

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

**“Determinación de la variabilidad espacial de las características físicas del
suelo en la parcela Experimental Irquis”**

*Tesis previa a la obtención del título de
Ingeniero Agrónomo*

AUTOR:

Xavier Ricardo Déleg Pacheco.

C.I. 1401011794

DIRECTOR:

Ing. Pedro José Francisco Cisneros Espinoza M.Sc.

C.I. 0101586816

Cuenca - Ecuador

2018



RESUMEN

El suelo presenta diversas interacciones en el proceso de formación debido a que intervienen factores geológicos y pedológicos adquiriendo características de heterogeneidad y variabilidad de las propiedades físicas y químicas. Esta variabilidad puede ser ocasionada debido a la labranza, prácticas de manejo del suelo y puede variar a nivel de grande y pequeña escala. En el presente estudio se determinó la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo en la parcela experimental de Irquis. Se realizó un análisis de varianza para evaluar el efecto longitudinal y transversal de la unidad experimental. Se utilizó dos métodos de interpolación Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada para comparar los resultados de predicción de las variables de estudio. La validación de los métodos de interpolación se realizó mediante validación cruzada. De los resultados obtenidos de la evaluación del efecto longitudinal se encontró diferencias para densidad aparente y materia orgánica, debido a las deposiciones del arrastre coluvial del talud concentrándose en las partes bajas de la unidad experimental. Para el análisis del efecto transversal se encontró diferencias para arena, limo y arcilla, debido a los sedimentos depositados por los desbordes de la quebrada que fluye paralela a la parcela. Se obtuvieron menores valores de los indicadores estadísticos de validación cruzada mediante Kriging Ordinario. El método de interpolación que presentó mayores valores de eficiencia de predicción fue Kriging Ordinario para todas las variables, aunque estos valores resultaron similares. Los mapas generados mediante Distancia Inversa Ponderada mostraron zonas aisladas, siendo más evidente en ciertas variables.

Palabras claves: VARIABILIDAD ESPACIAL, MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN, KRIGING ORDINARIO, DISTANCIA INVERSA PONDERADA, VALIDACIÓN CRUZADA, EFICIENCIA DE PREDICCIÓN



ABSTRACT

The soil presents diverse interactions in its formation process due that intervene factors geological and pedological acquiring characteristics heterogeneity and variability physical and chemical properties. This variability can be caused due to tillage, soil management practices and it may vary at the large and small scale. In the present test, the spatial variability of the physical properties of the soil in the Irquis experimental plot was determined. An analysis of variance was performed to evaluate longitudinally and transversely effect of the experimental unit. Two Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighted methods were to compare the prediction results of the variables studied. The validation of interpolation methods was through cross validation. The results obtained from the evaluation of longitudinal effect was found differences for bulk density and organic matter, due to the depositions of drag colluvial of talud, it was concentrating in the lower parts of the experimental unit. In the transversal effect analysis differences were found for sand, silt and clay, due to the sediments deposited by the overflows of the brook that flows parallel to the plot. It obtained low values of the statistical indicators of cross-validation by the Ordinary Kriging method. The interpolation method that presented prediction efficiency values was Ordinary Kriging for all the variables, although these values were similar. The maps generated by Inverse Distance Weighted showed isolated zones were more evident in certain variables.

Keywords: SPACE VARIABILITY, INTERPOLATION METHODS, ORDINARY KRIGING, INVERSE DISTANCE WEIGHTED, CROSS-VALIDATION, PREDICTION EFFICIENCY.



ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	3
AGRADECIMIENTOS	11
DEDICATORIA.....	12
1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. JUSTIFICACIÓN.....	15
3. OBJETIVOS.....	16
3.1. Objetivo General.....	16
3.2. Objetivos Específicos.....	16
4. HIPÓTESIS.....	16
5. REVISIÓN DE LITERATURA	17
5.1. Variabilidad espacial de los suelos	17
5.2. Geoestadística.....	18
5.3. Análisis y representación de la dependencia espacial.....	19
5.3.1. Semivariograma.....	19
5.4. Métodos de interpolación.....	20
5.5. Método Kriging.....	21
5.6. Método Distancia Inversa Ponderada.....	22
5.7. Validación	22
5.8. Variables edafológicas.....	22
5.8.1. Granulometría.....	22
5.8.2. Densidad aparente.....	24
5.8.3. Materia Orgánica	24
5.8.4. Porosidad.....	25



5.8.5. Resistencia a la penetración..... 26

6. MATERIALES Y MÉTODOS..... 26

6.1. Área de estudio..... 26

6.2. Suelos..... 27

6.3. Sitios de muestreo y recolección de muestras..... 28

6.3.1. Fase de campo 28

6.3.2. Fase de laboratorio 28

6.2.3. Granulometría..... 28

6.3.3. Densidad aparente..... 30

6.3.4. Densidad real..... 31

6.3.5. Materia orgánica 31

6.3.6. Resistencia a la penetración 31

6.4. Análisis estadístico 32

6.4.1. Determinación de la variabilidad de las propiedades físicas del suelo. 32

6.4.2. Selección de semivariogramas e interpolaciones. 33

6.4.3. Validación de los métodos de interpolación..... 34

6.4.4. Comparación de los métodos de interpolación 35

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 36

7.1. Caracterización de las propiedades del suelo (primer y segundo objetivo específico) 36

7.2. Pruebas de normalidad..... 39

7.3. Factores que influyen en la variabilidad espacial de las características físicas del suelo en la parcela (tercer objetivo específico)..... 41

7.4. Análisis Geoestadístico de la variabilidad espacial (cuarto objetivo específico). 46

7.5. Validación de los métodos de interpolación (quinto objetivo específico) 47



7.6. Comparación de la predicción de los métodos de interpolación (sexto objetivo específico) 48

8. CONCLUSIONES 55

9. RECOMENDACIONES..... 56

10. BIBLIOGRAFÍA..... 57

11. ANEXOS..... 66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tamaño de las partículas de diferentes fracciones del suelo..... 23

Tabla 2. Resumen estadístico de las variables de estudio..... 36

Tabla 3. Resumen estadístico de resistencia a la penetración. 39

Tabla 4. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk a nivel de significación al 5% de las variables edafológicas de estudio..... 40

Tabla 5. Análisis de varianza longitudinal para las variables de estudio..... 41

Tabla 6. Análisis de varianza de la evaluación del efecto transversal de las variables de estudio..... 44

Tabla 7. Parámetros del variograma aplicando Kriging Ordinario para las variables del suelo analizadas. 46

Tabla 8. Valores de validación cruzada de los métodos de interpolación utilizados de las variables del suelo analizadas. 47

Tabla 9. Valores de eficiencia de predicción (E) mediante comparación de los métodos de interpolación..... 48



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del Semivariograma.....	20
Figura 2. Ubicación geográfica del área de estudio en la provincia del Azuay.	27
Figura 3. Plano de la parcela experimental y puntos de muestreo.	33
Figura 4. Diagrama de cajas de las variables de estudio.	37
Figura 5. Diagrama de caja de densidad aparente del conjunto de datos de estudio.	37
Figura 6. Diagrama de caja de materia orgánica del conjunto de datos de estudio.	38
Figura 7. Diagrama de caja para la variable arena de la distribución no normal.	40
Figura 8. Diagrama de caja para resistencia a la penetración a 20 cm de una distribución no normal.	41
Figura 9. Comparación de valores medios de densidad aparente mediante columnas.	42
Figura 10. Comparación de valores medios de materia orgánica mediante columnas.	43
Figura 11. Comparación de valores medios de arena mediante filas.	44
Figura 12. Comparación de valores medios de limo mediante filas.	45
Figura 13. Comparación de valores medios de arcilla mediante filas.	45
Figura 14. Eficiencia de predicción de los métodos de interpolación mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada.	49
Figura 15. Mapas de interpolación para $\sqrt{\text{arena}}$ (%) mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada.....	50
Figura 16. Mapas de interpolación para limo (%) mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada.....	51
Figura 17. Mapas de interpolación para arcilla (%) mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada.....	52
Figura 18. Mapas de interpolación para densidad aparente (g/cm ³) mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada.	53



Figura 19. Mapa de interpolación para materia orgánica (%) mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada. 54



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Triángulo de clases texturales del suelo.....	66
Anexo 2. Clasificación textural del suelo.	67
Anexo 3. Histograma para el conjunto de datos de limo.....	68
Anexo 4. Histograma para el conjunto de datos de arcilla.....	68
Anexo 5. Histograma para el conjunto de datos de materia orgánica.....	69
Anexo 6. Histograma del conjunto de datos para densidad aparente.....	69
Anexo 7. Análisis de varianza para las variables de estudio mediante el efecto longitudinal.	69
Anexo 8. Prueba de Tukey al 5% para densidad aparente mediante análisis por columnas.	70
Anexo 9. Prueba de Tukey al 5% para Materia Orgánica mediante análisis por columnas.	70
Anexo 10. Analisis de varianza para las variables de estudio mediante forma transversal.	70
Anexo 11. Prueba de Tukey al 5% para arena mediante análisis por filas.	71
Anexo 12. Prueba de Tukey al 5% para limo mediante análisis por filas.....	71
Anexo 13. Prueba de Tukey al 5% para arcilla mediante análisis por filas.....	71
Anexo 14. Mapas de interpolación para porosidad (%) mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada.....	72
Anexo 15. Mapas de interpolación para resistencia a la penetración (MPa) a 10 cm de profundidad mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada.	73
Anexo 16. Mapas de interpolación para exp (resistencia a la penetración) (MPa) a 20 cm de profundidad mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada..	74
Anexo 17. Mapas de interpolación para resistencia a la penetración (MPa) a 30 cm de profundidad mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada.	75



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Xavier Ricardo Déleg Pacheco en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Determinación de la variabilidad espacial de las características físicas del suelo en la parcela Experimental Irquis", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 20 abril del 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Xavier', written over a horizontal line.

Xavier Ricardo Déleg Pacheco
C.I. 1401011794



Cláusula de Propiedad Intelectual

Xavier Ricardo Déleg Pacheco, autor del trabajo de titulación "Determinación de la variabilidad espacial de las características físicas del suelo en la parcela Experimental Irquis", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 20 de abril del 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Xavier", written over a horizontal line.

Xavier Ricardo Déleg Pacheco
C.I. 1401011794



AGRADECIMIENTOS

A mis padres, hermanas y sobrina por ser el pilar fundamental para alcanzar este sueño anhelado.

A la Universidad de Cuenca por permitir formarme durante los años de vida universitaria.

A mi director de tesis Ing. Pedro Cisneros, por permitir realizar el trabajo de tesis dentro del proyecto “Evaluación de técnicas de manejo de suelos para producción de pastos en el valle del río Tarqui” el mismo que estaba bajo su dirección.

A los docentes de la Universidad de Cuenca por ser quienes compartieron sus conocimientos y guiaron en el transcurso de la formación universitaria.

A mis amigos, compañeros de carrera por los años de formación compartidos durante la vida universitaria.

Xavier



DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, Judith y José por el apoyo incondicional que me han brindado en toda mi vida y hacer posible alcanzar mi formación profesional.

A mis hermanas, Celia y Elsa que a pesar de estar lejos siempre fueron quienes me motivaron.

A mi enamorada, Erika por darme siempre su apoyo incondicional en todo momento.

A mi familia y amigos, quienes me apoyaron directa o indirectamente en el transcurso de mi formación profesional.

Xavier



1. INTRODUCCIÓN

El suelo, recurso natural de gran importancia de la superficie terrestre para las actividades agrícolas, siendo una de las funciones primordiales proporcionar nutrientes a las plantas para su crecimiento y desarrollo. Debido a que existen interacciones en la formación con varios procesos pedogenéticos, tiene características de heterogeneidad dando como resultado una amplia variedad de suelos, existiendo mayor variabilidad de sus propiedades químicas, físicas, biológicas y mineralógicas (Jaramillo, 2012).

Caracterizar la variabilidad espacial y la distribución de las propiedades del suelo es de gran importancia para predecir los procesos de formación con respecto a los factores naturales y antropogénicos (Schimel et al., 2000). Existen diferencias considerables de las propiedades del suelo en: cultivos, tipos e intensidad de labranza, tipos de fertilizantes y tasas de aplicación. Por consiguiente, las propiedades físicas del suelo están influenciadas por diversos factores estando modificadas de forma vertical con la profundidad, lateral a través del campo y temporal en respuesta al clima y la actividad humana (Swarowsky et al., 2011).

Siendo que afecta al crecimiento de las plantas, dinámica de nutrientes y otros procesos del suelo es imprescindible determinar ésta variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo.

Entre las herramientas para determinar la variabilidad del suelo está la estadística clásica y la geoestadística siendo utilizadas ampliamente (Webster & Oliver, 1990). De esta manera, los métodos geoestadísticos pueden proporcionar estimaciones confiables en lugares que no se muestrearon. Existen diversos métodos de interpolación espacial como los determinísticos y estocásticos (Burrough & MacDonnell, 1998).

Entre los métodos de interpolación más utilizados tenemos Kriging y Distancia Inversa Pondera (Kravchenko & Bullock, 1999). La precisión de los mapas generados dependerá de la intensidad de muestreo y el método aplicado. El método Kriging presenta mayor complejidad en el proceso de interpolación y se considera que proporciona mejores estimaciones lineales no sesgadas, mientras que el



método de Distancia Inversa Ponderada es sencillo y rápido de aplicar. Existen numerosas descripciones matemáticas de estos métodos (Lu & Wong, 2008; Shi et al., 2009). Sin embargo, los resultados de la aplicación de estos métodos de interpolación y sus parámetros son contradictorios. Algunos autores mencionan que el rendimiento de Kriging en general es mejor que Distancia Inversa Ponderada (Kravchenko & Bullock, 1999). Otros autores reportan que Distancia Inversa Ponderada es más preciso que Kriging (Nalder & Wein, 1998).

Siendo que existen diferentes factores de formación del suelo y ante la realidad de los suelos andinos ocupados por pasturas es necesario realizar este estudio en la Granja Irquis de la Universidad de Cuenca y generar mapas que representan la variabilidad espacial mediante la aplicación de métodos de interpolación.



2. JUSTIFICACIÓN

La variabilidad espacial de las propiedades físicas ya sea intrínseca o extrínseca de los campos agrícolas está adherida a la naturaleza debido a componentes geológicos y pedológicos que forman el suelo. No obstante, esta variabilidad puede ser provocada por la labranza y otras prácticas de manejo del suelo (Quine & Zhang., 2002). La cuantificación e interpretación de la variabilidad espacial es un elemento clave en el manejo de sitio-específico del suelo (Brouder et al., 2001). Puede presentarse una notable variabilidad espacial tanto a nivel de grande y pequeña escala permitiendo la interacción de estos factores a través de escalas espaciales y temporales (Iqbal et al., 2005).

Debido a una reducida información a nivel nacional de la variabilidad de las propiedades físicas de suelos ocupados por pasturas en la Sierra Ecuatoriana, se ha visto pertinente realizar el presente trabajo, que consistió en cuantificar ciertas propiedades del suelo y establecer su grado de dependencia espacial en la parcela experimental.

Por lo que la determinación de la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo permitirá tomar decisiones adecuadas en el manejo del suelo. Es decir, mediante la utilización de herramientas geoestadísticas y la aplicación de métodos de interpolación generar mapas que faciliten interpretar la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo en la parcela experimental.

Por otro lado, dentro de las actividades agrícolas en nuestro medio no se utiliza información edafológica detallada para interpretar la variabilidad espacial y corregir ciertas deficiencias que el cultivo establecido requiera, utilizando la información generada se pretende adecuar el uso de insumos calculando los requerimientos agronómicos a partir de los resultados de la variabilidad espacial de los suelos, de esta manera se consigue realizar una agricultura de precisión.



3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

- ✓ Determinar la variabilidad de las características físicas del suelo en la parcela Experimental Irquis.

3.2. Objetivos Específicos

- ✓ Caracterizar las propiedades físicas del suelo en las unidades experimentales de la parcela.
- ✓ Determinar la variabilidad espacial de características físicas: textura, densidad aparente, materia orgánica, resistencia a la penetración y porosidad en la parcela.
- ✓ Determinar el factor que influye en la variabilidad espacial de las características físicas del suelo de la parcela.
- ✓ Representar en mapas la variabilidad espacial de las características físicas del suelo en la parcela experimental utilizando dos métodos de interpolación Kriging Ordinario (KO) y Distancia Inversa Ponderada (IDW).
- ✓ Validar los métodos de interpolación.
- ✓ Comparar la predicción de los dos métodos de interpolación.

4. HIPÓTESIS

H_0 : Las características físicas del suelo no presentan variabilidad espacial a nivel de parcela experimental.



5. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1. Variabilidad espacial de los suelos

La variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo dentro de los campos agrícolas está influenciada por la naturaleza geológica del suelo, pero en ciertos casos la variabilidad puede ser inducida por la labranza y otras prácticas de manejo. Estos factores interactúan unos con otros a través de escalas espaciales y temporales, se modificarán más a nivel local por procesos de erosión y deposición (Barrios & Florentino, 2009).

Existe variabilidad de las propiedades del suelo desde un punto a otro del paisaje siendo de diversos orígenes, estos pueden ser debido a las características inherentes de los procesos de formación que prevalecen, o factores de formación como: la litología, el clima, la topografía, la actividad biológica y la acción humana.

Ciertos procesos y factores de formación que influyen la variación espacial afectan en pequeña magnitud e introducen heterogeneidad en distancias cortas; otros provocan dependencia espacial de mayor extensión (Webster, 2000; Ulloa, 2002).

La variabilidad del suelo está determinada según la propiedad a ser analizada, presentando mayor variabilidad las propiedades químicas que las físicas. Existe menor variabilidad en las propiedades del suelo en su estado natural, comparado con un suelo intervenido mediante labor agrícola, resultando mayor variabilidad debido al manejo del suelo (Ovalles, 1992; Paz-Gonzalez et al., 2000; Jaramillo et al., 2012).

El material parental de formación del suelo varía en patrones de gran escala regional; en otros casos, se puede observar variaciones a pequeña escala, esto debido principalmente en suelos originarios por depósitos coluviales o aluviales en zonas adyacentes a los ríos (Brady & Weil, 2002).

La aplicación de un manejo específico del suelo, mediante el aprovechamiento de las potencialidades que presenta un campo de cultivo, depende de un entendimiento de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo (Santos et al., 2003).



En la actualidad la aplicación de la Geoestadística ha permitido determinar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, que combinado con la estadística clásica facilitan técnicas de gran importancia agrícola (Carvalho et al., 2003).

La Geoestadística ha sido definida como *“la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales”* (Matheron, 1962). El término geoestadística es utilizado para determinar el estudio estadístico de un fenómeno tomando en cuenta la localización espacial, permitiendo ser diferenciado por la distribución en el espacio de una o más variables, conocidas como *“variables regionalizadas”* (Journel & Huijbregts, 1978).

La aplicación de métodos de interpolación para determinar la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo ha sido ampliamente utilizada especialmente en otros países, reportando resultados contradictorios, para algunos estudios siendo el método de interpolación Kriging más preciso que Distancia Inversa Ponderada y en otros casos Distancia inversa Ponderada (Gotway et al., 1996; Nalder & Wein, 1998; Kravchenko & Bullock, 1999; Karydas et al., 2009). De modo que no existe información de métodos sólidos según estudios publicados en cuanto a una perspectiva de interpolación, precisos para mapear las propiedades del suelo (Shi et al., 2009). Por lo tanto, los resultados pueden estar influenciados por factores de formación del suelo, además que se utilizan diferentes análisis y escalas de muestreo.

En nuestro país, principalmente en la región de la sierra se han desarrollado pocos trabajos respecto a la determinación de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, siendo una limitante para conocer el grado de dependencia espacial y la variabilidad que presentan los suelos de la sierra.

5.2. Geoestadística

La Geoestadística es una de las ramas de la Estadística que se ocupa de la detección, estimación y mapeo de patrones espaciales de variables regionales y se centra en el modelado e interpretación por medio de variogramas. Siendo una herramienta que permite determinar variación en medidas separadas por distancias que serán analizadas (Goovaerts, 1997).



5.3. Análisis y representación de la dependencia espacial

5.3.1. Semivariograma

Es una gráfica que representa los valores de la semivarianza en relación al espaciamiento entre las muestras que se toman para realizar un determinado estudio. Cuando existe en una propiedad dependencia espacial, la semivarianza incrementa, a medida que incrementa la distancia entre muestras y la semivarianza puede llegar a estabilizarse a una determinada distancia, obteniendo un semivariograma estable (Webster & Oliver, 2007).

El semivariograma está conformado con los siguientes parámetros:

Nugget (C_0): el semivariograma no tiende a cero como lo hace la distancia h , el efecto nugget es una discontinuidad de salto en el origen por lo que representa la discontinuidad en el semivariograma para distancias que sean menores que la menor distancia dada entre los puntos de muestreo. Esta discontinuidad se puede presentar debido a errores en la medición o a una débil precisión analítica.

Sill (C_0+C): Es el valor máximo que toma la semivarianza y es el resultado de la suma del nugget más la variabilidad estructural. Al cumplirse el supuesto de estacionariedad, la meseta es muy similar a la varianza de los datos experimentales. Siendo la meseta el valor de la semivarianza que se vuelve constante a partir de una determinada distancia, por lo que a partir de la cual existe independencia espacial. En el caso de que la meseta no se estabiliza, no es constante a ninguna distancia de la utilizadas en el muestreo se explica que no se puede resolver la variabilidad espacial de la propiedad en la zona de muestreo, siendo así el modelo lineal el más simple que se ajusta a los datos.

Variabilidad estructural (C): indica hasta qué punto la variabilidad de los datos crece hasta que no exista más semejanza entre la variabilidad de las muestras.

Range (a): es la distancia para la cual los valores del semivariograma se estabilizan y las muestras tienen dependencia espacial.

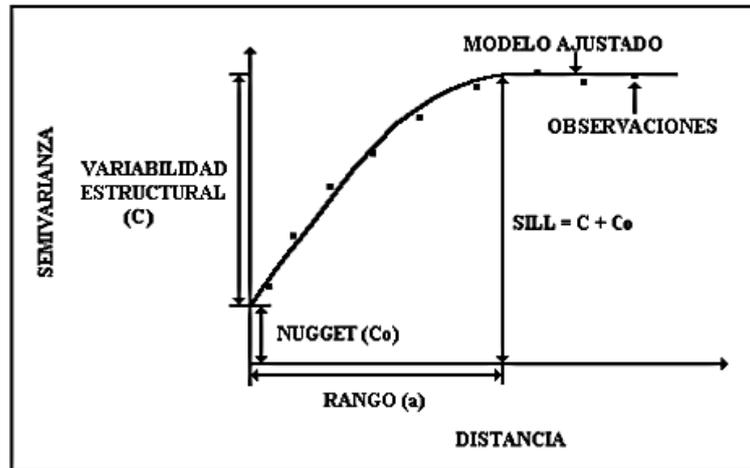


Figura 1. Estructura del Semivariograma.

Fuente: (Jaramillo et al., 2008)

5.4. Métodos de interpolación

Mediante la utilización de los avances tecnológicos en cuanto a la recolección de datos en campo, procesamiento, almacenamiento digital y con ayuda de los SIG ha facilitado realizar diversas aproximaciones de predicción de las propiedades de los suelos y representar los mismos en mapas digitales. Por lo que para generar mapas se realiza muestreos de suelos que proporcione datos de observaciones puntuales; siendo posible usando métodos de interpolación estimar el valor de las variables de estudio en los puntos en los que no se tiene observaciones (Lagacherie & McBratney, 2006).

La interpolación espacial es un procedimiento que permite calcular el valor de una variable o propiedad del suelo $f(x)$ en un punto x , del que no se dispone de observaciones, a partir de valores conocidos de f en un cierto número de puntos ubicados alrededor (Blanco, 2015).

Los diferentes métodos de interpolación espacial pueden ser clasificados en dos categorías: a) determinísticos: esquemas no-estocásticos; y b) probabilísticos: esquemas de interpolación estocástica u óptimos. La aproximación determinística pretende ajustar un tipo de superficie mediante un conjunto de valores muestreados (z) en coordenadas conocidas (x,y), donde es imprescindible de un esquema exacto de si los datos puntuales se refieren como reales de la variable en las localizaciones muestreadas. Mediante la aplicación de funciones matemáticas de diversos tipos y



complejidad se ajusta superficies a través de los puntos. La aproximación estadística depende de los datos espaciales, por lo que se puede considerar que la realización de los procesos tiene una variación aleatoria. Por lo que se puede mencionar la estimación de (z) puede ser hecha en términos de probabilidad. Para la estimación de la media espacial en un área influirá el tamaño de la muestra y la probabilidad de inclusión de la muestra. La aproximación estocástica puede estar determinada por un proceso por el cual existe un componente determinístico o estructural y un componente correlacionado espacialmente de forma aleatoria (Meijerink et al.,1994).

5.5. Método Kriging

El método Kriging es una técnica de interpolación utilizada en Geoestadística, siendo el mejor estimador lineal sin sesgo. El propósito de la estimación de Kriging es la predicción de valores no observados en variables espaciales (regionalizadas) apoyada en los valores observados de dichas variables (Christensen, 1991). La estimación de este método permite la desintegración de datos precisos y facilita una estimación del error de la distribución espacial, siendo que esta técnica de análisis provee información sobre la dependencia espacial y la continuidad de la variable a ser analizada (Matheron, 1963). La herramienta fundamental de esta técnica geoestadística es el variograma experimental, calculado a partir de los pares de datos con diferentes distancias de separación o lag (h), y el ajuste del mismo a un modelo de variograma teórico, donde resultan los más frecuentes el lineal, esférico y el gaussiano (Regalado & Ritter, 2005). Los parámetros del variograma que establecen la estructura de correlación espacial de las variables, son los que determinan los pesos de los puntos a utilizarse en la interpolación. Estos parámetros son: nugget que representa la microvarianza (variación a distancias más cortas que el espaciado de muestreo), los errores de muestreo y la zona espacialmente correlacionada compuesta por la sill que es el valor de la autocorrelación donde esta se vuelve estacionaria y el range que es la distancia a la que se alcanza la meseta (Matheron, 1971).



5.6. Método Distancia Inversa Ponderada

La interpolación mediante Distancia Inversa Ponderada (IDW) es un método de interpolación no paramétrico que da más peso a los valores cercanos a un punto es decir tiene mayor influencia local que disminuye de forma no lineal con la distancia, por lo que los puntos que se localizan más cerca reciben un peso mayor en la ponderación que los puntos más alejados. Los pesos son proporcionales al inverso de la distancia elevado a un valor de potencia p , de forma que, al aumentar la distancia, los pesos disminuyen rápidamente. Generalmente, se utiliza un valor de $p = 2$, designándose el método de interpolación con ponderación cuadrática inversa a la distancia (Mitas & Mitasova, 1999a; DeMers, 2005).

5.7. Validación

La validación de los métodos de interpolación utilizados se efectuó mediante validación cruzada. Este método consiste en eliminar un valor de la variable, calcular el semivariograma correspondiente y estimar el valor eliminado a partir de dicho semivariograma. Esto podemos realizar uno por uno con todos los valores de las variables, para posteriormente representar todos los valores interpolados frente a sus valores reales. El estudio de los resultados de la validación cruzada debe concentrarse en los aspectos negativos, como errores muy exagerados o áreas con evidente sobre o subestimación. No es recomendable utilizar los residuales de la validación cruzada para la mejora automática del modelos de semivariograma, ya que conducirá a un modelo “mejorado” que efectivamente produce resultados peores (Isaaks & Srivastava, 1989).

5.8. Variables edafológicas

5.8.1. Granulometría

La distribución en los tamaños de las partículas constituye la textura del suelo. Por lo que presenta una influencia significativa en las propiedades del suelo como la temperatura, estructura, formación de agregados, cohesión del suelo, capacidad de retención de humedad y conductividad hidráulica (Arya & Paris, 1981).



Es importante clasificar las diferentes fracciones granulométricas, arena, limo y arcilla para establecer intervalos de las mismas. Los intervalos establecidos según la USDA se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Tamaño de las partículas de diferentes fracciones del suelo.

Fracción	Diámetros aparentes (mm)
Arena gruesa (A.G.)	2 - 0.2
Arena fina (A.F.)	0.2 - 0.05
Limo grueso (L.G.)	0.05 - 0.02
Limo fino (L.F.)	0.02 - 0.002
Arcilla (A)	< 0.002

Fuente: (USDA, 1975).

Particularmente la arcilla es un componente muy activo que interviene en la retención y en los ciclos de nutrientes al determinar la capacidad de intercambio catiónico, además protege a la materia orgánica de la degradación y determinación de la formación de agregados, por lo que es muy importante su proporción como su tipología (Blanco, 2015).

La proporción de las diferentes fracciones granulométricas en la superficie del suelo está influenciado por diversos factores (Hans, 1994). Siendo el material de origen que influye en la distribución de las partículas, debido la composición mineralógica, que establece a su vez su mayor o menor resistencia a los factores de meteorización que pueden fragmentarla, distinguiéndose así los materiales en función de su estado de consolidación (Blanco, 2015).

La temperatura y la humedad son factores que determinan la velocidad e intensidad de meteorización del material de origen. El relieve es un factor clave al momento de determinar la modelización de las fracciones granulométricas, ya que influyen en los procesos de erosión, transporte y sedimentación (Blanco, 2015).

Siendo otro factor los microorganismos que pueden influir en la distribución de las partículas, favoreciendo la meteorización, mediante la acción física de las raíces o la acción química de los exudados y productos del metabolismo, o reteniendo los sedimentos frente a la erosión hídrica o eólica (McKenzie & Ryan, 1999; Zhu et al., 2010).



Las combinaciones de los porcentajes de arena, limo y arcilla obtenidos pueden agruparse en clases texturales. Para representar las mismas se utiliza los triángulos de textura/ diagramas triangulares siendo este método más utilizado; obteniendo 12 clases diferentes mediante la clasificación de la USDA.

5.8.2. Densidad aparente

La densidad aparente del suelo representa el estado de compactación y la estructura del suelo, relacionada con las partículas y el espacio de poros dentro del mismo. Por lo que depende del tamaño y la densidad de partículas minerales, orgánicas y como están agrupadas (Blanco, 2015).

La densidad aparente está determinada principalmente, por el contenido de carbono orgánico del suelo y la proporción de las fracciones granulométricas (arena, limo y arcilla) (Rawls, 1983; Nemes & Rawls, 2004).

Sin embargo, la densidad aparente del suelo en la capa arable no es una propiedad constante, ya que esta puede variar en función de las condiciones a las que está sometida el suelo; presentará diferentes variaciones si se realiza determinaciones en cobertura vegetal, actividades agrícolas y laboreo (Logsdon & Cambardella, 2000) o el uso de maquinaria pesada (Franzluebbers, 2005). Pueden existir variaciones significativas en un mismo año, debido al pastoreo o la estacionalidad de las precipitaciones (Timm et al., 2006).

5.8.3. Materia Orgánica

La materia orgánica del suelo (MOS) está formada por una mezcla heterogénea de sustancias que incluyen: la materia constituyente de la biomasa microbiana y los restos vegetales senescentes; materia orgánica levemente transformada, con características reconocibles, materia humificada transformada, la misma que ha perdido las características químicas de sus precursores, acumulándose en la superficie como dentro del perfil del suelo (Porta et al., 2003).

La materia orgánica fresca presenta una fase de evolución que se transforma en humus para en una segunda etapa, continuar descomponiéndose hasta convertirse



en elementos minerales. Por lo que se diferencian dos fases: la humidificación y la mineralización (Gros & Domínguez, 1992).

El contenido de materia orgánica del suelo presenta diferentes niveles siendo: alto para valores mayores a 10, medio entre 4 -10 y bajo con valores menores a 4% (Landon, 1991).

La importancia de la materia orgánica del suelo debido a que cumple funciones esenciales en la estructura y estabilidad del suelo (Six et al., 2002), fertilidad nutritiva (Reeves, 1997), capacidad de retención de agua (Hudson, 1994), resistencia a la penetración por raíces (Zou et al., 2000), incrementa la resistencia a la erosión favoreciendo la infiltración del agua (Pikul & Zuzel, 1994).

5.8.4. Porosidad

La porosidad se refiere el porcentaje por unidad de volumen de suelo en su estado natural no ocupado por fracciones sólida, mineral u orgánica (Narro, 1994).

La porosidad del suelo en los primeros centímetros de profundidad influye en la infiltración y el escurrimiento del agua que determina el transporte hacia niveles superficiales o profundos (Bruckler, 1998). La circulación de agua y aire en el suelo se efectúa mediante el espacio poroso influenciado por el tamaño, abundancia y distribución de los mismos (Bonneau & Levy, 1979). La calidad del suelo es determinada por esta propiedad debido a que presenta su capacidad de almacenar agua y permitir el intercambio fisicoquímico y biológico entre las diferentes fases del suelo (Ruiz et al., 2009).

El espacio poroso del suelo de acuerdo a sus características de conducción o de almacenamiento está compuesto por la porosidad submicroscópica, porosidad microscópica o capilar y macroporosidad (Bruckler, 1998).

La alteración del espacio poroso produce el colapso de los poros, iniciando un proceso de degradación edáfica, declinación productiva de los ecosistemas e impactos hidrológicos importantes (Muhammad & Rattan, 2009).



5.8.5. Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración (RP) del suelo es un indicador de la compactación del suelo, lo que disminuye el desarrollo de la radicular de las plantas. La RP es una propiedad física que representa el comportamiento y los efectos de diferentes propiedades del suelo como: densidad aparente, contenido de humedad, porosidad y permeabilidad, que resultan de la distribución del tamaño de las partículas, la estructura y el contenido orgánico y mineral del suelo (Soane et al., 1980).

La RP depende del uso del suelo destinado, por lo que existe variabilidad espacial de esta propiedad física (Meshalkina et al., 1995).

Entre los factores perjudiciales de la compactación del suelo podemos mencionar reducción de la capacidad de emergencia de las plantas, afectando las características del suelo como: disponibilidad de nutrientes, acumulación de agua ocasionando el uso ineficiente de los recursos hídricos y disminución en el rendimiento de los cultivos (Conte et al., 2007; Serafim et al., 2008).

Para medir la dureza del suelo se utiliza un aparato conocido como penetrómetro. El valor limitante mencionado por (Taylor et al., 1966) ha sido de 2.5 MPa mientras que (Forsythe et al., 2005) presentó un valor de 2.96 MPa como indicador de limitación al desarrollo radicular a capacidad de campo, ya que el porcentaje de penetración de raíces pivotantes redujeron independientemente del material del suelo.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicado en la provincia del Azuay, cantón Cuenca, parroquia Victoria del Portete, en la Granja Irquis perteneciente a la Universidad de Cuenca. La Granja está ubicada en la microcuenca del río Tarqui. Tiene una extensión de 507 has, de las cuales 59.601 has están cubiertas por pastos y 183.639 has por bosques aproximadamente. La parcela experimental está localizada en la parte central de la Granja con un área de 4800 m². Se localiza a 2600 m s.n.m. entre las 9659147 m N; 9659038 m S; 713861 m E; y 713743 m W; en la proyección Universal Transversal de Mercator (UTM). Zona 17 Hemisferio Sur, Datum

horizontal; Sistema Geodésico Mundial (WGS 84), Datum Vertical: Nivel medio del mar de la estación mareográfica de la Libertad.

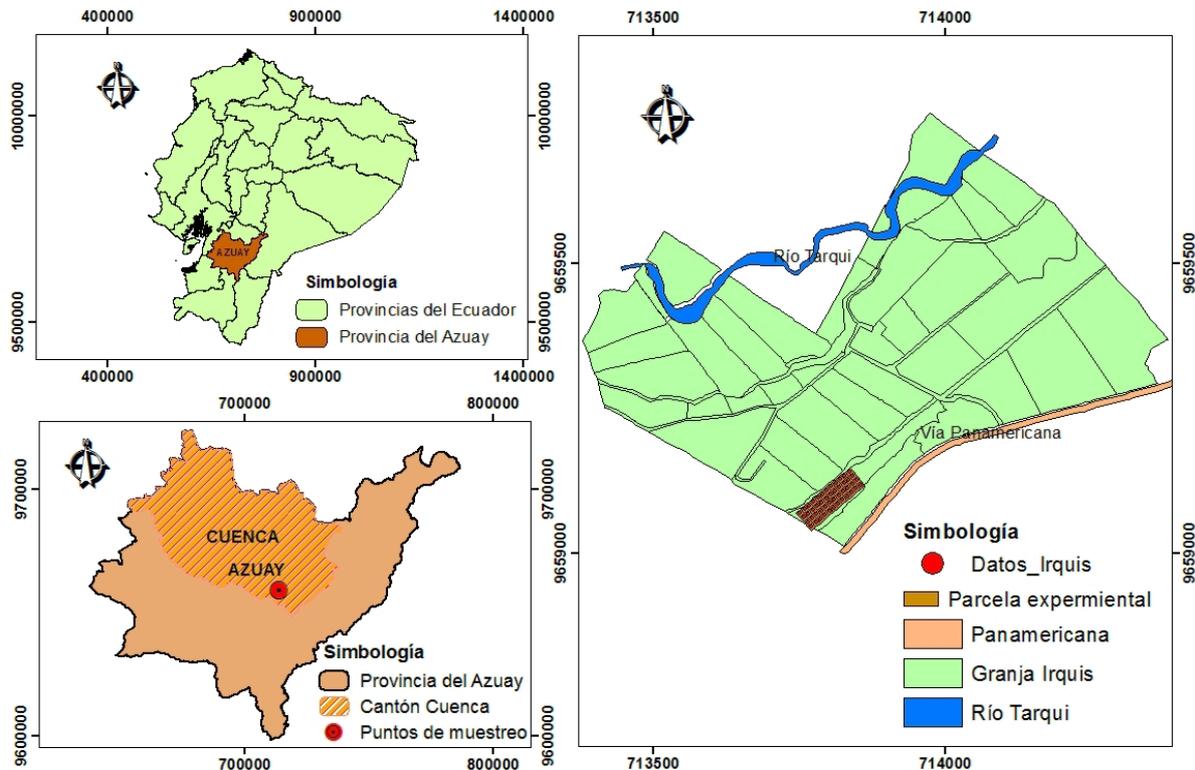


Figura 2. Ubicación geográfica del área de estudio en la provincia del Azuay.

Fuente: (P. DIUC, 2016)

6.2. Suelos

Los suelos de la granja Irquis presentan una formación de origen aluvial principalmente el fondo de valle, una característica es la presencia de alto contenido de arcilla, según el mapeo realizado por Dercon et al. (1998) determinaron suelos conocidos como Vertisoles, los mismos que presentan hidromorfismo debido a los encharcamientos y ascensos del nivel freático.

Los Vertisoles presentan características como alto contenido en esmectitas que se contraen y se expanden después de cambios estacionales de humedad. Estos procesos forman una típica estructura formando grietas en el suelo. Cuando estos suelos están mojados son pegajosos, cohesivos, plásticos e impermeables siendo que se convierten en suelos masivos, duros formando bloques o prismas cuando están secos (Van Ranst, 1997).



6.3. Sitios de muestreo y recolección de muestras

Los sitios de muestreo fueron distribuidos en el área en forma sistemática. Se utilizó una cuadrícula a un intervalo de 10 x 10 m para definir las 48 unidades experimentales. Se consideró la profundidad de la rizosfera de 30 cm.

Para determinar las propiedades de interés en el presente estudio se recolectaron muestras de suelo alteradas e inalteradas alrededor del centro de cada unidad experimental. Se tomaron 5 submuestras por cada unidad experimental, se homogenizó y se obtuvo 2 kg de suelo para las muestras alteradas.

Las muestras inalteradas fueron tomadas directamente de la parcela experimental y llevadas al laboratorio en anillos de Kopecky de 100 cm³, dos anillos por cada unidad experimental.

6.3.1. Fase de campo

En esta fase se realizaron las siguientes actividades:

- Recolección de muestras de 48 unidades experimentales.
- Las muestras recolectadas se colocaron en bolsas plásticas con su respectiva etiqueta.

6.3.2. Fase de laboratorio

Los análisis se realizaron en el laboratorio de Hidro-física de suelos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca.

Las muestras fueron secadas al ambiente, tamizadas a 2 mm para eliminar piedras, restos vegetales y posteriormente realizar el análisis respectivo.

De las muestras recolectadas se determinó los siguientes parámetros:

6.2.3. Granulometría

Se determinó mediante el método del hidrómetro o Bouyoucos.

Se pesó 20 g de suelo seco tamizado por una malla de 2 mm, se añadió agente dispersante (Hexametáfosfato de sodio al 4% (NaPO₃)₆) más agua destilada hasta un volumen aproximado de 400 ml. Se mezcló la solución en la batidora por cinco minutos. Para la separación de la fracción arena la solución se filtró en un tamiz de



63 μm , posteriormente la fracción arena retenida en el tamiz (63 μm) fue colocada en un recipiente y secada a 105 °C por 24 horas. La solución limo y arcilla en suspensión < 63 μm fue vertida en una probeta y aforada con agua destilada hasta completar un volumen de 1000 ml. Para obtener el blanco (**Rbl**) se diluyeron 20 ml de agente dispersante y se agregó agua destilada en una probeta hasta completar un volumen de 1000 ml. A continuación, la suspensión se equilibró térmicamente a una temperatura de 20 °C en el cilindro de sedimentación y en el blanco (**Rbl**). El cilindro de sedimentación se tapó y agitó, posteriormente se bajó el hidrómetro en la suspensión y se tomó la lectura **R** cuando éste estuvo estable (no más tarde de 50 segundos después de completada la mezcla). El hidrómetro se reinsertó cerca de 10 segundos antes de cada lectura. Los tiempos de lectura se realizó a los 0,83, 5, 120, 960 y 1440 minutos respectivamente (Bouyoucos, 1962).

Para evitar errores de lectura se recomienda sacar el hidrómetro y limpiar luego de cada lectura; anotar la lectura en la solución **R** cada vez que se introduzca el hidrómetro y anotar la lectura en el blanco como **Rbl**.

Cálculos

1. La concentración de sedimentos en suspensión **C**, en g/L es:

$$C = R - Rbl$$

donde:

R = Lectura en la solución sin corregir, g/L

Rbl = Lectura en el blanco, g/L

2. El porcentaje de las partículas **P** para un intervalo de tiempo de tiempo, es decir el porcentaje del peso de todas las partículas todavía presentes en la profundidad de medida después de un tiempo de sedimentación, es

$$P = 100 * \frac{C}{C_0}$$

Donde:

R = Lectura en la solución sin corregir, g/L

C₀ = Peso total de la muestra

C₀ = C_{50s} + Peso total de la fracción de arena

C_{50s} = Peso de las fracciones de arena y arcilla



3. El diámetro promedio de partículas X , en μm se obtiene usando:

$$X = 1000 \frac{\sqrt{Bh'}}{\sqrt{t}}$$

Donde:

El factor **B (x 10)** en función de la temperatura a 20 °C

$$B = 1,85$$

$$h' = -0.164R + 16.3$$

h' = Profundidad efectiva del hidrómetro, cm

t = Tiempo en minutos

4. Usando las lecturas con el hidrómetro y la información del tamice, grafique P vs. X . De la curva resultante, determine los porcentajes de arcilla y limo. El porcentaje de arena se obtendrá por sustracción. Los porcentajes obtenidos se llevan al triángulo textural como podemos ver en el Anexo 1 y se define la clase textural correspondiente a cada muestra.

6.3.3. Densidad aparente

Se determinó mediante el método del cilindro

Se retiró la cobertura vegetal del suelo, en un toma muestras (marca Eijelkamp) se insertó el anillo de Kopecky de 100 cm³, se introdujo en el suelo evitando alteración de la muestra, con un cuchillo se retiró la parte excedente del anillo, posteriormente se etiquetó, se llevó al laboratorio para ser secado en la estufa a 105°C por 24 horas y pesado para determinar su masa (Blake & Hartge, 1986a).

Para realizar el cálculo se utilizó la siguiente fórmula:

$$Da = \frac{Pss}{Vc}$$

Donde:

Da = Densidad aparente: g/cc.

Pss = Peso del suelo seco en la estufa.

Vc = volumen del cilindro: cm³



6.3.4. Densidad real

Se determinó mediante el método del picnómetro.

Se utilizó un picnómetro de 25 ml, se pesaron 5 g de suelos seco y tamizado con tamiz de 2 mm; en una balanza de precisión se realizó las siguientes pesadas: 1) Peso del sólido (suelo): **M1**; 2) Peso del picnómetro lleno con agua destilada: **M2**; 3) Peso del picnómetro con agua destilada y el sólido (suelo) **M3**. Se consideró que el picnómetro esté lleno con agua destilada hasta la señal de enrase, en el caso de que se excediera el nivel de enrase de agua destilada se eliminó utilizando un palillo hecho de papel filtro. Además se secó el picnómetro por la parte externa antes de realizar la pesada con papel filtro (Blake & Hartge, 1986b).

Para la determinación de la densidad real se aplicó la siguiente fórmula:

$$dr = \frac{M}{V} \qquad V = \frac{M1+M2+M3}{d}$$

d: densidad del agua =1g/cm³; reemplazando:

$$dr: \frac{M1}{M1 + M2 - M3}$$

6.3.5. Materia orgánica

Se determinó mediante el método por combustión húmeda propuesto por (Walkley & Black, 1934). El análisis se realizó en el laboratorio de suelos de Agrocalidad.

6.3.6. Resistencia a la penetración

Se procedió a realizar 3 tomas de datos en el centro de cada unidad experimental con un penetrómetro (marca Eijkelkamp), el mismo que mide en Mega Pascales (MPa); para esto se introdujo una varilla de sondeo con punta cónica de acero inoxidable de 1 cm² de diámetro en la base, articulado al sensor de fuerza, realizando la toma de datos *in situ* a una profundidad de 0 a 30 cm, profundidad que está dentro del rango del trabajo de las equipos agrícolas utilizados en la labranza (Jaramillo et al., 2008). De la fila de la parcela que están junto a la quebrada no se tomaron datos debido a la presencia de piedras, por lo que fueron consideradas 36 unidades experimentales.



6.4. Análisis estadístico

6.4.1. Determinación de la variabilidad de las propiedades físicas del suelo.

Se realizó un análisis exploratorio de los datos de todas las variables mediante gráficas de cajas e histogramas; para comprobar si existe distribución de probabilidad normal se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk (Kitanidis, 1997). Este análisis se realizó mediante el software estadístico IBM SPSS Statistics 22.

Para determinar la variabilidad de las propiedades físicas del suelo en la parcela experimental se consideró la distancia desde un punto de origen como podemos ver en la Figura 3. Posterior a esto se realizó un análisis de varianza (ANOVA), para evaluar el efecto transversal (filas) y longitudinal (columnas). Las variables que presentaron diferencias estadísticas según el análisis realizado se procedió a aplicar una prueba de Tukey al 5%. Se realizó para arena, limo, arcilla, densidad aparente y materia orgánica.

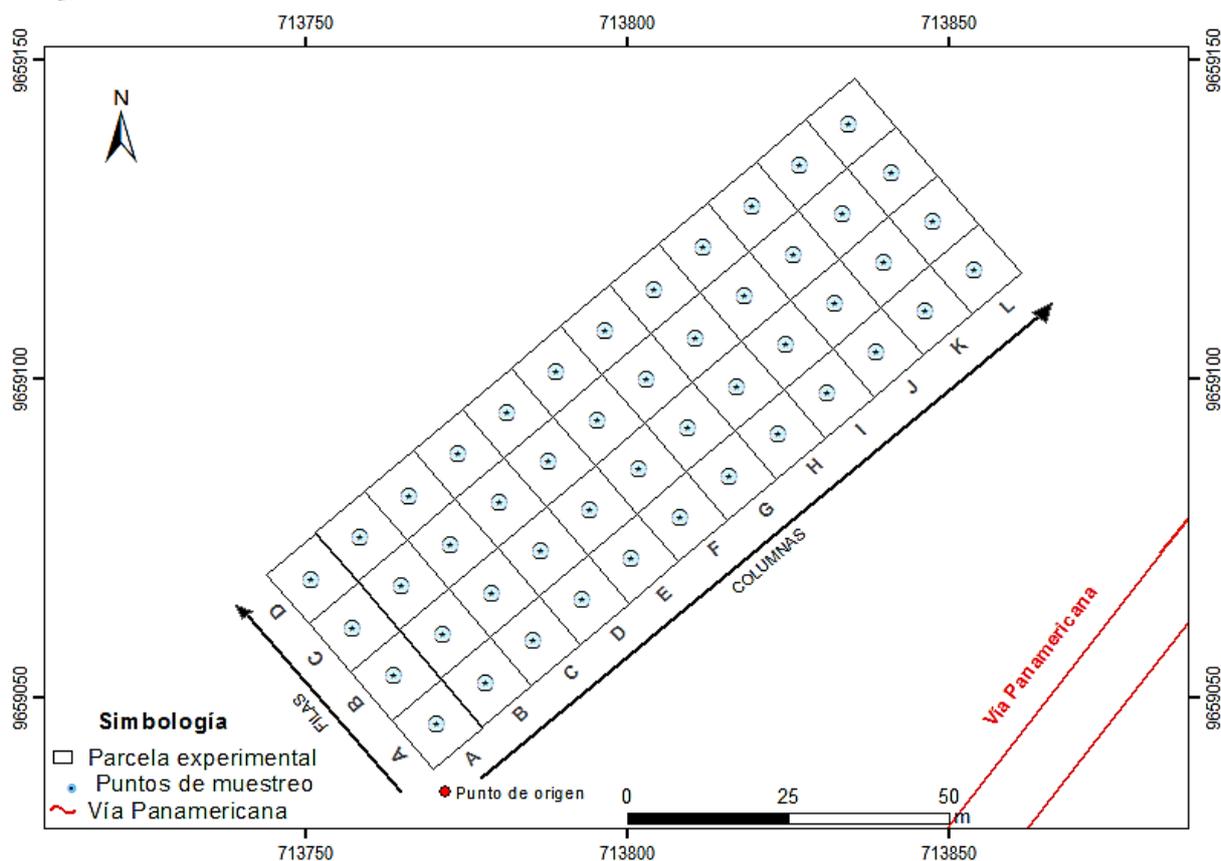


Figura 3. Plano de la parcela experimental y puntos de muestreo.

Fuente: (P. DIUC, 2016)

6.4.2. Selección de semivariogramas e interpolaciones.

En esta fase se utilizaron dos métodos de interpolación Kriging Ordinario (KO) y Distancia Inversa Ponderada (IDW) cuyos parámetros fueron obtenidos mediante el programa ArcGIS (versión 10.4) aplicando la extensión Geostatistical Analysis (licencia adquirida a través de la Universidad de Cuenca). Se evaluaron los semivariogramas experimentales y se ajustaron a semivariogramas teóricos utilizando como parámetros de selección valores menores de la suma de cuadrados de residuos. Los modelos aplicados a KO tienen tres parámetros como: nugget (C_0), sill ($C_0 + C$) y range que fueron utilizados para obtener el grado de dependencia espacial de cada variable. En el caso de IDW se asignó pesos y se seleccionó tomando en cuenta el criterio del valor más bajo en la suma del error medio. A partir de los semivariogramas ajustados, se generó los mapas de interpolación para cada variable del suelo.



6.4.3. Validación de los métodos de interpolación

La validación de los métodos de interpolación utilizados se realizó mediante validación cruzada (Arlot & Celisse, 2010). Este método se basa en la eliminación de cada dato observado, estimando el valor en su sitio a partir de las observaciones restantes y comparando el valor predicho con el valor medido (Voltz & Webster, 1990). Se utilizó este tipo de validación debido a que se disponía de una cantidad reducida de datos.

La validación de los métodos de interpolación se calculó mediante dos índices estadísticos; para seleccionar el mejor método a partir de los valores medidos e interpolados en cada sitio de la muestra de validación de cada conjunto de datos de prueba. El error medio (ME), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y se determinó a partir de los valores medidos (Johnston et al., 2001).

Se debe tomar en cuenta los indicadores estadísticos utilizados como es el error medio (ME) que sea próximo o cercano a 0 (Hevesi et al., 1992) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) debe ser lo más pequeño posible para una interpolación precisa (Oliver & Webster, 2014).

La determinación del error medio (ME) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) se realizó mediante la aplicación de las siguientes formulas:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{Z(X_i) - \hat{z}(X_i)\}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{Z(X_i) - \hat{z}(X_i)\}^2}$$

Donde:

N = tamaño de la muestra

x_i) = valor medido

$\hat{z}(x_i)$ = valor predicho

6.4.4. Comparación de los métodos de interpolación

La comparación de los métodos de interpolación se realizó utilizando indicadores estadísticos como: el error cuadrático medio (MSE) y la eficiencia de predicción (E) (Karydas et al., 2009; Kerbala University, 2014).

El error cuadrático medio se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|Z(X_i) - \hat{z}(X_i)|)^2$$

Donde $z(x_i)$ es el valor medido en la localización i , $\hat{z}(X_i)$ es el valor predicho en la posición i , y n es el tamaño de la muestra. El cuadrado de la diferencia en cualquier punto da una indicación de la magnitud de las diferencias, por lo que valores pequeños del error cuadrático medio indican predicciones más precisas de punto a punto (Johnston et al., 2001; Webster & Oliver, 2001). La medida de eficiencia de predicción (E) indica de que tan efectiva es la predicción en relación con el uso de la derivada de la media de la muestra (Gotway et al., 1996; Schloeder et al., 2001).

$$E = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Z(X_i) - \hat{z}(X_i))^2}{\sum_{i=1}^n (Z(X_i) - \bar{z})^2} \right) \cdot 100$$

Dónde $z(x_i)$ es el valor observado en la posición i , $\hat{z}(X_i)$ es el valor predicho en la posición i , n es el tamaño de la muestra y \bar{z} es la media de la muestra. Un valor de eficiencia de predicción (E) igual a 100 % indica una predicción perfecta, valores positivos (desde 0 a 100 %) indican que las predicciones son más confiables que el uso de la media de la muestra y los valores negativos indican que las predicciones son menos confiables en lugar del uso de la media de la muestra.



7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Caracterización de las propiedades del suelo (primer y segundo objetivo específico)

Analizadas las unidades experimentales se determinó granulometría obteniendo un 25% que corresponde a Franco, un 50% Franco-limoso y un 25% Franco-arenoso (ver Anexo 2).

En las figuras 4, 5 y 6 se presentan los diagramas de cajas de las variables de estudio, la misma en la que se observa la distribución y sesgo antes de ser normalizada.

En la Tabla 2. se presentan los resultados del análisis estadístico de las propiedades del suelo a una de profundidad 0-30 cm.

Tabla 2. Resumen estadístico de las variables de estudio.

Variabes	Unidad	Promedio	Mínimo	Máximo	DE	CV (%)
Arena	%	36.246	12.987	69.293	16.377	45.182
Limo	%	47.924	15.565	76.881	13.149	27.438
Arcilla	%	15.829	2.870	26.669	5.576	35.225
Densidad aparente	g/cm ³	1.043	0.781	1.264	0.095	9.140
Materia orgánica	%	6.980	4.830	9.610	1.028	14.727
Porosidad	%	53.809	44.026	65.437	4.222	7.846

DE: Desviación estándar y CV: Coeficiente de variación

Fuente: Elaboración propia

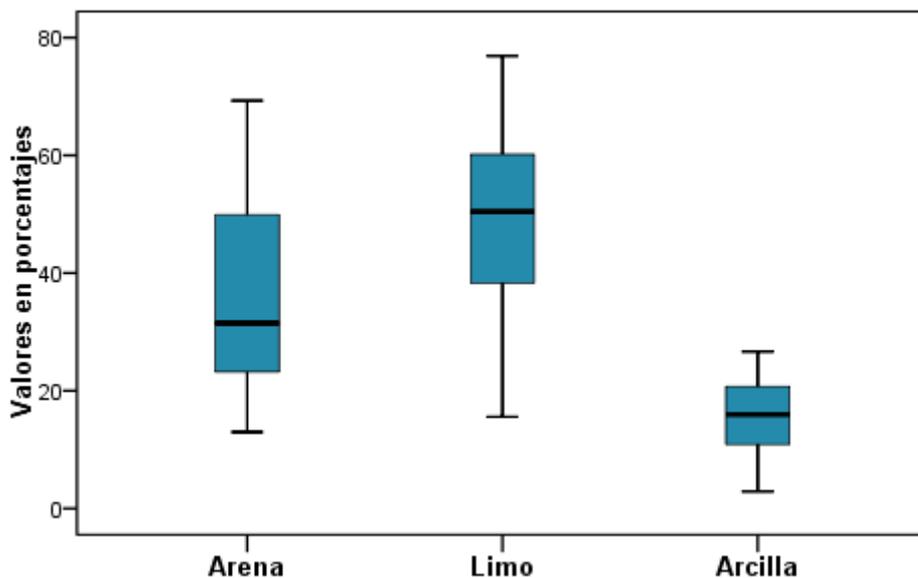


Figura 4. Diagrama de cajas de las variables de estudio.

Fuente: Elaboración propia

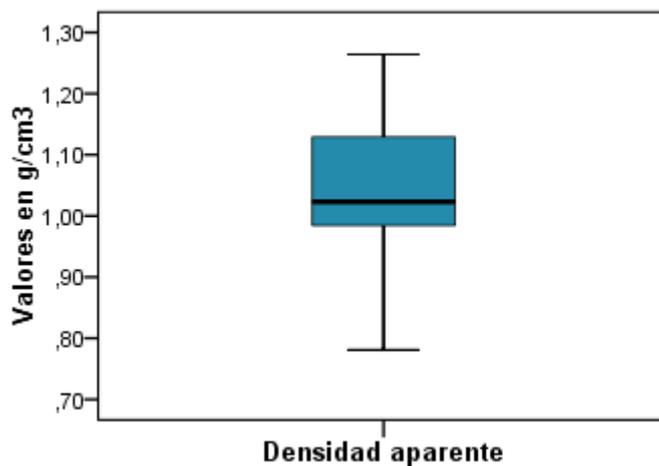


Figura 5. Diagrama de caja de densidad aparente del conjunto de datos de estudio.

Fuente: Elaboración propia

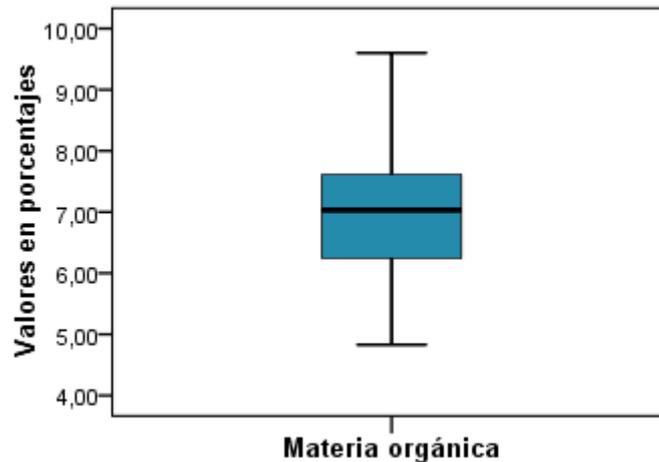


Figura 6. Diagrama de caja de materia orgánica del conjunto de datos de estudio.

Fuente: Elaboración propia

De los resultados obtenidos se encontraron los siguientes valores para arena entre 12,98 a 69,29 %, limo 15,56 a 76,88 %, arcilla 2,87 a 26,69 %, densidad aparente 0,78 a 1,26 g/cm³, materia orgánica 4,83 a 9,61 % y porosidad 44,02 % a 65,43 %. Según la clasificación de coeficientes de variación de las propiedades del suelo propuestos por Warrick & Nielsen (1980), se encontró una variación baja (CV < 12 %) para densidad aparente, materia orgánica y porosidad y una variación media (CV entre 12-60 %) para arena, limo y arcilla.

Los coeficientes de variación bajo y medio determinados de las propiedades analizadas se atribuyen posiblemente a diversos factores de formación del suelo siendo que estarán influenciadas por características propias del lugar, consiguiendo así resultados diferentes aun utilizando escalas de muestreo similares como los obtenidos por (Obando et al., 2006).

El promedio de materia orgánica de 6.98 % indica que el suelo de la parcela experimental presenta un nivel medio según la clasificación propuesta por (Landon, 1991).

En la Tabla 4. se presentan los resultados del análisis estadístico para resistencia a la penetración a diferentes profundidades de muestreo: 0-10, 10-20 y 20-30 cm.

Tabla 3. Resumen estadístico de resistencia a la penetración.

Variabes	Unidad	Promedio	Mínimo	Máximo	D.E.	CV (%)
RP 10 cm	MPa	1.608	0.503	2.773	0.472	29.338
RP 20 cm	MPa	2.252	1.393	3.150	0.509	22.611
RP 30 cm	MPa	2.067	1.037	2.843	0.543	26.256

RP: Resistencia a la penetración; Fuente: Elaboración propia

Para resistencia a la penetración a una profundidad de 0-10cm se obtuvo valores que varían entre 0,50 a 2,77 MPa; de 10-20cm entre 1,39 a 3,15 MPa y de 20-30cm entre 1,03 a 2,84 MPa. Existe un coeficiente de variación alto entre 20-30 % para todas las profundidades analizadas de acuerdo a la clasificación propuesta por (Gomes, 1984).

Los resultados promedios obtenidos a diferentes profundidades varían entre 1.61 a 2.25 MPa valores que no indican restricciones en el desarrollo radicular de los cultivos. Considerando los valores máximos se encontró valores entre 2.77 – 3.15 MPa indicando que el suelo de la parcela de estudio presenta zonas compactadas. Según Taylor et al., (1966) y Forsythe et al., (2005) un valor de 2.5 MPa indica restricción en el crecimiento radicular. Sin embargo, los valores encontrados no superan los reportados por (Montanari et al., 2013) ya que obtuvo valores de RP de 4.18 a 5.34 MPa en suelos bajo pastoreo.

7.2. Pruebas de normalidad

Realizada la prueba de Shapiro-Wilk de las variables edafológicas se obtuvieron valores que se ajustan a una distribución normal a excepción de arena y resistencia a la penetración a 20-30 cm, por lo que se realizó transformaciones de raíz cuadrada y exponencial, los mismos que se utilizaron en estudios similares realizados por (Obando et al., 2006).

Los resultados de la Tabla 4 indican el *valor p* de cada variable mayor al valor de significancia (0.05), por lo que cumple con los supuestos de normalidad de los datos, de la misma forma para las variables que fueron transformadas. En la Figura 7 y 8 se presentan las variables que no cumplen una distribución normal.

Tabla 4. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk a nivel de significación al 5% de las variables edafológicas de estudio.

Variable	p-value
Arena (%)	0.071
Limo (%)	0.059
Arcilla (%)	0.325
DA (g/cm ³)	0.153
MO (%)	0.248
Porosidad (%)	0.153
Resistencia a la penetración (MPa) 10 cm	0.758
Resistencia a la penetración (MPa) 20 cm	0.070
Resistencia a la penetración (MPa) 30 cm	0.094

Fuente: Elaboración propia

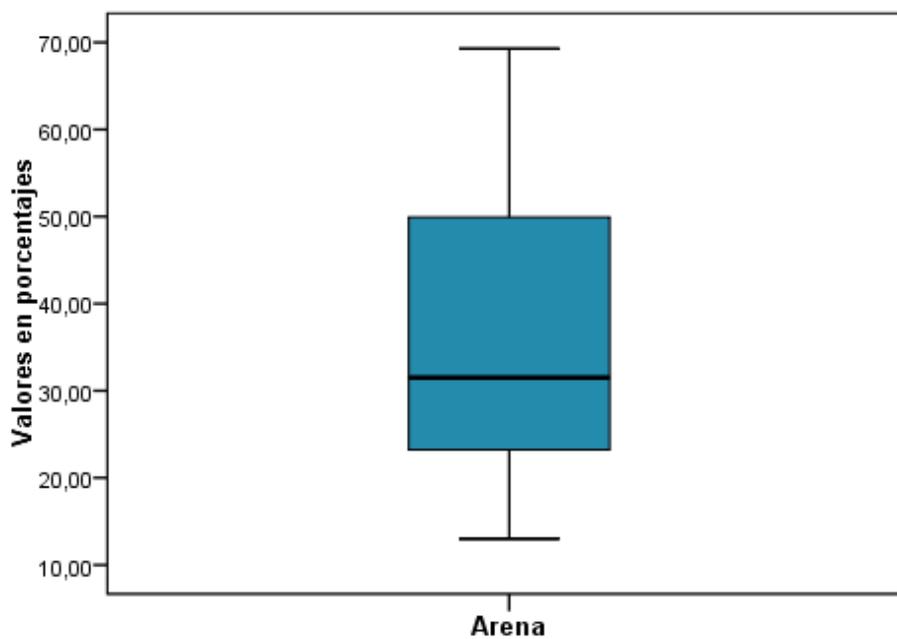


Figura 7. Diagrama de caja para la variable arena de la distribución no normal.

Fuente: Elaboración propia

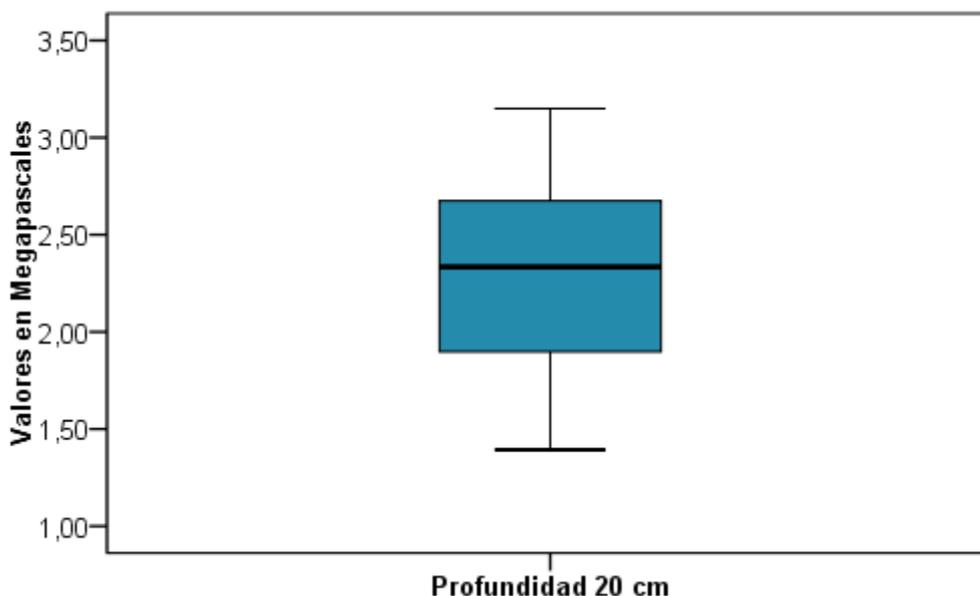


Figura 8. Diagrama de caja para resistencia a la penetración a 20 cm de una distribución no normal.

Fuente: Elaboración propia

7.3. Factores que influyen en la variabilidad espacial de las características físicas del suelo en la parcela (tercer objetivo específico).

Realizado el análisis longitudinal (columnas) de las variables de estudio como podemos ver en la Tabla 5 existen diferencias significativas ($p < 0.05$), para densidad aparente y materia orgánica; para el análisis de arena, limo y arcilla resultando no significativo.

Por lo que se rechaza la hipótesis nula existiendo diferencias estadísticas significativas para densidad aparente y materia orgánica, a excepción de arena, limo y arcilla no presentó argumentos suficientes para contrastar dicha hipótesis.

Tabla 5. Análisis de varianza longitudinal para las variables de estudio.

Variables	p-valor
Arena (%)	.972
Limo (%)	.845
Arcilla (%)	.998
Densidad aparente	.008
Materia orgánica (%)	.007

Fuente: Elaboración propia

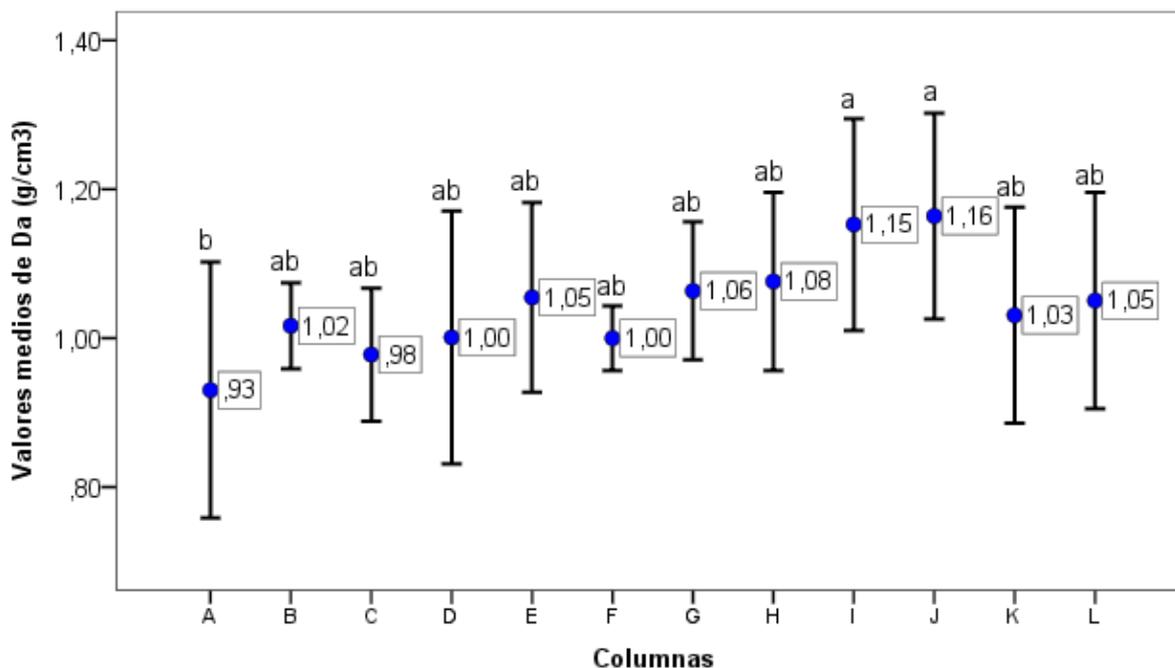


Figura 9. Comparación de valores medios de densidad aparente mediante columnas.

Rangos: a, b, ab

Fuente: Elaboración propia

Realizado la comparación de valores medios de densidad aparente como podemos observar en la Figura 9, se encontró valores mayores de densidad aparente para las columnas (J e I) a diferencia de la columna (A) que presentó menor valor. Estas diferencias posiblemente se atribuyen a la acumulación de arena en ciertas áreas considerando que algunas unidades experimentales están ubicadas en la parte baja tomando en cuenta la topografía de la parcela.

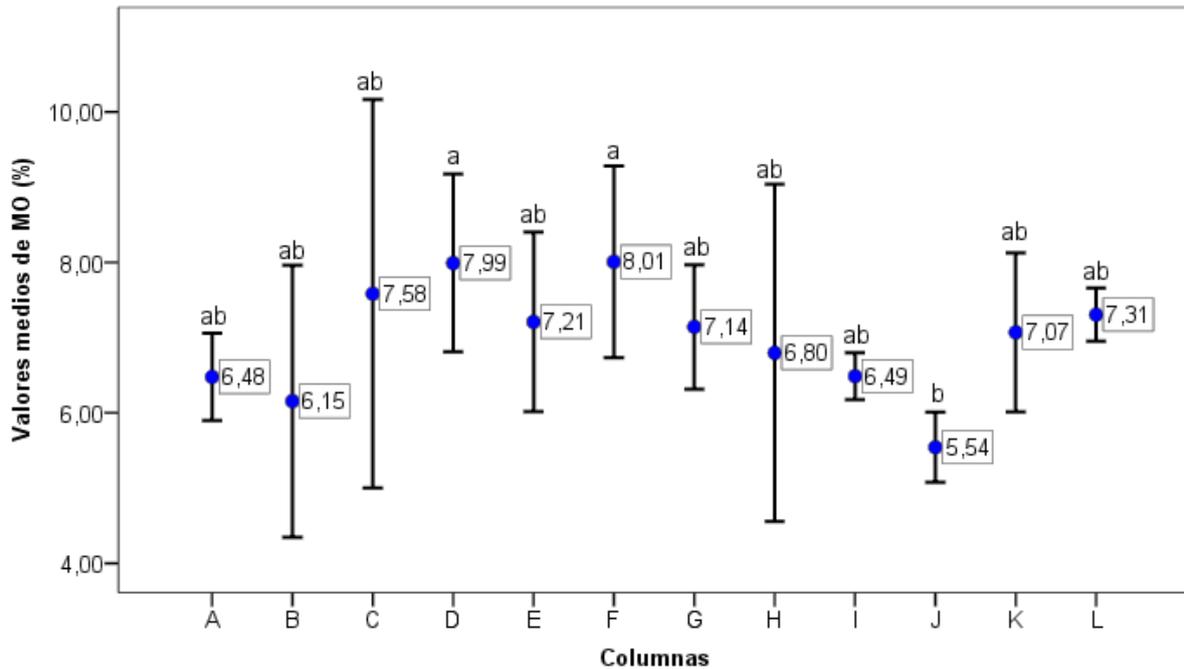


Figura 10. Comparación de valores medios de materia orgánica mediante columnas.

Rangos: a, b, ab.

Fuente: Elaboración propia

Realizado la comparación de valores medios para materia orgánica como podemos observar en la Figura 10, se encontraron valores mayores de materia orgánica para las columnas (F y D) respectivamente a diferencia de la columna (J) que presentó menor valor. Ciertas diferencias se deben posiblemente a la acumulación de materia orgánica debido a deposiciones por el arrastre de sedimentos.

Realizado el análisis de varianza con un nivel de significación al 5% para la evaluación del efecto transversal (filas) de las variables de estudio según los resultados presentados en la Tabla 6; indica que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) para arena, limo y arcilla, resultando no significativo para densidad aparente y materia orgánica. Por lo que se rechaza la hipótesis nula para las variables arena, limo y arcilla existiendo diferencias estadísticas significativas y en el caso de densidad aparente y materia orgánica no existe argumentos necesarios para contrastar dicha hipótesis.

Tabla 6. Análisis de varianza de la evaluación del efecto transversal de las variables de estudio.

Variable	p-valor
Arena (%)	.000
Limo (%)	.000
Arcilla (%)	.000
Densidad aparente (g/cm ³)	.139
Materia orgánica (%)	.654

Fuente: Elaboración propia

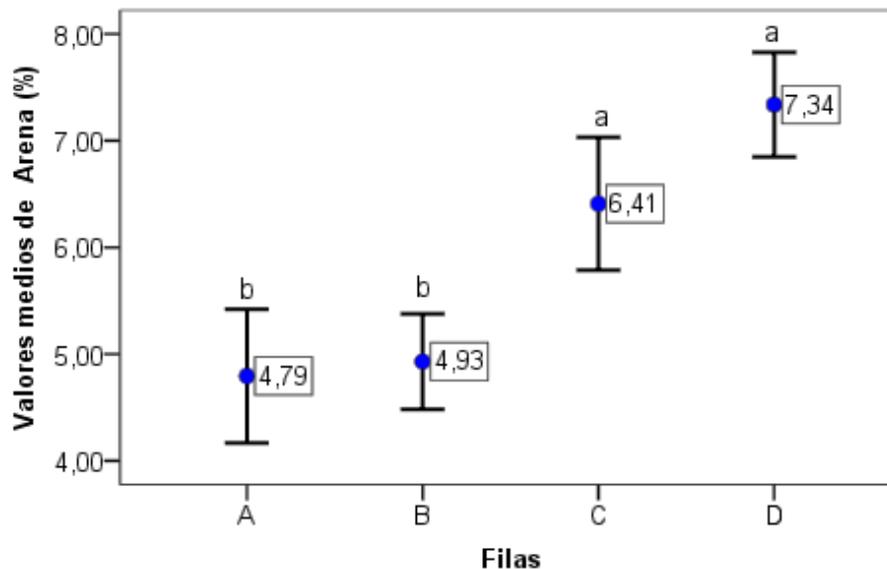


Figura 11. Comparación de valores medios de arena mediante filas.

Rangos: a, b.

Fuente: Elaboración propia

Realizado la comparación de valores medios para arena mediante la evaluación del efecto transversal según los resultados de la Figura 11; las filas (D y C) presentaron mayores valores a diferencia de las filas (B y A) que presentaron menores valores. Estas diferencias se atribuyen a la influencia de la quebrada por sus desbordes en épocas de crecidas siendo de origen aluvial.

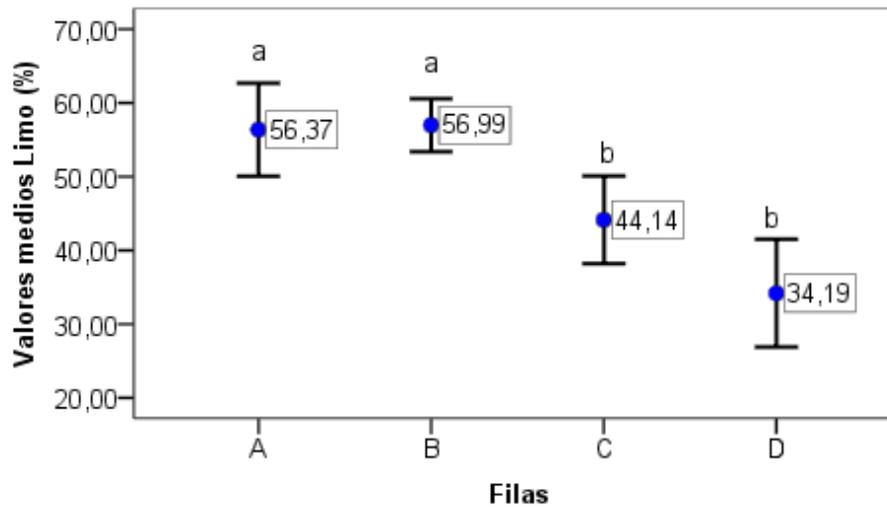


Figura 12. Comparación de valores medios de limo mediante filas.

Rangos: a, b.

Fuente: Elaboración propia

Realizado la comparación de valores medios de limo mediante la evaluación del efecto transversal según los resultados de la Figura 12; las filas (B y A) presentaron mayores valores a diferencia de las filas (C y D) siendo que presentaron menores valores. Estas diferencias se atribuyen posiblemente a las deposiciones coluviales provenientes del talud de la construcción de la vía.

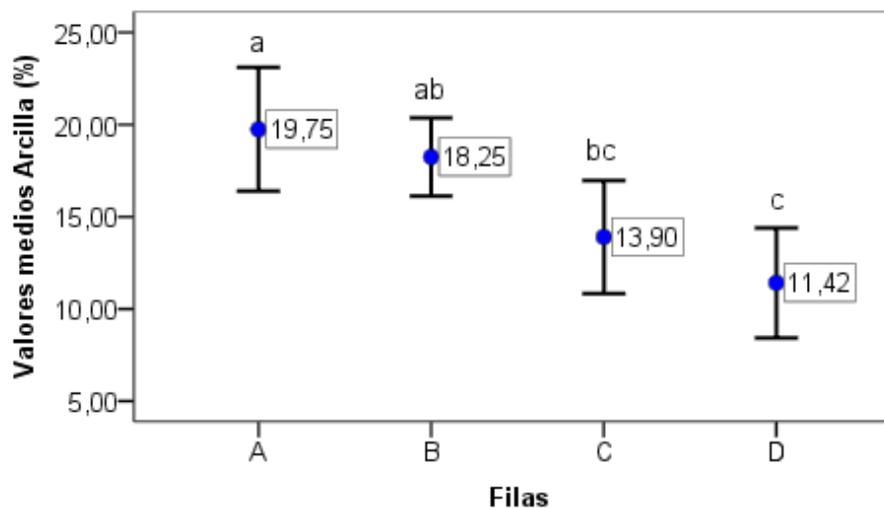


Figura 13. Comparación de valores medios de arcilla mediante filas.

Rangos: a, ab, bc, c.

Fuente: Elaboración propia



Realizado la comparación de valores medios para arcilla mediante el análisis de la evaluación del efecto transversal según los resultados de la Figura 13; la fila (A) presentó mayor valor a diferencia de la fila (D) siendo que presentó menor valor. Estas diferencias se atribuyen probablemente a la deposición coluvial proveniente del talud de la construcción de la vía.

7.4. Análisis Geoestadístico de la variabilidad espacial (cuarto objetivo específico).

Si se considera la variación entre el porcentaje de la variable aleatoria (nugget) de una propiedad, dentro de la variabilidad total (sill) que en ésta presenta, puede cuantificarse el grado de dependencia espacial. Cambardella et al. (1994) establecieron diferentes clases de dependencia espacial entre la relación efecto nugget/sill si es igual o inferior al 25% se considera como una fuerte dependencia espacial, moderada si está entre 25-75% y débil si el valor es mayor a 75%. Se determinó dependencia espacial fuerte para densidad aparente, porosidad y resistencia a la penetración a 20-30cm, moderada para arena, limo, arcilla, materia orgánica y resistencia a la penetración a 10-20cm. y débil para resistencia a la penetración a 0-10cm.

Tabla 7. Parámetros del variograma aplicando Kriging Ordinario para las variables del suelo analizadas.

Propiedades del suelo	Modelo	Nugget	Sill	Range	GDE
Arena	Gaussiano	0.651	2.416	39.449	26.93
Limo	Gaussiano	85.177	204.38	41.144	41.68
Arcilla	Circular	16.220	37.852	45.026	42.85
Densidad aparente	Esférico	0.002	0.012	86.702	16.67
Materia orgánica	Gaussiano	0.353	1.115	19.999	31.67
Porosidad	Esférico	5.195	25.139	87.224	20.67
Resistencia a la penetración (10 cm)	Exponencial	0.162	0.167	21.056	97.01
Resistencia a la penetración (20 cm)	Esférico	7.398	28.821	29.855	25.67
Resistencia a la penetración (30 cm)	Gaussiano	0.013	0.345	19.999	3.86

GDE: Grado Dependencia Espacial; Fuente: Elaboración propia



Las propiedades del suelo se ajustaron a modelos teóricos de semivariograma, predominando el modelo gaussiano, aunque se ajustaron a otros modelos como el circular, esférico y exponencial. Los contenidos de materia orgánica, resistencia a la penetración de 10 y 30 cm presentaron rangos bajos con un aproximado de 20 m. Para el caso de arena, limo y arcilla un rango cercano a 40 m y para densidad aparente y porosidad un rango próximo a 80 m. En general, la mayoría de las propiedades del suelo presentaron rangos superiores a 20 m lo que confirma que la distancia utilizada para el muestreo entre puntos a 10 m permitió identificar la dependencia espacial dentro de la parcela experimental; coincidiendo con los resultados obtenidos en un estudio similar de las propiedades físicas del suelo por (Cucunubá et al., 2011).

7.5. Validación de los métodos de interpolación (quinto objetivo específico)

En la Tabla 7. se presentan los errores medios (ME), Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) obtenidos para cada variable del suelo usando Kriging Ordinario (KO) y Distancia Inversa Ponderada (IDW).

Tabla 8. Valores de validación cruzada de los métodos de interpolación utilizados de las variables del suelo analizadas.

Método	Variable	ME	RMSE
KO	Arena	0.027	0.906
	Limo	0.302	10.744
	Arcilla	0.024	4.601
	Densidad aparente	0.001	0.073
	Materia orgánica	0.016	0.891
	Porosidad	0.037	3.239
	Resistencia a penetración 10 cm	-0.031	0.410
	Resistencia a penetración 20 cm	-0.212	4.424
	Resistencia a penetración 30 cm	-0.016	0.421
IDW	Arena	0.047	1.007
	Limo	0.675	11.031
	Arcilla	0.056	4.867
	Densidad aparente	0.003	0.074
	Materia orgánica	0.024	0.933
	Porosidad	0.150	3.278
	Resistencia a penetración 10 cm	-0.026	0.425
	Resistencia a penetración 20 cm	-0.332	4.569
Resistencia a penetración 30 cm	-0.021	0.492	



KO: Kriging Ordinario; IDW: Distancia Inversa Ponderada; ME: Error Medio; RMSE: Raíz Error Cuadrático Medio. Fuente: Elaboración propia

En la validación cruzada aplicada a los métodos de interpolación los indicadores estadísticos Error Medio (ME) y Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), se obtuvieron valores más bajos para Kriging Ordinario en todas las propiedades del suelo, esto indica que fue mejor para predecir las propiedades del suelo en comparación al método de Distancia Inversa Ponderada lo que concuerda con un estudio similar reportados por (Samira et al., 2014) .

7.6. Comparación de la predicción de los métodos de interpolación (sexto objetivo específico)

Tabla 9. Valores de eficiencia de predicción (E) mediante comparación de los métodos de interpolación.

Método	Variable	MSE	E
KO	Arena	0.821	54.719
	Limo	115.446	31.814
	Arcilla	21.172	30.449
	Densidad aparente	0.005	39.868
	Materia orgánica	0.794	23.29
	Porosidad	10.493	39.872
	Resistencia a penetración 10 cm	0.168	22.343
	Resistencia a penetración 20 cm	19.573	19.966
	Resistencia a penetración 30 cm	0.178	38.007
IDW	Arena	1.013	44.114
	Limo	121.678	28.133
	Arcilla	23.690	22.176
	Densidad aparente	0.005	38.401
	Materia orgánica	0.870	15.92
	Porosidad	10.748	38.414
	Resistencia a penetración 10 cm	0.181	16.366
	Resistencia a penetración 20 cm	20.873	14.653
	Resistencia a penetración 30 cm	0.242	15.412

KO: Kriging Ordinario; IDW: Distancia Inversa Ponderada; MSE: Error Cuadrático Medio; E: Eficiencia de Predicción. Fuente: Elaboración propia

Se obtuvieron mayores valores de eficiencia de predicción en todas las variables del suelo mediante Kriging Ordinario, aunque para ciertas variables como densidad aparente y porosidad existieron valores similares. Sin embargo en otros estudios se reportan mejores resultados aplicando el método de Distancia Inversa Ponderada,

esto no contradice el presente estudio ya que la variabilidad espacial del suelo está influenciada por factores predominantes en cada zona de estudio como los resultados reportados por Gotway et al. (1996) y Karydas et al. (2009) realizado en trabajos similares.

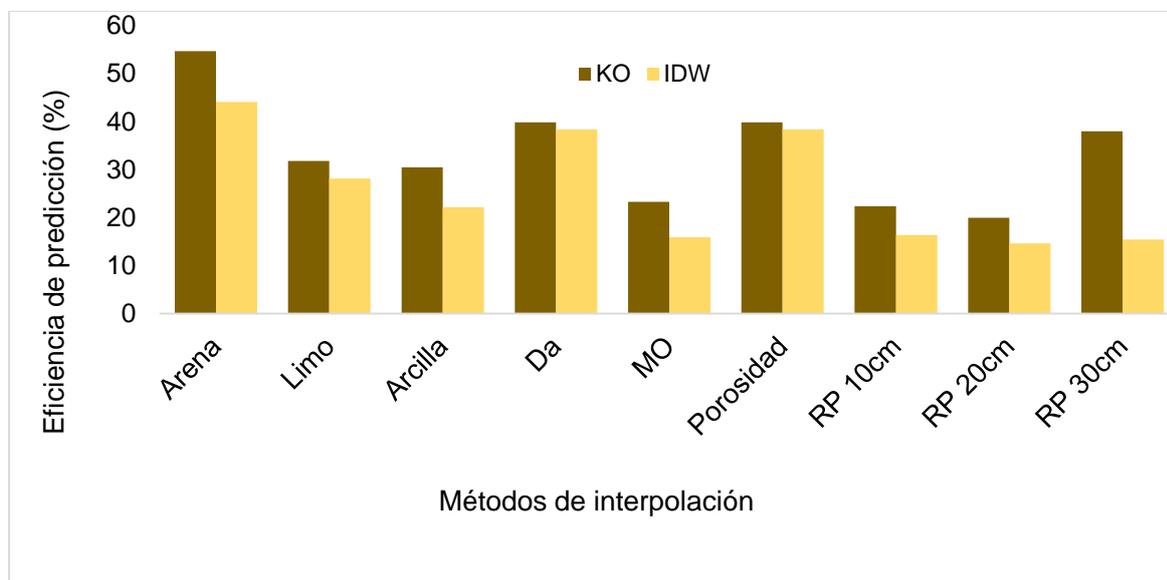


Figura 14. Eficiencia de predicción de los métodos de interpolación mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 14 se presentan los valores de eficiencia de predicción, los cuales se pueden observar que existen valores muy similares, aunque el método de interpolación Kriging Ordinario presentó mayores porcentajes en eficiencia de predicción que el método de Distancia Inversa Ponderada.

Mediante un análisis visual de los mapas de interpolación se pretendió identificar las variaciones de las propiedades del suelo analizadas especialmente de aquellas influenciadas por las características de la parcela. Los mapas generados mediante Kriging Ordinario presentaron predicciones más precisas (mayor eficiencia de predicción), se obtuvieron transiciones suficiente graduales con niveles de detalle debido a su efecto de suavizado. Por el contrario, los mapas generados con el método de Distancia Inversa Ponderada presentaron ciertas zonas aisladas conocidas como ojo de buey que es característico de este interpolador. Siendo que se puede observar en estudios similares realizados por Gotway et al. (1996) y El-Sayed (2012) los cuales utilizaron los mismos métodos de interpolación.

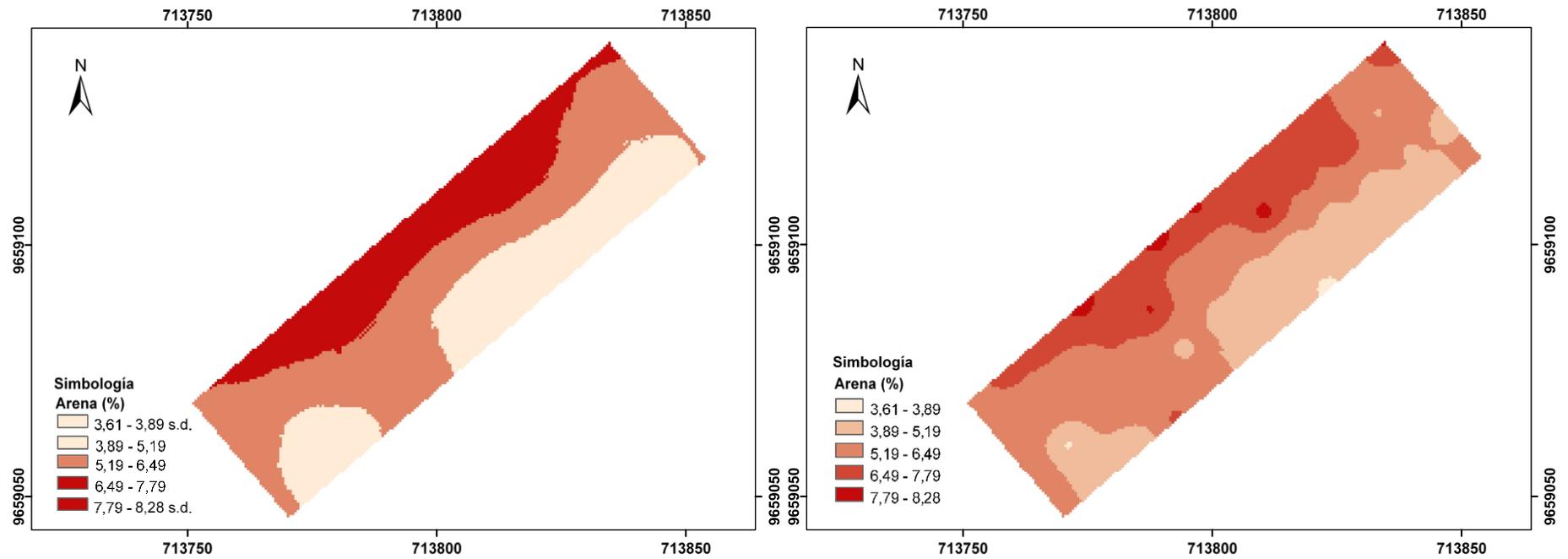


Figura 15. Mapas de interpolación para arena (%) mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada.

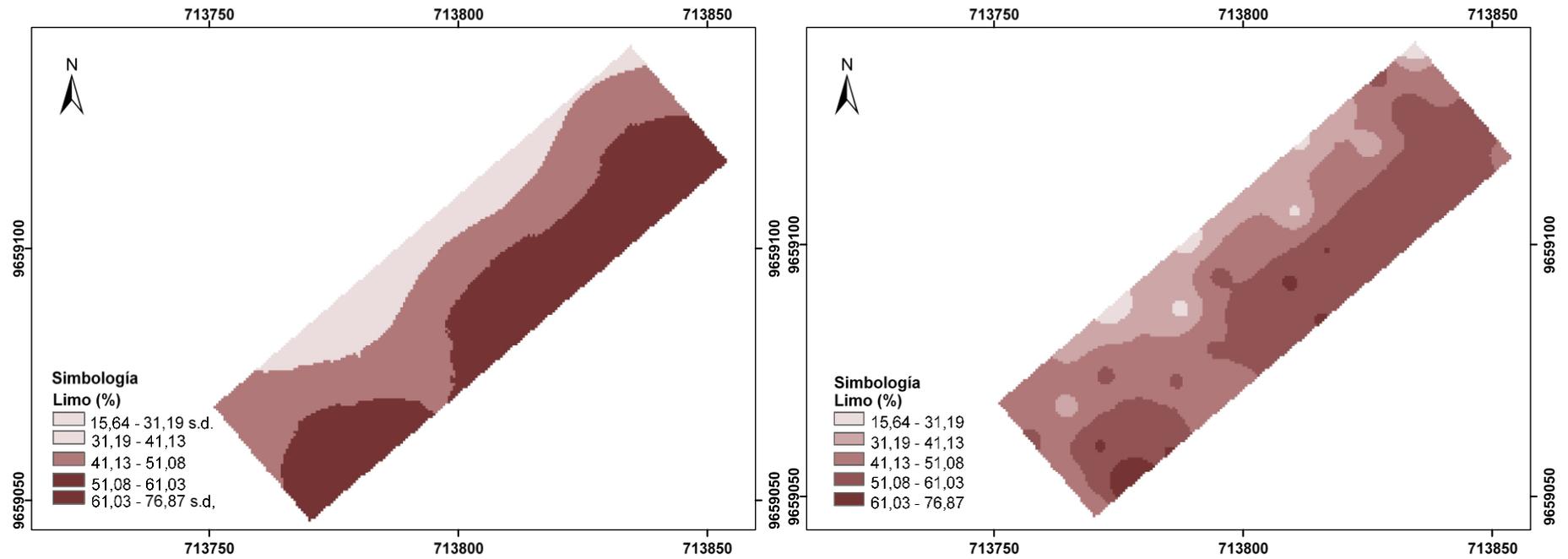


Figura 16. Mapas de interpolación para limo (%) mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada.

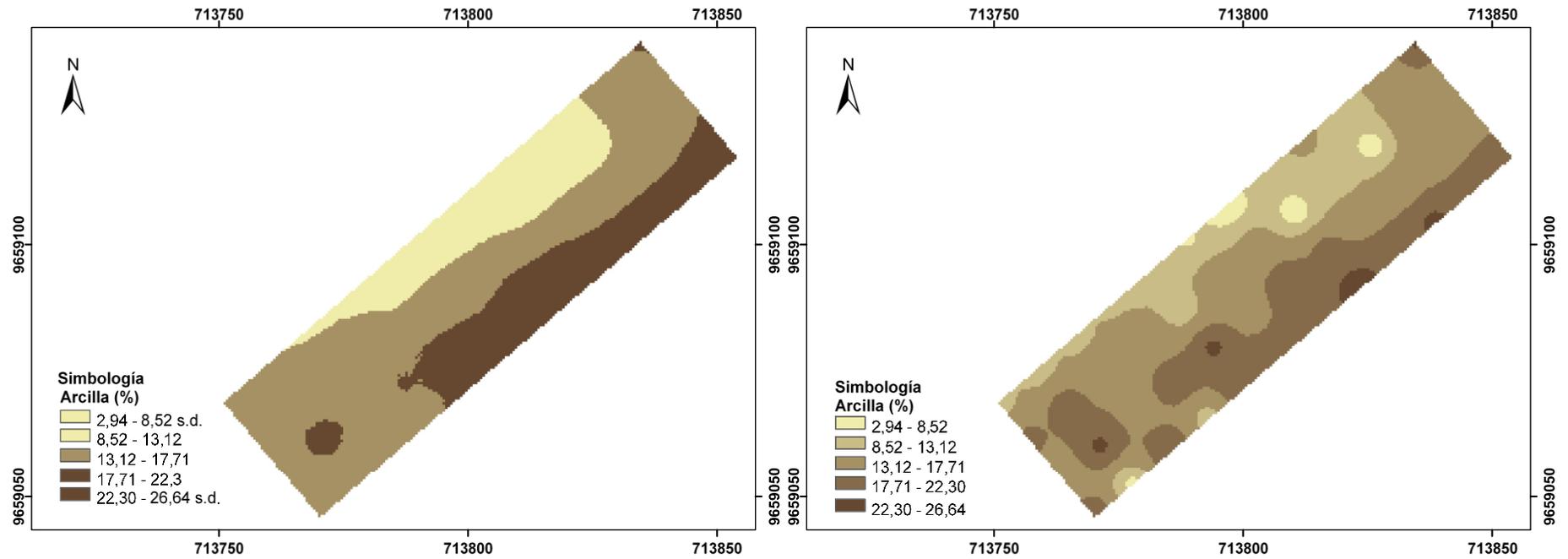


Figura 17. Mapas de interpolación para arcilla (%) mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada.

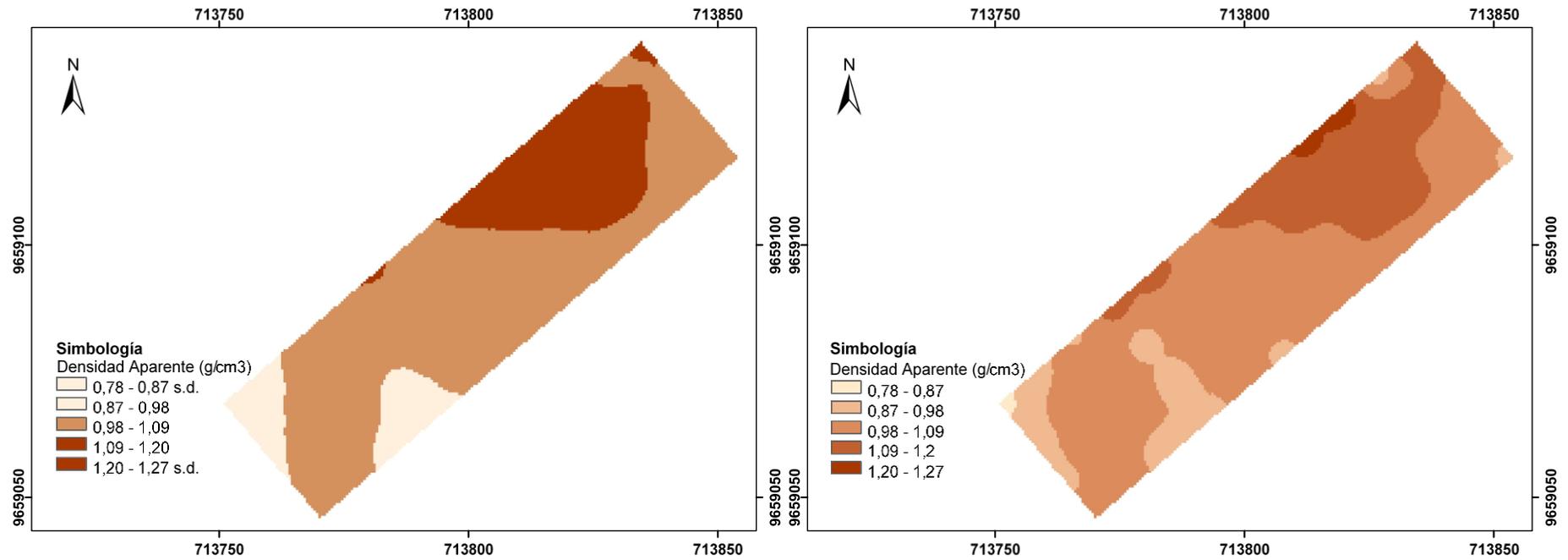


Figura 18. Mapas de interpolación para densidad aparente (g/cm3) mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada.

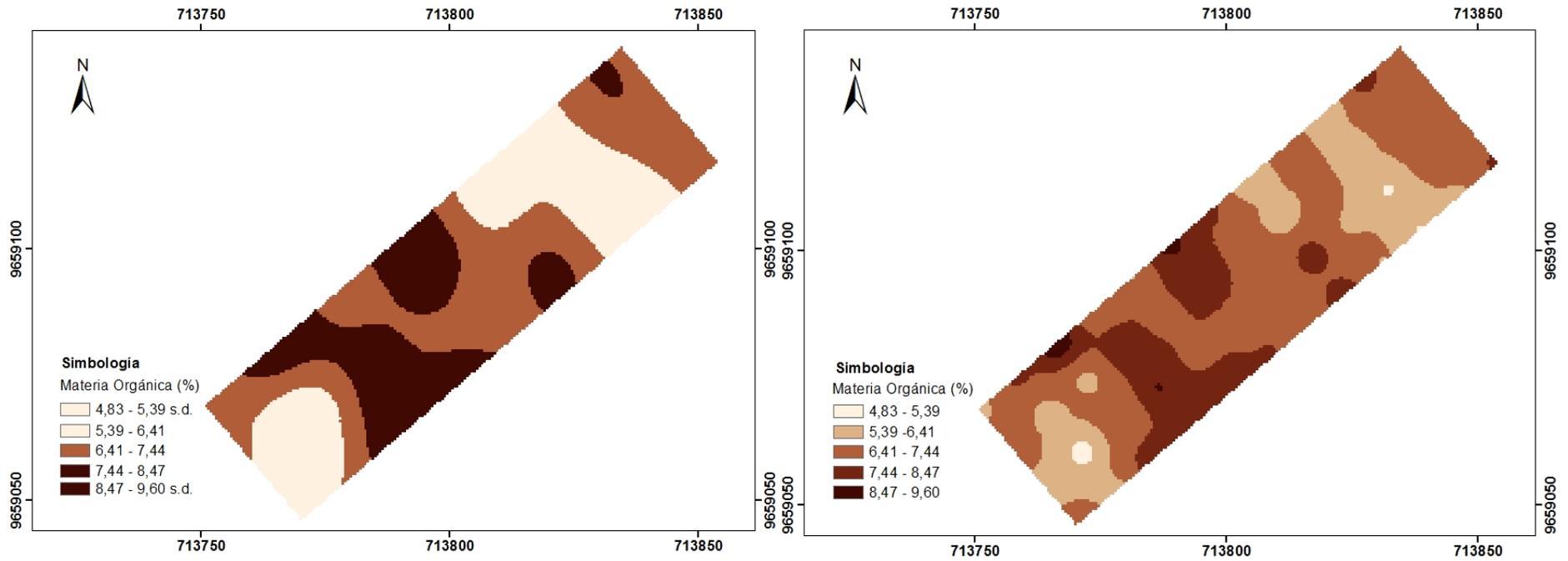


Figura 19. Mapa de interpolación para materia orgánica (%) mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada.



8. CONCLUSIONES

Las propiedades del suelo de la parcela experimental presentaron coeficientes de variación medio y bajo es decir que existe heterogeneidad en el área de estudio; por lo que la escala de muestreo utilizada tuvo la suficiente resolución para detectarla.

La variabilidad espacial encontrada en las propiedades físicas del suelo de la parcela experimental está en función de un gradiente del material parental, se atribuye también a las deposiciones de material aluvial debido a la influencia de la quebrada, siendo que fue más notoria para las características de la textura en la fracción arena y limo.

Los modelos teóricos de mejor ajuste para las variables analizadas fueron el gaussiano, circular, esférico y exponencial.

La mayoría de las propiedades del suelo presentaron rangos superiores a 20 m, siendo que el intervalo de muestreo utilizado permitió identificar la dependencia espacial dentro de la parcela experimental.

Visualizando los mapas generados se aprecian patrones similares de variación con la utilización de los dos métodos de interpolación de las variables interpoladas.

El método de interpolación Kriging Ordinario presentó mayores valores de eficiencia de predicción, aunque para ciertas variables la diferencia no fue muy amplia.



9. RECOMENDACIONES

- Realizar experimentos similares considerando otras escalas de muestreo.
- Conducir el experimento considerando otros horizontes en el perfil del suelo, esto es muy loable debido a la influencia que tiene el horizonte sub superficial en las características hidrofísicas especialmente en la conductividad hidráulica saturada.
- Utilizar la información edafológica generada en la toma de decisiones para el manejo del suelo hacia una agricultura de precisión.



10. BIBLIOGRAFÍA

- Agterberg, F. (1984). Trend surface analysis. In G. L. Gaile & C. J. Willmott (Eds.), *Spatial statistics and models* (pp. 147–171). Connecticut: Springer.
- Arlot, S., & Celisse, A. (2010). A survey of cross-validation procedures for model selection. *Statistics Surveys*, 4, 40–79.
- Arya, L., & Paris, J. (1981). A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, 45(6), 1023–1030.
- Barrios Maestre, R., & Florentino de Andreu, A. (2009). Variabilidad espacial de las propiedades físicas de dos suelos cultivados con palma aceitera en el estado Monagas, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 9(4), 912–924.
- Blake, G., & Hartge, K. (1986a). Bulk Density. In Series Agronomy (Ed.), *Methods of soils analysis part 1, Physical and Mineralogical Methods*. Madison Wisconsin USA.: Soil Science Society of America Journal.
- Blake, G., & Hartge, K. (1986b). Particle density. *Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, 377–382.
- Blanco, A. (2015). *Estudio de la distribución espacial y cartografía digital de algunas propiedades físicas, químicas e hidrodinámicas de suelos de la Cuenca del Segura*. Facultad de Biología. Retrieved from https://digitum.um.es/xmlui/bitstream/10201/46968/1/TESIS_ARANTZAZU_2015.pdf
- Bonneau, M., & Levy, G. (1979). *Assemblage et organisation physique des particules*. Elsevier. Paris: Elsevier-Masson.
- Bouyoucos, G. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464–465.
- Brady, N., & Weil, R. (2002). *The nature and properties of soils*. (Vol. 13). New Jersey: Prentice Hall.



- Brouder, S., Hofmann, B., & Reetz, H. (2001). Evaluating spatial variability of soil parameters for input management. *Better Crops*, 85, 8–11.
- Bruckler, L. (1998). *Transferencias en el suelo*. Paris: Instituto Nacional de Investigación Agronómica.
- Burrough, P., & MacDonnell, R. (1998). *Spatial Information Systems and Geostatistics*. (Oxford University Press, Ed.), *Principles of Geographical Information Systems*. New York.
- Cambardella, C., Moorman, T., Parkin, T., Karlen, D., Novak, J., Turco, R., & Konopka, A. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5), 1501–1511.
- Carvalho, M., Takeda, E., & Freddi, O. (2003). Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 27(4), 695–703.
- Christensen, R. (1991). *Linear models for multivariate, time series and spatial data*. New York: Springer.
- Conte, O., Levien, R., Trein, C., Cepik, C., & Debiasi, H. (2007). Demanda de tração em haste sulcadora na integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo e sua relação com o estado de compactação do solo. *Engenharia Agrícola*, 27(1), 220–228.
- Cucunubá, J., Álvarez, J., & Camacho, J. (2011). Identification of Agronomic Management Units Based on Physical Attributes of Soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 11(1), 87–99.
- Dercon, G., Bussuyt, B., De Bievre, B., Cisneros, F., & Deckers, J. (1998). *Zonificación agroecológica del Austro Ecuatoriano*. (Universidad de Cuenca, Ed.) (4th ed.). Cuenca. Retrieved from http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/zonoficacion_agroecologica_parte_1.pdf



- El-Sayed, E. O. (2012). Improving the Prediction Accuracy of Soil Mapping through Geostatistics. *International Journal of Geosciences*, 3, 574–590.
- Forsythe, W., Sancho, F., & Villatoro, M. (2005). Efecto de la compactación de suelos sobre el rendimiento del maíz en tres localidades de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 29(3), 175–185.
- Franzluebbers, A. (2005). Soil organic carbon sequestration and agricultural greenhouse gas emissions in the southeastern USA. *Soil and Tillage Research*, 83(1), 120–147.
- Gomes, F. (1984). *A estatística moderna na pesquisa agropecuária*. Piracicaba: Potafos.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. New York: Oxford University Press.
- Gotway, C., Ferguson, R., Hergert, G., & Peterson, T. (1996). Comparison of Kriging and inverse-distance methods for mapping soil parameters. *Soil Science Society of America Journal*, 60(4), 1237–1247.
- Gros, A., & Domínguez, A. (1992). *Abonos: guía práctica de la fertilización*. (8th ed.). Madrid: Mundi-Prensa.
- Hans, J. (1994). *Factors of soil formation: a system of quantitative pedology*. (Dover, Ed.). New York: McGraw-Hill.
- Hevesi, J., Istok, J., & Flint, A. (1992). Precipitation Estimation in Mountainous Terrain Using Multivariate Geostatistics. Part I: Structural Analysis. *Journal of Applied Meteorology*, 31(7), 661–676.
- Hudson, B. (1994). Soil organic matter and available water capacity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49(2), 189–194.
- Iqbal, J., Thomasson, J., Jenkins, J., Owens, P., & Whisler, F. (2005). Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 1338–1350.



- Isaaks, E., & Srivastava, R. (1989). *Applied geostatistics*. New York. New York: Oxford University Press.
- Jaramillo, D. (2012). Variabilidad espacial del suelo: Bases para su estudio. *Revista de La Facultad de Ciencias Universidad de Colombia*, 73–87.
- Jaramillo, D., González, H., & Álvarez, F. (2008). Variabilidad espacial de algunas propiedades físico-mecánicas de suelos de textura pesada. *Revista CES*, p. 11.
- Jaramillo, D., Sadeghian, S., & Lince, L. (2012). *Agricultura de precisión en el manejo de la fertilización en el cultivo del café en Colombia. Informe de año sabático*. Universidad Nacional de Colombia-CENICAFÉ. Medellín.
- Johnston, K., Ver Hoef, J., Krivoruchko, K., & Lucas, N. (2001). *Using ArcGIS Geostatistical Analyst* (Vol. 380). New York: Esri Redlands.
- Journel, A., & Huijbregts, C. (1978). *Mining Geostatistics*. London: Academic press.
- Karydas, C., Gitas, I., Koutsogiannaki, E., Lydakís-Simantiris, N., & Silleos, G. (2009). Evaluation of spatial interpolation techniques for mapping agricultural topsoil properties in Crete. *EARSeL eProceedings*, 8(1), 26–39.
- Kerbala University. (2014). A Comparative Study of Interpolation for Mapping Soil Physical Properties. *Journal of Kerbala University*, 12(2), 221–232.
- Kitanidis, P. (1997). Introduction to geostatistics: applications in hydrogeology (p. 249 p.). New York: Cambridge University Press.
- Kravchenko, A., & Bullock, D. (1999). A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agronomy Journal*, 91(3), 393–400.
- Lagacherie, P., & McBratney, A. (2006). Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: Perspectives for digital soil mapping. *Developments in Soil Science*, 31, 3–22.
- Landon, J. R. (1991). *Booker Tropical Soil Manual*. (J. R. Landon, Ed.), New York (2nd ed., Vol. I). Londres: Booker Agriculture International Ltd.



- Logsdon, S., & Cambardella, C. (2000). Temporal changes in small depth-incremental soil bulk density. *Soil Science Society of America Journal*, 64(2), 710–714.
- Lu, G., & Wong, D. (2008). An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Computers & Geosciences*, 34, 1044–1055.
- Matheron, G. (1962). *Traite de Geostatistique Appliquee, Tome I: Memoires du Bureau de Recherches Geologiques et Minieres*. In *Editions Technip* (Vol. 14). Paris.
- Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 58, 1246–1266.
- Matheron, G. (1971). *The Theory of Regionalization Variables and Its Applications* (p. 211). Fontainebleau: Ecole nationale superieure des mines de Paris.
- McKenzie, N., & Ryan, P. (1999). Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*, 89(1), 67–94.
- Meijerink, A., Brouwer, H., Mannaerts, C., & Valenzuela, C. (1994). *Introduction to the use of Geographic Information Systems for practical Hydrology*. Enschede: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC).
- Meshalkina, J., Stein, A., & Ye, D. (1995). Spatial variability of penetration data on Russian plots in different land use. *Soil Technology*, 8(1), 43–59.
- Mitas, L., & Mitasova, H. (1999). *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*. Spatial Interpolation (pp. 481–492). Wiley.
- Montanari, R., Lima, E. de S., Lovera, L., Rios, L., Henrique, A., & Dalchiavon, F. (2013). Correlación entre la productividad de un forraje con las propiedades físicas de un Ultisol en Aquidauana. *Ceres*, 60(1), 102–110.
- Muhammad, A., & Rattan, L. (2009). Tillage and drainage impact on soil quality: II. Tensile strength of aggregates, moisture retention and water infiltration. *Soil and Tillage Research*, 103, 364–372.



- Nalder, I., & Wein, R. (1998). Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92, 211–225.
- Narro, E. (1994). *Física de suelos con enfoque agrícola* (1st ed.). Estado de México: Trillas.
- Nemes, A., & Rawls, W. (2004). Soil texture and particle-size distribution as input to estimate soil hydraulic properties. *Developments in Soil Science*, 30, 47–70.
- Obando, F., Villegas, A., Betancur, J., & Echeverri, L. (2006). Variabilidad espacial de propiedades químicas y físicas en un Typic Udivitrands, arenoso de la región andina central Colombiana. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 59(1), 3217–3235.
- Oliver, M., & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *CATENA*, 113(Supplement C), 56–69.
- Ovalles, F. (1992). *Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad*. (FONAIAP-CENIAP-IIAG, Ed.). Maracay: Instituto de Investigaciones Agrícolas Generales.
- Paz-Gonzalez, A., Vieira, S., & Taboada, M. (2000). The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. *Geoderma*, 97(3), 273–292.
- Pikul, J., & Zuzel, J. (1994). Soil crusting and water infiltration affected by long-term tillage and residue management. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1524–1530.
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. (3rd ed.). Madrid: Mundi-Prensa.
- Quine, T., & Zhang, Y. (2002). An investigation of spatial variation in soil erosion, soil properties, and crop production within an agricultural field in Devon, United Kingdom. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57, 50–60.



- Rawls, W. J. (1983). Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Journal Soil Science*, 135, 123–125.
- Reeves, D. (1997). The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 43(1–2), 131–167.
- Regalado, C., & Ritter, A. (2005). Técnicas geoestadísticas para caracterizar la variabilidad espacial de la hidrofobicidad en la zona no saturada de una cuenca forestal. *Estudios de La Zona No Saturada Del Suelo*, 7, 235–240.
- Ruiz, N., Velasquez, E., Pando, A., Decaëns, T., & Dubs, F. (2009). Indicateurs synthétiques de la qualité du sol. *Etude et Gestion Des Sols*, 16, 323–338.
- Samira, I., Ahmed, D., & Lhoussaine, M. (2014). Soil fertility mapping: comparison of three spatial interpolation techniques. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(11), 1635–1643.
- Santos, A., Pallone, W., Ungaro, M., Lino, A., & Radin, B. (2003). Prospecção de zonas potenciais para manejo diferenciado em agricultura de precisão utilizando-se padrões de solo-planta-clima. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental*, 7(3), 463–468.
- Schimel, D., Melillo, J., Tian, H., McGuire, D., Kicklighter, D., Kittel, T., ... Sykes, M. (2000). Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the United States. *Science*, 287(5460), 2004–2006.
- Serafim, M., Vitorino, A., Peixoto, P., Souza, C., & Carvalho, D. (2008). Intervalo hídrico ótimo em um Latossolo Vermelho distroférrico sob diferentes sistemas de produção. *Engenharia Agrícola*, 28(4), 654–665.
- Shi, W., Liu, J., Du, Z., Song, Y., Chuanfa, C., & Yue, T. (2009). Surface modelling of soil pH. *Geoderma*, 150(1), 113–119.
- Six, J., Conant, R., Paul, E., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241(2), 155–176.



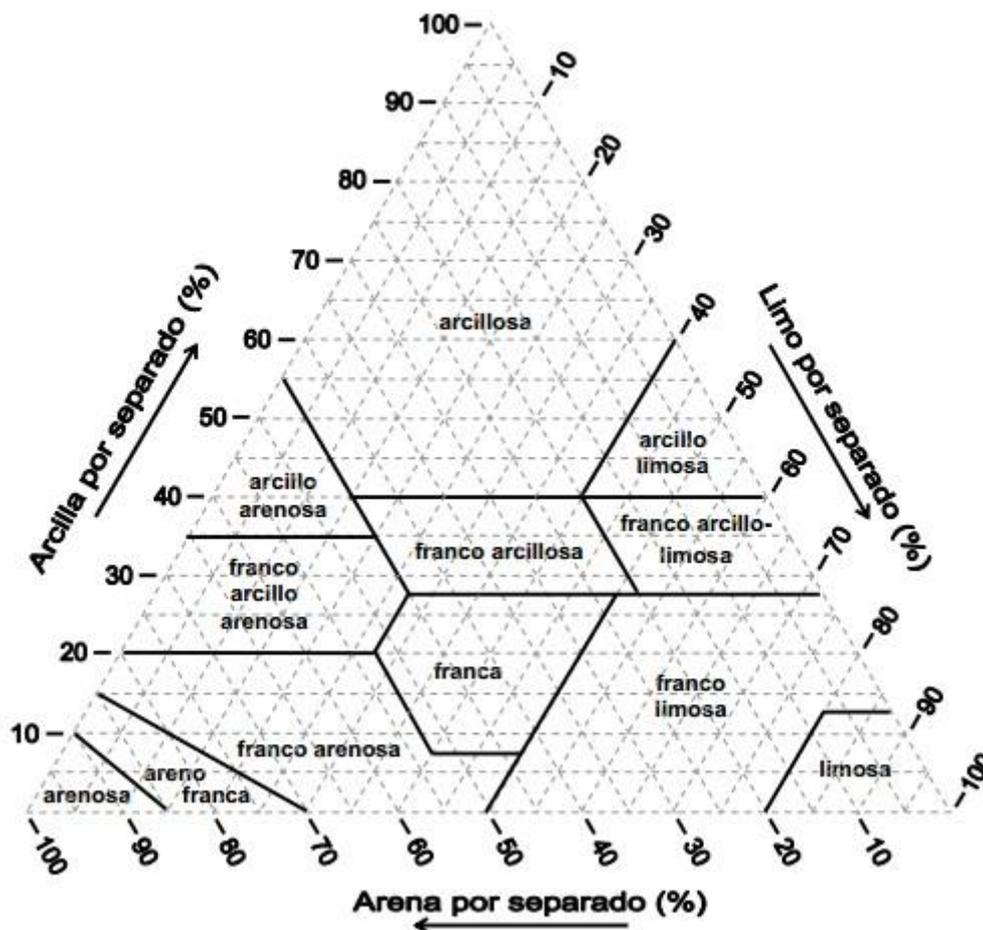
- Soane, B., Blackwell, P., Dickson, J., & Painter, D. (1980). Compaction by agricultural vehicles: A review I. Soil and wheel characteristics. *Soil and Tillage Research*, 1(1), 207–237.
- Stelluti, M., Maiorana, M., & Giorgio, D. (1998). Multivariate approach to evaluate the penetrometer resistance in different tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 46(3), 145–151.
- Swarowsky, A., Dahlgren, R., Tate, K., Hopmans, J., & O'Geen, A. (2011). Catchment-scale soil water dynamics in a Mediterranean-type oak woodland. *Vadose Zone Journal*, 10(3), 800–815.
- Taylor, H., Roberson, G., & Parker, J. (1966). Soil strength-root penetration relations for medium-to coarse textured soil materials. *Soil Science*, 102(1), 18–22.
- Timm, L., Pires, L., Roveratti, R., Arthur, R., Reichardt, K., Oliveira, J., & Bacchi, O. (2006). Field spatial and temporal patterns of soil water content and bulk density changes. *Scientia Agricola*, 63(1), 55–64.
- Ulloa, M. (2002). *Aplicación de la Geoestadística al Estudio de la Fertilidad del Suelo*. Universidad de Coruña.
- USDA. (1975). Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. In SCS. *USDA (Agricutult, p. 754 pp)*. Washington DC: Soil Conservation Service U.S. Department of Agriculture.
- Van Ranst, E. (1997). *Tropical Soils*. Belgica: Universidad de Ghent.
- Voltz, M., & Webster, R. (1990). A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. *European Journal of Soil Science*, 41(3), 473–490.
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38.
- Webster, R. (2000). Is soil variation random? *Geoderma*, 97(3), 149–163.



- Webster, R., & Oliver, M. (1990). *Statistical methods in soil and land resource survey*. Oxford: Oxford University Press (OUP).
- Webster, R., & Oliver, M. (2001). *Geostatistics for Environmental Scientists*. (J. Wiley & Sons, Eds.) (2nd ed.). Gran Bretaña: International, Padstow, Cornwall.
- Webster, R., & Oliver, M. (2007). *Geostatistics for Environmental Scientists*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Zhu, A., Liu, F., Li, B., Pei, T., Qin, C., Liu, G., ... Zhou, C. (2010). Differentiation of soil conditions over low relief areas using feedback dynamic patterns. *Soil Science Society of America Journal*, 74(3), 861–869.
- Zou, C., Sands, R., Buchan, G., & Hudson, I. (2000). Least limiting water range: A potential indicator of physical quality of forest soils. *Soil Research*, 38, 947–958.

11. ANEXOS

Anexo 1. Triángulo de clases texturales del suelo.



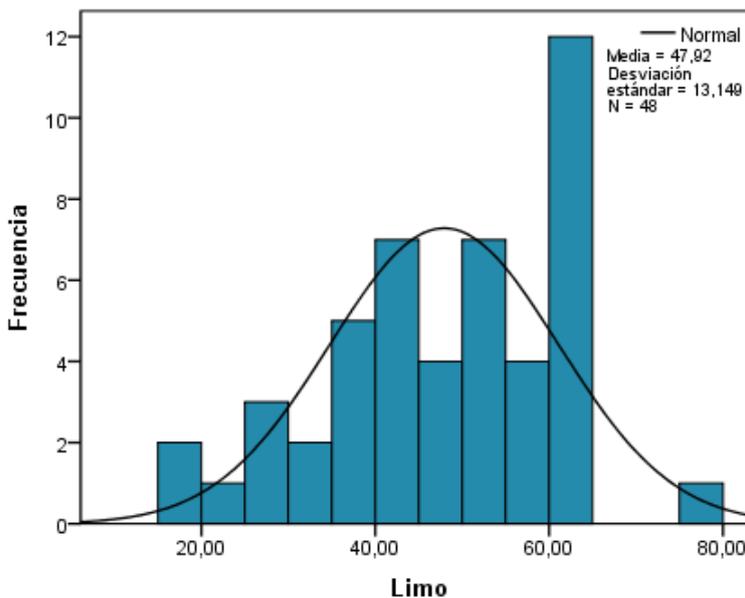


Anexo 2. Clasificación textural del suelo.

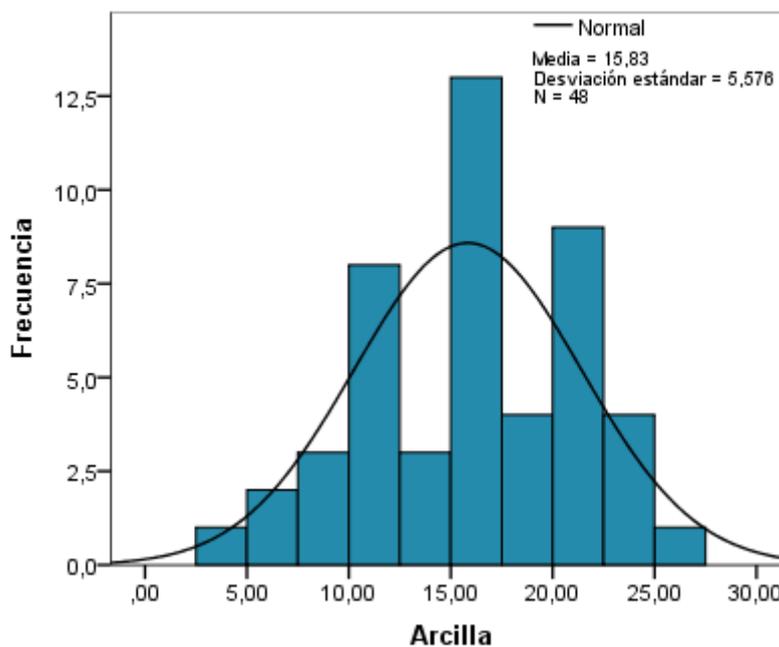
N°	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural	Da	MO	Porosidad
A1	37.438	41.552	21.011	Franco	1.039	6.540	53.968
A2	42.084	44.753	13.164	Franco	0.958	6.190	57.577
A4	40.006	49.063	10.931	Franco	0.781	6.210	65.437
A9	28.864	49.433	21.702	Franco	0.900	8.170	60.145
A1	37.009	47.762	15.228	Franco	0.941	8.270	58.330
A1	45.142	44.399	10.459	Franco	1.002	7.090	55.628
B3	41.901	37.690	20.408	Franco	1.062	7.380	52.972
B4	47.508	42.087	10.406	Franco	1.136	7.610	49.717
B5	44.306	44.582	11.111	Franco	1.015	7.940	55.075
B7	42.691	41.603	15.706	Franco	1.122	5.620	50.337
B2	33.877	44.267	21.856	Franco	0.931	7.610	58.763
B2	36.919	47.137	15.944	Franco	1.090	7.090	51.737
A3	28.452	52.755	18.793	Franco limoso	0.943	6.970	58.241
A5	17.372	61.556	21.072	Franco limoso	1.009	6.190	55.341
A6	30.917	52.382	16.701	Franco limoso	1.064	4.830	52.905
A7	30.917	52.665	16.418	Franco limoso	1.018	6.000	54.920
A1	25.049	51.621	23.330	Franco limoso	1.023	6.500	54.676
A1	17.164	61.549	21.287	Franco limoso	0.964	8.280	57.333
A1	15.601	62.372	22.027	Franco limoso	0.939	8.520	58.418
A1	17.788	60.114	22.098	Franco limoso	0.996	8.210	55.916
A1	23.018	60.997	15.985	Franco limoso	1.052	7.150	53.414
A2	20.422	60.418	19.160	Franco limoso	0.963	7.550	57.356
A2	26.582	56.771	16.647	Franco limoso	0.996	7.150	55.894
A2	26.582	56.771	16.647	Franco limoso	1.018	8.430	54.942
A2	32.092	54.131	13.778	Franco limoso	1.023	8.900	54.699
B1	15.472	76.881	7.647	Franco limoso	0.993	7.170	56.049
B2	14.742	61.868	23.390	Franco limoso	1.063	6.410	52.927
B6	28.039	51.496	20.465	Franco limoso	1.010	8.090	55.274
B9	25.084	55.525	19.391	Franco limoso	1.033	6.400	54.278
B1	23.403	60.769	15.828	Franco limoso	1.141	6.280	49.495
B1	30.857	53.235	15.907	Franco limoso	1.198	6.530	46.949
B1	12.987	60.344	26.669	Franco limoso	1.052	5.340	53.414
B1	19.805	61.257	18.939	Franco limoso	1.166	5.270	48.388
B1	15.811	60.240	23.949	Franco limoso	1.037	6.300	54.063
B1	24.842	59.331	15.828	Franco limoso	0.995	6.780	55.939
B2	23.018	60.295	16.687	Franco limoso	1.036	7.310	54.125
A8	55.828	33.383	10.790	Franco	0.976	7.600	56.780
A1	61.325	28.479	10.196	Franco	1.015	6.060	55.075
A1	52.322	38.963	8.715	Franco	0.974	9.600	56.868
A1	63.098	34.032	2.870	Franco	1.160	6.890	48.654
A2	56.248	28.752	15.000	Franco	1.169	6.390	48.233
B8	69.293	18.207	12.500	Franco	1.158	5.540	48.720
B1	68.424	23.651	7.926	Franco	1.239	6.740	45.133
B1	64.916	29.896	5.188	Franco	1.174	5.900	47.990

B1	53.508	35.630	10.862	Franco	1.264	5.660	44.026
B1	56.734	37.310	5.956	Franco	1.153	7.390	48.921
B2	52.641	36.819	10.541	Franco	0.938	7.810	58.477
B2	61.718	22.717	15.565	Franco	1.145	7.210	49.293

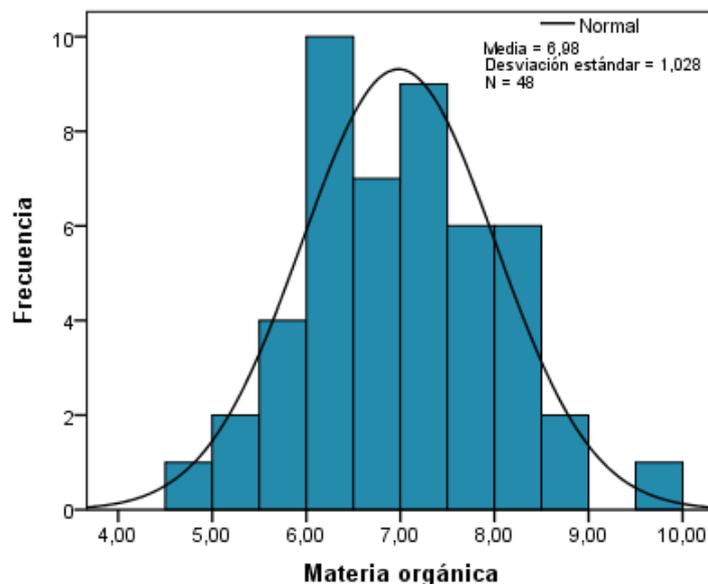
Anexo 3. Histograma para el conjunto de datos de limo.



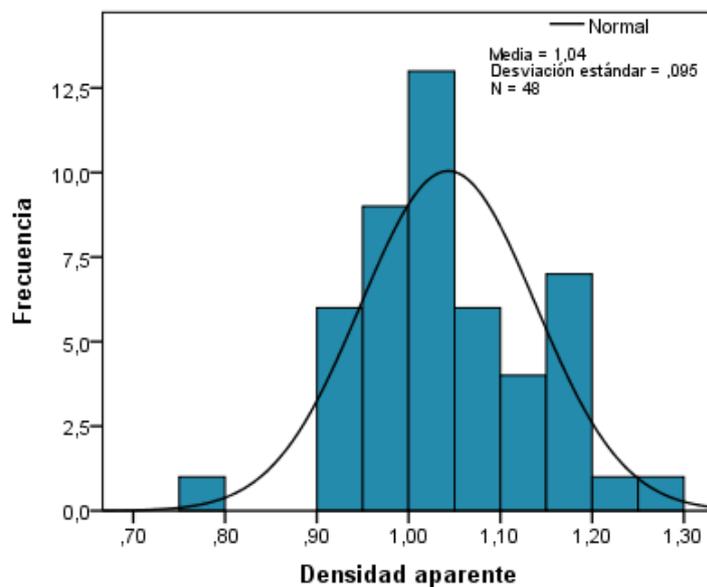
Anexo 4. Histograma para el conjunto de datos de arcilla.



Anexo 5. Histograma para el conjunto de datos de materia orgánica.



Anexo 6. Histograma del conjunto de datos para densidad aparente.



Anexo 7. Análisis de varianza para las variables de estudio mediante el efecto longitudinal.

Variabes	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F Calculado	p-valor
Arena	1172.897	11	106.627	.336	.972
Limo	1193.380	11	108.489	.563	.845
Arcilla	73.429	11	6.675	.173	.998
Da	.199	11	.018	2.863	.008
MO	23.629	11	2.148	2.969	.007



Anexo 8. Prueba de Tukey al 5% para densidad aparente mediante análisis por columnas.

Tratamientos (Columnas)	Medias	Rangos
J	1.640	a
I	1.153	a
H	1.076	ab
G	1.064	ab
E	1.055	ab
L	1.051	ab
K	1.031	ab
B	1.017	ab
D	1.001	ab
F	1.000	ab
C	.978	ab
A	.930	b

Anexo 9. Prueba de Tukey al 5% para Materia Orgánica mediante análisis por columnas.

Tratamientos (Columnas)	Medias	Rangos
F	8.008	a
D	7.990	a
C	7.583	ab
L	7.305	ab
E	7.210	ab
G	7.143	ab
K	7.070	ab
H	6.798	ab
I	6.488	ab
A	6.478	ab
B	6.155	ab
J	5.543	b

Anexo 10. Analisis de varianza para las variables de estudio mediante forma transversal.

Variable	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F. Calculado	p-valor
Arena	7759.611	3	2586.537	23.486	.000
Limo	4278.310	3	1426.103	16.307	.000
Arcilla	532.180	3	177.393	8.401	.000
Da	.050	3	.017	1.926	.139
MO	1.779	3	.593	.545	.654



Anexo 11. Prueba de Tukey al 5% para arena mediante análisis por filas.

Tratamientos (Filas)	Medias	Rangos
D	7,338	a
C	6,409	a
B	4,930	b
A	4,795	b

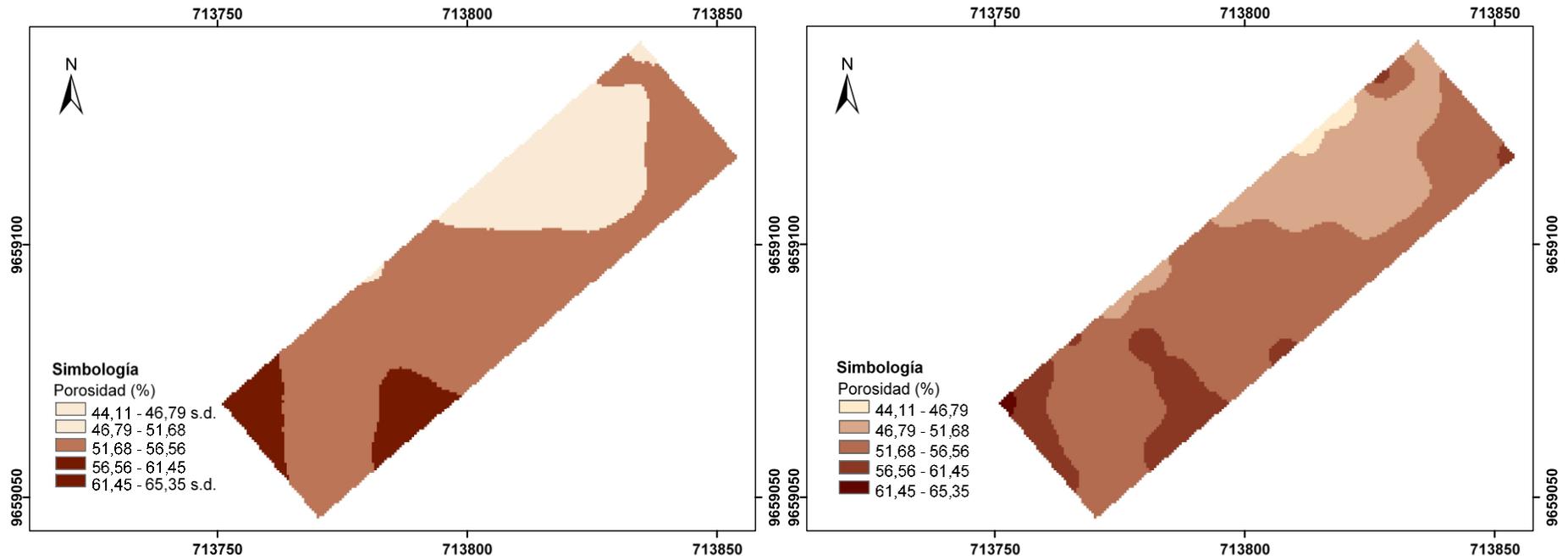
Anexo 12. Prueba de Tukey al 5% para limo mediante análisis por filas.

Tratamientos (Filas)	Medias	Rangos
B	56,993	a
A	56,372	a
C	44,142	b
D	34,190	b

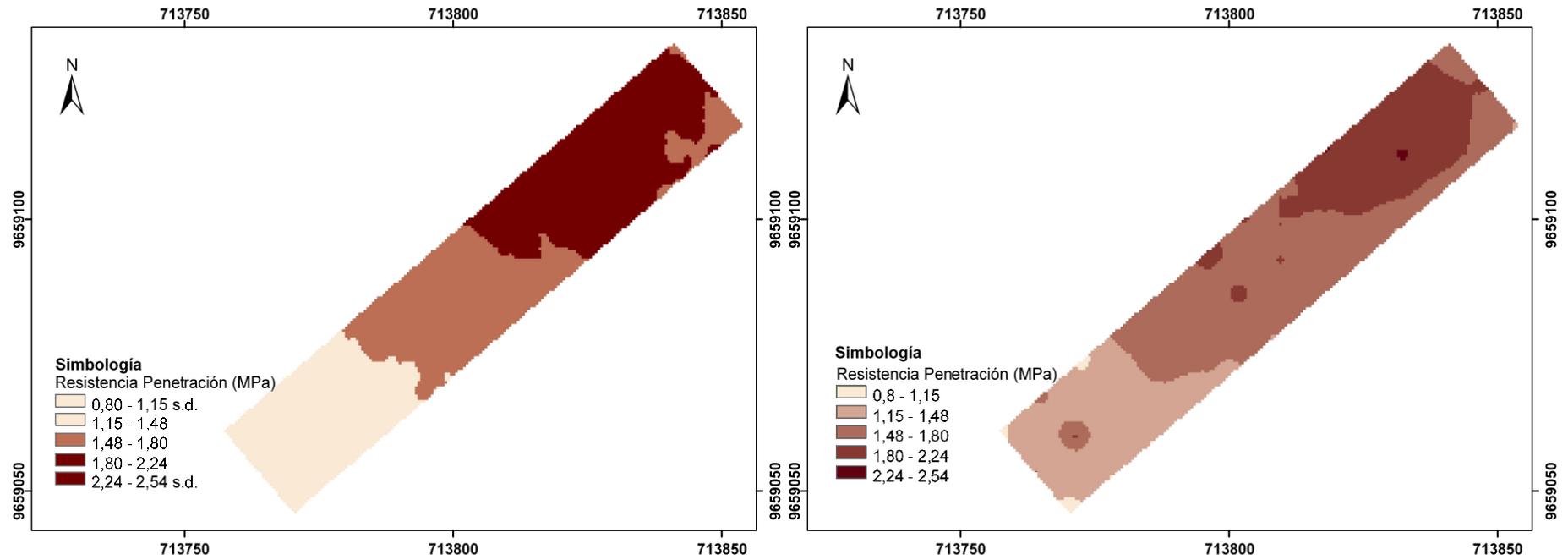
Anexo 13. Prueba de Tukey al 5% para arcilla mediante análisis por filas.

Tratamientos (Filas)	Medias	Rangos
A	19,746	a
B	18,249	ab
C	13,904	bc
D	11,420	c

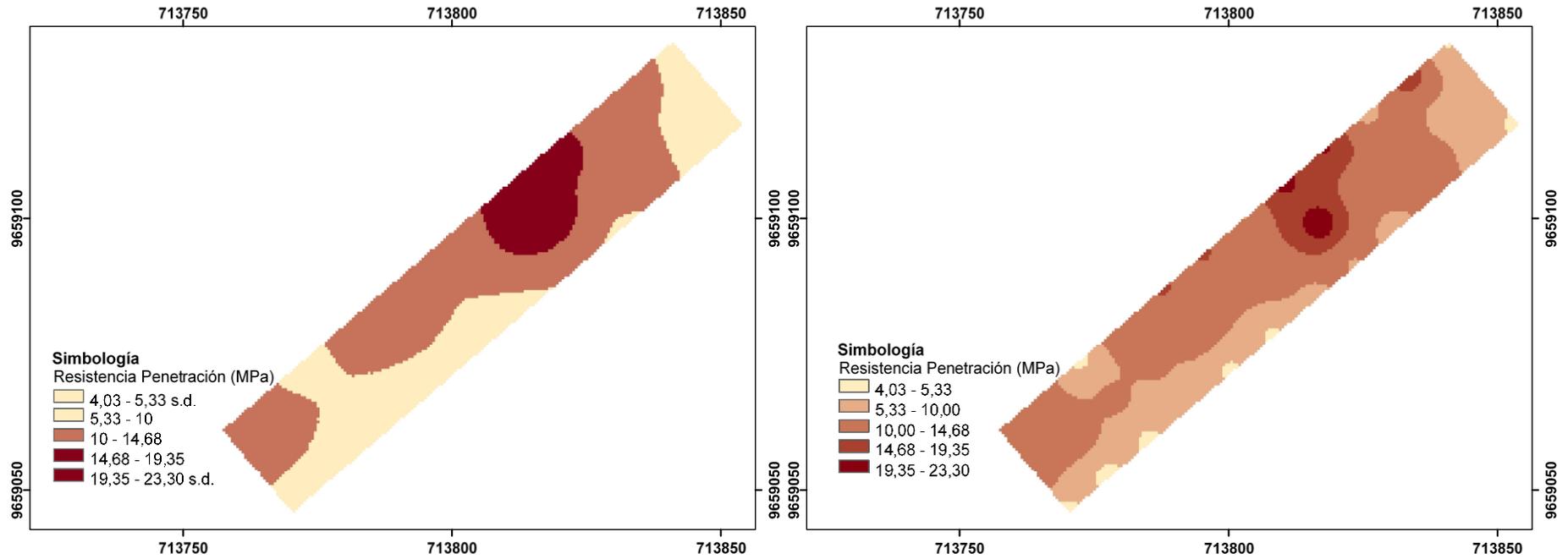
Anexo 14. Mapas de interpolación para porosidad (%) mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada.



Anexo 15. Mapas de interpolación para resistencia a la penetración (MPa) a 10 cm de profundidad mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada.



Anexo 16. Mapas de interpolación para exp (resistencia a la penetración) (MPa) a 20 cm de profundidad mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada.



Anexo 17. Mapas de interpolación para resistencia a la penetración (MPa) a 30 cm de profundidad mediante Kriging Ordinario y Distancia Inversa Ponderada.

