

**VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA RESISTENCIA MECÁNICA A LA PENETRACIÓN
DEL SUELO. “CASO ESTUDIO: CENTRO AGROPECUARIO MARENGO - SABANA DE
BOGOTÁ”.**

**SPATIAL VARIABILITY OF MECHANICAL RESISTANCE TO SOIL
PENETRATION “CASE STUDY: AGRICULTURAL CENTER MARENGO –
BOGOTÁ”**

KAREN ELIANA ORDUZ SALAMANCA
Ingeniera Agrícola

**Opción de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Especialista en Geomática**

Modalidad: Proyecto de Grado

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA
BOGOTÁ D.C., 2014**

**VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA RESISTENCIA MECÁNICA A LA
PENETRACIÓN DEL SUELO. “CASO ESTUDIO: CENTRO AGROPECUARIO
MARENGO - BOGOTÁ”**

**SPATIAL VARIABILITY OF MECHANICAL RESISTANCE TO SOIL
PENETRATION “CASE STUDY: AGRICULTURAL CENTER MARENGO –
BOGOTÁ”**

KAREN ELIANA ORDUZ SALAMANCA

Ing. Agrícola, Investigadora, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia
Keorduzs@unal.edu.co

RESUMEN

La resistencia mecánica a la penetración (RP) es un indicador del proceso de compactación de un suelo, que representa limitantes en la producción agrícola, el estudio se lleva a cabo en el Centro Agropecuario Marengo ubicado en Mosquera – Cundinamarca, se establece muestreo aleatorio de 85 puntos en 90 ha, con distancias que variaron entre 50 y 100 m entre punto y punto de muestreo realizando medición *in situ* utilizando un penetrológico, evaluando desde 0.05 m hasta 0.30 m de profundidad, el objetivo de este trabajo es estudiar la compactación del suelo mediante la evaluación y medición de la resistencia mecánica a la penetración usando técnicas estadísticas y geoestadísticas, mostrando dependencia espacial ajustado al modelo exponencial, mediante interpolación kriging establecer áreas afectadas por problemas de compactación.

Palabras clave: Compactación, variabilidad espacial, dependencia espacial, geoestadística, semivariograma, kriging.

ABSTRACT

The mechanical Penetration Resistance (PR) is an indicator of soil compaction process, that represent constraints on agricultural production, the study was carried out in the Agricultural Center Marengo located in Mosquera - Cundinamarca, random sampling is set to 85 points in 90 ha, with distances ranging from 50 to 100 m between points sampling performing in situ measurement using a Penetrologger,

evaluating from 0.05 m to 0.30 m depth, the objectives of this work were study the soil compaction by evaluating and measuring the mechanical penetration resistance with statistics and geostatistical techniques showed spatial dependence, with adjustment to exponential model, by kriging interpolation establishing areas affected with compaction problem.

Keywords: Compaction, spatial variability, spatial dependence, geostatistics, semivariogram, kriging.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento y desarrollo de las plantas dependen de un conjunto de factores ambientales que interactúan para favorecer o afectar el proceso de vida de un cultivo o planta. El desarrollo radicular componente fundamental para la vida de las plantas cuando es afectado por la compactación se refleja en reducción de aireación, alteración en el movimiento de agua en el suelo y disponibilidad de nutrientes Da Silva [1].

En algunos casos la disminución del espacio poroso del suelo produce una pobre aireación y durante la época lluviosa los poros finos que quedan en el suelo producto de la reducción de la porosidad “densificación” se saturan presentándose encharcamiento y aparición del proceso de gleización Forsythe et al [2]. Esto genera detrimento de las condiciones químicas, físicas y biológicas del suelo, observándose en deficiencias nutricionales, pH, drenaje insuficiente, baja tasa de oxígeno, temperaturas no adecuadas, compactación del suelo y doblez radicular Da Silva [1].

Un indicador de compactación es la Resistencia a la penetración (RP). Blanco [3], estudio la relación entre densidad aparente y RP del suelo como indicadores de la compactación del suelo presentando correlación significativa manteniendo condiciones particulares de muestreo.

La RP es un índice que puede ser evaluado *in situ* sencilla y rápidamente, permitiendo realizar un alto número de mediciones. Nacci & Pla [4] señalan que las lecturas obtenidas por equipos diferentes son difícilmente comparables, ya que la resistencia a la penetración es influida por las características del suelo, equipo, y forma de rotura del suelo, teniendo en cuenta que diferentes autores consideran importante la humedad del suelo para el momento de las lecturas. En este sentido, no es importante el tipo de equipo que se utilice para obtener la información, pues un equipo poco costoso como el penetrómetro de impacto puede ser utilizado tan

efectivamente como el más costoso que incluya registros automáticos y computarizados.

Evaluar la variabilidad espacial de la RP permite definir el mejor uso del suelo para zonas que se encuentren en riesgo y establecer un manejo específico. Las herramientas geoestadísticas permiten evaluar la dependencia espacial que tenga esta variable en el espacio evaluado bajo las condiciones del terreno presentes al momento del muestreo. Para un mejor entendimiento del suelo se verifica su variabilidad y dependencia espacial mediante el uso de técnicas geoestadísticas, estadística clásica y kriging nos permite identificar zonas compactadas y realizar un manejo localizado de este fenómeno Ramírez López et al [5].

Orjuela-Mata et al [6] realizaron un análisis espacial en un oxisol considerando la importancia de conocer la variabilidad de los atributos del suelo, para conocer el comportamiento y apoyar la toma de decisiones bajo la concepción de agricultura de precisión.

1. ESTADO DEL ARTE

La compactación del suelo es un proceso en el que las partículas que constituyen la fracción sólida se disponen en capas que produce una disminución del espacio poroso. Es una limitante en la producción agrícola que se ha estudiado desde varias décadas. Veihmeyer et al [7] usaron la densidad aparente como índice de la penetrabilidad del suelo, y en trabajos con girasoles se encontró que ninguna raíz penetraba suelos con densidad aparente mayor de 1.90 g cm^{-3} , determinando que la densidad aparente permite identificar capas que impiden el crecimiento radical.

La densidad aparente y la RP son propiedades que son utilizadas para evaluar la degradación por compactación que presenta el suelo. Los resultados de la evaluación de estos parámetros se caracterizan por una elevada variabilidad espacial debido a las variaciones espaciales de las condiciones ambientales del muestreo, Blanco [3].

Los diferentes tipos de suelo tienen características que permiten diferenciarlos en órdenes, cada uno de estos presenta propiedades físicas diferentes por su clima, relieve, material parental y demás. Núñez et al [8] realizaron un estudio de resistencia a la penetración en vertisoles usando un penetrómetro de impacto en tres áreas, una en barbecho, otra sembrada en caña por más de 15 años y la última en proceso de reconversión, encontrando que las áreas en barbecho y caña presentaban un alto grado de compactación, con valores de resistencia a la penetración que alcanzaban valores de 5 MPa, a partir de los 5 cm de profundidad

por la ausencia de labores culturales. En el área de reconversión presenta valores más bajos en los primeros 30 cm, alcanzando valores hasta 4 MPa.

La dureza del suelo puede ser medida con un penetrómetro que mide la combinación de falla tangencial, compactación y flujo plástico. El valor crítico para esta variable propuesto por Taylor et al [9] ha sido de 2,5 MPa, mientras que Forsythe [10] propuso un valor de 2.96 MPa, como indicador de restricción al desarrollo radicular a capacidad de campo, pues el porcentaje de penetración de raíces pivotantes disminuyeron drásticamente independientemente del material del suelo. Henríquez et al [11] evaluaron el uso de dos tipos de penetrómetro de cono con diámetros diferentes donde se encontró que el valor de RP en la superficie duplicaba el valor obtenido a los 15 cm. Ambos equipos suministran valores significativamente diferentes pero presentan una tendencia, por lo que la diferencia entre valores se explica por el diámetro del cono utilizado.

Las propiedades del suelo nos permiten conocer el comportamiento, relación e importancia en el manejo. Una técnica para llevar a cabo el estudio de la variabilidad espacial del suelo es el análisis de semivarianza, cuyo producto final puede ser el modelo teórico denominado como semivariograma. Este modelo teórico relaciona la variación de los valores medios de la varianza, con diferentes distancias entre puntos de muestreo. Cuando una variable tiene dependencia espacial, la semivarianza aumenta a medida que aumenta la distancia entre muestras, Jaramillo [12].

Autores como Ramírez-López et al. [5] evaluaron la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración (RP) en un Oxisol de los llanos orientales, y su relación con la densidad aparente, la densidad real, la porosidad total y los contenidos de arena, limo y arcilla, para establecer zonas donde se pueden presentar limitantes para el desarrollo de cultivos. Estos autores encontraron que las propiedades evaluadas presentaban dependencia espacial a una profundidad entre 0 y 0.10 m, pero no a profundidades entre 0.10 y 0.20 m, concluyendo que algunos atributos del suelo presentan semivariogramas con efecto pepita puro, por lo que la confiabilidad de los datos estimados disminuye, al ser representados en mapas.

El grado de dependencia espacial se establece al hallar el porcentaje de la variable aleatoria (Pepita) de una variable dentro de la variabilidad total (meseta) que ella presenta. Cambardella et al. [13] establecieron diferentes clases de dependencia espacial, donde valores inferiores al 25% se considera como una fuerte dependencia espacial, moderada si esta entre 25-75% y débil si el valor es inferior al 75%.

Al evaluar la variabilidad como característica intrínseca de cada propiedad, su comportamiento es específico para cada condición ambiental, de suelo, de uso y de manejo. Cuando el valor que toma una propiedad en un sitio depende de la distancia y dirección en la cual se ubica con respecto a otro sitio vecino, se tiene una variable con dependencia espacial. Para el estudio de estas variables se utilizan un grupo de herramientas estadísticas conocidas como Geoestadística o Estadística espacial. Jaramillo [12].

El semivariograma representa un índice de cambio de una variable con la distancia. Su forma describe el patrón de variación espacial en términos de su magnitud y forma general. La pendiente del semivariograma indica la intensidad de cambio de la variable analizado con la distancia al mismo tiempo que el porcentaje de disminución en la dependencia espacial. La Figura 1 representa los parámetros del semivariograma, grafica que relaciona los valores promedios de la semivarianza con la distancia entre muestras en las que se realizó el estudio.

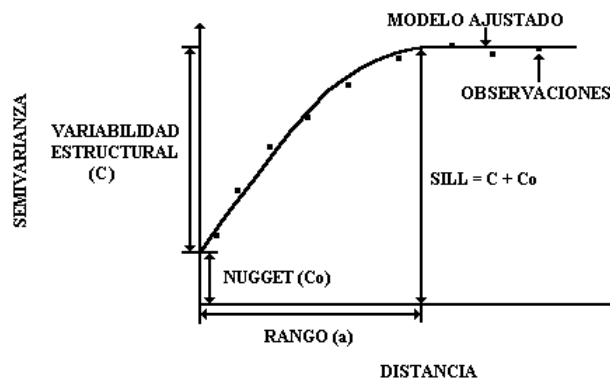


Figura 1. Esquema de los parámetros del semivariograma

Fuente: Variabilidad espacial de suelos: Bases para su estudio, Jaramillo 2012

Cada parámetro caracteriza la dependencia espacial de la variable:

Pepita (C_0): Semivarianza en cero "0", representa pequeñas variaciones o errores, *Meseta* (*sill*): Máximo valor o semivarianza que alcanza un semivariograma, *Rango* (a): Lag o *distancia* a la que la meseta es alcanzada define el límite de la dependencia espacial, Ginzo et al [14]. El rango se interpreta como la zona de influencia. Cuanto más pequeño sea el rango, más cerca se está del modelo de independencia espacial.

En el estudio realizado por Mogollón [15] sobre el comportamiento espacial de la RP y su relación con propiedades físicas encontró ajuste a modelos exponenciales en lotes de pasturas con R^2 medio de 0.734, en lotes preparados se evidenció falta de ajuste en profundidades entre 0.09 y 0.15 m, debido a la influencia de la preparación del terreno presentando valores totalmente aleatorios.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se describirá los materiales y métodos utilizados en la realización del trabajo.

2.1. Área de Estudio

El estudio fue desarrollado en el año 2013, en el Centro de Investigación Agropecuario Marengo (CAM) de la Universidad Nacional de Colombia, localizado en el municipio de Mosquera, Cundinamarca - Colombia, ($4^{\circ} 42''$ N de latitud Norte, $74^{\circ} 12''$ W de longitud oeste) altitud de 2543 msnm, con precipitación entre 500 y 1000 mm, régimen de lluvias bimodal máximos en abril y octubre, temperatura media anual de 13.4°C , clasificado como zona de vida de bosque seco montano bajo. El suelo estudiado pertenece a la serie Marengo y serie Mosquera, con texturas franco limosas y franco arcillosas, pendientes inferiores al 1%. El suelo es un Andisol con un horizonte A espeso y oscuro originado de sedimentos lacustres, drenaje natural entre pobre e imperfecto, con problemas de salinidad y bajos contenidos de sodio (IGAC, 1977).

2.2. Levantamiento de datos

Se realizó muestreo aleatorio de 85 puntos en 90 ha, con distancias que variaron entre 50 y 100 m entre punto y punto de muestreo, cuya distribución se puede observar en la Figura 2 donde se muestra el perímetro del predio donde se realizó el muestreo.

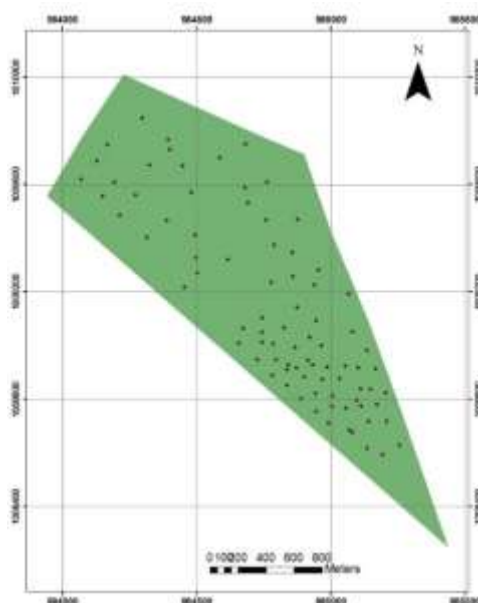


Figura 2. Distribución del muestreo (CAM – Mosquera - Cundinamarca, Colombia)

Fuente: Elaboración Propia

En cada punto de muestreo se realiza 3 lecturas de resistencia mecánica a la penetración con un penetrológico (marca Eijkelkamp), el cual mide el esfuerzo realizado en Mega Pascales (MPa) para introducir una varilla de sondeo con punta cónica de acero inoxidable de 2 cm de diámetro en la base, conectado al sensor de fuerza, realizando medición *in situ* hasta una profundidad de 0.30 m, profundidad que está dentro del rango de trabajo de las herramientas agrícolas de labranza, González et al [16], el muestreo se realizó en el mes de diciembre de 2013 la figura 3 muestra imágenes del muestreo. Algunas zonas no se evaluaron por presencia de niveles freáticos superficiales, razón por la cual se realizó el muestreo de forma aleatoria.



Figura 3. Toma de Puntos de Resistencia a la Penetración en diferentes lotes de CAM – Mosquera – Cundinamarca, Colombia
Fuente: Elaboración propia

2.3. Análisis estadístico

Los datos obtenidos de la variable RP se consideraron para 6 profundidades desde 0,05 m hasta 0,30 m. Para cada profundidad se realizó un análisis de medidas de tendencia central (media, mediana, mínimo, máximo) de variación (desviación estándar y coeficiente de variación) y de forma (asimetría y curtosis)

2.4. Obtención del semivariograma

Para el análisis geoestadístico los datos deben ser al menos simétricos y aproximarse a la distribución normal, donde se observe la proporcionalidad de la variación de los datos, pues esto permite tener varianzas y medias homogéneas en todos los grupos de distancias definidos, Jaramillo [12]. Se realizó prueba Chi-cuadrado, tendencia y anisotropía a las diferentes profundidades a la que la variable fue evaluada antes de utilizar las técnicas geoestadísticas, verificando que los datos presentan distribución normal.

El análisis de variabilidad espacial fue realizado utilizando la semivarianza Ecuación (1), con base en las presuposiciones de la hipótesis intrínseca, es decir, se quiere

probar que los datos son independientes de la localización pero presentan dependencia respecto a la separación, utilizando el programa GS+. El programa GS+ aplica estas técnicas geoestadísticas para analizar y predecir los valores de una variable distribuida espacialmente, de esta manera provee herramientas para analizar la Resistencia a la Penetración en la zona de muestreo, empleando la técnica de semivarianza y kriging.

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

donde $\gamma(h)$ es la semivarianza estimada; $N(h)$ representa el número de pares de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$ separados por un vector (h) . De esta manera es posible realizar el ajuste a un modelo matemático que represente la variabilidad espacial de las propiedades del suelo.

La semivarianza determina la variación de una propiedad entre pares de observación y se grafica mediante un semivariograma. Una vez generado, se procede a interpolar mediante kriging generando valores en áreas cercanas al punto de muestreo, Becerra, et al [17].

2.5. Obtención de mapas por interpolación tipo kriging

A partir de los modelos de semivariogramas que expresaron dependencia espacial, se realiza la interpolación por el método de kriging ordinario, utilizado para hacer predicción en sitios no muestreados, presentando los resultados mediante mapas de contorno. Este procedimiento fue realizado con el programa ArcGIS 10.1, permitiendo una visualización de la variación de RP en el perímetro del CAM – Mosquera - Cundinamarca.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

Siguiendo la metodología al realizar el análisis estadístico obtenemos la Tabla 1 que presenta los parámetros estadísticos por cada profundidad.

Los promedios de RP para las profundidades 0.00 – 0.05, 0.05 - 0.10, 0.10 – 0.15, 0.15 – 0.20, 0.20 – 0.25, 0.25 – 0.30 m fueron respectivamente 1.10, 1.29, 1.29, 1.28, 1.27, 1.27 MPa valores que no indican restricciones en el desarrollo radicular de los cultivos. Evaluando los valores máximos se observó que se encuentran entre 2.05 – 2.66 MPa indicando que el suelo estudiado tiene zonas compactadas, comparando con datos obtenidos por Taylor et al, [9] y Forsythe [10] que reportan valores de RP por encima de 2.5 MPa como indicador de restricción en el crecimiento radicular. Los valores mínimos se encuentran entre 0.20 y 0.21 MPa, comparando con Mogollon [15] obtuvo valores más altos de RP, puede ser debido

a la preparación de los suelos para la siembra de cultivos, buscando proveer condiciones apropiadas para el desarrollo de las plantas.

Tabla 1. Análisis descriptivo de la RP* de 5 a 30 cm

Parámetro	Tabla de Parámetros Estadísticos					
	RP 5 cm	RP 10 cm	RP 15 cm	RP 20 cm	RP 25 cm	RP 30 cm
Media (MPa)	1.17	1.32	1.28	1.27	1.26	1.25
Mediana (MPa)	1.10	1.29	1.29	1.28	1.27	1.27
Coefficiente de Variación (%)	38	39	40	41	41	41
Mínimo (MPa)	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Máximo (MPa)	2.05	2.66	2.64	2.64	2.48	2.48
Desviación Estándar	0.45	0.48	0.24	0.24	0.24	0.23
Coefficiente de Asimetría	0.08	0.30	0.20	0.19	0.09	0.10
Curtosis	-0.56	0.02	0.24	0.09	-0.21	-0.20

RP*: Resistencia a la Penetración (MPa)

Fuente: Elaboración propia

Al contrario de los resultados obtenidos por Montanari et al [18] presentaron para las profundidades 0-0.10, 0.10-0.20 m valores de RP de 5.34 MPa y 4.18 MPa respectivamente, indicando que el suelo estudiado se encuentra en un alto grado de compactación por encontrarse bajo pastoreo, evidencia de la influencia que tiene el manejo del suelo sobre sus propiedades físicas, factor que incide en la heterogeneidad espacial.

Gomes [19] establece un criterio para clasificar el coeficiente de variación (CV), parámetro que permite evaluar la variabilidad de los datos como baja $\leq 10\%$; media entre 10-20%; alta entre 20-30% y muy alta $\geq 30\%$, los resultados obtenidos indican muy alta variabilidad de los datos en todas las profundidades evaluadas, mostrando una cubierta heterogénea con condiciones de pisoteo en algunas zonas o en su defecto labores culturales (Montanari, et al., 2013); Mogollon [15] encontró CV entre 18.5 y 28.5% en lotes de pasturas y en lotes preparados CV entre 24 y 41.8%. Propiedades del suelo evaluadas bajo diferentes condiciones ambientales y de manejo presentan coeficientes de variación diferentes. Los resultados sugieren que la variabilidad es una característica intrínseca de cada propiedad y su comportamiento es específico de cada condición ambiental, tipo de suelo y manejo, Jaramillo [12].

Al observarse los valores de media y mediana son similares y valores cercanos a cero de asimetría y curtosis indican una aproximación a la distribución normal para las profundidades estudiadas, Mogollon [15].

La Geoestadística es una herramienta que nos permite encontrar una ecuación entre el espacio y la variable y si están relacionadas, el rango indica hasta donde se dejan de parecer los datos, es decir, hasta que distancia existe dependencia espacial, por medio de una función que los diferencie generando un “plano”.

Las profundidades evaluadas muestran estructura espacial que se detecta por medio del semivariograma, para los datos evaluados el modelo que mejor se ajustó fue el exponencial con RMSE mayores 0.73, la Tabla 2 describe los parámetros de los semivariogramas obtenidos en la Figura 4, concordando con Mogollón [15] y Medina et al [20], quienes reportan predominio de modelo exponencial evaluando la misma región. El Modelo exponencial tiene la bondad que representa muy bien la continuidad espacial, Gallardo [16].

Tabla 2. Parámetros de los semivariogramas para RP
Modelo Exponencial evaluado a las diferentes profundidades.

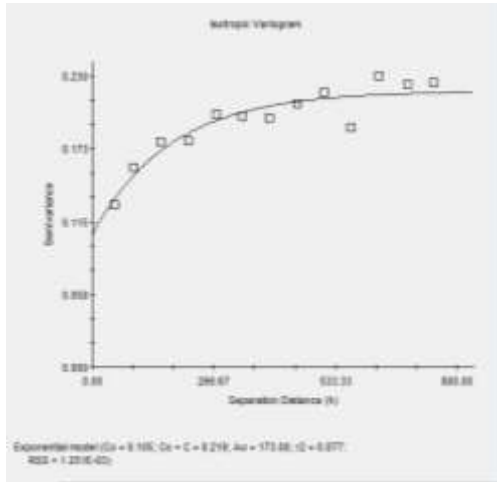
Profundidad de RP	C_0	C_0+C_1	C_1	a (m)	GDE (%)	RMSE
0.05 m	0.105	0.219	0.113	519	51.8	0.877
0.10 m	0.122	0.263	0.142	402	53.8	0.758
0.15 m	0.135	0.271	0.136	624	50.2	0.784
0.20 m	0.109	0.279	0.170	495	60.9	0.888
0.25 m	0.143	0.286	0.143	528	50.2	0.732
0.30 m	0.143	0.288	0.145	591	50.2	0.856

Fuente: Elaboración propia

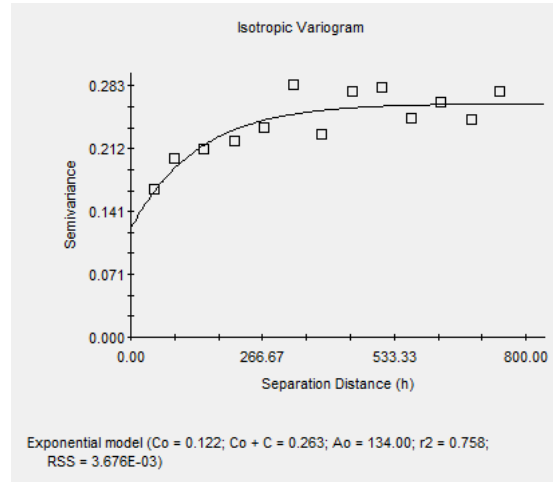
La dependencia entre zonas muestreadas donde se manifestó la variabilidad de la RP por medio de los valores de alcance (a), varían entre 134 a 519 m, rango que permite establecer hasta donde se dejan de parecer los datos, indicando que cada profundidad tiene su propio patrón de distribución en las capas del suelo, Luengas et al [22]. Se puede decir que muestras tomadas a una distancia mayor al rango son independientes.

Según criterio de Cambardella [13], los datos evaluados presentan un GDE moderado con valores mayores a 50% en las profundidades evaluadas. Esta variabilidad puede verse afectada por la reciente intervención del suelo, Luengas et al [22].

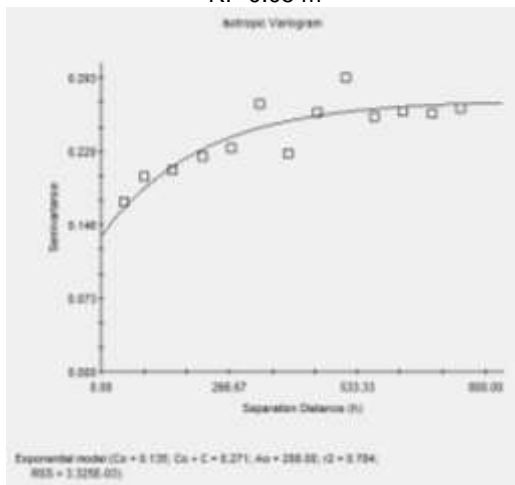
Las observaciones ubicadas en las gráficas definen el semivariograma experimental, y ajustando al modelo teórico exponencial se pueden realizar las predicciones sobre el comportamiento espacial de la Resistencia a la Penetración, en zonas no muestreadas.



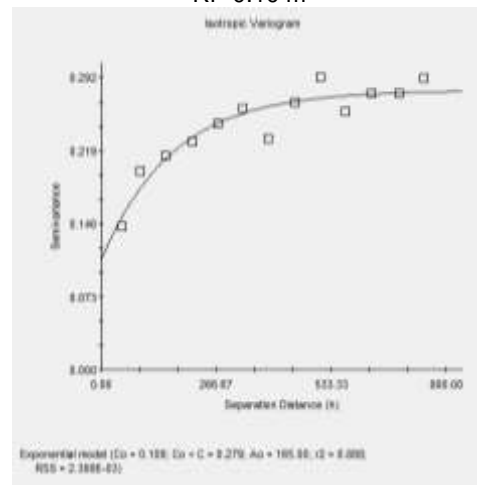
RP 0.05 m



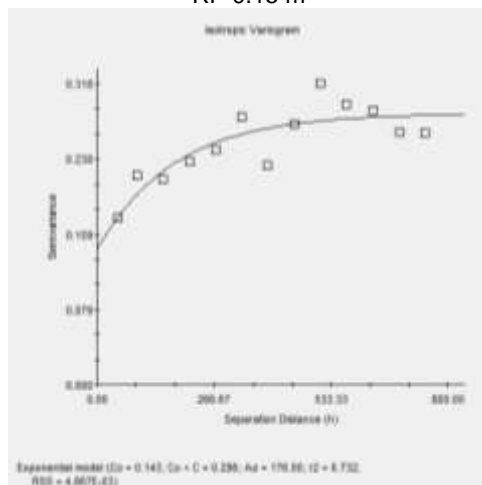
RP 0.10 m



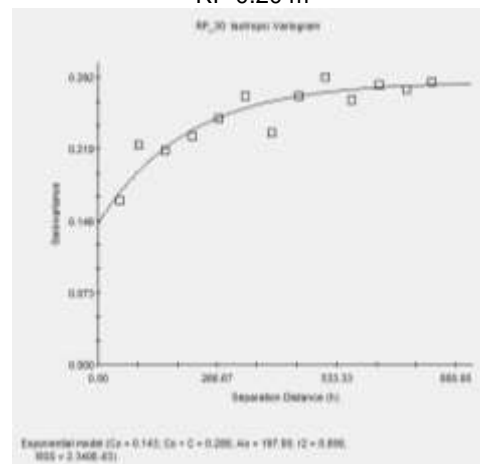
RP 0.15 m



RP 0.20 m



RP 0.25 m

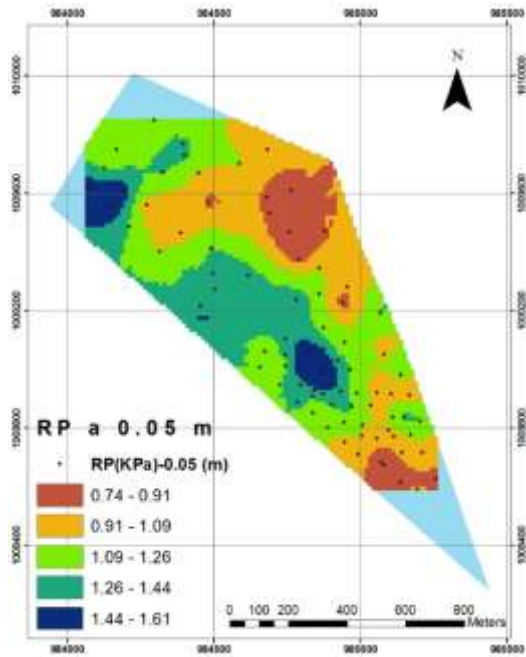


RP 0.30 m

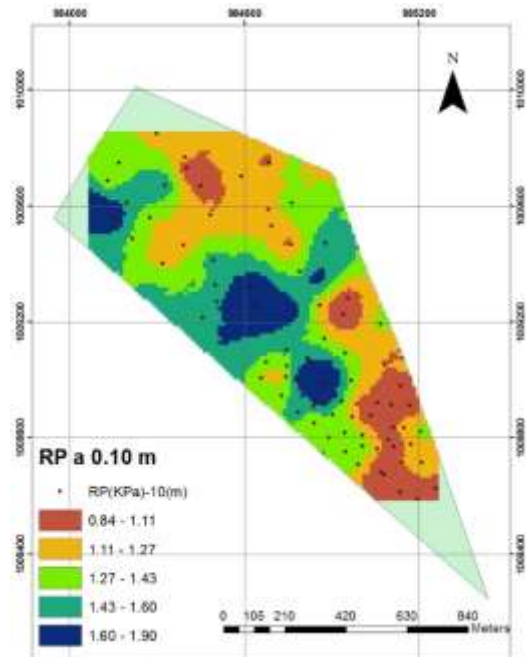
Figura 4. Semivariogramas ajustados para RP 0.05 m a RP 0.30 m. de un suelo de Mosquera (Cundinamarca)

Fuente: Elaboración Propia

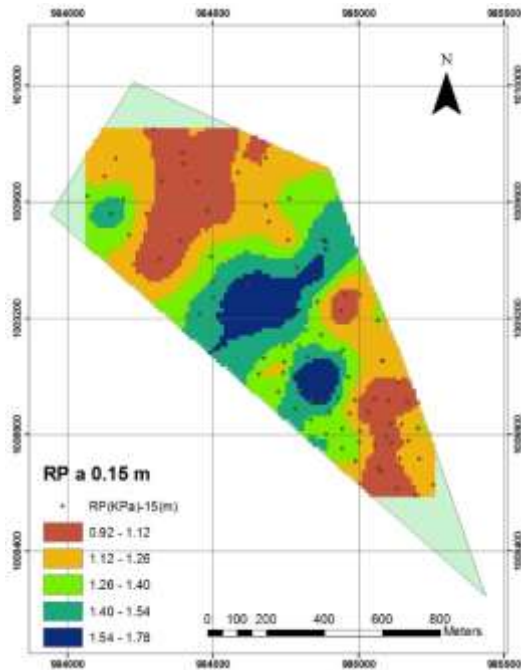
Los mapas obtenidos por interpolación mediante kriging ordinario Figura 5, permiten observar las zonas con valores más altos de RP se encuentran en la parte media del lote, pues es la zona que se encuentra bajo pastoreo desde hace varios años, sin ningún tipo de labranza o de escarificación, por lo que son zonas que pueden ser susceptibles a compactación. A su vez, las zonas con menores valores de RP se encuentran en los extremos esto debido principalmente a que son zonas que presentan anegación y niveles freáticos superficiales, lo que limita su uso durante algunos meses al año.



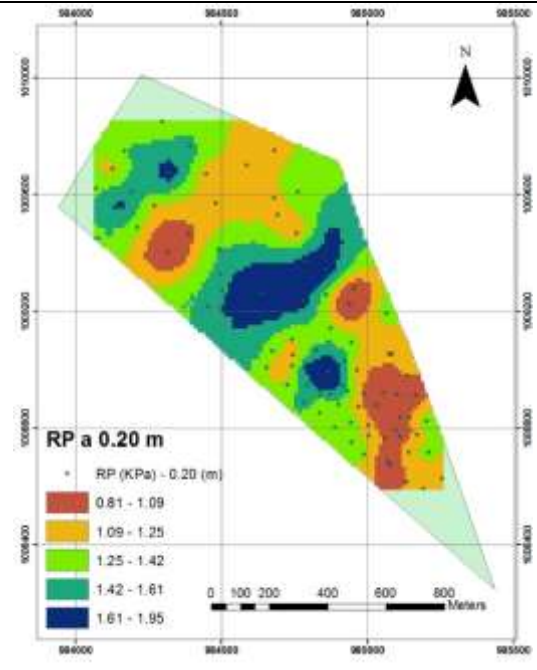
a. Superficie de RP a 0.05 m



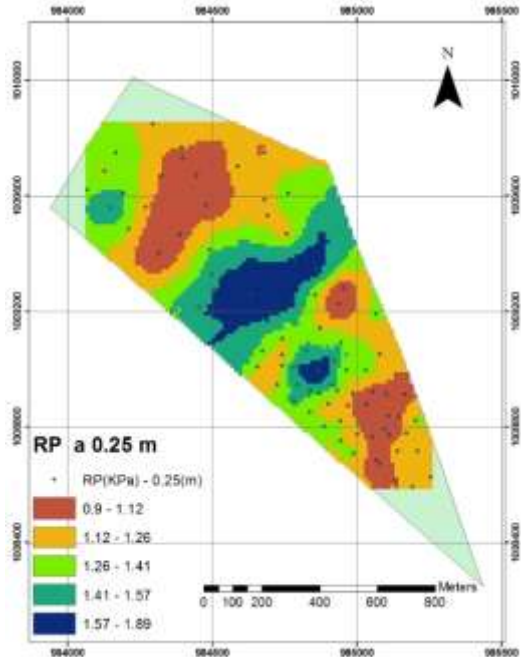
b. Superficie de RP a 0.10 m



c. Superficie de RP a 0.15 m



d. Superficie de RP a 0.20 m



e. Superficie de RP a 0.25 m



f. Superficie de RP a 0.30 m

Figura 5. Superficies generadas por interpolación Kriging para la variable RP (MPa)

Fuente: Elaboración propia

Los mapas generados para RP presentan una leyenda donde cada color expresa un rango específico, y los valores numéricos expresan el valor de RP presentado en cada rango.

Según lo observado en la Figura 5, el mapa que expresa RP a los 0.05 m. no presenta en la zona media del lote la superficie azul oscura que expresa el rango de valores más altos de RP, mientras que para RP a 0.10 m. si se presenta esta superficie azul que se mantiene hasta el mapa de 0.30 m esto puede ser debido a que a los 0.05 m se empieza a presentar capas compactadas y hay continuidad en las demás capas o profundidades evaluadas, de acuerdo con, Soane [17] al realizarse una presión en la capa superior es transmitida a las siguientes capas disipando el efecto, este fenómeno depende de la textura y contenido de humedad del suelo.

El conocimiento de la variabilidad espacial del suelo permite generar diferentes aplicaciones como la elaboración de mapas de propiedades del suelo por interpolación, realizar controles de calidad de mapas de suelos, optimizar la interpretación de resultados, agricultura de precisión, Jaramillo [12].

CONCLUSIONES

La RP evaluada a las diferentes profundidades presentaron distribución normal, con coeficientes de asimetría positiva entre (0.08 – 0.30). Coeficientes de curtosis presentaron valores positivos entre (0.02 - 0.24) y negativos entre (-0.20 a -0.56) estos valores cercanos a cero, además de la cercanía entre la media y la mediana evidencian una distribución normal de los datos.

El modelo de semivariograma que más se ajusta a la variable Resistencia a la Penetración es el exponencial permitiendo generar por interpolación superficies de Resistencia a la penetración lo que hace más fácil el análisis e interpretación de los datos.

Se observa valores altos de Resistencia a la penetración conforme aumenta la profundidad en la zona media del lote, esto puede deberse a que esta parte del lote se encuentra destinada a pastoreo desde hace varios años, sin ningún tipo de labranza o escarificación, por lo que son zonas susceptibles a compactación.

A su vez, las zonas con menores valores de RP se encuentran en los extremos esto debido principalmente a que son zonas que presentan anegación y niveles freáticos superficiales, lo que limita su uso durante algunos meses al año.

El análisis espacial de las variables del suelo debe considerar más de una variable, el suelo hace parte de un conjunto de condiciones que determinan sus características, para el caso de la RP las labores culturales, clima, humedad del suelo, y ocupación del suelo hacen variar esta propiedad por lo que debe ser

estudiada en diferentes condiciones y así determinar cuáles son críticas y lograr un manejo adecuado del suelo para preservar su calidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Da Silva, Métodos Auxiliares para diagnóstico da necessidade de subsolagem de solos agrícolas, Campinas, 2002.
- [2] W. Forsythe, F. Sancho y M. Villatoro, «Efecto de la compactación de suelos sobre el rendimiento del maíz en tres localidades de Costa rica,» *Agronomía Costarricense*, vol. 29, nº 3, pp. 175 - 185, 2005.
- [3] R. Blanco, «La relación entre densidad aparente y la Resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo,» *Agrociencia*, pp. 231-239, 2009.
- [4] S. Nacci y I. Pla Sentis, «Estudio de la Resistencia a la penetración de los suelos con equipos de Penetrometría desarrollados en el país,» *Agronomía Tropical*, pp. 115-132, 1992.
- [5] L. Ramírez-López, A. Reina-Sánchez y J. H. Camacho-Tamayo, «Variabilidad espacial de atributos físicos de un Typic Haplustox de los Llanos Orientales de Colombia.,» *Engenharia Agrícola*, 28(1), pp. 55-63, 2008.
- [6] H. Orjuela, Y. Rubiano y J. Camacho, «Análisis Espacial de la Infiltración en un Oxisol de los Llanos Orientales de Colombia,» *Chilean journal of agricultural research Vol. 72*, pp. 404-410, 2012.
- [7] F. Veihmeyer y A. Hendrickson, «Soil density and root penetration,» *Soil Science*, vol. 65, nº 6, pp. 487 - 493, 1948.
- [8] R. Nuñez, V. López, S. Ricardo y A. Paz, «Estudio de la Resistencia de penetración de un suelo Vertisol con el uso del penetrómetro de impacto en la localidad de "Antonio Maceo". Cacocum. Holguín. Cuba,» *Ciencias Holguín*, vol. 16, nº 2, pp. 1-9, 2010.
- [9] H. Taylor, G. Roberson y J. Parker, «Soil Strenght - Root penetration relations for medium - To coarse textured soil materials,» *Soil Science*, pp. 18-22, 1965.
- [10] W. Forsythe, Manual Laboratorio Física de suelos, Costa Rica: IICA, 1985.

- [11] C. Henriquez, O. Ortiz, K. Largaespada, P. Portugués, M. Vargas, P. Villalobos y D. Gomez, «Determinación de la Resistencia a la penetración, al corte tangencial, densidad aparente y temperatura en un suelo cafetalero, Juan Viñas, Costa Rica,» *Agronomía Costarricense*, pp. 175-184, 2011.
- [12] D. Jaramillo, «Variabilidad Espacial del suelo: Bases para su estudio,» *Revista de la Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín*, p. 73 a 87, 2012.
- [13] C. A. Cambardella, T. B. Moorman, J. M. Novak, T. B. Parkin, D. L. Karlen y R. F. y. K. A. E. Turco, «Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils,» *Soil Science*, pp. 1501-1511, 1994.
- [14] M. Ginzo y M. Febrero, «Análisis Geoestadístico de datos funcionales,» 2014.
- [15] R. Mogollon, *Comportamiento espacial de la resistencia mecánica a la penetración y su relación con propiedades físicas del suelo en áreas con diferentes usos y ocupaciones en la Sabana de Bogotá*, Bogotá, 2012.
- [16] A. Gallardo, «Geoestadística,» *Ecosistemas*, pp. 48-58, 2006.
- [17] B. Soane, P. Blackwell y J. P. D. Dickson, «Compaction by agricultural vehicles: a review 1. Soil and Wheel characteristics,» *Soil and Tillage Research*, pp. 207-237, 1981.
- [18] A. Alvarado y W. Forsythe, «Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica,» *Agronomía Costarricense*, vol. 29, nº 001, pp. 85 - 94, 2005.
- [19] R. Montanari, E. d. S. Lima, L. H. Lovera, L. T. R. Godoy, A. F. Henrique y F. C. & Dalchiavon, «Correlación de la productividad de un forraje con las propiedades físicas de un Ultisol en Aquidauana,» *Ceres*, V 60 (1), 2013.
- [20] H. González, D. Jaramillo y F. Álvarez, «Variabilidad espacial de algunas propiedades físico - mecánicas de suelos de textura pesada,» *Revista CES*, pp. 10-19, 2008.
- [21] C. Becerra, E. Madero, O. Herrera y E. Amézquita, «Caracterización espacial de la compactación en terrenos agrícolas de CIAT, Colombia,» *Instituto de Investigación FIGMMG*, pp. 33-37, 2005.

- [22] P. Gomes, «Curso estatística experimental,» de *Curso estatística experimental*, Brasil, 1987.
- [23] C. A. Luengas, F. Leiva y J. H. Camacho, «Comportamiento espacial de la Resistencia a la Penetración,» de *XII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VIII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba* .
- [24] C. Medina, J. Camacho-Tamayo y C. Cortés, «Soil Penetration Resistance Analysis By multivariate and geostatistical methods,» *Engeneering Agricultural Jaboticabal*, pp. 91-101, 2012.