua disponible en el suelo, para que su crecimiento y desarrollo sea normal, debido a que sus necesidades hídricas tienen una relación directa con su gran superficie foliar, Es sensible a la falta de agua durante todo el ciclo de vida, pero, principalmente, durante la primera parte del período vegetativo, así como durante la floración y la formación del racimo (Castaño et al., 2012).

Según Turner et al. (2007) no se tiene una idea clara de la relación entre el consumo de agua y la productividad del banano; sin embargo, (Castaño et al., 2012) pudo establecer que el fruto ajusta su tasa de crecimiento al suministro de agua aprovechable por la planta.

2.2.5. Punto de marchitez permanente

La relación entre la planta, el suelo y el agua, indica que la estimación del PMP tiene una relación directa con la textura del suelo, principalmente en el contenido de arcilla. Se explica entonces que los suelos con mayor contenido de arcilla ocasionaran valores más altos de PMP. Este comportamiento se debe a que la fracción granulométrica favorece la presencia de microporos y aumenta la superficie específica de la matriz del suelo, de esta forma la capacidad de absorción del agua aumenta (Hernandez et al., 2018).

2.3. El suelo como un sistema dinámico

El suelo tiene una gran capacidad de organizarse ya que es un medio muy diverso posee gran variedad de factores bióticos y abióticos donde todo está relacionado formando una serie de procesos, todo este conjunto le da una estructura y funcionalidad compleja. Al igual que todo ser vivo el suelo evoluciona a través del tiempo esto es limitado por los factores que se encuentran en su entorno, los suelos que están dedicados a la agricultura son los más vulnerables a un cambio ya que se encuentran manipulados por el hombre (Labrador, 2008).

El suelo desempeña diversos roles claves en los ecosistemas terrestres por ser un cuerpo natural y dinámico, está formado a partir del material parental, clima, biota, relieve y el tiempo en una serie de procesos: pérdidas, ganancias, transformaciones y translocaciones donde se determina sus características. La interacción de factores y procesos formadores tiene lugar al desarrollo de una gran diversidad de suelos. Es el intermediario entre el sistema biogeoquímico (biosfera) y el sistema físico-climático cualquier actividad que se produzca sobre él está influyendo en los procesos globales. Según la Teoría de Sistemas, el “sistema suelo” se puede comprender como un punto relativamente estable frente a procesos de transferencia y transformación y desde esta perspectiva, es clara la relación morfología-procesos (Figuroa et al., 2018).

2.4. Variabilidad espacial de suelos

De acuerdo a Jaramillo, (2012) la variabilidad espacial es el primer tipo de variación que afecta a los suelos, por ende su importancia, ya que es un recurso natural base en la producción alimentaria, en los últimos años se ha estado trabajando en la adecuación y adopción de metodologías que permitan evaluar la variabilidad, de esta forma poder

manejar los recursos eficientemente así lograr reducir el impacto ambiental por las malas prácticas agrícolas y aumentar la rentabilidad en la producción.

Cuando se estudia la variabilidad espacial del suelo las variables que se toman en cuenta son las de dependencia espacial. Una variable tiene dependencia espacial cuando su valor en un sitio determinado depende de la distancia o de la dirección en donde se posiciona con respecto a otro sitio vecino, a las propiedades que poseen dependencia espacial en 1978 Journel y Huijbregts las denominaron “Variables Regionalizadas”, dando lugar al desarrollo de la teoría de Variables Regionalizadas, en donde ha sido de gran ayuda al momento de realizar estudios relacionados a la variabilidad espacial de las propiedades del suelo. La “Geoestadística” se creó como una herramienta para estudiar y evaluar este tipo de variables (Dörner et al., 2016).

La variabilidad espacial se puede dividir en sistemática y aleatoria, la primera se la conoce como variación inerte está en función de la forma de la tierra, geomorfología o factores de formación (cronosecuencias, litosecuencias, toposecuencias, biosecuencias y climosecuencias), y la segunda es conocida como dinámica, no se la puede explicar esta depende de factores como la actividad humana, la flora y la fauna (Cutillas et al., 2019).

En cualquier región, está influenciado la formación de suelos por diversos factores como el material principal, vegetación, clima y materiales secundarios resultantes y la historia del uso local de tierra, todos estos factores varían de un lugar a otro ocasionando la variación espacial de las propiedades del suelo. La ubicación, magnitud y las causas de variabilidad espacial son todas esenciales para el estudio de suelos (Iñigo et al., 2012).

Se pueden estudiar las variaciones espaciales a través de técnicas geoestadísticas, estas permiten elaborar mapas de referencia y delimitar áreas de manejo homogéneo. Se han hecho estudios de la variabilidad de las propiedades físicas, biológicas y químicas del suelo que afectan la productividad en cultivos donde se reportan asociaciones entre estas y el rendimiento, aunque dependen las asociaciones del rango de variación del parámetro y del rango en donde este afecta al rendimiento (Cordoba et al., 2016).

2.5. Sistema de información geográfica y sus aplicaciones en la agricultura

La agricultura de precisión involucra un sistema cíclico de recolección de datos (imágenes satelitales, mapas de suelos, mapas de rendimiento, mapas topográficos, etc.), y los SIG

tienen un rol importante en la interpretación, integración y análisis de la información disponible. El SIG actúa como integrador de los conocimientos disponibles y ayuda a ordenar información histórica y nueva (Perez et al., 2019).

La principal utilidad de un Sistema de Información Geográfica es su capacidad para construir modelos o representaciones del mundo real a partir de las bases de datos digitales. Esos modelos se los puede usar en la simulación de los efectos que un proceso de la naturaleza o una acción antrópica producida sobre un escenario determinado en una época específica (Aleman et al., 2019).

2.6. Geo estadística

La geoestadística es una rama de la estadística aplicada, esta se especializa en la modelación y análisis de la variabilidad espacial en ciencias del suelo. Su principal objeto de estudio es el análisis y la predicción de fenómenos en espacio y/o tiempo donde se toma en cuenta la auto correlación espacial y direccional de los datos (Pacheco et al., 2016), Esta herramienta es un importante método de análisis de datos para estudiar variables con dependencia espacial en un espacio georreferenciado (Erazo & Sandoval, 2015).

Cuando existe variabilidad que no se puede relacionar con causas conocidas estas se definen como variabilidad aleatoria o al azar, en cambio cuando se puede atribuir a causas conocidas, entendibles y predecibles se la conoce como variabilidad sistemática. Esta última está compuesta por dos componentes: uno de tendencia que se relaciona a la localización de las muestras se las conoce como tendencia espacial (T) y otro de dependencia espacial (DE)(Guedes et al., 2014). La dependencia espacial se caracteriza por presentar en las propiedades valores diferentes ya que estas dependen del espaciamiento entre muestras o de la distancia y la dirección de donde sean recolectadas, este comportamiento particular que tienen las variables se las conoce como variables regionalizadas (Jaramillo et al., 2008).

2.6.1. Etapas del análisis geoestadístico

De acuerdo con Dörner et al., (2016), todo análisis geoestadístico implica tres etapas:

- Análisis exploratorio de datos.
- Análisis estructural.
- Predicción espacial.

2.6.1.1. Análisis Exploratorio de Datos (AED)

Para el análisis exploratorio de datos se inicia con la recolección de datos muestrales, en este procedimiento no se toma en cuenta su distribución geográfica, se realiza el cálculo estadístico tales como medidas de dispersión, posición y forma y se procede a la interpretación de resultados (González & Pérez de Vargas, 2009).

2.6.1.2. Análisis estructural

Se procede en esta etapa a estudiar la continuidad de la variable. En esta fase el variograma corresponde al estudio de un análisis preponderante, este mismo relaciona la dispersión de una variable con la distancia en un punto dado permitiendo poner en evidencia las discontinuidades en la distribución espacial del objeto de estudio. A partir de las observaciones se calcula el semivariograma experimental, que se analiza e interpreta para ajustarlo a un semivariograma teórico con la finalidad de explicar la variabilidad espacial $Z(x)$ (González & Pérez de Vargas, 2009).

2.6.1.3. Semivarianza

La semivarianza describe el componente de dependencia espacial, se inicia el proceso del cálculo al momento de comparar dos sitios dentro de una zona de estudio, esta solo va a depender de la distancia o/y la dirección de separación entre los dos sitios sin tomar en cuenta su localización geográfica. La semivarianza aumentará su valor al irse incrementando la distancia de separación entre los puntos de muestreo hasta llegar a un valor constante a partir de una determinada distancia (Jaramillo et al., 2008).

Para la estimación de la semivarianza se utiliza la siguiente ecuación (1).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2, \quad 1)$$

Fuente: (Oliver, 2010)

Donde:

$\gamma(h)$: es la semivarianza,

$N(h)$: es el número de pares de observaciones comparadas en cada distancia (debe ser > 50),

$Z(x_i)$: es el valor de la variable en el sitio x ,

$Z(x_i + h)$: es el valor que toma la variable en otro sitio ubicado a una distancia h del sitio x .

Para analizar la semivarianza de un grupo de datos esta debe contener una normalidad en sus datos (Oliver, 2010).

El procedimiento básico para analizar la semivarianza es el siguiente:

Definición de las distancias de muestreo.

- Los puntos de muestreo se ubican en el campo y se georreferencian mediante coordenadas (x, y) o en (x, y, z) , verdaderas o artificiales.
- Se realiza el muestreo de manera cuidadosa para no confundir las muestras.
- Se debe tener cuidado en la elaboración de la base de datos con los resultados de la evaluación de las variables que se estudian.
- Cuando está completa la base de datos se debe realizar un análisis exploratorio de los mismos con el fin de:
 - Comprobar que la distribución es normal o, por lo menos, que no hay asimetría.
 - Detectar valores anómalos o extremos.
- Se obtiene el semivariograma y se analizan sus características.
- Se realiza un análisis complementario, según las aplicaciones que se definido para el estudio

En el análisis exploratorio de datos que se realiza, se deben corregir las anomalías que se encuentren antes de obtener el semivariograma. Si hay valores anómalos o extremos, se los tiene que analizar y los erróneos se eliminan. De todas maneras, si no hay muchos valores extraños, y estos se distribuyen de forma aleatoria, pueden ser eliminados para mejorar el comportamiento del semivariograma y del kriging (Oliver, 2010).

2.6.1.4. Semivariograma

En la geoestadística, su herramienta fundamental el semivariograma, es una gráfica que relaciona la semivarianza de los pares de puntos de muestreo que se encuentran separados

a una distancia determinada conforme se vaya incrementando la separación entre ellos. Se obtiene un semivariograma limitado cuando la semivarianza llega a estabilizarse a una determinada distancia, en cambio, cuando la semivarianza aumenta monótonamente con la distancia y no llega a estabilizarse dentro del rango de distancias que se utilizan para el muestreo, se tiene un semivariograma no transicional (Oliver, 2010).

La representación de los valores de la semivarianza correspondientes a cada intervalo de distancia (lag en inglés) considerado, se obtiene un gráfico de puntos conocido como semivariograma experimental. A este semivariograma se le ajusta un modelo matemático denominado semivariograma teórico (Figura 1).

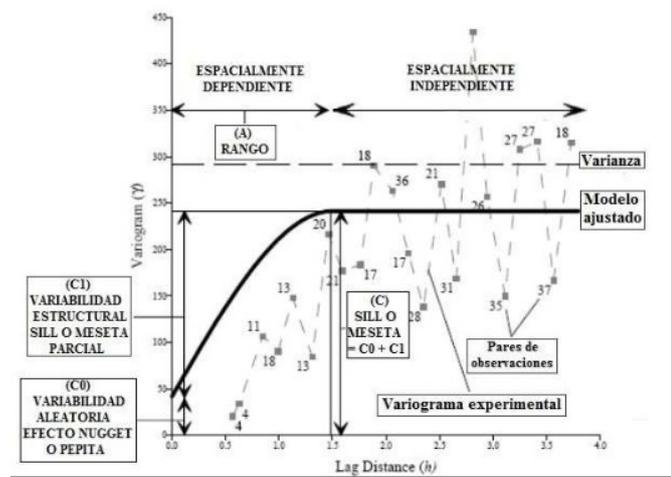


Figura 1: Semivariograma Adaptado de Golden Software, 2012

Nugget, efecto pepita o variabilidad aleatoria (Co): determina la variabilidad aleatoria, corresponde a la semivarianza que es independiente de la distancia de muestreo. El nugget se puede atribuir a errores de medición de la variable, o en determinadas ocasiones se supone que la estructura espacial se consolida a distancias menores a las observadas (Jaramillo, 2012).

Variabilidad estructural (C1): corresponde a la variabilidad espacial de la variable, se conoce como sill o meseta parcial, esta no representa el sill en su totalidad, es decir es la diferencia entre la meseta o sill y el nugget (Oliver, 2010).

Sill, umbral o meseta (Co+C): Es el máximo valor de la semivarianza y este es igual a la suma del nugget más la variabilidad estructural. Cuando el supuesto de estacionaridad se cumple, el sill es bastante similar a la varianza de los datos experimentales. Cuando el sill no logra estabilizarse, es decir, no se vuelve constante a ninguna distancia de las que se utilizó en el muestreo, se dice que la propiedad no tiene variabilidad espacial en la zona

de muestreo y el modelo más simple que se ajusta a los datos es lineal (Jaramillo et al., 2008).

Rango o alcance (a): Es la distancia en donde se estabiliza la semivarianza. En este parámetro define la distancia hasta la cual hay dependencia espacial entre las muestras, es decir, aquellas tomadas a una distancia menor al rango, están relacionadas espacialmente y las que se tomen a una distancia mayor al rango son espacialmente independientes (Jaramillo, 2012).

De acuerdo a Jaramillo et al., (2008), se les puede ajustar a los semivariogramas experimentales varios modelos teóricos. Describen alguno de ellos: lineal, circular, esférico, exponencial, gaussiano, etc. Los que mayor se ajustan con frecuencia a las propiedades del suelo que presentan dependencia espacial son el esférico y el exponencial, y según recomendación de (Oliver, 2010), deben preferirse sobre los demás.

- Modelo Lineal: modelo de independencia, indica carencia de dependencia espacial entre las observaciones de una variable.
- Modelo esférico: presenta un crecimiento rápido cerca del origen, pero los incrementos marginales van disminuyendo para distancias grandes. A las distancias superiores al rango, los incrementos son nulos.
- Modelo exponencial: cuando tiene un crecimiento exponencial la dependencia espacial respecto a la distancia entre las observaciones, los valores del rango son iguales a la distancia en donde el semivariograma toma un valor igual al 95% de la meseta.
- Modelo gaussiano: similar al modelo exponencial, la dependencia espacial desaparece solo en distancias que tienden al infinito. Presenta una forma parabólica cerca del origen

Cada modelo proporciona parámetros geoestadísticos. El coeficiente de determinación (R^2) se usa para encontrar el modelo que más se ajuste al semivariograma empírico para cada variable; se utiliza el modelo que posee el valor mayor. El grado de dependencia espacial es muy variable en las propiedades del suelo, si se establece el porcentaje que le corresponde a la variabilidad aleatoria (nugget) de una propiedad dentro de la variabilidad total (sill) puede estimarse el grado de dependencia espacial. (Cambardella et al., 1994), establecieron tres categorías para agrupar la importancia de la variabilidad espacial de acuerdo con dichos porcentajes se tiene.

- Fuerte dependencia espacial nugget < 25 % del sill
- Moderada dependencia espacial nugget entre 25 y 75 % del sill
- Débil dependencia espacial nugget > 75 % del sill.

A partir de esta información se construyen mapas de contorno, utilizando la técnica de interpolación Kriging ordinario (Cutillas et al., 2019).

2.6.2. Aplicaciones del estudio de la dependencia espacial del suelo

Es importancia conocer la dependencia espacial del suelo, aparte de mejorar el conocimiento que se adquiere sobre él, tiene varias aplicaciones prácticas como:

- Elaborar mapas de propiedades del suelo por procesos de interpolación.
- Hacer control de calidad de mapas de suelos.
- Definir el tamaño y la ubicación de unidades experimentales en ensayos de campo.
- Mejorar los sistemas de muestreo de suelos.
- Mejorar la interpretación de resultados de investigación.
- Ayudar en el manejo intensivo de los suelos.

2.6.3. Método de interpolación

2.6.3.1. Kriging

Los interpoladores se basan en la premisa que puntos cercanos están más relacionados entre sí que aquellos que se encuentran más lejanos. En la ecuación (2) se muestra la fórmula del cálculo.

$$Z^* = \sum_{i=1}^n W_i Z_i \quad 2)$$

Fuente: Modificado de Villatoro et al. (2008).

Donde:

Z*: valor estimado o interpolado.

Zi: valores reales utilizados en el cálculo.

Wi: peso o factor de ponderación.

Kriging usa la técnica del semivariograma. Este representa la varianza entre valores de puntos observados a distancias predeterminadas y permite estimar la distancia máxima de los puntos que presentan dependencia espacial. Dentro de este rango, se estima el Wi mediante la ecuación (3) (Frolla et al., 2015).

$$W=C^{-1}.d \quad 3)$$

Fuente: Modificado de Villatoro et al. (2008).

Donde:

C^{-1} : Inversa de la semivarianza para un punto conocido.

d: semivarianza de la distancia del punto desconocido al punto conocido.

La geoestadística usa la técnica de interpolación kriging para la construcción de mapas temáticos, esta utiliza la estructura de dependencia espacial obtenida mediante el ajuste de un modelo espacial para la estimación de valores en lugares donde no se han muestreado, las estimaciones que se tienen sin sesgo y con varianza mínima garantizan que la interpolación obtenida por kriging nos proporcionan el mejor estimador (Frolla et al., 2015).

2.7. Agricultura de precisión

En las últimas décadas se ha impulsado el desarrollo y la utilización de los Sistemas de Información Geográficos (SIG) y Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) esto dio lugar al surgimiento de la Agricultura de Precisión (AP). Se define a la AP como la aplicación de tecnologías y principios para el manejo de la variabilidad espacial y temporal de los factores edáficos y del terreno (Peralta et al., 2015), con la finalidad de delimitar zonas de manejo (ZM). Esta última se define como una subdivisión de los lotes en áreas homogéneas tales como textura, estado hídrico, topografía y niveles de nutrientes del suelo, para aplicar un manejo diferencial en función del potencial que tiene cada zona por medio de la incorporación de la tecnología de Manejo Sitio Específico (Moral et al., 2011).

La (AP) es un concepto moderno en la producción agrícola esta se basa en la utilización de variables regionalizadas para determinar la variabilidad espacial en el espacio productivo (lote), (Córdoba et al., 2012). Las prácticas de Manejo Sitio-Específico (MSE) se recomiendan en situaciones donde, la finca, exista una alta variabilidad de los factores de producción (fertilidad, agua, suelo etc.) y exista una variación de los rendimientos en función de ellos. En estas condiciones, se deben aplicar manejos diferenciales dentro del sitio (Pino, 2019).

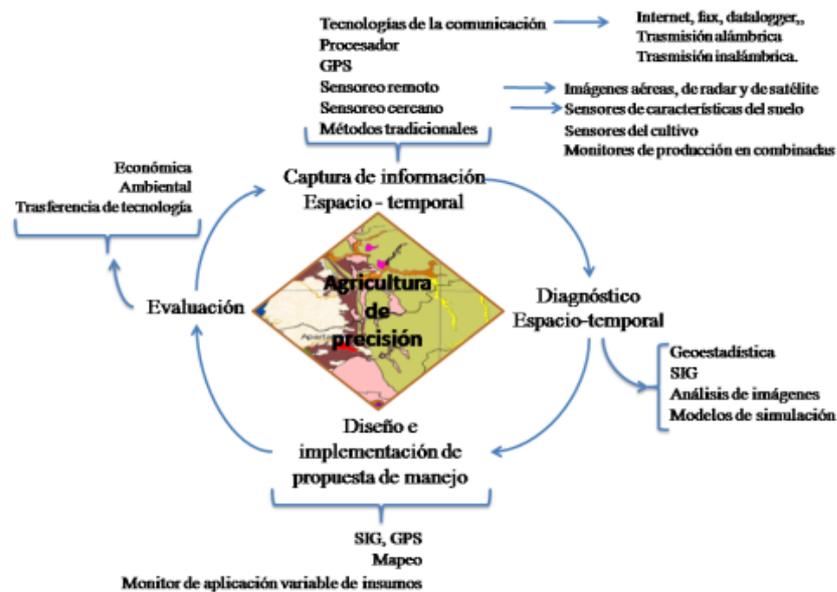


Figura 2: Etapas de la agricultura de precisión y componentes tecnológicos usados en cada una de estas.

Fuente: (Castañeda, 2011).

2.8. Análisis de componentes principales

Para poder determinar las interrelaciones existentes entre varios atributos del suelo, se prefiere realizar procedimientos estadísticos con enfoque multivariado. En ese contexto, el análisis multivariado se considera más eficiente que el análisis univariado, en este último la correlación que existe entre las variables son desconocidas limitando la interpretación al análisis de las variables de manera independiente. Las técnicas estadísticas multivariadas permiten analizar simultáneamente múltiples características de los individuos que se estudian. (Pires Da Silva et al., 2001).

Son una herramienta primordial los métodos estadísticos para interpretar y evaluar los resultados de investigaciones científicas. Al respecto, el método de componentes principales permite agrupar cantidades grandes de variables, asociarlas y poder

representarlas en un gráfico en el cual las coordenadas indican la correlación de cada variable con los factores y de esta manera agrupar cada una de las variables en relación a su interacción y características propias.(Nieves et al., 2017).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

3.1.1. Localización

La ubicación del predio en estudio se encuentra en el sector la barriada, parroquia la Peaña del cantón Pasaje, la Finca “Márquez” se encuentra en la vía Machala – Pasaje a 15 km del cantón y 5 km de la ciudad de Machala (Figura 3).

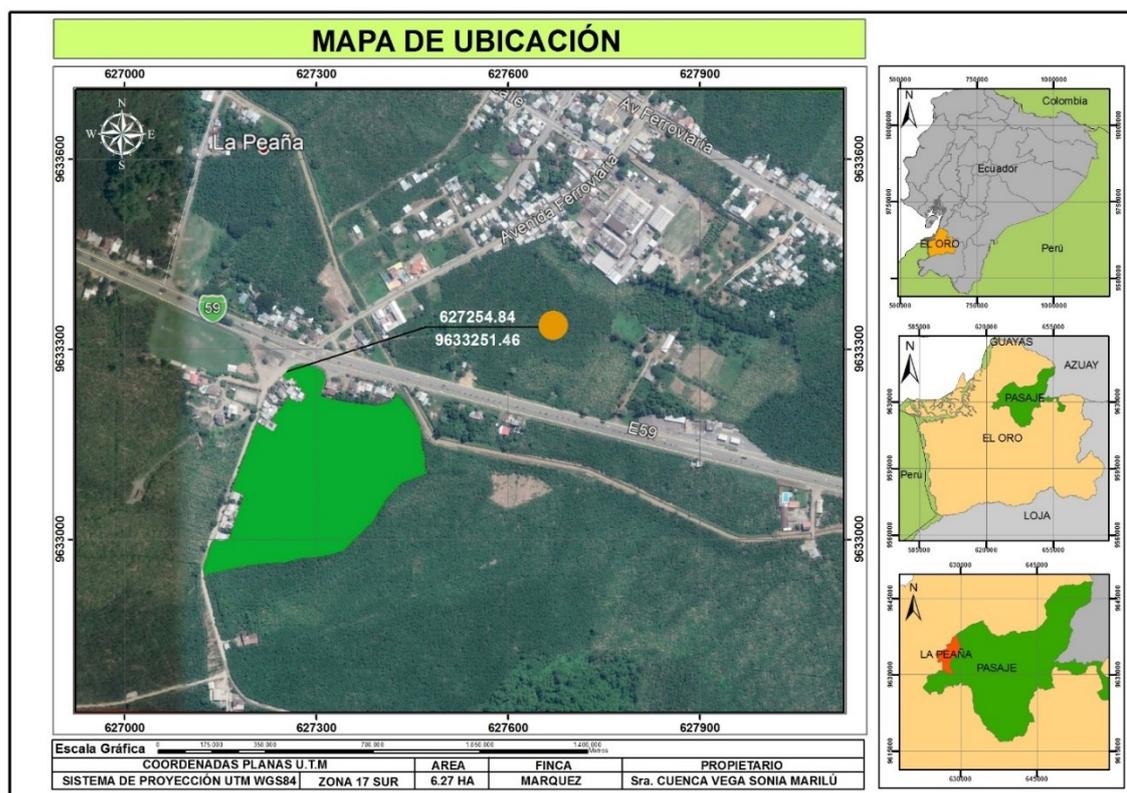


Figura 3: Ubicación del predio en estudio

Fuente: Google Earth

3.1.2. Caracterización del área en estudio

El área de estudio seleccionada se encuentra en zonas de bosque húmedo tropical con una temperatura que varía entre 22 a 32 °C, Humedad relativa del 82 % y un régimen de lluvias con precipitaciones concentradas de enero a abril. La finca Márquez con coordenadas UTM (627254, 9633251). Altitud de 20 msnm.

El sector agrícola en estudio tiene condiciones climatológicas y ecológicas, como se detallan en la tabla 1.

Tabla 1: Condiciones climatológicas del sector

Régimen térmico	Variación de la humedad	Índice hídrico	Temperatura °C		Humedad %		Precipitación mm
			Calurosa	Fresca	Más húmedo	Menos húmedo	
Cálido	Gran déficit hídrico en época seca	Sub húmedo	Febrero-mayo 31°C	Junio-noviembre 22°C	Septiembre-julio 97%	Agosto 35%	555

Fuente: Plan de desarrollo y ordenamiento territorial 2015 GAD La Peaña

3.1.3. Materiales, equipos y reactivos utilizados en la investigación

Materiales

- Cilindros de hierro galvanizado.
- Cinta métrica
- Fundas plásticas, plástico de embalaje y etiquetas
- Espátula, Pala, Machete
- balones aforados 100 ml
- Probetas tipo Bouyoucos de 1205 ml
- Pizzetas.
- Pipetas Aforadas de 10 ml

Equipos

- Balanza Electrónica Analítica de 300gr
- Hidrómetro de 5 a 60GR/LT (Bouyoucus scale)
- Termómetro (escala -20°C a 100°C)
- Estufa
- Batidora Eléctrica H-4260A
- Ollas de Presión
- Membranas de Richards
- Anillos de goma de 5cm de diámetro y 1cm de espesor

- Compresor
- GPS

Reactivos

- Dicromato de potasio al 1N
- Agua destilada

3.2. Metodología

3.2.1. Variables analizadas

Según los objetivos planteados en esta investigación se establecieron 8 variables de estudio que son:

- Textura (%)
- Densidad real (g.cm^{-3})
- Densidad aparente (g.cm^{-3})
- Porosidad Total (%)
- Capacidad de Campo ($\text{cm}^3 . \text{cm}^{-3}$)
- Punto de Marchitez Permanente ($\text{cm}^3 . \text{cm}^{-3}$)

3.2.2. Fase de campo

3.2.2.1. Diseño de la investigación

Inicialmente se efectuó el levantamiento topográfico de la finca “Márquez” utilizando GPS donde se procesó la información y con la ayuda del software AutoCAD (2014) se elaboró el plano del predio cumpliendo con todas las normativas exigidas por el MAG, se realizó un muestreo sistemático (grilla 70 x 70 m), dando un total de 15 puntos de interés (Figura 4).

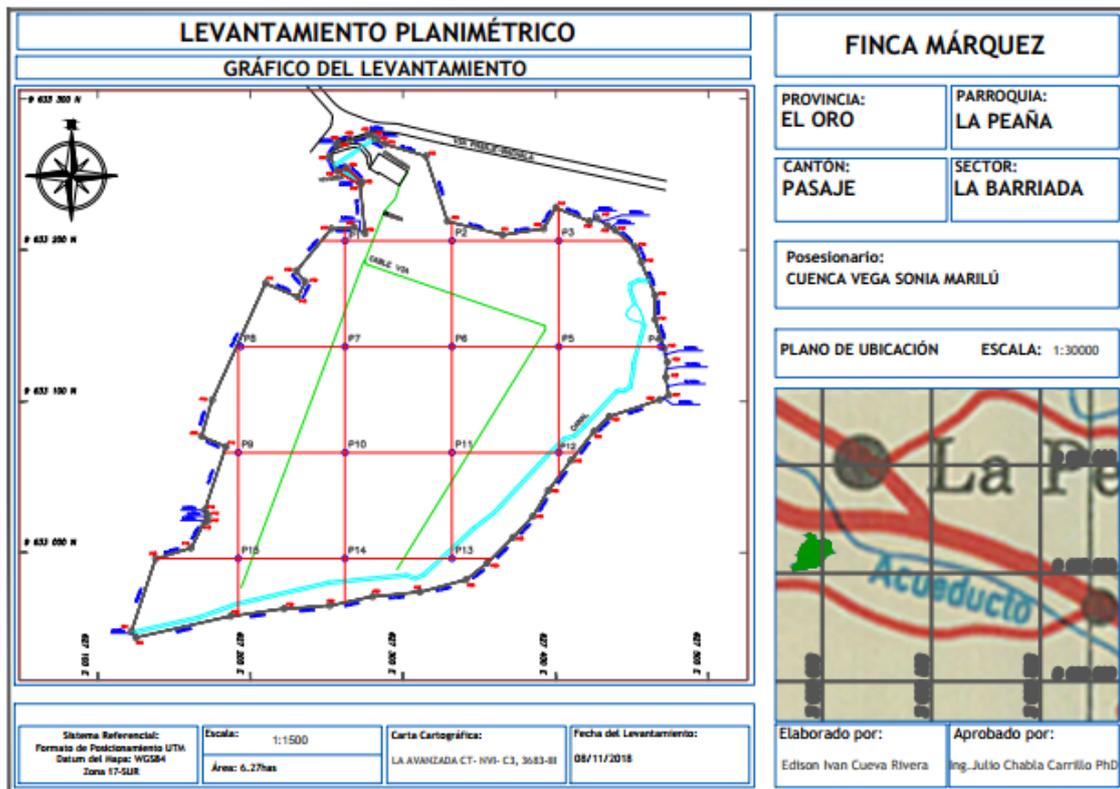


Figura 4: Levantamiento planímetro finca “Márquez”

Para la toma de muestras en cada punto se realizó una calicata de 50*70 cm en forma de escalinata (15 cm de ancho x 10 cm profundidad), se tomaron muestras en un perfil de suelo de 50 cm de profundidad en estratos cada 10 cm, los estratos muestreados son de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 y 40-50 cm lo que da un total de muestras de 75, a continuación, se detalla los pasos para la extracción de la muestra en campo:

- En cada estrato se inserta en el centro de cada escalón un cilindro de hierro galvanizado de 5 cm de altura por 5.4 cm de diámetro, se presiona hasta que se encuentre al ras del suelo, tomando así muestras sin alterar.
- Sobre el cilindro introducido al ras del suelo, se coloca otro cilindro y se procede a presionar hasta 2.5 cm del segundo cilindro, con el fin de garantizar que la muestra a tomarse se encuentre en el centro de cada estrato.
- Luego se introduce la pala alrededor del cilindro haciendo surcos en forma cuadrangular para poder levantar el bloque de suelo de la base de la grada y poder sacar el cilindro sin que se altere la muestra.
- Del suelo que se encuentra alrededor del cilindro se recolecto 1 kilo en cada estrato para las posteriores determinaciones de las demás propiedades físicas de suelo.

- Con ayuda de un estilete o navaja se procedió a eliminar el exceso de suelo de la muestra del cilindro donde debe quedar al ras del mismo luego se embala para mantener la humedad y poder transportarlo al laboratorio donde se hicieron los respectivos análisis.

3.2.3. Fase de laboratorio

3.2.3.1. Análisis de las propiedades físicas de suelo

El análisis de las muestras se las realizó en el laboratorio de suelo de la Universidad técnica de Machala y la Universidad Estatal de Cuenca en la tabla 2 se detalla los métodos utilizados para cada variable.

Tabla 2: Métodos utilizados en las propiedades físicas.

Parámetro	Método	Tamaño Muestra
Textura (%)	Bouyoucos	75
Densidad real (g.cm^{-3})	Picnómetro	75
Densidad aparente (g.cm^{-3})	Cilindro metálico	75
Porosidad total (%)	Relación de densidades	75
Capacidad de Campo ($\text{cm}^3. \text{cm}^{-3}$)	Membranas de Richards	30
Punto de Marchitez Permanente ($\text{cm}^3. \text{cm}^{-3}$)	Membranas de Richards	30

3.2.4. Análisis estadístico

Cada variable analizada en laboratorio de suelos se estimó parámetros de tendencia central, dispersión y distribución en el software IBM SPSS STATISTICS 23 (2014) donde permite identificar las variables con mayor dispersión en la finca “Márquez” para lo cual se emplean gráficos exploratorios como diagramas caja bigote, que permiten apreciar de manera visual el comportamiento de la variable.

3.2.5. Análisis geoestadístico

En el software Surfer 16, se cargó la base de datos para la determinación de los semivariogramas experimentales para cada una de las variables analizadas en Excel se obtuvieron los errores medios cuadrados de cada una, de igual manera se hizo una validación de los métodos a partir de los valores predichos por el software ArcGIS 2014 con los cuales se estableció el coeficiente de Pearson y de Nash.

3.2.6. Coeficiente de Nash –Sutcliffe

Este criterio es uno de los más usados, es un indicador de ajuste, que emplea valores logarítmicos del valor observado y del valor simulado, como resultado la influencia de

valores bajos incrementa los errores y hace más sensible a la medida del criterio estadístico. Los valores iguales a uno indican un ajuste perfecto conforme se aleja de este valor el modelo se vuelve pobre y no se ajusta a los datos observados, ecuación (4) (Albuja & Tenelanda, 2014).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Qoi - Qsi)^2}{\sum_{i=1}^N (Qoi - \bar{Qsi})^2} \quad 4)$$

3.2.7. Coeficiente de determinación (R^2)

Para un conjunto de datos se la utiliza como un modelo de ajuste. Esta medida es el Coeficiente de Determinación, que es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson, da la proporción de variación de la variable (Y) que es explicada por la variable (X), estos valores explican si el modelo presenta un ajuste perfecto cuando es igual a 1 o más cercano a este, entre más se aleja de la unidad pierde su capacidad predictiva. (Martínez, 2005).

3.2.8. Error cuadrático medio (RMSE)

El error cuadrático medio se utiliza frecuentemente como una medida de diferencia entre datos simulados y datos observados, estas diferencias individuales son llamadas residuos, los valores iguales a cero o más cercano a este significa que tiene un ajuste perfecto, (Albuja & Tenelanda, 2014).

$$RMSE_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_{xi}^2}{n}} \quad 5)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_{yi}^2}{n}} \quad 6)$$

3.2.9. Análisis de los componentes principales

Los resultados de la información recolectada de las propiedades físicas, fueron analizados mediante el Análisis de Componentes Principales (ACP) a través del software IBM SPSS STATICS 23 (2014), donde se las agrupo y se las represento en un cuadro, indica la correlación de las variables más representativas.

Las variables consideradas en este método son: arcilla, limo, arena, Dr, Da, Pt, CC y PMP.

4. RESULTADOS

4.1 Análisis exploratorio de las propiedades físicas del suelo

El diagrama de caja y bigotes permite comparar de manera más fácil la dispersión y distribución del porcentaje de arcilla en las diferentes profundidades de acuerdo a esta el porcentaje más alto de arcilla (26%) se encuentra en los primeros 10 cm y el más bajo es de 0 a 5 % en el último estrato, debido al origen aluvial de los mismos, de acuerdo al rango intercuartílico la mayor variabilidad de los datos se presenta en el primer estrato y el más homogéneo de 40-50 cm, con respecto a la mediana indica una mayor dispersión de los estratos de 10-20, 20-30, 30-40 cm, dentro de estos existen valores atípicos que no son representativos de la muestra (Figura 5).

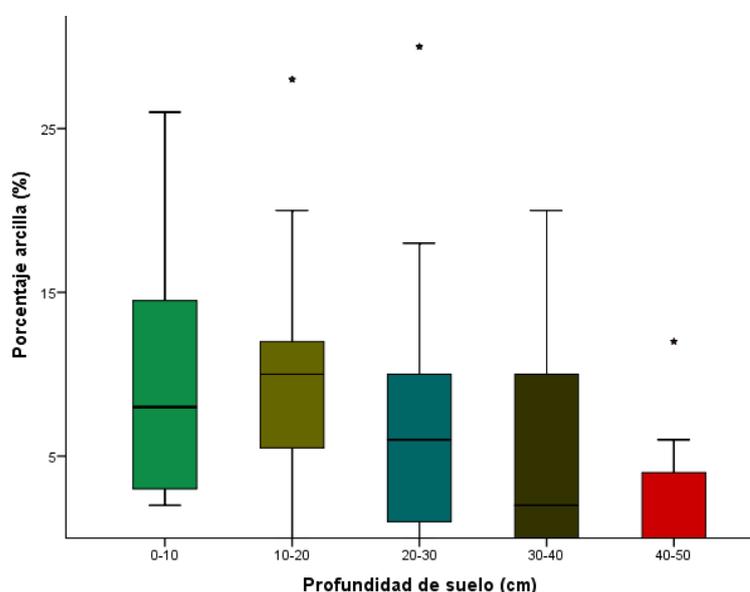


Figura 5: Diagrama de caja y bigote de porcentaje de Arcilla en 5 profundidades de estudio

Comparando las diferentes profundidades el mayor porcentaje de limo (66%) se encuentra a una profundidad de 10-20 cm debido probablemente a la eluviación de sus partículas a estratos inferiores y el mínimo (2%) de 30-40 cm, de acuerdo al 50 % de los datos entre el cuartil 1 y 3 la mayor variabilidad se encuentra en los primeros 40 cm y de 40-50 cm los valores más homogéneos, respecto a la mediana de 30-40 cm existe una mayor dispersión de los datos. (Figura 6).

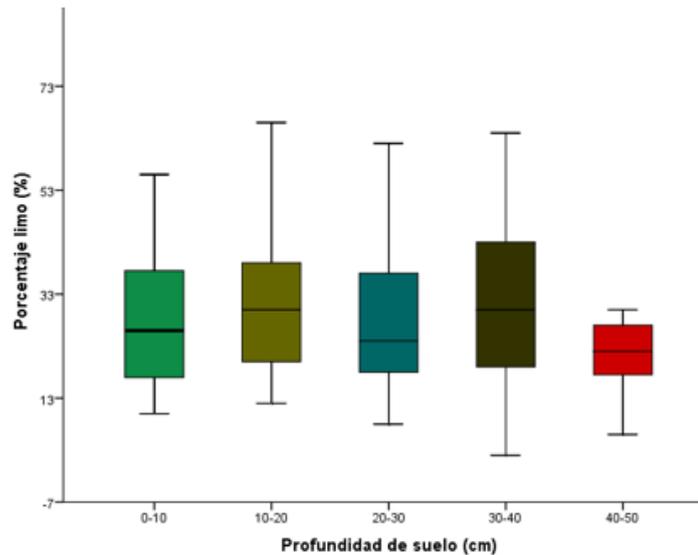


Figura 6: Diagrama de caja y bigote de porcentaje de Limo en 5 profundidades de estudio

En la Figura. 7, la mayor variabilidad de porcentaje de arena se encuentra a una profundidad de 20-30 cm con un valor máximo de 88 % y mínimo de 24 %, tomando en cuenta la mediana en los primeros 40 cm, los datos no presentan distribución normal debido a que existe una mayor asimetría en los estratos de 0-10, 10-20, 20-30 cm, manteniendo la misma tendencia a una profundidad de 40-50 cm se encuentran los valores más homogéneos debido probablemente al origen aluvial de estos suelos las partículas más gruesas a los estratos más profundos, a esta misma profundidad se presentan valores extremos y atípicos que no representan la muestra en general donde deberán ser eliminados para obtener datos más normales.

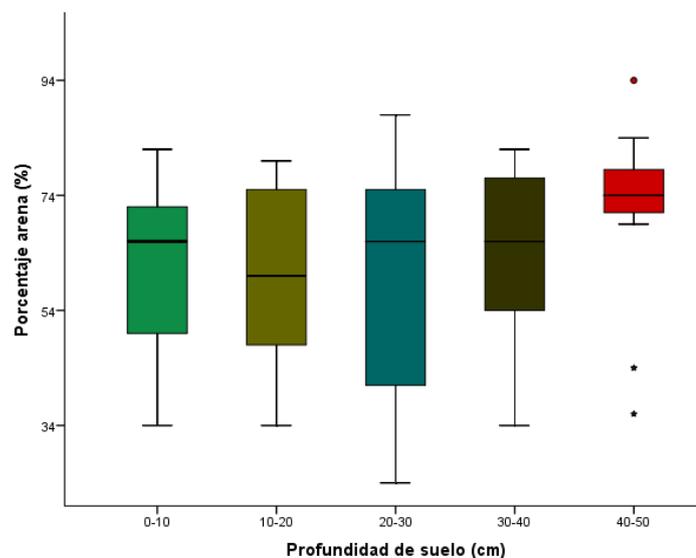


Figura 7: Diagrama de caja y bigote de porcentaje de Arena en 5 profundidades de estudio

En la Figura. 8, la mayor dispersión de los datos de densidad real tomando en cuenta el rango intercuartilico se encuentra a una profundidad de 10-20 cm, el valor máximo (2,69 $g.cm^{-3}$) se presenta en los primeros 10 cm y el mínimo (2,34 $g.cm^{-3}$) de 10-20 cm, la distribución de los datos respecto a la mediana determina que son asimétricos las profundidades de 0-10, 10-20 y 20-30 cm, se encontraron valores atípicos de 40-50 cm que no representan el total de la muestra.

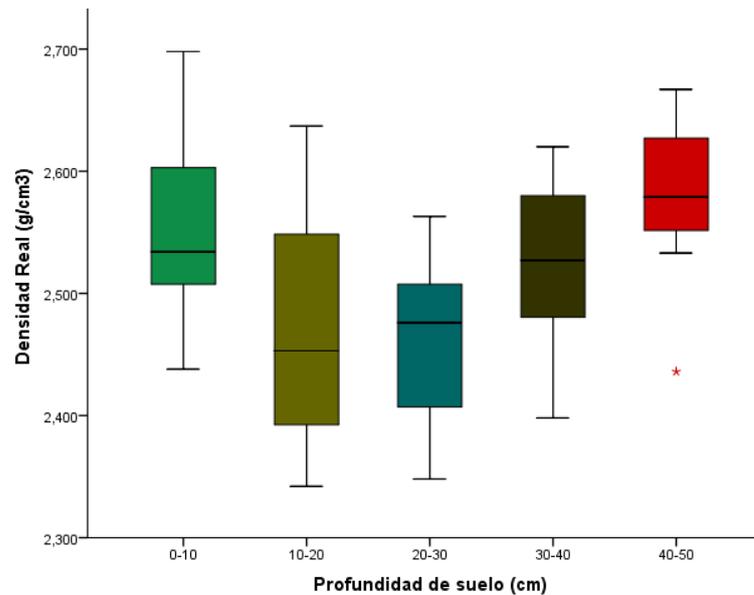


Figura 8: Diagrama de caja y bigote de Densidad real en 5 profundidades de estudio

De acuerdo al diagrama de caja y bigotes en la Figura. 9, las dispersión de los datos de densidad aparente son similares en todas las profundidades, el valor máximo (1,66 $g.cm^{-3}$) se encuentran a una profundidad de 30-40 cm y el mínimo (1,23 $g.cm^{-3}$) de 20-30 cm debido a que a esta profundidad se encuentra el menor porcentaje de arena ya que tiene una relación directa con la D_a (Jimenez & Siavosh, 2005), la distribución de los datos es simétrica de 10-20 cm y asimétrica para el resto de profundidades.

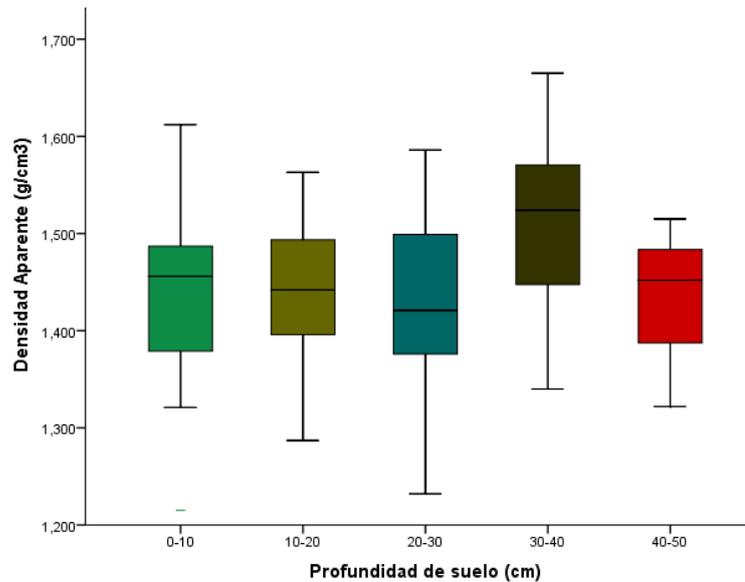


Figura 9: Diagrama de caja y bigote de Densidad aparente en 5 profundidades de estudio

De acuerdo a la distribución de los datos Figura. 10, el mayor porcentaje de porosidad total (48,6 %) se encuentra en los primeros 10 cm de suelo conforme aumenta la profundidad los valores disminuyen hasta un (35.8%) en el estrato de 30-40 cm, esto está relacionado a que la densidad aparente aumenta la porosidad tienden a disminuir (Gutierrez, 2017), la mayor variabilidad se encuentra de los 20 a 50 cm de profundidad a esta misma profundidad los datos tienen un comportamiento asimétrico debido a que su mediana se encuentra más cerca del Q1 y Q3, se encontraron valores atípicos en los primeros 20 cm de suelo.

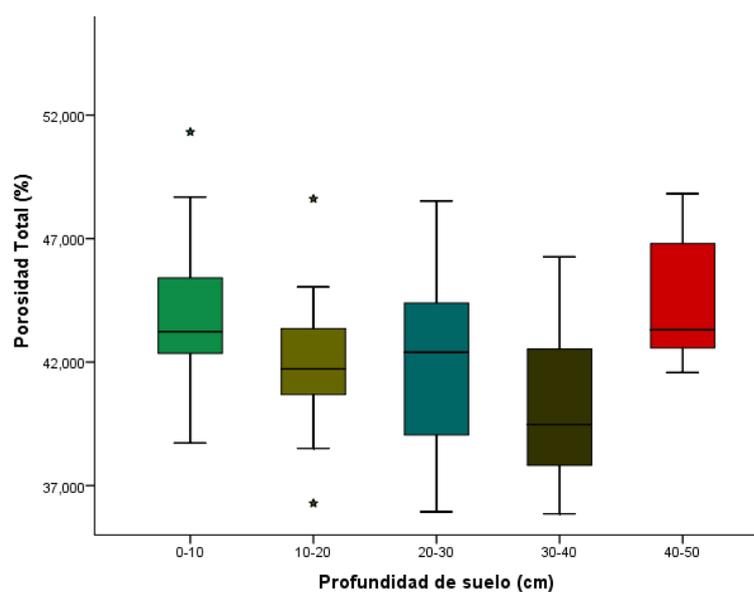


Figura 10: Diagrama de caja y bigote de Porosidad total en 5 profundidades de estudio

En la Figura. 11, las medianas de capacidad de campo son casi iguales en los dos estratos, pero existe mayor dispersión con forme aumenta la profundidad de muestreo, el valor máximo ($0,43 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) se encuentra en los primeros 10 cm de suelo esto puede ser a que existe el mayor porcentaje de arcilla permitiendo obtener mayor retención de humedad (Villarreal, 2010) y el mínimo ($0,15 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) de 20-30 cm debido al mayor porcentaje de arena presente en el mismo, la distribución de los datos en las dos profundidades tiene un comportamiento asimétrico ya que se encuentra la mediana más cerca de los cuartiles 1 y 3.

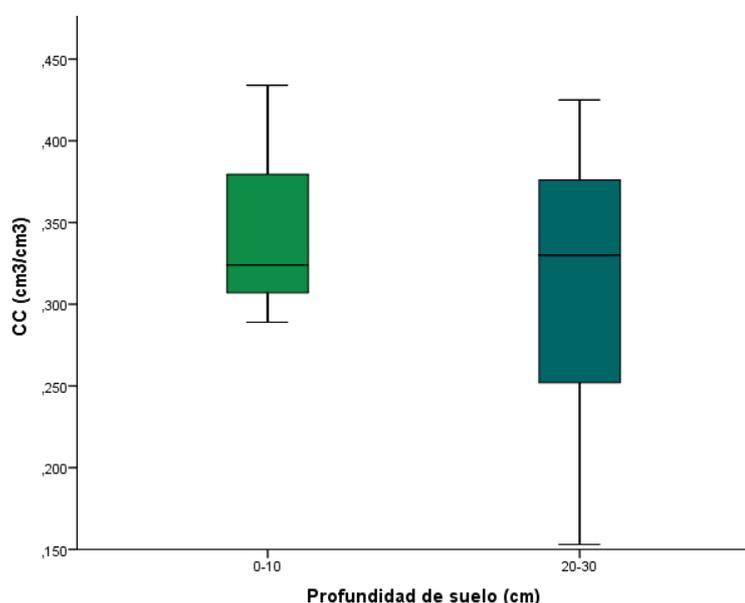


Figura 11: Diagrama de caja y bigote de Capacidad de Campo en 2 profundidades de estudio

Comparando las diferentes profundidades en la Figura. 12, se observa que son parecidas las medianas, pero presenta una mayor variación de los datos de 20-30 cm debido a que el rango intercuartílico es mayor y en este estrato se encuentra el mayor porcentaje de arena lo que influye en el porcentaje de arcilla y ocasiona que el PMP no sea homogéneo (Hernandez et al., 2018), el valor máximo y mínimo ($0,18$ y $0,10 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) de PMP se encuentra de 20-30 cm, existe una distribución asimétrica positiva en las dos profundidades debido a que la mediana se encuentra más cerca del primer cuartil.

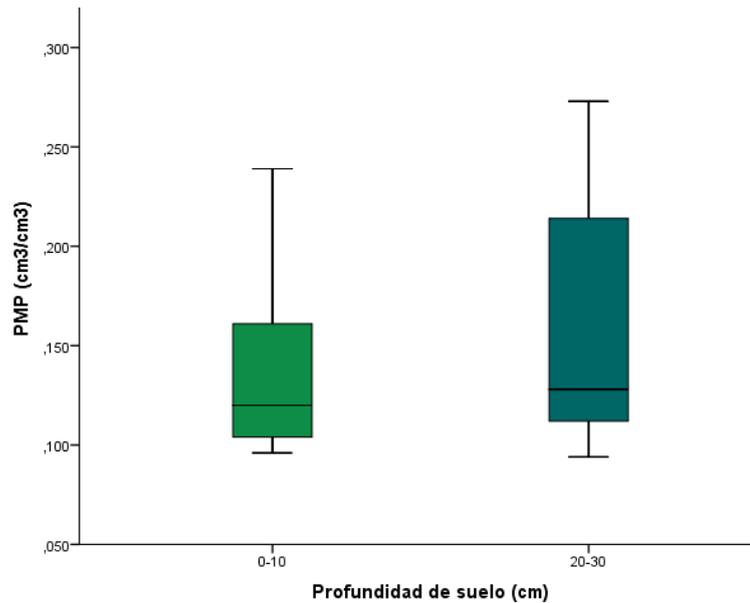


Figura 12: Diagrama de caja y bigote de Punto de Marchitez Permanente en 2 profundidades

Antes de realizar la prueba de normalidad, Tabla 3, se procedió a eliminar valores extremos y atípicos obtenidos del diagrama de cajas y bigotes de cada muestra para poder obtener valores más homogéneos. En cada estrato, se analizó cada variable y se determinó la normalidad de los datos por Shapiro-Wilk por el tamaño de las muestras que son menores a 50, ya que el valor de la significancia (sig) fueron mayores a 0,05 esto permite hacer una mejor predicción de los datos en el análisis geo estadístico para la creación de mapas.

Tabla 3: Prueba de normalidad para cada profundidad

Variables	Profundidad de suelo (cm)	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Arcilla (%)	0-10	,888	15	,063
	10-20	,916	15	,168
	20-30	,813	15	,059
	30-40	,794	15	,056
	40-50	,686	15	,052
Limo (%)	0-10	,954	15	,585
	10-20	,940	15	,383
	20-30	,864	15	,061
	30-40	,966	15	,794
	40-50	,818	15	,053
Arena (%)	0-10	,930	15	,273
	10-20	,892	15	,071
	20-30	,906	15	,118
	30-40	,909	15	,131
	40-50	,823	15	,054

Tabla:3 Continuación

Dr (g. cm ⁻³)	0-10	,935	15	,320
	10-20	,895	15	,080
	20-30	,959	15	,676
	30-40	,935	15	,327
	40-50	,916	15	,170
Da (g. cm ⁻³)	0-10	,937	15	,352
	10-20	,960	15	,688
	20-30	,940	15	,377
	30-40	,957	15	,640
	40-50	,930	15	,274
Porosidad Total (%)	0-10	,961	15	,712
	10-20	,979	15	,961
	20-30	,969	15	,839
	30-40	,935	15	,324
	40-50	,895	15	,080
CC (cm ³ . cm ⁻³)	0-10	,919	15	,187
	20-30	,920	15	,190
PMP (cm ³ . cm ⁻³)	0-10	,921	15	,202
	20-30	,896	15	,082

La Tabla 4 muestra un resumen de la estadística descriptiva de 510 datos de 8 variables estudiadas, tomando en cuenta todas las profundidades de 15 puntos los valores más abundantes es la fracción arena de 88 a 24 % debido a que las clases texturales predominantes son arenoso franco, franco arenoso y en menor proporción franco limosos (Anexo 13) esto se debe a que el contenido de limo varía de 2 a 66% y en menor porcentaje se encuentra la arcilla de 0 a 26 %, la densidad real (Dr) varia de 2,34 a 2,69 g. cm⁻³ en promedio se desvían los datos respecto a la media en 0,087 g. cm⁻³, en densidad aparente (Da) los datos se desvían de la media en 0,096 g. cm⁻³ el valor mínimo es de 1,21 g. cm⁻³ y máximo 1,66 g. cm⁻³ este aumento se debe a que existe un mayor contenido de arena en todos los puntos, la porosidad total (Pt) los valores mínimos son de 35,86 % y máximos 48,6 % los datos se desvían de la media en 3,49 %, la capacidad de campo (CC) los valores mínimos y máximos son de 0,15 a 0,43 cm³. cm⁻³ y de PMP 0,094 a 0,183 cm³. cm⁻³. Los valores más bajos de CC y PMP se deben a que existen zonas más arenosas y no permite retener mayor cantidad de agua en el suelo.

Tabla 4: Estadística descriptiva de las propiedades físicas de suelo

VARIABLE	Promedio	Me	S	CV (%)	Min	Max	Rango	Sesgo	Curtosis
Arcilla (%)	7.040	6.8	6,879	97,713	0.0	26.0	25.0	1.166	0.774
Limo (%)	29.573	28.0	16.448	55.619	2.0	66.0	64.0	0.873	0.158
Arena (%)	63.387	64.0	16.911	26.680	24.0	88.0	64.0	-0.614	-0.777
Dr (g. cm ⁻³)	2.520	2.526	0.087	3,452	2,342	2,698	0,356	-0,135	-0,674
Da (g. cm ⁻³)	1,448	1,454	0,096	6,629	1,215	1,665	0,450	-0,237	-0,048
Pt (%)	42,528	42,620	3,493	8,213	35,856	48,63	15,459	0,108	-0,406
CC (cm ³ . cm ⁻³)	0.330	0.327	0.069	20.910	0.153	0.434	0.281	-0.915	0.708
PMP (cm ³ . cm ⁻³)	0.149	0.121	0.054	36.242	0.094	0.183	0.159	1.033	-0.099

En la Tabla 5, Warrick & Nielsen (1980) clasifico al coeficiente de variación (CV) de las propiedades físicas en 3 categorías donde se determinó que las variables de Dr, Da y Pr, presentaron un comportamiento más homogéneo con los valores más bajos de 3,45 a 8,21 % y el CV más alto de 97,713 % corresponde a la arcilla que presenta el comportamiento más heterogéneo de todas las variables.

Tabla 5: Clasificación del coeficiente de variación de las propiedades físicas

CV (%)	Clasificación de las variables	Variables físicas del suelo
< 12	Baja variabilidad	Dr, Da y Pt
12-60	Variabilidad media	Limo, Arena, CC y PMP
> 60	Alta variabilidad	Arcilla

4.2. Análisis de variabilidad espacial de suelos

4.2.1. Análisis estructural de las propiedades físicas del suelo.

Se realizó la elaboración del semivariograma de Da en el software Surfer (Figura 13), es una gráfica que relaciona la semivarianza de los pares de puntos de muestreo en el eje de las (Y) que se encuentran separados a una distancia determinada eje de las (X). Se obtuvo un gráfico de puntos conocido como semivariograma experimental a este semivariograma se le ajusto un modelo matemático denominado semivariograma teórico, los modelos más ajustados para cada profundidad fueron: esférico figura **13A**, **13B** y **13E** y gaussiano figura **13C** y **13D**. Los parámetros del semivariograma que presenta cada una de las profundidades son, el sill que es el valor máximo de la semivarianza, el rango es la

distancia hasta donde se estabiliza la semivarianza y también indica en todos los estratos la distancia hasta donde existe dependencia espacial el cual fue para D_a de 90 a 150 m, los valores de semivarianza que no parten de cero se conocen como nugget figura **13A**, **13D** y **13E**, estos valores se puede atribuir a errores de medición de la variable. La construcción de los semivariogramas del resto de propiedades se encuentra en anexos.

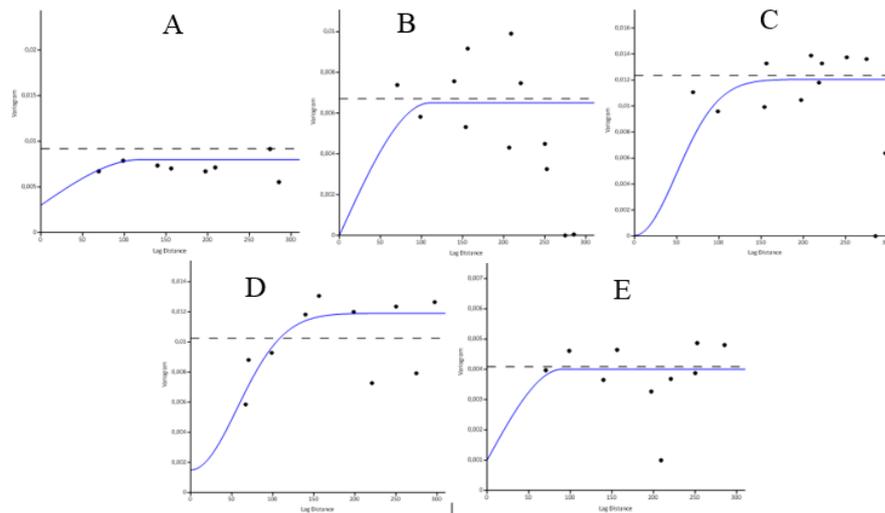


Figura 13: Semivariograma ajustado de D_a ($g.cm^{-3}$) en un perfil de 50 cm.

Las letras indican los estratos en (cm) **A)** 0-10, **B)** 10-20, **C)** 20-30, **D)** 30-40, **E)** 40-50.

En la Tabla 6, se presentan los resultados del análisis estructural de todas las variables en estudio para la determinación de semivariogramas experimentales se utilizó el programa Surfer 16 donde se ajustó modelos teóricos (esférico, gaussiano y exponencial) para los estratos considerados en el perfil, para cada variable, siendo más precisos y eficientes los modelos esférico y gaussiano ya que presentaron un coeficiente de Nash y un coeficiente de determinación (R^2) cercano o igual a 1, así mismo se obtuvieron los valores más bajo del error medio cuadrático (RMSE),

Los resultados evidenciaron la existencia de variabilidad espacial y el análisis estructural de acuerdo a Cambardella et al., 1994, se determinó una dependencia espacial moderada para D_a y CC en los primeros 10 cm de suelo, en el estrato de 20 -30 cm PMP y el ultimo estrato de 40-50 cm Pt, se presentó una dependencia espacial fuerte a los 10 cm de suelo de, Arcilla, Limo, Arena, Dr, Pt y PMP, para el estrato de 10-20 cm, Arcilla, Limo, Arena, Dr, D_a y Pt, de 20-30 cm mantiene la misma dependencia fuerte del estrato anterior incluyendo la CC, de 30-40 cm presenta la misma dependencia espacial fuerte del estrato de 10-20 cm y en el último de 40-50 cm, Arcilla, Limo, Arena, Dr y D_a , no se presentó

en ninguna profundidad una dependencia débil. Los rangos que explican la existencia de una dependencia espacial se encuentran entre 80 a 180 m.

Tabla 6: Parámetros del variograma aplicando kriging ordinario para las variables de estudio.

Prof. (cm)	Var.	modelo	Nugget	Sill	Rango	R2	Nash	RMSE	De	
0-10	Arcilla	Exponencial	11	53	120	0.998	0.965	1.416	20,75	Fuerte
	Limo	Gaussiano	0	180	150	0.999	1.000	0.042	0,00	Fuerte
	Arena	Gaussiano	3,356	200	155	0.999	1.000	0.285	1,68	Fuerte
	Dr	Esférico	0,0002	0,004	120	0.999	0.993	0.006	5,00	Fuerte
	Da	Esférico	0,003	0,007	120	0.596	0.588	0.06	42,86	Moderada
	Pt	Esférico	2,54	12,04	120	0.991	0.939	0.830	21,10	Fuerte
	CC	Gaussiano	0,001	0,002	150	0,995	1,000	0,022	50	Moderada
	PMP	Esférico	0,00012	0,00049	120	0.44	1.000	0.006	24,49	Fuerte
10-20	Arcilla	Gaussiano	10	48	120	1.000	0.958	1.441	20,83	Fuerte
	Limo	Esférico	17	237	80	1.000	0.993	1.22	7,17	Fuerte
	Arena	Esférico	10	260	100	0.999	0.998	0.803	3,85	Fuerte
	Dr	Esférico	0	0,0108	100	1.000	1.000	0.002	0,00	Fuerte
	Da	Esférico	0	0,0065	110	0.999	1.000	0.001	0,00	Fuerte
	Pt	Esférico	0,25	8	100	1.000	0.998	0.121	3,13	Fuerte
20-30	Arcilla	Gaussiano	1.567	67,56	170	0.999	0.999	0.239	2,32	Fuerte
	Limo	Gaussiano	12	360	140	1.000	0.999	0.675	3,33	Fuerte
	Arena	Gaussiano	40	405	180	0.998	0.987	2.194	10,96	Fuerte
	Dr	Esférico	0,0001	0,004	120	0.984	0.972	0.011	2,50	Fuerte
	Da	Gaussiano	0,00005	0,012	150	1.000	1.000	0.001	0,42	Fuerte
	Pt	Esférico	2,45	13,95	125	0.996	0.961	0.712	17,56	Fuerte
	CC	Esférico	0,0001	0,0072	120	1.000	1.000	0.002	1,39	Fuerte
	PMP	Gaussiano	0,00033	0,00083	180	0.985	1.000	0.0089	39,76	Moderada
30-40	Arcilla	Gaussiano	2	53	150	1.000	0.999	0.27	3,77	Fuerte
	Limo	Gaussiano	20	330	160	0.999	0.996	1.03	6,06	Fuerte
	Arena	Esférico	3,89	251	120	0.999	0.999	0.398	1,55	Fuerte
	Dr	Esférico	0,0006	0,0032	85	0.999	0.972	0.010	18,75	Fuerte
	Da	Gaussiano	0,0015	0,0119	150	1.000	0.984	0.013	12,61	Fuerte
	Pt	Gaussiano	1,98	10,98	150	1.000	0.967	0.581	18,03	Fuerte
40-50	Arcilla	Esférico	0,7	11	120	0.999	0.993	0.283	6,36	Fuerte
	Limo	Esférico	5	230	120	1.000	0.999	0.367	2,17	Fuerte
	Arena	Esférico	4,3	205	110	1.000	0.999	0.343	2,10	Fuerte
	Dr	Esférico	0,0009	0,0047	120	0.248	0.108	0.073	19,15	Fuerte
	Da	Esférico	0,001	0,004	90	0.999	0.931	0.016	25	Fuerte
	Pt	Gaussiano	2,05	6,05	150	0.999	0.881	0.84	33,88	Moderada

4.2.2. Creación de mapas temáticos de las propiedades físicas del suelo.

Para determinar el comportamiento espacial del porcentaje de arcilla se realizó un ajuste de semivariograma (Anexo 1) para las diferentes profundidades en el cual se determinó un rango de 120 a 170 m esto indica que hasta esa distancia existe una dependencia espacial, la concentración de arcilla en la Figura 14, varía en todas las profundidades de 0 a 26 %, en las figuras **14A**, **14B** y **14C**, se concentró la mayor cantidad de arcilla al sur oeste de la finca, al inicio se presentan valores más altos de 23 a 26 % que se distribuye hasta el lindero de la finca conforme aumenta la profundidad de acuerdo a Delgado, (2017) menciona que los contenidos de arcilla influyen en una mayor retención de agua y nutrientes, de la misma manera al norte en la figura **14D** y **14E** presenta un comportamiento similar, el menor porcentaje de arcilla se encuentra en el centro de 0,8 a 8,20 % esta concentración se distribuye por todo el lugar conforme aumenta la profundidad, Villarreal, (2010) menciona que porcentajes bajos influye en la aireación, permeabilidad, volumen explorado por las raíces lo que origina problemas en la producción.

Las letras indican los estratos en (cm) **A)** 0-10, **B)** 10-20, **C)** 20-30, **D)** 30-40, **E)** 40-50.

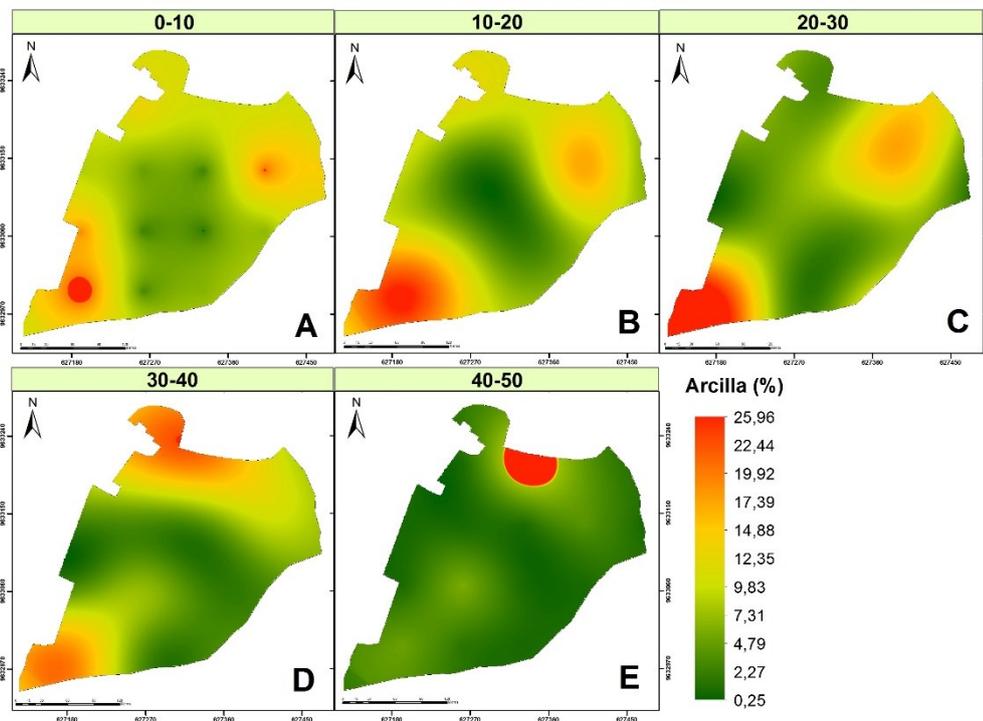


Figura 14: Distribución espacial de la Arcilla en un perfil de 50 cm.

En la Figura 15 se presentan los mapas de distribución espacial del porcentaje de limo que fueron obtenidos a partir del ajuste del semivariograma (Anexo 2) que sirvieron para interpolar por medio del kriging ordinario, los rangos que presentan dependencia espacial son de 80 a 160 m, la concentración de los datos varían de 2 a 66 % en todas las profundidades, de acuerdo a las figuras **15A, 15B, 15C, 15D, 15E**, los valores máximos de 61 a 66 % se ubican al Sur este de la finca, conforme las profundidades aumentan los datos se dispersan hacia la zona baja del predio, en la parte Noroeste y Noreste se encuentran los valores más bajos de 2 a 25 % de manera que a mayor profundidad los datos se dispersan alrededor de la finca. Los suelos que contienen mayores proporciones de limo en términos generales presentan buenas condiciones para la actividad agrícola (Delgado, 2017).

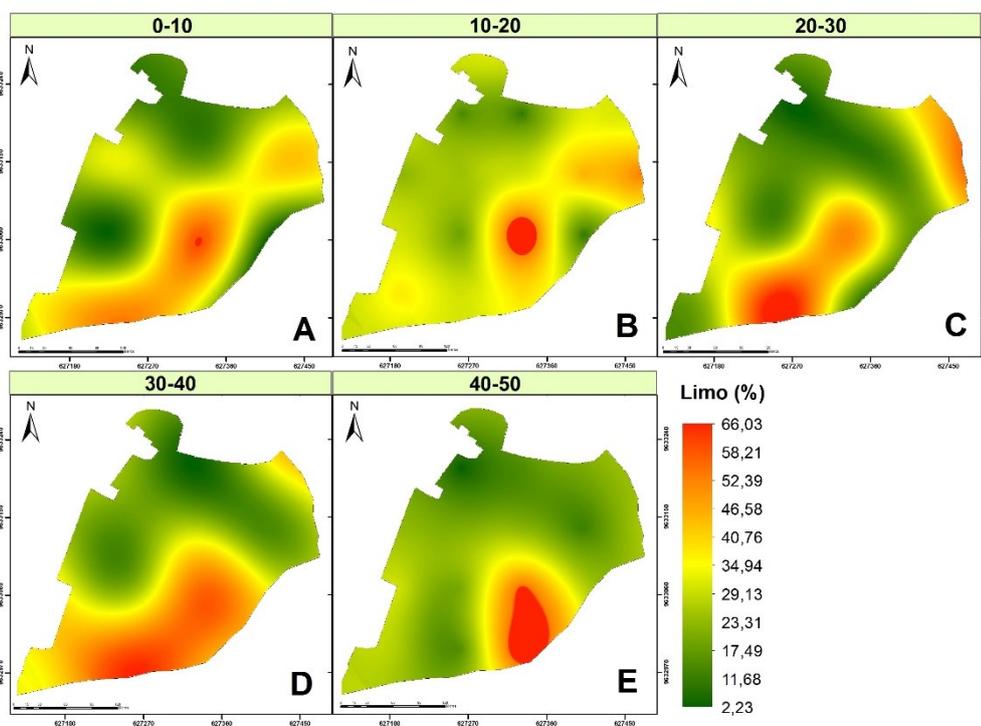


Figura 15: Distribución espacial de la Limo en un perfil de 50 cm.

En la Figura 16 se presenta los mapas de la variabilidad del porcentaje de arena a diferentes profundidades obtenidos mediante el kriging ordinario que fueron previamente ajustados a un modelo (Anexo 3) en el cual se determinó un rango de dependencia espacial de 100 a 180 m, la concentración de arena varía en todas las profundidades de 24 a 88 %, la mayor cantidad de arena de 66 a 88 % se concentró en todo los estratos ubicados al noroeste del predio a medida que la profundidad aumenta esta se dispersa casi

por todo el terreno figura **16C**, **16D** y **16E**, de acuerdo a Jimenez & Siavosh, (2005) los porcentajes altos de arena presentan una baja capacidad de retención de humedad, baja retención de nutrientes, drenaje alto, baja capacidad de suministro de agua, excesiva aireación, los valores más bajos de 24 a 43 % se distribuyen desde el noreste siguiendo el lindero hasta el noroeste, de acuerdo a la figura **16A**, hasta **16E**, las dispersión se va reduciendo. Esto determina que las clases texturales más predominantes son la Arena Franca y el franco arenoso (Anexo 13).

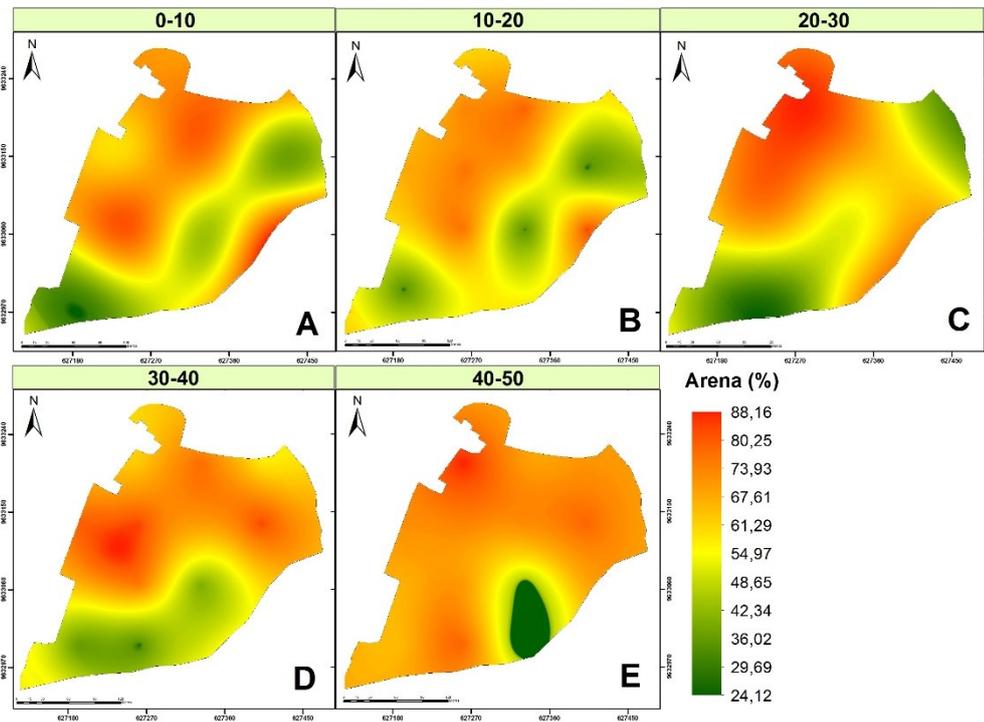


Figura 16: Distribución espacial de Arena en un perfil de 50 cm.

Se presentan mapas de distribución espacial de densidad real (D_r) Figura 17, que fueron obtenidos a partir del ajuste del semivariograma (Anexo 4) que sirvieron para interpolar por medio del kriging ordinario. Los rangos que presentan dependencia espacial son de 85 a 120 m, la concentración de los datos varían de 2,45 a 2,69 $g.cm^{-3}$, en todas las profundidades, los valores son más o menos constantes debido a la composición química y mineralógica de la fase sólida, de acuerdo los valores máximos de 2,64 a 2,69 $g.cm^{-3}$, la figura **17A** presento una mayor concentración al noroeste de la finca, en la figura **17B** la mayor concentración se presentó al centro y en la figura **17E** los linderos presentaron una moderada elevación, los valores medios 2,54 a 2,60 $g.cm^{-3}$, se presentan al centro de la figura **17D** y en mayor proporción en la figura **17E**, los datos más bajos 2,45 a 2,52

g.cm^{-3} , se encuentra la mayor concentración a los 30 cm., Si la densidad real es muy inferior a $2,65 \text{ gr/cm}^3$, podemos pensar que el suelo posee un alto contenido de yeso o de materia orgánica, (Heredia, 2013).

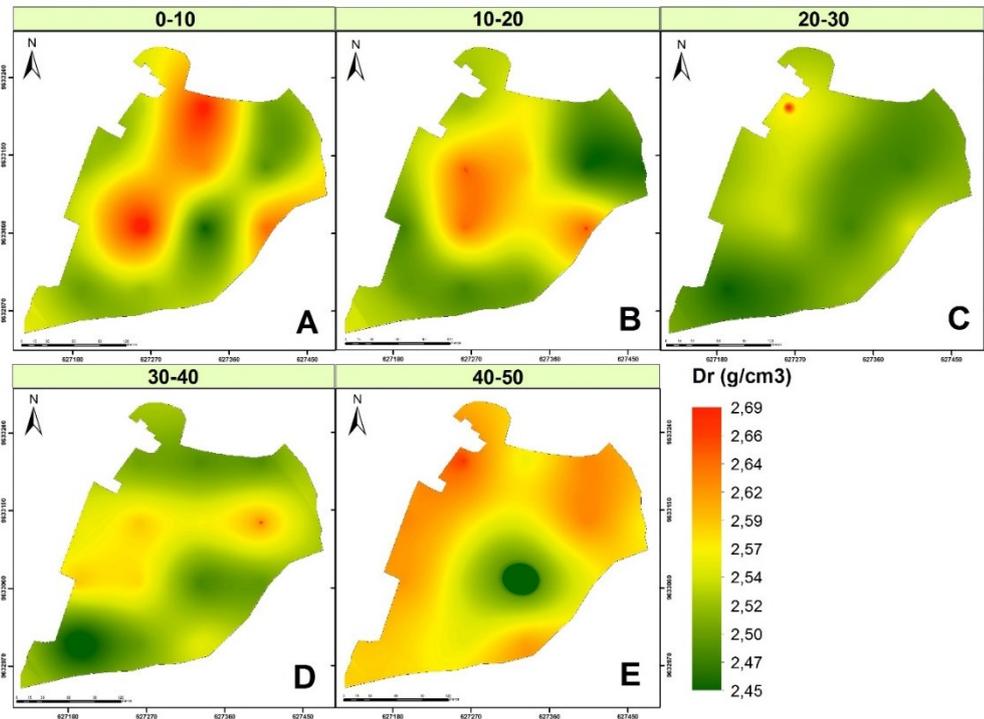


Figura 17: Distribución espacial de D_r en un perfil de 50 cm.

En la Figura 18 se presenta mapas de variabilidad espacial de densidad aparente (D_a) obtenidos mediante el kriging ordinario a partir de un ajuste de modelos (Anexo 5) en el cual se determinó un rango de dependencia espacial de 90 a 150 m, los valores de D_a varía en todas las profundidades de $1,22$ a $1,66 \text{ g.cm}^{-3}$, los valores más altos ubicados al oeste del predio se encuentran de $1,51$ a $1,66 \text{ g.cm}^{-3}$, estos se concentraron en menor concentración en los primeros 10 cm Figura 18A y va aumentando hasta los 40 cm de profundidad figura 18D. De acuerdo a Chabla et al., (2019) la densidad crítica para el cultivo de banano es de $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$, donde su intervalo hídrico óptimo (IHO) tiene un $\approx 0\%$ de humedad disponible para la planta, siendo este uno de los principales problemas para la producción agrícola ya que dificulta el crecimiento óptimo de raíces, aireación, retención de agua (Villa et al., 2018).

Los valores más bajos de $1,22$ a $1,45 \text{ g.cm}^{-3}$, se presentan en mayor concentración a los 10 cm en casi en toda finca conforme aumenta la profundidad esta desciende hasta los 40

cm figura 18D, y en los último 50 cm los valores más bajos llegan a concentrarse en toda la finca Figura 18E.

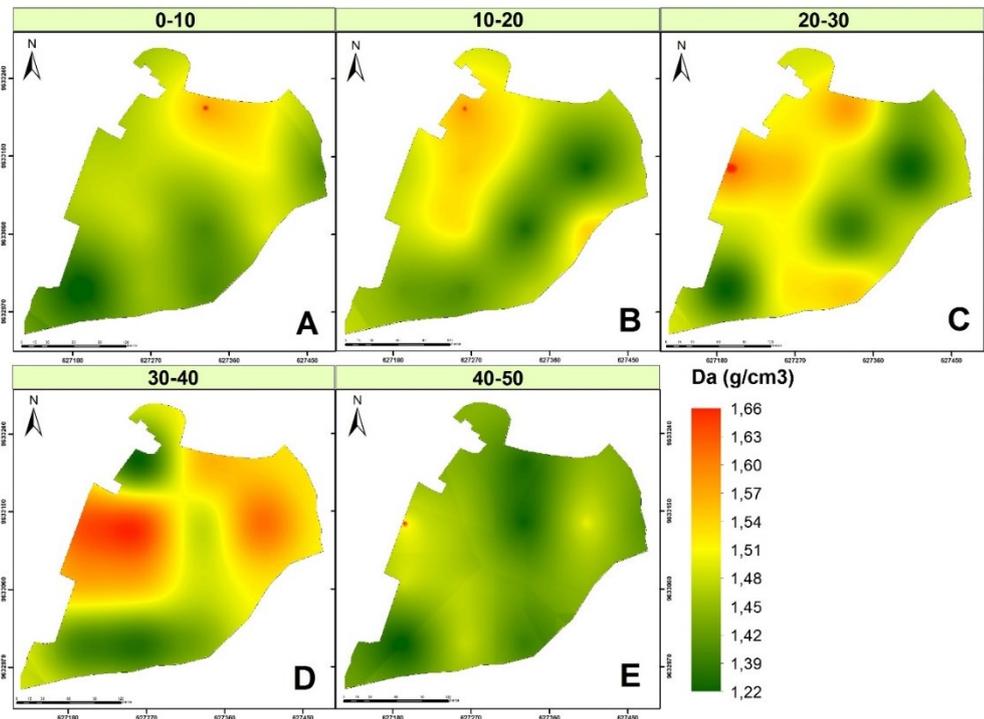


Figura 18: Distribución espacial de D_a en un perfil de 50 cm.

Se presentan mapas de distribución espacial de porosidad total (Pt) Figura 19, que fueron obtenidos por medio del kriging ordinario a partir del ajuste del semivariograma (Anexo 6), estos presentan un rango de dependencia espacial de 100 a 150 m, la concentración de los datos varían de 36,4 a 48,3 %, en todas las profundidades, los valores máximos de 45,9 a 48,3 % la figura 19A, presenta una mayor concentración al suroeste de la finca y esta se dispersa por todo el lugar, en la figura 19B y 19C, los valores se dispersan desde el centro hacia la parte superior derecha, en los últimos 50 cm se presenta la mayor concentración de datos en toda la finca, a los 40 cm presento los valores más bajos de 36,4 a 41,2 % Figura 19D. Según el estudio de Amézquita et al., (2002) el óptimo porcentaje para el desarrollo adecuado de las plantas en un suelo con porosidad total > 50%. Por el aumento de la D_a se encuentran porcentajes de porosidad por abajo del requerido esto afecta directamente a la productividad de banano.

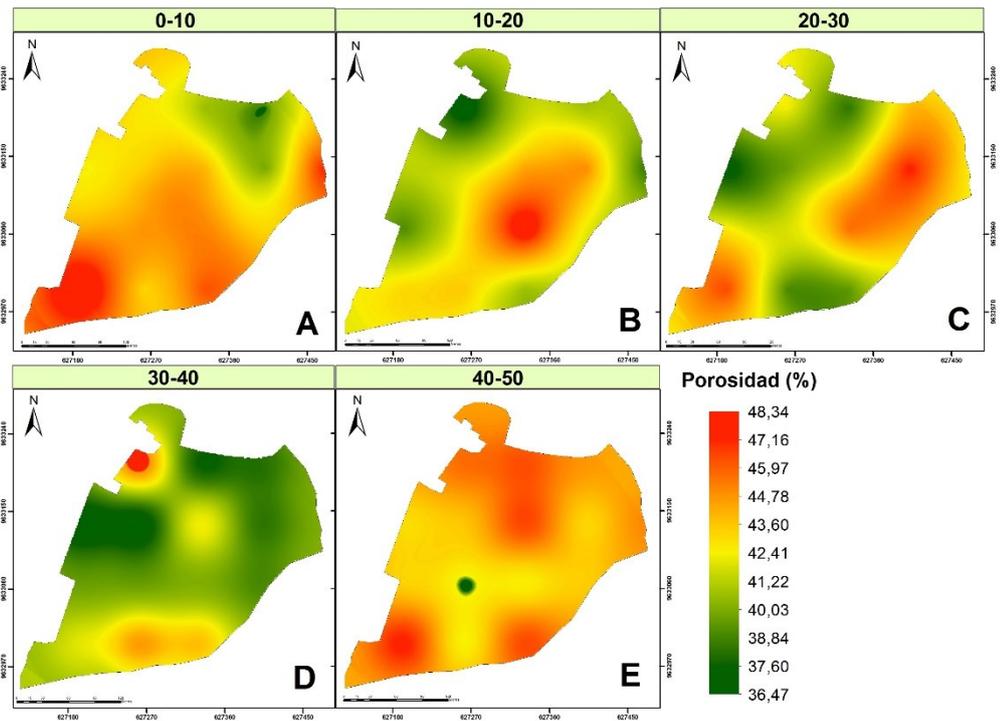


Figura 19: Distribución espacial de Pt en un perfil de 50 cm.

En la Figura 20 se presenta mapas de variabilidad espacial de capacidad de campo (CC) en dos profundidades, estos se obtuvieron mediante el kriging ordinario después de haber sido ajustado a un modelo (Anexo 7) en el cual se determinó un rango de dependencia espacial de 120 a 150 m, la concentración de CC varía en las dos profundidades de 0,15 a 0,42 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, los valores mayores de CC (0,36 a 0,42) se concentró en los primeros 10 cm alrededor de toda la finca, los valores más bajos de 0,15 a 0,28 Figura 20C, se ubican al noroeste del predio, esta disminución de la CC se debe a que existe valores altos de arena y Da ocasionando que la porosidad total disminuya, de acuerdo a esto se explica la baja capacidad que tiene el suelo para almacenar agua aprovechable.

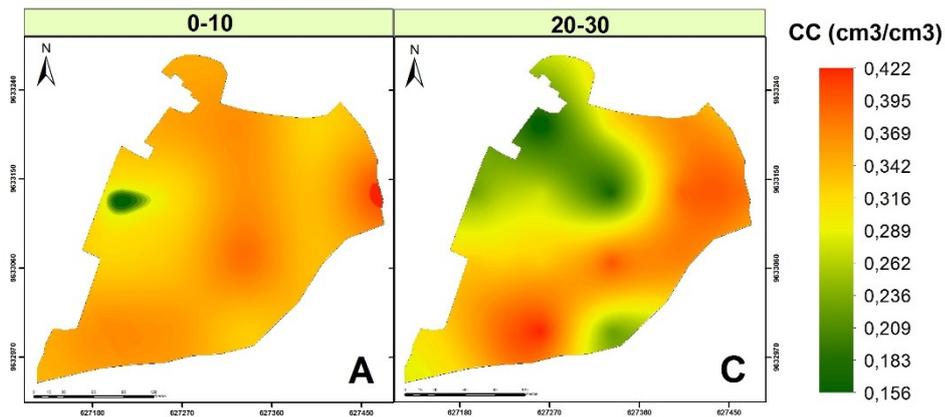


Figura 20: Distribución espacial de CC en un perfil de 50 cm.

En la Figura 21 se presenta mapas de variabilidad espacial de punto de marchitez permanente (PMP) en dos profundidades, estos se obtuvieron mediante el kriging ordinario después de haber sido ajustado a un modelo (Anexo 8) en el cual se determinó un rango de dependencia espacial de 120 a 180 m, la concentración de PMP varía en las dos profundidades de 0,11 a 0,17 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, la mayor cantidad de PMP es 0,15 a 0,17 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, estos valores se concentraron a los 30 cm ubicados al noreste de predio, los valores más bajos de 0,11 a 0,12 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, se concentran desde el centro hacia la parte superior figura 21A y conforme aumenta la profundidad se desplaza desde el centro hacia la izquierda de la finca figura 21C. Las propiedades que influyen en la CC también tienen una relación directa con el PMP. Los valores más bajos se deben tomar en cuenta ya que por debajo de estos las raíces restringen su crecimiento (Chabla et al., 2019).

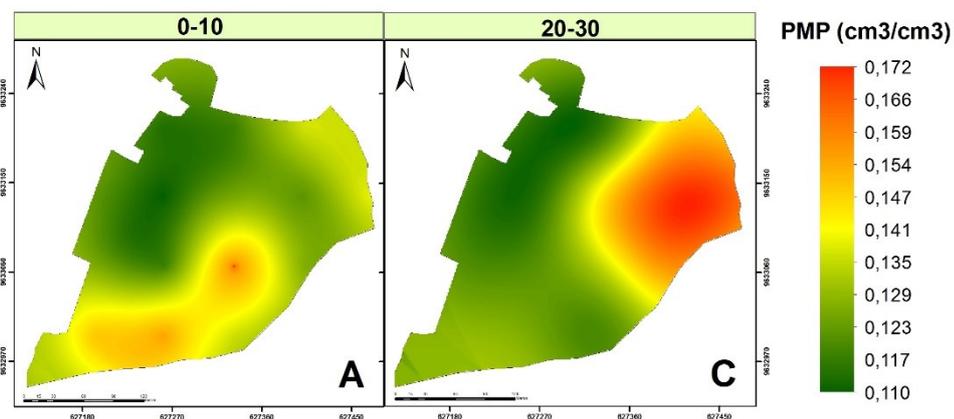


Figura 21: Distribución espacial de PMP en un perfil de 50 cm.

4.3. Análisis Multivariado

De las variables estudiadas se realizó un análisis de correlación lineal de Pearson Tabla 7, se determinó una correlación fuerte negativa (-0,898) entre Arena y limo esto significa conforme aumenta el porcentaje de arena los valores de limo disminuyen y viceversa, las variables de Dr y Arena presentan una correlación moderada (0,649), de la misma manera se determinó un correlación moderada positiva (0,665) para el porcentaje de arena con Da, según (Jimenez & Siavosh, 2005) explican que al aumentar la densidad aparente también aumenta el contenido de arena, el porcentaje de Pt con Da presentan una correlación fuerte negativa (-0,859) , de acuerdo a Gutierrez, (2017) indica que al aumentar la Da el Pt disminuye, según se observa la CC y PMP tienen una correlación moderada negativa con el porcentaje de arena de tal manera al aumentar esta variable la CC y PMP disminuyen, tal como indica Villarreal, (2010).

Tabla 7: Matriz de correlación de Pearson de las propiedades físicas del suelo.

	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Dr (g.cm ⁻³)	Da (g.cm ⁻³)	Pt (%)	CC (cm ³ .cm ⁻³)	PMP (cm ³ .cm ⁻³)
Arcilla (%)	1							
Limo (%)	-0.167 0.153	1						
Arena (%)	-0,283* 0.014	-0,898** 0.000	1					
Dr (g.cm⁻³)	-0,446** 0.000	-0,463** 0.000	0,649** 0.000	1				
Da (g.cm⁻³)	-0,358** 0.002	-0,417** 0.000	0,665** 0.000	0,420** 0.000	1			
Pt (%)	0.148 0.205	0.191 0.100	-0,252* 0.029	0.103 0.380	-0,859** 0.000	1		
CC (cm³.cm⁻³)	0.092 0.628	0,525** 0.003	-0,659** 0.001	-0.076 0.690	-0,420* 0.021	0,440* 0.015	1	
PMP (cm³.cm⁻³)	-0.046 0.809	0,568** 0.000	-0,634** 0.000	-0,552** 0.002	-0,609** 0.000	0,406* 0.026	0,545** 0.002	1

En la tabla 8, se realizó el análisis estadístico por componentes principales donde se asociaron 8 variables arcilla, limo, arena, Dr, Da, Pt, CC, PMP. Los resultados indican que todas las variables se agruparon en tres componentes principales y estas representan el 82.65 % de la varianza. El primer componente obtuvo un mayor coeficiente de correlación Dr y Arena con una varianza de 32,32 %, el segundo componente explico el 61,91 % de la varianza y la mayor correlación se presentan para las variables de Pt, CC y

PMP, el último componente la mayor correlación se encuentra en el porcentaje de arcilla. Este método aporta una idea visual de las interacciones entre las variables permitiendo explicar la mayor parte de la información que contienen cada una de ellas.

De acuerdo a Rincon et al., (2008) la D_r al igual que el porcentaje de arena está determinado por la composición mineralógica de la fase sólida, este elemento constituyente del suelo es el que determina las variaciones de la densidad real.

De acuerdo con Delgado (2017) se determina que está fuertemente relacionado la distribución de los poros ya que son fundamentalmente los puntos básicos que reflejan una capacidad de retención de agua.

Tabla 8: Componentes principales de las propiedades físicas

	Componente		
	1	2	3
Dr (g.cm⁻³)	0,879	0,113	-0,349
Arena (%)	0,850	-0,400	
Limo (%)	-0,539	0,367	-0,335
Pt (%)		0,822	0,492
CC (cm³.cm⁻³)	-0,255	0,807	-0,197
Da (g.cm⁻³)	0,349	-0,670	-0,584
PMP (cm³.cm⁻³)	-0,439	0,628	0,217
Arcilla (%)			0,866
Varianza Total %	32,321	61,919	82,654

4. CONCLUSIONES

- La propiedad física que mayor coeficiente de variación presentó fue el porcentaje de Arcilla, la densidad aparente, densidad real y porosidad total presentaron la variación más baja.
- Las propiedades que presentaron una dependencia espacial fuerte en los primeros 10 cm fueron Arcilla, Limo, Arena, Dr, Pt y PMP para las profundidades de 20, 30 y 40 cm Arcilla, Limo, Arena, Dr, Da, Pt, y para el estrato de 40-50 cm Arcilla, Limo, Arena, Dr y Da.
- Los modelos que más se ajustaron a las diferentes profundidades de cada variable fueron el esférico y gaussiano ya que presentaron un coeficiente de Nash y un coeficiente de determinación (R^2) cercano o igual a 1, así mismo se obtuvieron los valores más bajo del error medio cuadrático (RMSE).
- Los semivariogramas que se elaboraron para las diferentes propiedades físicas explican que existe una dependencia espacial en este tipo de suelo de 80 a 180 m en un perfil de 50 cm.
- A través del análisis espacial se construyeron mapas temáticos, estableciéndose hasta tres zonas perfectamente diferenciadas de cada variable en las distintas profundidades, que sirvan como base al momento de tomar decisiones en un manejo de insumos por sitio específico.
- De acuerdo a los componentes principales se determina que está fuertemente relacionado la distribución de los poros con la CC y PMP, ya que son fundamentalmente los puntos básicos que reflejan una capacidad de retención de agua.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Agrocalidad. (2016). Manual de aplicabilidad de buenas prácticas agrícolas de banano. AGROCALIDAD, 17-22; 33-34. Obtenido de <http://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/pdf/inocuidad/manuales-aplicabilidad/manual-banano.pdf>
- Albuja, E., & Tenelanda, D. (2014). Desarrollo De Un Modelo Conceptual De Lluvia-Escorrentía Para Interpretación De Procesos Hidrológicos En La Cuenca Altoandina Del Río Zhuruca. [Universidad de Cuenca]. In El Escorial.
- Aleman, B., Bácaro, A., Henríquez, C., & Largaespada, K. (2019). Mapeo digital de suelos agrícolas en la región occidental. *Agronomía Costarricense*, 43(2), 157–166. <https://doi.org/ISSN:0377-9424>
- Andriotti. (2010). *Fundamentos de Estadística e Geoestatística*. São Leopoldo: Editora Unisinos., 165p.
- Amézquita, E., Chavez, L., Molina, D., & Galvis, J. (2002). Susceptibilidad a la compactación en diferentes sistemas de uso del suelo en los llanos orientales de Colombia. *19 (1–2)*, 202–217.
- Barrios, M., & Florentino, A. (2009). Variabilidad espacial de las propiedades físicas de dos suelos cultivados con palma aceitera en el estado Monagas. Venezuela. *Revista UDO Agrícola*, 9(4): 912-924.
- Cambardella, C., Moorman, T., Parkin, T., Karlen, D., Turco, R., & Konopka, A. (1994). 1994 Cambardella.pdf. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5), 1501–1511. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- Castaño, Á., Aristizábal, M., & González, H. (2012). Hydric Requirements Of Plantain Dominico-Harton (Musa Aab Simmonds) Inthe Santagueda Region (Palestina, Caldas). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 15(2), 331–338.
- Chabla Carrillo, J. C., Vazquez, E. V., Unda, S. B., & León, M. B. (2019). Determinación del intervalo Hídrico Optimo en un suelo Inceptisol bananero, bajo sistemas de riego. *Revista Científica Agroecosistemas*, 7(3), 38-44.
- Coelho, E. F., De Melo, D. M., Pereira, B. L. D. S., Dos Santos, D. B., & Rosa, R. C. C. (2016). Raízes da bananeira ‘BRS Princesa’ fertirrigada com substâncias húmicas e extratos vegetais a base de saponinas. *Acta Scientiarum - Agronomy*, 38(4), 521–528. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v38i4.30790>
- Córdoba, M., Balzarini, M., Bruno, C., & Costa, J. L. (2012). Identificación de zonas de manejo sitio-específico a partir de la combinación de variables de suelo. *Corpoica*

- Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 13(1), 47–54.
https://doi.org/10.21930/rcta.vol13_num1_art:239
- Cordoba, M., Bruno, C., Costa, J., & Balzarini, M. (2016). Variabilidad espacial de suelo a escala de lote y su relación con los rendimientos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 42(1), 47–53. <https://www.redalyc.org/pdf/864/86445998011.pdf>
- Cutillas, P., González, G., & Conesa, C. (2019). Evaluación de la erosionabilidad (factor k) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 23, 71–96. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>
- Delgado, D. (2017). Aplicación de enmiendas orgánicas para la recuperación de propiedades físicas del suelo asociadas a la erosión hídrica. 17, 77–82. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21501/21454086.1907>
- Dörner, J., Salas, R., Ordóñez, I., & Valle, S. (2016). Variación espacial de propiedades físicas de un suelo derivado de cenizas volcánicas sometido a distintas estrategias de mejoramiento de una pradera degradada. *Agro Sur*, 44(3), 29–40. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2016.v44n3-04>
- Erazo, E., & Sandoval, D. (2015). Desarrollo de una herramienta geoestadística para elaborar mapas de variabilidad espacial de suelos. *Suelos Ecuatoriales*, 45(1), 36–40. <https://doi.org/ISSN 0562-5351>
- Figueroa, M. D. L., Martínez, M. R., Ortiz, C. A., & Fernández, D. (2018). Influence of factors of soil formation in the properties of soils in Mixteca , Oaxaca , México. *Terra Latinoamericana*, 36(3), 287–299. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.259>
- Frolla, F., Zilio, J., & Kruger, H. (2015). Variabilidad espacial de la profundidad del suelo . Métodos de interpolación para el sudoeste bonaerense. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 41(3), 309–319. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86443147014>
- Galantini, J., Iglesias, J., Maneiro, C., Santiago, L., & Kleine, C. (2006). Sistemas de labranza en el sudoeste bonaerense. Efectos de largo plazo sobre las fracciones orgánicas y el espacio poroso del suelo. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 35(1), 15–30. <https://doi.org/0325-8718>
- González, M., & Pérez de Vargas, A. (2009). Una introducción a los procesos estocásticos y a la geoestadística. In A. Calvete (Ed.), *Estadística aplicada una visión instrumental*. Díaz de Santos.

- Guedes, L. P. C., Uribe, M. A., & Ribeiro, P. J. (2014). Optimización del tamaño y de la forma de configuraciones muestrales para variables regionalizadas usando lo recocido simulado. *Ciencia e Investigacion Agraria*, 41(1), 33–47. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202014000100004>
- Gutierrez, G. (2017). Efecto del cultivo de palma de aceite sobre las propiedades físicas del suelo y su relación con la producción y la pudrición de cogollo. *Lámpsakos*, 1(17), 20–28. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21501/21454086.2390>
- Hernandez, J., Díaz, E., & Cerana, J. (2018). Estimación del punto de marchitez permanente en suelos de la provincia de entre ríos. *ResearchGate*, December 2019, 1–5. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11522.43206>
- Heredia, E. (2013). Densidad real, aparente y porosidad total [Pontificia Universidad Católica del Perú]. In *Academia*. <https://www.academia.edu/>
- Iñigo, V., Andrades, M. S., Alonso-Martirena, J. I., Marín, A., & Jiménez-Ballesta, R. (2012). Variabilidade espacial das propriedades do solo em ambiente húmido Mediterrâneo: La Rioja, Espanha. *Spanish Journal of Soil Science*, 2(1), 38–54. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2012.V2.N1.03>
- Jaramillo, D. (2011). *El suelo: Origen, Propiedades, Espacialidad*. Medellín. 553p.: Universidad Nacional de Colombia.
- Jaramillo, D. (2012). Variabilidad espacial del suelo: Bases para su estudio. *Revista de La Facultad de Ciencias*, 1(1), 73–87. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rfc/article/view/49004>
- Jaramillo, D., González, H., & Álvarez, F. (2008). Variabilidad espacial de algunas propiedades físico mecánicas de suelos de textura pesada. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 3(2), 10–19. <http://www.redalyc.org/articulo.oa>
- Jimenez, A., & Siavosh, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera Colombiana. *Cenicafé*, 56(4), 381–397. <http://orton.catie.ac.cr/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=ORTON.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mf=084455>
- Labrador, J. (2008). Manejo del suelo en los sistemas agrícolas de producción ecológica. In *Manual Técnico Manejo del suelo en los sistemas de producción ecológica*. <http://www.agroecologia.net%0AManual>
- Martínez, E. (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. *Anuario Jurídico y Económico Escurialense*, 38(1133–3677),

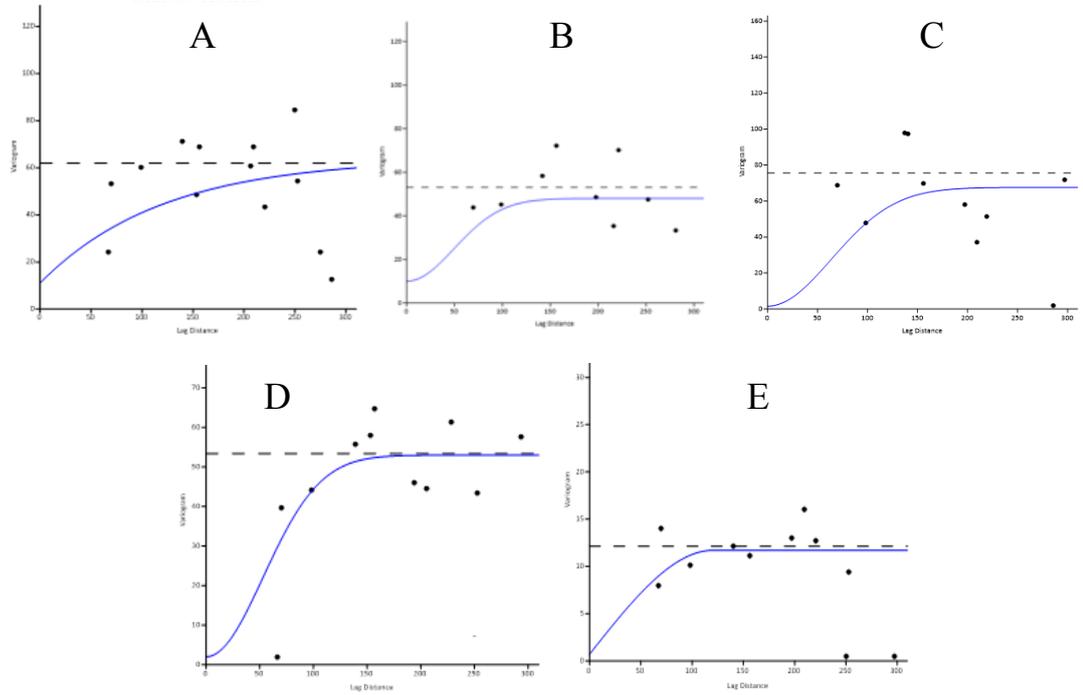
- 315–332. https://www.rcumariacristina.com/wp-content/uploads/2010/12/11-Elena-Martinez_1.pdf
- Moral, F. J., Terrón, J. M., & Rebollo, F. J. (2011). Site-specific management zones based on the Rasch model and geostatistical techniques. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75(2), 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.10.014>
- Nieves, F., Alejo, G., Juárez, P., & Luna, G. (2017). Diagnóstico nutrimental en lima “Persa” (*Citrus latifolia* Tanaka) con análisis estadístico por componentes principales. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 3(1), 8–13. <https://doi.org/10.30973/aap/2017.3.1/2>
- Novillo, I. D., Carrillo, M. D., Cargua, J. E., Nabel, V., Albán, K. E., & Morales Intriago, F. L. (2018). Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de Los Ríos, Ecuador. *Temas Agrarios*, 23(2), 177–187. <https://doi.org/10.21897/rta.v23i2.1301>
- Oliver, M. (2010). Geostatistical applications for precision agriculture. In M. Oliver (Ed.), Springer Science+Business Media B.V (Visiting P). Library of Congress Control Number: 2010931684 ©. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9133-8>
- Pacheco, J., Aviles, A., & Delgado, O. (2016). Análisis de métodos de interpolación geoestadísticos para la estimación espacial de la precipitación en la cuenca del río Paute. *Revista Bosque Latitud Cero*, 6(2), 142–159. www.bosqueslatitudcero.com
- Peralta, N. R., Barbieri, P., Gowland, T., Aparicio, V., & Costa, J. L. (2015). Agricultura de precisión: dosis variable de nitrógeno en cebada. *Ciencia Del Suelo*, 33(1), 131–137.
- Perez, C. A., Pérez, J. J., Santana, L. H., Gustabello, R., & Armas, E. B. (2019). Sistema de Información Geográfica para la agricultura cañera en la provincia de Villa Clara. *Revista Cubana de Ciencias Informaticas*, 13(2), 30–46. <http://rcci.uci.cu>
- Pino, E. (2019). Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: un futuro de alta tecnología. *Idesia (Arica)*, 37(1), 75–84. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292019005000402>
- Pires Da Silva, A., Imhoff, S., Giarola, N. F. ., & Tormena, C. . (2001). Análisis multivariado y univariado en la discriminación de sistemas de uso de suelos del centro de Santa Fe. *Edafología*, 8, 21–34. http://www.secs.com.es/data/Revista_edafo/partes_volumen_8-1/paginas_21-34.pdf
- Ritter. (2008). An on-farm approach to quantify yield variation and to derivate decision rules for site-specific weed management. *Precision Agric.*, 9: 133-146.

- Rincon, Á., Castro, H., & Gomez, M. (2008). Caracterización física de los suelos sulfatados ácidos del Distrito de Riego del Alto Chicamocha (Boyacá) y su aplicación al manejo. *Agronomía Colombiana*, 26(1), 134–145. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180314729016>
- Serrano, E. (2003). Banana Root System: towards a better understanding for its productive management. In D. W. Turner (Ed.), *Relationship between functional root content and banana yield in Costa Rica* (Issue November, pp. 25–34).
- Turner, D. W., Fortescue, J. A., & Thomas, D. S. (2007). Environmental physiology of the bananas (*Musa spp.*). *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), 463–484. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400013>
- Vaquero. (2003). Soil physical properties and banana root growth *Proceedings Banana root system: Toward a better understanding for its productive management*, Pp 125-131. Inibap, Musalac, Corbana. San José de Costa Rica. 261 pp.
- Vargas, R. D. P., Serrato, F., & Torrente, A. (2015). Variabilidad espacial de las propiedades físicas de un suelo Fluventic Ustropepts en la cuenca baja del río Las Ceibas - Huila. *Ingeniería y Región*, 13(1), 113–123. <https://doi.org/10.25054/22161325.713>
- Villa, P., Chabla, J., & Villaseñor, D. (2018). Efecto de riegos presurizados sobre propiedades físicas de un suelo bananero asociado con kudzu (*Pueraria phaseoloides Benth.*). *Revista Científica Agroecosistemas*, 6(1), 34–45. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes>.
- Villarreal, J. (2010). Determinación de un índice de calidad del suelo en áreas productoras de banano (*musa x paradisíaca l.*) de la vertiente del pacifico de panamá. *Universitat de Lleida*.
- Villaseñor, D., Chabla, J., & Luna, E. (2015). Caracterización física y clasificación taxonómica de algunos suelos dedicados a la actividad agrícola de la provincia de El Oro. *Ordenamiento Territorial, Urbanismo y Sostenibilidad. Revista CUMBRES*, 1(2), 28–34. ISSN 1390-9541
- Warrick AW, Nielsen DR. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. En: Hileel D, editor. *Applications of soil physics*. Nueva York: Academic Press. pp. 319-344

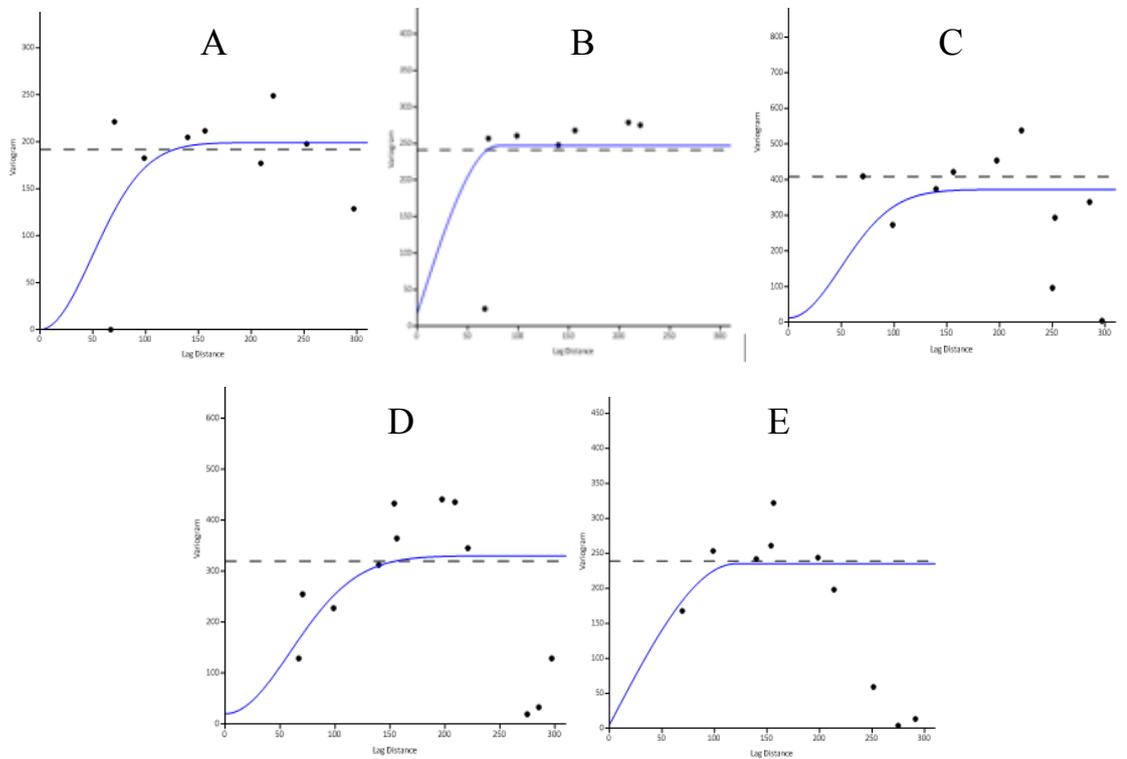
ANEXOS

Semivariogramas ajustados de las propiedades físicas.

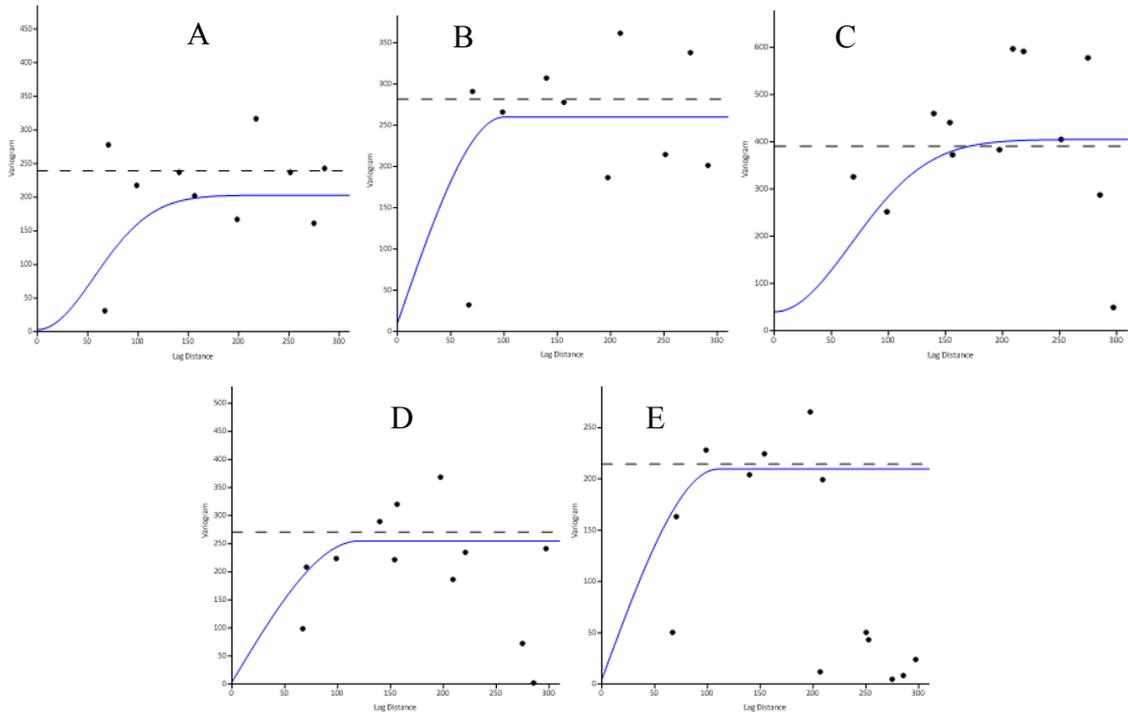
Las letras significan los estratos en (cm): **A)** 0-10, **B)** 10-20, **C)** 20-30, **D)** 30-40, **E)** 40-50



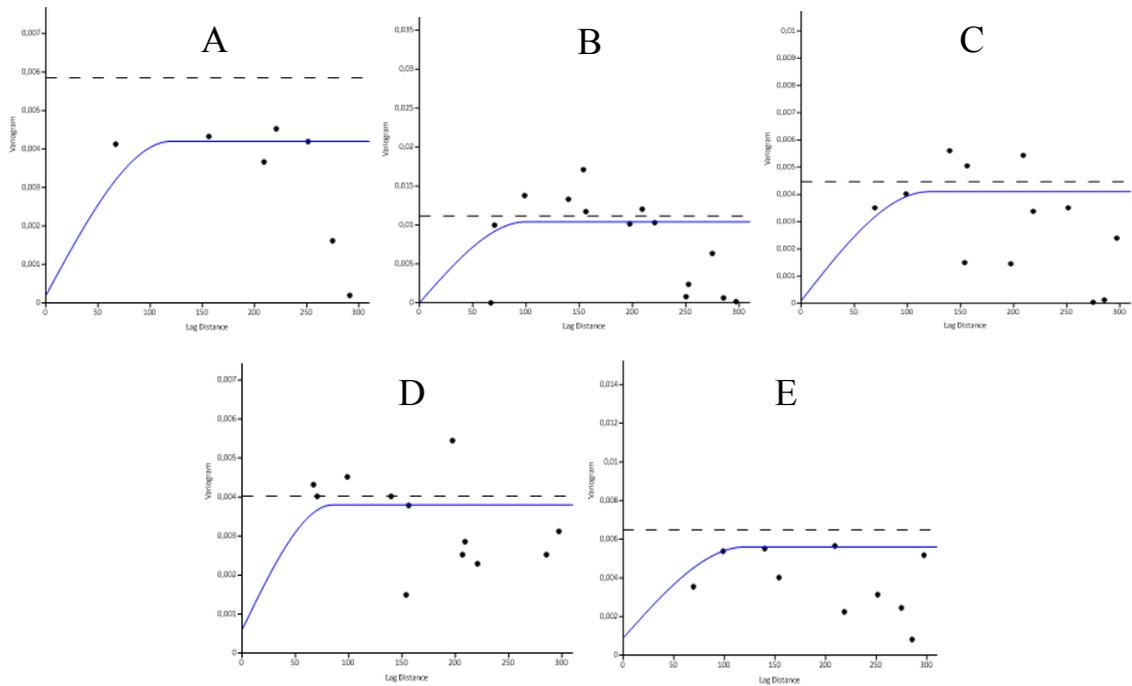
Anexo 1: Semivariograma ajustado de Arcilla (%) en un perfil de 50 cm.



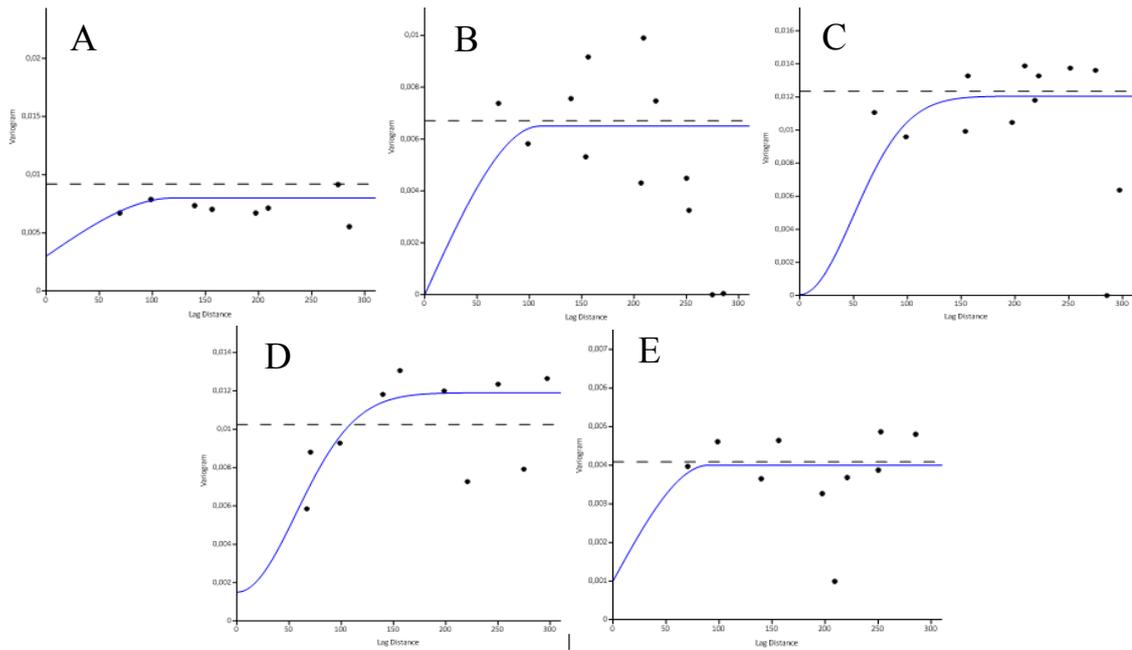
Anexo 2: Semivariograma ajustado de Limo (%) en un perfil de 50 cm.



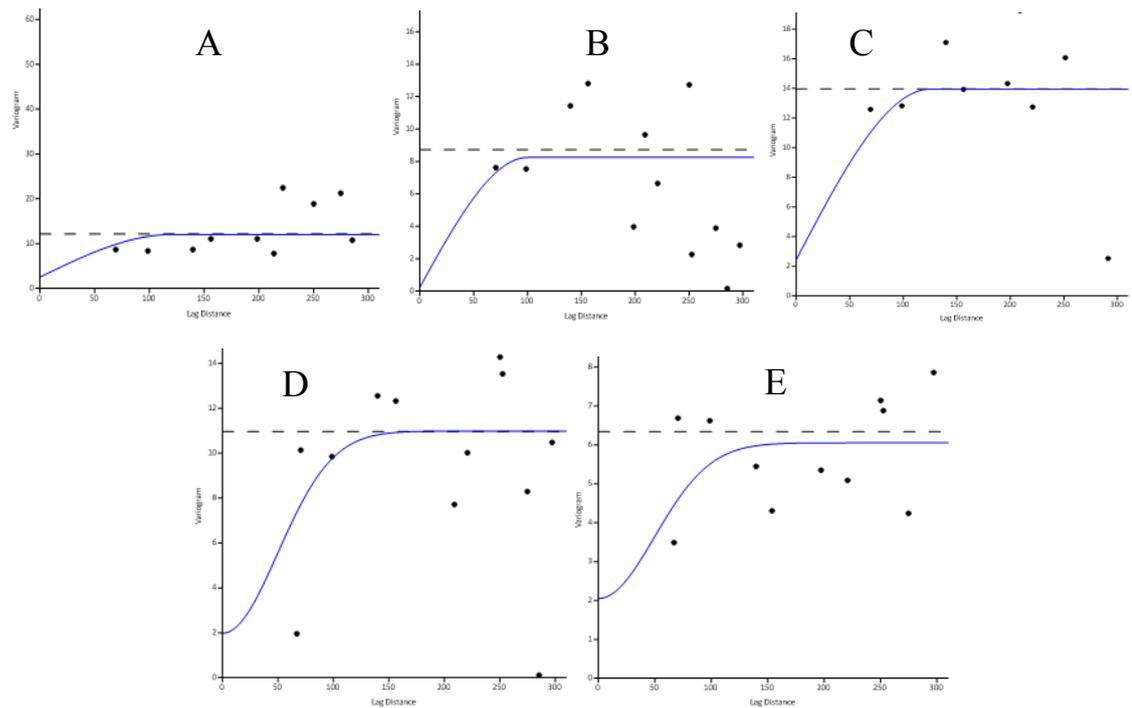
Anexo 3: Semivariograma ajustado de Arena (%) en un perfil de 50 cm.



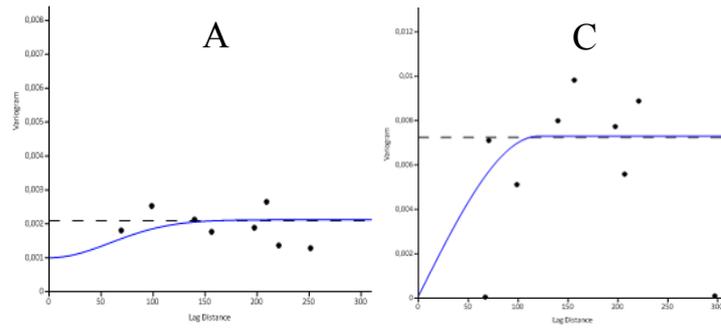
Anexo 4: Semivariograma ajustado de D_r ($g.cm^{-3}$) en un perfil de 50 cm.



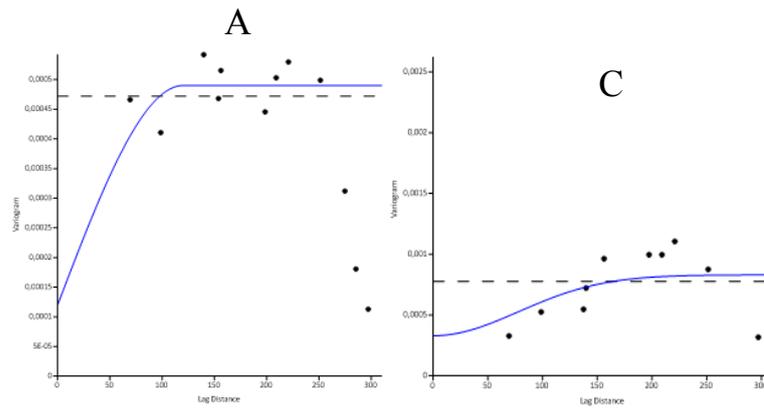
Anexo 5: Semivariograma ajustado de Da ($g \cdot cm^{-3}$) en un perfil de 50 cm.



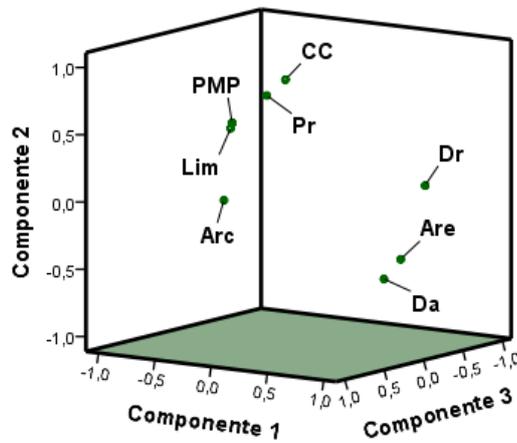
Anexo 6: Semivariograma ajustado de Pt (%) en un perfil de 50 cm.



Anexo 7: Semivariograma ajustado de CC ($cm^3 \cdot cm^{-3}$) en un perfil de 50 cm.



Anexo 8: Semivariograma ajustado de PMP ($cm^3 \cdot cm^{-3}$) en un perfil de 50 cm.



Anexo 9: Grafico de Componentes principales.



Anexo 10: Calicata para la toma de muestras



Anexo 11: Determinación de textura



Anexo 12: Determinación de Densidad real

Profundidad cm	Franco Arcilloso	Franco Limoso	Franco Arcillo Arenoso	Franco Arenoso	Franco	Arenoso Franco	Arenoso	Total
0-10	0	1	1	5	3	5	0	15
10.-20	1	1	0	6	2	5	0	15
20-30	1	3	0	3	1	6	1	15
30-40	0	2	1	6	1	5	0	15
40-50	0	1	0	1	1	11	1	15
Total	2	8	2	21	8	32	2	75

Anexo 13: Distribución de frecuencia de la clase textural agrupada por profundidades.