



Evaluación geoestadística de atributos hidrofísicos del suelo en la granja Tunguavita, Paipa, Colombia*

Javier Giovanni Álvarez Herrera^a ■ Hernán David Ruiz Berrío^b ■ Darwin Fernando Acosta Tova^c

Resumen: dada la influencia en la explotación agrícola de los atributos físicos de los suelos, es necesario su estudio geoestadístico, con el fin de conocer la distribución y variabilidad que poseen, y su efecto sobre las restantes características del suelo. Por lo anterior, se realizó la medición de 80 puntos en un transecto de la granja de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Se analizó la densidad real (D_r), la densidad aparente (D_a), la porosidad total (P_T), el contenido de carbono orgánico (co), el tamaño de las partículas y la infiltración básica (I_b), mediante un análisis descriptivo, geoestadístico y multivariado. Las propiedades físicas que presentaron los menores coeficientes de variación (cv) fueron la D_r (7,50 %) y la D_a (4,33 %). Todas las variables evaluadas mostraron bajo cv , a excepción de la I_b . Los valores de co de la granja son muy bajos (1,97 %). La D_r , el co y la P_T se ajustaron a semivariogramas lineales y tuvieron los mayores rangos (75 m). La arcilla se correlacionó negativamente con la arena y el limo; mientras que la P_T tuvo correlación directa con la D_r , e inversa con la D_a . La porosidad y el tamaño de partículas tienen gran influencia en la varianza de las propiedades físicas de los suelos de la granja, de acuerdo con el análisis de componentes principales. Probablemente, la ganadería intensiva practicada allí afecta la porosidad y la D_r , lo que disminuye la I_b y aumenta la compactación del suelo.

Palabras clave: alfisol; carbono orgánico; densidad aparente; geoestadística; infiltración en suelos; materia orgánica; tamaño de partícula.

Recibido: 26/10/2020 **Aceptado:** 12/04/2021 **Disponible en línea:** 23/07/2021

* Artículo de investigación.

- a Doctor en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia. Profesor asociado de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Grupo de Investigaciones Agrícolas (GIA), Tunja, Colombia. Correo electrónico: javier.alvarez@uptc.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1737-6325>
- b Ingeniero Agrónomo, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. Grupo de Investigaciones Agrícolas (GIA). Correo electrónico: hernan.ruiz@uptc.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1450-7342>
- c Ingeniero agrónomo, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. Correo electrónico: darwin.acosta@uptc.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6618-8777>

Cómo citar: J. G. Álvarez Herrera, H. D. Ruiz Berrío, y D. F. Acosta Tova, «Evaluación geoestadística de atributos hidrofísicos del suelo en la granja Tinguavita, Paipa, Colombia», Cien.Ing.Neogranadina, vol. 31, n.º 1, pp. 129-140, jul. 2021.

Geostatistical Evaluation of Hydro-Physical Soil Properties at the Tinguavita Farm, Paipa, Colombia

Abstract: Given the influence on the agricultural exploitation of the physical properties of soils, it is necessary to study its geo-statistics to know their distribution, variability, and their effect on the remaining soil properties. 80 points were measured in a transect of a farm belonging to the *Universidad Pedagógica de Colombia*. True density (Td), apparent density (Ad), total porosity (Tp), organic carbon content (oc), particle size and basic infiltration (Bi) were analyzed using a descriptive, geostatistical, and multivariate analysis. The physical properties with the lowest coefficients of variation (cv) were Td (7.50 %) and Ad (4.33 %). All variables showed a low cv, saved the Bi. oc farm values are very low (1.97 %). Td, oc and TP were adjusted to linear semi-variograms and showed the highest ranges (75 m). Clay correlated negatively with sand and lime; while the TP correlated directly with Td, and inversely with Ad. Porosity and particle size have a large influence on the variance of the physical properties of the farm soils, as per the analysis of the main components. It is possible that intensive cattle farming affect the porosity and Td, which decreases the Bi and increases soil compaction.

Keywords: Alfisol, organic carbon, apparent density, geo-statistics, soil infiltration, organic matter, particle size.

Introducción

El suelo, medio natural de crecimiento de las plantas, presenta cambios en las características físicas por adiciones, pérdidas o transformaciones de materia [1]. Según S. I. Pla [2], el mal uso del suelo y el agua son la principal causa de catástrofes, incluso mayores a las atribuidas al cambio climático por la acción humana. Los suelos son variables aún en cortas distancias, debido a las interacciones entre los procesos formadores. La reducción de costos en la aplicación de muestreos se logra mediante el estudio de intervalos de distancias para diferentes variables [3]-[5].

La variabilidad es inherente al suelo, debido a los múltiples y diversos procesos de formación, lo que produce, como consecuencia, una alta cantidad de diferentes suelos [6]. Del mismo modo, todas las propiedades del suelo deben ser medidas o correlacionadas entre sí, pues el comportamiento de cada suelo es único según las condiciones climáticas, relieve y la influencia de la actividad humana [7].

El manejo adecuado del suelo depende del conocimiento de la variabilidad espacial de las propiedades [8]. Un suelo afectado por actividades agrícolas se distingue de su entorno, a causa del manejo que ha tenido, aunque el suelo es homogéneo en las primeras capas debido a las actividades como mecanización, riego, fertilización y otros [9]. Si la variabilidad no se relaciona con alguna causa o no se justifica, es nombrada *variabilidad aleatoria*, en cambio, si se conocen las razones o motivos de la variabilidad, se denomina *sistemática*. De igual manera, para mejorar los sistemas agropecuarios, es necesario estudiar la variabilidad espacial y correlacionarla con los procesos de producción [10], [11].

El estudio de la variabilidad espacial de los suelos se realiza comúnmente con técnicas geoestadísticas, basadas en el supuesto del modelo de función aleatoria en el que las variables se modelan como variables aleatorias correlacionadas espacialmente. Al asumir este modelo, la caracterización de la variabilidad espacial se reduce a caracterizar las correlaciones entre las variables aleatorias de la función. Entonces, es posible realizar inferencias

coherentes sobre la variable, utilizando técnicas de estimación o de simulación. De esta forma, la distribución espacial puede caracterizarse plenamente [12], [13]. El análisis geoestadístico requiere varias etapas, dentro de las cuales destacan la exploración de datos, la clasificación y el análisis de datos, seguido de un análisis de la estructura espacial de las propiedades continuas en el espacio y, luego, una estimación del comportamiento en lugares no muestreados [14], [15].

La utilización de la geoestadística posibilita identificar la existencia o no de dependencia espacial entre las observaciones. Puede ser aplicada en la elaboración de gráficos bajo el modelo de variación espacial, lo cual facilita aplicarla en lugares donde el acceso y los datos sobre el suelo son limitados [16].

Con ello en mente, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la distribución espacial de algunas propiedades hidrofísicas, en un transecto de suelo con características de textura arcillosa de la granja Tunguavita del municipio de Paipa, para lograr realizar planes de manejo más eficientes y acordes con la distribución espacial.

Materiales y métodos

La investigación se hizo en el trópico alto colombiano, municipio de Paipa, vereda El Salitre, en la granja experimental Tunguavita, perteneciente a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). La zona se encuentra a una altitud de 2470 msnm; con latitud 05°44'27" Norte y longitud 73°07'15" Oeste; la temperatura media de 14,1 °C; precipitación media anual de 966 mm y la humedad relativa media de 75%; con brillo solar de 4,47 horas por día. El suelo de la zona se clasificó taxonómicamente como alfisol. Los análisis de laboratorio se realizaron en el laboratorio de suelos de la UPTC –Sede Tunja.

Se realizó un muestreo en 80 puntos, con una distancia de 10 m entre cada punto y con bordes de 05 m, en relación con la carretera. Esta distancia y número de puntos se escogió por ser representativo del área de estudio. El muestreo se realizó en un transecto en el que se encuentra una explotación maderable (*Eucaliptus globulus*) y kikuyo

(*Pennisetum clandestinum*). Las muestras se tomaron a una profundidad de 0,25 m, debido al tipo de cultivos (pradera y cereales) que, comúnmente, se siembran en la zona. Posteriormente, las muestras fueron llevadas al laboratorio de suelos para ser analizadas.

Se midieron las siguientes propiedades hidrofísicas del suelo: (1) tamaño de partícula, por el método de Bouyoucos; (2) infiltración básica, obtenida a partir de los cálculos con la información arrojada por el método de anillos concéntricos; (3) densidad real, por medio del método de picnómetro; (4) densidad aparente, por el método del terrón parafinado; (5) carbono orgánico, por el método de Walkley-Black; y (6) porosidad, con las técnicas descritas en el *Manual de métodos analíticos del laboratorio de suelos* del Instituto Geográfico Agustín Codazzi -Igac [17].

Se hizo un análisis estadístico descriptivo y se formalizó una prueba de normalidad de las variables, utilizando el paquete estadístico SAS v.9.2 (SAS Institute Inc., Cary NC). Se realizó un análisis multivariado de componentes principales de todas las propiedades hidrofísicas, medidas para así definir zonas homogéneas (figura 1). Esto facilitó hacer un estudio simultáneo de las propiedades del suelo, que ayudó a entender de forma integral su comportamiento en el espacio [18]-[20].

Se estimaron los parámetros estadísticos descriptivos básicos como media, mediana, mínimo, máximo, asimetría y curtosis. La normalidad se determinó por medio del test de Kolmogorov-Smirnov adicionalmente, se calculó el coeficiente de variación (cv), y se analizó la variabilidad de las propiedades de acuerdo con la clasificación hecha por Warrick y Nielsen [21], en la que suelos con cv entre 0-15 % se consideran de variabilidad baja; entre 15 % y 35 % tienen una variabilidad media; y para cv mayor a 35 %, variabilidad alta.

Análisis geoestadístico

Mediante un análisis isotrópico de los datos, debido a la naturaleza unidimensional de los transectos, se obtuvieron los modelos del semivariograma con mejor ajuste. Posteriormente, se realizó la validación cruzada de los datos mediante el método de interpolación de mayor correlación con el

software GS+ v.9 (Gamma Design, Bulgaria). Por medio de la teoría de las variables regionalizadas, se calculó la dependencia espacial de los atributos del suelo, mediante el ajuste de un grupo de datos a un modelo de semivariograma teórico $\gamma(h)$, que se define como muestra la ecuación 1.

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

Donde:

$\gamma(h)$ es la semivarianza.

$N(h)$ es el número de parejas de puntos separados a una distancia h .

$Z(X_i)$ es el calor del atributo en el lugar X_i .

$Z(X_i + h)$ es el valor del atributo a una distancia h del lugar $X_i + h$.

Resultados y discusión

Análisis descriptivo

La densidad aparente (D_a) presentó un promedio de 1,45 g/cm³, con un cv de 4,31 %. La asimetría y curtosis presentaron valores de 0,107 y -0,69, respectivamente (tabla 1). Asimismo, esta variable fue normal ($p > 0,150$) (tabla 1). A ello se suma que la D_a reveló una correlación inversa con la porosidad ($r = -0,469^{**}$) (tabla 2), similar a lo reportado en otros estudios, en los que se menciona que la D_a tiene una estrecha relación con la porosidad del suelo, la humedad y la conductividad hidráulica [22], [23]. Adicionalmente, en los modelos hidrológicos del suelo, la D_a es un parámetro muy importante [24], [25].

Según Monroy, Álvarez y Alvarado [26], el valor promedio de la D_a fue un 57 % más alto que el reportado en este estudio para la misma zona. Esta diferencia ocurrió, probablemente, por la variación de la precipitación en las fechas de toma de los datos, dado que las mediciones del presente estudio se realizaron en época más seca. De otro lado, según Warrick y Nielsen [21], el cv de la D_a se clasifica como medio, y fue menor a lo reportado por Guatibonza, Álvarez y Sanabria [27] y

Monroy y su equipo [26], con 16,62 % y 27,76 %, respectivamente. Lo anterior ocurrió debido a que la zona estudiada fue más reducida en área, homogénea en cuanto a relieve y topografía, y se utilizó un tamaño de muestra menor, de 80 en relación con 85 [27] y 110 [26].

Los datos medidos de D_a se encuentran por debajo de $1,6 \text{ g/cm}^3$, lo que es ideal para el crecimiento radicular y para el desarrollo de las plantas [28], ya que un suelo con alta D_a limita la infiltración del agua y presenta baja aireación, situación que afecta el crecimiento y desarrollo de las raíces [29].

La densidad real (D_r) mostró una media de $2,28 \text{ g/cm}^3$ con un cv de 7,5 %, clasificado como bajo [21]. Por su parte, la asimetría presentó un valor de $-0,085$, y la curtosis un valor de $-1,183$ (tabla 1). En la tabla 1, se aprecia que la D_r no tuvo un comportamiento normal; mientras que en la tabla 2, se visualiza una correlación de la D_r con la porosidad ($r=0,839^{**}$).

El valor de D_r obtenido en este estudio está dentro del rango de valores encontrado para la granja Tunguavita en [27] y [26] de $2,33$ y $2,12 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Esto manifiesta que la D_r es una propiedad del suelo muy robusta al cambio de condiciones ambientales y, habitualmente, permanece constante. No obstante, puede llegar a verse alterada por la deforestación, cambio de uso del suelo y la compactación debida al pisoteo continuo de los animales [30], causa predominante en la zona de estudio. Estos valores de D_r corresponden con suelos minerales con bajo contenido de materia orgánica [31], como los encontrados para la granja Tunguavita (materia orgánica: 3,39 %).

La porosidad tuvo un comportamiento normal (tabla 1), con promedio de 37,15 %; y un cv de 16,56 %, clasificado como medio [21]. De otra parte, la asimetría y la curtosis presentaron valores de $0,021$ y $-0,643$, respectivamente (tabla 1). La porosidad correlacionó inversamente con la D_a y proporcionalmente con la D_r (tabla 2), lo que coincide con los resultados de Pepper y Brusseau [32], quienes mencionan que el porcentaje de poros en el suelo depende de la textura, estructura y la actividad biológica del suelo.

De los parámetros medidos, el cv de la porosidad fue uno de los más bajos, similar al 14,17 % y

15,89 % reportado por Monroy y su equipo [26] y Guatibonza y su equipo [27], respectivamente. Estos últimos afirman que esta propiedad está muy relacionada con la génesis y formación del suelo.

El carbono orgánico (co) presentó un promedio de 1,97 %, con un cv de 20,75 % clasificado como medio [17]. La asimetría y curtosis para el co fue 0,702 y 0,490, respectivamente (tabla 1). Esta variable no tuvo un comportamiento normal (tabla 1), ni se correlacionó con otro parámetro evaluado (tabla 2). El bajo contenido de co medido se debe, probablemente, al tipo de suelo de la zona, el cual pertenece al orden alfisol y presenta un horizonte superficial claro con bajo contenido de materia orgánica [33]. Al respecto, Sayer *et al.* [34] demostraron que, por un lado, las reservas de carbono del suelo no aumentan en los bosques tropicales y, por otro, están ligadas a las condiciones ambientales de cada sistema [35].

El cv obtenido para el co está por debajo de los rangos y valores encontrados por Teng *et al.* [36] y Yescas *et al.* [37], de 25-28 % y 46,3 %, respectivamente. Ello indica que las labores agrícolas como la mecanización podrían afectar la variación de carbono orgánico en el suelo, al homogenizar la distribución de la materia orgánica. En contraste con este estudio, Teng *et al.* [36] encontraron en suelos bajo coberturas de bosque nativo, altas correlaciones con variables topográficas, de elevación y espesor del suelo.

La arena presentó un promedio de 18,08 % y un cv de 22,13 %, la asimetría y la curtosis presentaron valores de $0,463$ y $-0,121$, respectivamente (tabla 1). El limo mostró un promedio de 24,2 % y un cv de 15,71 %, la asimetría y la curtosis tuvieron valores de $0,113$ y $-0,167$, respectivamente (tabla 1). La arcilla registró un promedio de 57,71 % y un cv de 10,24 %; la asimetría y la curtosis presentaron valores de $-0,635$ y $0,736$, respectivamente (tabla 1).

La arcilla presentó correlación inversa tanto con la arena ($-0,771^{**}$) como con el limo ($-0,742^{**}$), mientras que limo y arena no tuvieron correlación entre sí (tabla 2). Esto indica que, en el presente estudio, son independientes entre ellos, pero dependientes de la arcilla; resultado similar a lo encontrado en ultisoles cultivados con maíz [38].

No obstante, para suelos de la granja Tinguavita, Guatibonza y su equipo encontraron un comportamiento similar entre la arcilla y la arena; no así para la relación entre la arcilla y el limo [27].

Ninguno de los atributos relacionados con el tamaño de partícula presentó normalidad, a pesar de realizar transformación logarítmica de las propiedades evaluadas (tabla 1). No obstante, todos mostraron un cv medio a excepción de la arcilla, cuyo cv se clasificó como bajo según Warrick y Nielsen [21]. El cv de la arena, limo y arcilla fue menor a 39,19%, 25,05% y 32,27%, respectivamente, reportados por Guatibonza y su equipo [27], debido a que, a pesar de que la investigación se realizó en la misma granja, estudió la variabilidad espacial en un área mayor, en tres zonas con diferentes condiciones, al mismo tiempo (explotación maderable y pastos en parte alta y parte baja de un reservorio); mientras que el presente estudio se hizo en una zona plana, de pastos y con mayor homogeneidad.

La infiltración básica (Ib) presentó un promedio de 1,77 cm/h, con un cv de 41,1% clasificado

como medio [17], una asimetría y una curtosis de 0,363 y -0,502, respectivamente (tabla 1); y mostró un comportamiento normal, no correlacionado con ningún otro parámetro físico (tabla 2), este resultado es similar a lo encontrado por da Silva, Gomes y Camacho [38]. El valor de la Ib obtenido es superior al valor de la conductividad hidráulica (0,145 cm/h; cv=85,49) determinada previamente para esta misma zona; asimismo, el cv fue mucho menor al reportado previamente [27].

Los valores de infiltración dependen, principalmente, del contenido de agua en el suelo [38] y, en menor grado, de factores como el tamaño de la muestra del suelo, las condiciones cercanas a la superficie, la labranza, la cobertura vegetal, la rugosidad de la superficie, la porosidad, la densidad del suelo, la materia orgánica, el tamaño y estabilidad de los agregados. A estos resultados llegaron Almeida *et al.* [39], quienes encontraron que, para suelos desnudos la infiltración pasados 20, 50 y 60 días después de labranza fue de 1,61, 1,43 y 2,29 cm/h, respectivamente, valores muy cercanos a los obtenidos en este estudio.

Tabla 1. Análisis descriptivo

Atributo	Unidad	Media	cv	Mínimo	Medio	Máximo	Asimetría	Curtosis	N
Da	g/cm ³	1,45	4,33	1,34	1,45	1,60	0,09	-0,67	*
Dr	g/cm ³	2,28	7,50	2,00	2,28	2,50	-0,08	-1,18	NS
A	%	18,08	22,13	10,88	18,08	28,88	0,46	-0,12	NS
Ar	%	57,71	10,24	41,12	57,71	73,12	-0,63	0,73	NS
L	%	24,20	15,71	16,00	24,20	32,00	0,11	-0,16	NS
CO	%	1,97	20,75	1,32	1,97	3,08	0,70	0,49	NS
PT	%	37,15	16,56	25,00	37,15	50,40	0,02	-0,64	*
Ib	cm/h	1,76	41,08	0,46	1,76	3,44	0,36	-0,50	NS

cv: coeficiente de variación. Ib: infiltración básica. Da: densidad aparente. Dr: densidad real. PT: porosidad total. CO: carbono orgánico. A: arena. Ar: Arcilla. N: normalidad de Kolmogorov-Smirnov. NS: no significativo. *: significativo para normalidad ($p < 0,01$). Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Coeficientes de correlación de Pearson para las propiedades físicas

Atributo	Da	Dr	A	Ar	Limo	co	PT	Ib
Da	1							
Dr	-0,075	1						
A	-0,016	-0,079	1					
Ar	-0,083	0,084	-0,771*	1				
L	0,147	-0,047	0,146	-0,742*	1			
co	0,078	-0,015	0,029	-0,089	0,108	1		
pt	-0,469*	0,839*	-0,039	0,100	-0,114	-0,032	1	
Ib	0,025	-0,030	-0,0190	-0,012	0,038	-0,114	-0,010	1

Ib: infiltración básica. Da: densidad aparente. Dr: densidad real. PT: porosidad total. CO: carbono orgánico. A: arena. Ar: Arcilla. L: limo. *: significativo para normalidad ($p < 0,01$).
Fuente: elaboración propia.

Análisis geoestadístico

La Dr, el co y la PT tuvieron un rango mayor a 75 m y un grado de dependencia espacial (GDE) de cero (tabla 3) clasificado como débil acorde con Vidana, Biswas y Strachan [40], quienes clasificaron el GDE como la relación entre el efecto pepita y la meseta expresado en porcentaje (<25 % débil; 25-75 % moderado; y >75 % fuerte), lo cual hace suponer que, hasta esa distancia, estas variables son espacialmente dependientes y poseen una baja relación entre los puntos de muestreo.

Una situación similar de GDE moderado fue reportada por Alvarado y su equipo y Guatibonza y

sus colaboradores para la Dr [26], [27]. Mientras tanto, para la PT, Guatibonza *et al.* [27] encontraron un GDE débil, similar a lo reportado aquí. Cabe resaltar que la Dr es una propiedad íntimamente relacionada con los factores formadores de suelo, clase de material parental, clima y topografía, entre otros. Esto hace que sus procesos de transformación sean lentos; mientras que la PT varía acorde con prácticas de manejo, como la incorporación de residuos de cultivos y las labores de mecanización, que mejoran esta propiedad y que, acorde con los resultados, no se realizan de forma adecuada, razón por la cual es probable que también el co haya tenido un GDE débil (figura 1).

Tabla 3. Parámetros de los semivariogramas ajustados para las variables medidas

Atributo	Modelo	r ² modelo	Co	(Co+C)	Rango (m)	GDE (C/[Co+C])	vc	r ² vc
Da	Esférico	0,88	0,00001	0,0036	18,00	0,997	(IDW) 0,580	0,162
Dr	Lineal	0,32	0,02998	0,0299	75,66	0,000	(IDW) -0,882	0,093
A	Esférico	0,15	0,89000	15,620	11,40	0,943	Kriging 0,550	0,151
Ar	Esférico	0,29	0,39000	31,480	14,30	0,988	Kriging 0,165	0,017
Limo	Exponencial	0,57	1,77000	15,110	30,00	0,883	Kriging 0,564	0,103
co	Lineal	0,15	0,18639	0,1863	75,66	0,000	IDW -0,623	0,049
PT	Lineal	0,29	36,64895	36,6489	75,66	0,000	IDW -0,684	0,051
Ib	Esférico	0,65	0,00100	0,48400	15,20	0,998	Kriging 0,439	0,095

Co: efecto pepita. Co+C: meseta. GDE: grado de dependencia espacial. vc: validación cruzada. Da: densidad aparente. Dr: densidad real. PT: porosidad total. CO: carbono orgánico. A: arena. Ar: Arcilla. r²: coeficiente de correlación de Pearson.
Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, las propiedades relacionadas con el tamaño de partícula, como arena, limo y arcilla, también la Da y la Ib, mostraron un GDE fuerte; pero con un rango limitado, que osciló para estas variables entre 11 y 30 m (tabla 3), lo cual indica la distancia a la que estos parámetros pueden ser modelados [41].

Para el caso del tamaño de partícula, el limo presentó el mayor rango (30 m); mientras que la arena y la arcilla tuvieron 11,4 y 14,3 m, respectivamente (figura 1). Lo anterior contrasta con lo reportado por Guatibonza *et al.* [27], quienes mencionan que la arena y el limo tuvieron un efecto pepita puro, por lo que no mostraron GDE; mientras que la arcilla tuvo un GDE fuerte similar a lo encontrado en el presente estudio.

Al respecto, la baja movilidad de las arcillas puede deberse a que, en la zona, se presentan precipitaciones y dinámicas pedogenéticas, que originan la traslocación de arcillas a horizontes más profundos. Esto, a su vez, genera la presencia de horizontes argílicos, característicos de los alfisoles, a los que pertenecen los suelos muestreados. En

cuanto a la arena, al ser más pesada, tiene menor movilidad y, por tanto, menor rango [27].

En cuanto a la Da, Monroy *et al.* [26] lograron obtener un GDE fuerte con un rango superior a los 1000 m para suelos de la granja Tunguavita en época de alta pluviosidad. Ello deja entrever el efecto de las condiciones climáticas en las que se realizó el experimento. Guatibonza *et al.* [27] encontraron un GDE fuerte, con un rango de 121 m para la zona de la granja Tunguavita. Del mismo modo, da Silva *et al.* [38] mencionan que la Da, generalmente, tiene un GDE que varía desde moderado a fuerte.

La Ib tuvo un rango de 15,2 m, el que se considera bajo, al compararlo con lo encontrado por Orjuela, Sanabria y Camacho [42], quienes, en un oxisol, obtuvieron un rango de 174 m, el cual fue el valor más bajo de las propiedades evaluadas. De modo similar a lo reportado en el presente estudio, Orjuela y su equipo también encontraron un GDE fuerte para la Ib, lo que concuerda con lo reportado en estudios como el de Haghghi, Forood y Kamali, quienes al aplicar diferentes métodos para el cálculo de la infiltración encontraron un GDE fuerte en todos los modelos evaluados [4].

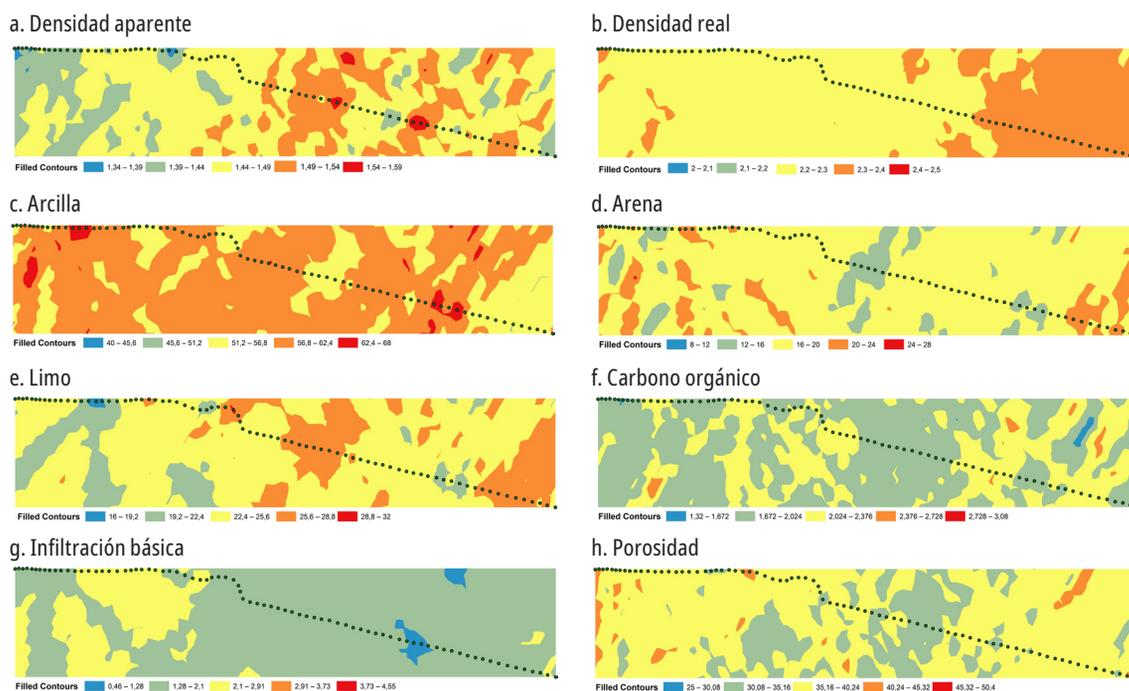


Figura 1. Mapas de distribución espacial, obtenidos mediante Kriging.

Fuente: elaboración propia.

Análisis de componentes principales

Se realizaron cinco análisis de componentes principales (CP) de los ocho atributos evaluados, cuya suma explicó en un 89,6 % la varianza total, valor superior al recomendado de 80 %, para la realización de un buen análisis de datos (tabla 4) [5].

Se aprecia el efecto de las variables medidas dentro del CP1, el cual explicó un 29 % la varianza. En el CP1, las variables que presentaron mayor influencia fueron en su orden, limo, arena y PT, lo que indica que el tamaño de partícula y la porosidad tienen un papel importante en el suelo muestreado. El segundo CP representó el 22,99 % y estuvo afectado, principalmente, por la arcilla y la densidad aparente. El tercer CP tuvo una proporción de 14,01 % de la varianza total de los datos; y la variable más influyente fue la Ib. Los últimos dos CP (CP4 y CP5) explicaron en 12,91 % y 10,62 % la varianza total, respectivamente; mientras que los principales factores que influyeron fueron la arena, el carbono orgánico y la infiltración básica.

Estos coeficientes revelan que las partículas grandes del suelo como la arena y el limo inciden

en la Ib, al aumentarla; mientras que las fracciones pequeñas como la arcilla y el co la disminuyen. Además, el co fue la variable que presentó la mayor comunalidad (tabla 4), lo que implica que es la propiedad más afín a los restantes atributos medidos; también que es la propiedad que más fácil se deja afectar por los parámetros estudiados. Prieto, Prieto y Acevedo mencionan que a la materia orgánica se atribuye gran importancia en la formación y estabilización de agregados, el ciclo de los nutrientes, el pH y la retención de humedad, lo que afecta la densidad aparente [41]. Al respecto, Monroy *et al.* encontraron que las variables con mayor comunalidad (proporción de la varianza explicada por factores comunes ubicada en rango 0-1) para los suelos de la granja Tinguavita fueron la Da y la PT [26].

A su vez, la Ib mostró el segundo mayor valor de comunalidad, lo cual se explica por la relación que tiene la infiltración con propiedades como la densidad, el tamaño de partícula y la acumulación de materia orgánica. Estos resultados son acordes con lo reportado por Bi Zou y Zhu, quienes mencionan que la velocidad de infiltración se ve afectada tanto por la Da como por la cobertura vegetal [46].

Tabla 4. Coeficientes de los componentes principales

Atributo	cp1	cp2	cp3	cp4	cp5	Comunalidad
Da	0,25	0,28	-0,25	-0,56	-0,46	0,721442
Dr	-0,34	-0,51	-0,16	-0,35	-0,24	0,577950
A	0,40	-0,34	0,17	0,38	-0,05	0,449914
Ar	-0,55	0,40	-0,06	-0,02	0,04	0,465101
Limo	0,44	-0,26	-0,08	-0,37	-0,01	0,395467
co	0,11	-0,03	-0,71	-0,06	0,66	0,956747
pt	-0,40	-0,57	-0,02	-0,07	0,02	0,485622
Ib	0,02	0,03	0,62	-0,53	0,54	0,947586
Autovalor	2,32	1,83	1,12	1,03	0,84	
Varianza total	29,08	22,99	14,01	12,91	10,62	
Varianza acumulada	29,08	52,07	66,07	78,98	89,60	

Da: densidad aparente. Dr: densidad real. A: arena. Ar: arcilla. co: carbono orgánico. PT: porosidad total. Ib: infiltración básica. CP: componente principal.

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

La deficiente mecanización que se ha llevado a cabo, así como la homogeneidad del terreno generaron un bajo cv del CO, así como de las demás variables medidas a excepción de la Ib, que mostró el mayor cv. La Dr, el CO y la PT tuvieron semi-variogramas de modelos lineales, con los mayores rangos (75 m) y las menores relaciones entre los datos georreferenciados, lo que indica su alta variabilidad espacial en el suelo estudiado. La arcilla correlacionó inversamente con la arena y el limo; mientras que la PT tuvo correlación directa con la Dr e inversa con la Da.

Propiedades físicas como la porosidad y el tamaño de partícula tienen gran influencia en la varianza de las propiedades físicas de los suelos de la granja Tunguavita. La granja Tunguavita presentó bajos valores de CO. La ganadería intensiva practicada en la granja Tunguavita afecta la porosidad y la densidad real, lo que disminuye la infiltración y aumenta la compactación del suelo.

Referencias

- [1] A. E. Hartemink *et al.*, “Soil Horizon Variation: A Review”, *Advances in Agronomy*, vol. 160, n.º 1, pp. 125-185, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.10.003>
- [2] S. I. Pla, “Soil and Water Resources Protection in the Changing Environment”, en *Soil and Water Resources Protection in the Changing Environment*, M. Zlatic y S. Kostadinov, eds., Stuttgart: Catena Soil Sciences, 2017, pp. 258-268.
- [3] X. Xiong, S. Grunwald, R. Corstanje, C. Yu y N. Bliznyuk, “Scale-dependent Variability of Soil Organic Carbon Coupled to Land Use and Land Cover”, *Soil and Tillage Research*, vol. 160, pp. 101-109, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.03.001>
- [4] R. M. Lark, “Spatially Nested Sampling Schemes for Spatial Variance Components: Scope for Their Optimization”, *Computers & Geosciences*, vol. 37, pp. 1633-1641, 2011. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.12.010>
- [5] H. U. Lenna, B. G. Premasudha, S. Panneerselvam y P. K. Basavaraja, “Pedometric Mapping for Soil Fertility Management – A Case Study”, *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, vol. 20, pp. 128-135, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2020.12.008>
- [6] D. F. Jaramillo-Jaramillo, “Definición de áreas homogéneas de fertilidad mediante análisis factorial y geoestadística”, *Boletín de Ciencias de la Tierra*, vol. 39, pp. 5-11, 2016. Doi: <https://doi.org/10.15446/rbct.n39.40587>
- [7] M. S. Metwally *et al.*, “Soil Properties Spatial Variability and Delineation of Site-specific Management Zones Based on Soil Fertility Using Fuzzy Clustering in a Hilly Field in Jianyang, Sichuan, China”, *Sustainability*, vol. 11, n.º 24, pp. 7084, 2019. Doi: <https://doi.org/10.3390/su11247084>
- [8] D. Mulla, “Modeling and Mapping Soil Spatial and Temporal Variability”, en *Hydropedology*, H. Lin. Boston: Academic Press, 2017, pp. 637-664. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386941-8.00020-4>
- [9] F. A. Rodríguez, J. H. Camacho y Y. Rubiano, “Variabilidad espacial de los atributos químicos del suelo en el rendimiento y calidad de café”, *Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecuaria*, vol. 17, n.º 2, pp. 237-254, 2016. Doi: https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num2_art:493
- [10] C. Valbuena, L. Martínez y R. Henao, “Variabilidad espacial del suelo y su relación con el rendimiento de mango (*Mangifera indica* L.)”, *Revista Brasileira de Fruticultura*, vol. 30, n.º 4, pp. 1146-1151, 2008. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452008000400049>
- [11] I. Freitas, F. dos Santos, R. Custódio, A. da Silva y V. Correchel, “Resistência à penetração em Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes formas de manejo” *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 16, n.º 12, pp. 1275-1281, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001200003>
- [12] S. Erşahin, *et al.* “Spatial Variation in the Solute Transport Attributes of Adjacent Typic Haplusteps, Mollic Ustifluvents, and Lithic Ustipsamments”, *Geoderma*, vol. 289, pp. 107-116, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.035>
- [13] B. E. Marín, D. Geissert, S. Negretey A. Gómez, “Spatial Distribution of Hydraulic Conductivity in Soils of Secondary Tropical Montane Cloud Forests and Shade Coffee Agroecosystems”, *Geoderma*, vol. 283, pp. 57-67, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.08.002>
- [14] D. Murakami, Y. Yamagata y T. Hirano, “Geostatistics and Gaussian Process Models”, en *Spatial Analysis Using Big Data*, Y. Yamagata y H. Seya, eds. Academic Press, 2020, pp. 57-112. Doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813127-5.00004-7>
- [15] B. Alemán, A. Búcara, C. Henríquez y C. Largaespa-da, “Mapeo digital de suelos agrícolas en la región occidental del Valle Central de Costa Rica”, *Agronomía*

- Costarricense*, vol. 43, n.º 2, pp. 157-166, 2019. Doi: <https://doi.org/10.15517/RAC.V43I2.38205>
- [16] Instituto Geográfico Agustín Codazzi –Igac, *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*, 6.ª ed. Bogotá: autor 2006.
- [17] K. Aggelopoulou, A. M. Castrignanò, T. Gemtos y D. de Benedetto, “Delineation of Management Zones in an Apple Orchard in Greece Using a Multivariate Approach”, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 90, pp. 119-130, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.09.009>
- [18] Y. Rong-Jiang *et al.*, “Determination of Site-specific Management Zones Using Soil Physicochemical Properties and Crop Yields in Coastal Reclaimed Farmland”, *Geoderma*, vol. 232-234, pp. 381-393, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.06.006>
- [19] F. Raiesi y V. Kabiri, “Identification of Soil Quality Indicators for Assessing the Effect of Different Tillage Practices Through a Soil Quality Index in a Semi-arid Environment”, *Ecological Indicators*, vol. 71, pp. 198-207, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoind.2016.06.061>
- [20] A. W. Warrick y D. R. Nielsen, “Spatial Variability of Soil Physical Properties in the Field”, en *Applications of soil physics*, D. Hillel. Nueva York: Academic Press, 1980, pp. 319-344.
- [21] A. Ilek, J. Kucza y M. Szostek, “The Effect of the Bulk Density and the Decomposition Index of Organic Matter on the Water Storage Capacity of the Surface Layers of Forest Soils”, *Geoderma*, vol. 285, pp. 27-34, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.09.025>
- [22] C. H. Sequeira, S. A. Wills, C. A. Seybold y L.T. West, “Predicting Soil Bulk Density for Incomplete Databases”, *Geoderma*, vol. 213, pp. 64-73, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.013>
- [23] D. F. Li, G. Y. Gao, M. A. Shao y B. J. Fu, “Predicting Available Water of Soil from Particle-Size Distribution and Bulk Density in an Oasis-desert Transect in Northwestern China”, *Journal of Hydrology*, vol. 538, pp. 539-550, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.046>
- [24] K. Walter, A. Don, B. Tiemeyer y A. Freibauer, “Determining Soil Bulk Density for Carbon Stock Calculations: A Systematic Method Comparison”, *Soil Science Society of America Journal*, vol. 80, n.º 3, pp. 579-591, 2016. Doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.11.0407>
- [25] F. L. Monroy, J. G. Álvarez y O. H. Alvarado, “Distribución espacial de algunas propiedades físicas del suelo en un transecto de la granja Tunguavita, Paipa”, *Rev. U.D.C.A Act. y Div. Cient.*, vol. 20, n.º 1, pp. 91-100, 2017.
- [26] M. Guatibonza, J. G. Álvarez y J. E. Sanabria, “Distribución espacial de la conductividad hidráulica en un lote de la granja Tunguavita (Paipa, Colombia)”, *Agro-nomía Colombiana*, vol. 27, n.º 2, pp. 261-271, 2009.
- [27] S. R. Tracy, C. R. Black, J. A. Roberts y S. J. Mooney, “Exploring the Interacting Effect of Soil Texture and Bulk Density on Root System Development in Tomato (*Solanum lycopersicum* L.)”, *Environmental and Experimental Botany*, vol. 91, pp. 38-47, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.03.003>
- [28] B. Volverás, E. Amézquita y J. M. Campo, “Indicadores de Calidad Física del Suelo de la Zona Cerealera Andina del Departamento de Nariño, Colombia”, *Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecuaria*, vol. 17, n.º 3, pp. 361-377, 2016. Doi: https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num3_art:513
- [29] M. A. Mora, L. Ríos, L. Ríos y J. L. Almarío, “Impacto de la actividad ganadera sobre el suelo en Colombia”, *Ingeniería y Región*, vol. 17, pp. 1-12, 2017. Doi: <https://doi.org/10.25054/22161325.1212>
- [30] S. R. Vargas, C. F. Serrato y T. A. Torrente, “Variabilidad espacial de las propiedades físicas de un suelo Fluventic Ustropepts en la cuenca baja del río Las Ceibas-Huila”, *Revista Ingeniería y Región*, vol. 13, n.º 1, pp. 113-123, 2015.
- [31] I. Pepper y M. L. Brusseau, “Physical-Chemical Characteristics of Soils and the Subsurface”, en *Environmental and Pollution Science*, M. L. Brusseau, I. Pepper y C. P. Gerba, eds., Academic Press, pp. 9-22, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814719-1.00002-1>
- [32] H. Castro y M. Gómez, “Fertilidad de suelos y Fertilizantes”, en *Ciencia del suelo. Principios Básicos*, F. Silva y H. Burbano, eds., Bogotá: Guadalupe S.A. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 2010, pp. 217-303.
- [33] E. Sayer *et al.*, “Tropical Forest Soil Carbon Stocks Do Not Increase Despite 15 Years of Doubled Litter Inputs”, *Scientific Reports*, vol. 9, n.º 18030, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54487-2>
- [34] C. P. Díaz, G. Fachin, C. Tello y L. Arévalo, “Carbono almacenado en cinco sistemas de uso de tierra, en la región San Martín, Perú”, *Rinderesu*, vol. 1, n.º 2, pp. 57-67, 2016.
- [35] M. Teng *et al.* “Spatial Variability of Soil Organic Carbon in Three Gorges Reservoir Area, China”, *Science of the Total Environment*, vol. 599-600, pp. 1308-1316, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.085>

- [36] P. Yescas, V. Álvarez, M.A. Segura, M. García, V. Hernández y G. González, “Variabilidad espacial del carbono orgánico e inorgánico del suelo en la comarca Lagunera, México”, *Bol. Soc. Geol. Mex.*, vol. 70, n.º 3, pp. 591-610, 2018. Doi: <https://doi.org/10.18268/bsgm2018v70n3a2>
- [37] A. L. da Silva, E. Gomes de Moura y T.J. Camacho, “Spatial Variability of Infiltration and Its Relationship to Some Physical Properties”, *Ingeniería e Investigación*, vol. 30, n.º 2, pp. 116-123, 2010.
- [38] E. L. Almeida, M. A. Suárez, J. G. Pérez, M. L. Naranjo, O. E. Robalino y T. D. Manzano, “Tasa de infiltración de agua en suelos agrícolas”, *Ciencia Digital*, vol. 2, n.º 3, pp. 662-671, 2018. Doi: <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v2i3.182>
- [39] D. N. Vidana, A. Biswas y I. B. Strachan, “Spatial Variability of Soil Thermal Properties and Their Relationships with Physical Properties at Field Scale”, *Soil and Tillage Research*, vol. 193, pp. 50-58, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.012>
- [40] R. Awal *et al.*, “Soil Physical Properties Spatial Variability under Long-term No-tillage Corn”, *Agronomy*, vol. 9, n.º 11, pp. 750, 2019. Doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy9110750>
- [41] H. M. Orjuela, Y. R. Sanabria y J. H. Camacho, “Spatial Analysis of Infiltration in an Oxisol of the Eastern Plains of Colombia”, *Chilean Journal of Agricultural Research*, vol. 72, n.º 3, pp. 404-410, 2012.
- [42] F. Haghghi, S. Forood y K. Kamali, “Modelling Infiltration and Geostatistical Analysis of Spatial Variability of Sorptivity and Transmissivity in a Flood Spreading Area”, *Spanish Journal of Agricultural Research*, vol. 12, n.º 1, pp. 277-288, 2014. Doi: <http://doi.org/10.5424/sjar/2014121-4659>
- [43] C. Medina, J. Camacho, C. Cortés, “Soil Penetration Resistance Analysis by Multivariate and Geostatistical Methods”, *Eng. Agric.*, vol. 32, n.º 1, pp. 91-101, 2012.
- [44] J. M. Prieto, F. G. Prieto y O. A. Acevedo, “Variabilidad espacial de la materia orgánica en un suelo dedicado al cultivo de cebada maltera”, *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, n.º 71, pp. 141-152, 2014.
- [45] Y. Bi, H. Zou y C. Zhu, “Dynamic Monitoring of Soil Bulk Density and Infiltration Rate During Coal Mining in Sandy Land with Different Vegetation”, *International Journal of Coal Science & Technology*, vol. 1, pp. 198-206, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40789-014-0025-2>