
ANÁLISIS DEL PATRÓN DE VARIACIÓN ESPACIAL DE ATRIBUTOS EDAFOLÓGICOS EN ÁREAS DE MONTAÑA

Ángel Rafael Valera Valera¹ y Jesús Arnaldo Vilorio Rendón²

¹*Centro de Investigación y Extensión en Suelos y Aguas, CIESA-UNERG. San Juan de los Morros, Guárico, Venezuela, angelvalera@unerg.edu.ve,* ²*Laboratorio de Agrología, Facultad de Agronomía, UCV, Aragua, Venezuela, jesus.viloria@gmail.com*

RESUMEN

Los atributos del suelo presentan escalas de variaciones diferentes y complejas, por lo que es muy importante y necesaria la cuantificación de dicha variabilidad a múltiples escalas, como base para la comprensión de la influencia de cada nivel de abstracción sobre las fuentes de variaciones. La estructura de variación de atributos edafológicos se puede evaluar mediante un análisis de varianza anidado o jerárquico (AVA). En este estudio se utiliza un diseño de muestreo de suelos de múltiples escalas de variación, tomando como base un modelo digital de elevación (MDE) de 15 m de resolución espacial y la clasificación digital del terreno, expresada en clases geomorfométricas representativas de los tipos de relieves de paisajes de montañas en un sector de la cuenca del río Caramacate. El objetivo de la investigación fue analizar el patrón de variación en una zona de montaña a fin de cuantificar la variabilidad del suelo y determinar el aporte de diferentes niveles de detalle: un píxel o celda (N5), una ventana de 3x3 píxeles (N4), diferentes tipos de relieve o clase geomorfométrica (N3), tipos de paisaje (N2) y distintas unidades litológicas (N1), a la variación total del suelo en el área de estudio. Con el muestreo anidado se demostró que la variación de atributos edáficos ocurre sobre un amplio rango de escalas, presentando diferentes contribuciones a la variación total. Las variables morfológicas y algunas propiedades físicas muestran alta variación de corto alcance. El nivel que contribuyó con mayor proporción a la varianza total de los suelos es el tipo de relieve (laderas de montaña), indicando que las clases geomorfométricas se consideran un nivel apropiado para realizar posteriores muestreos, interpolaciones, predicciones de propiedades del suelo y la generalización de atributos en la cartografía digital de suelos.

Palabras Clave: *Variación espacial, paisaje, muestreo anidado, clasificación digital, variogramas.*

ABSTRACT

Soil attributes present scales of different and complex variations, so it is very important and necessary to quantify this variability at multiple scales, as a basis for understanding the influence of each level of abstraction on the sources of variations. The structure of variation of pedological attributes can be evaluated through nested or hierarchical variance analysis (NVA). In this study a soil sampling design of multiple scales of variation is used, based on a digital elevation model (MDE) of 15 m of spatial resolution and the digital classification of the terrain, expressed in geomorphometric classes representative of the types of reliefs of mountain landscapes in a sector from Caramacate river basin. The objective of the research was to analyze the variation pattern in a mountain area in order to quantify the soil variability and determine the contribution of different levels of detail: a pixel or cell (N5), a window of 3x3 pixels (N4), different relief types or geomorphometric class (N3), landscape types (N2) and different lithological units (N1), to the total variation of the soil in the study area. With nested sampling it was shown that the variation of edaphic attributes occurs over a wide range of scales, presenting different contributions to the total variation. The morphological variables and some physical properties show high short-range variation. The level that contributed the greatest proportion to the total variance of the soils is the type of relief (mountain slopes), indicating that the geomorphometric classes are considered an appropriate level to carry out subsequent sampling, interpolations, predictions of soil properties and generalization of attributes in digital soil mapping.

Key Words: *Spatial variation, landscape, nested sampling, digital classification, variograms.*

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los sistemas de información geográfica ha promovido el uso de modelos digitales de elevación (MDE) e imágenes satelitales como fuentes de datos ambientales para la cartografía digital de suelos. Tanto en un MDE como en una imagen satelital, el terreno es representado como una malla continua de celdas de igual tamaño, cada una de las cuales es identificada por tres valores (x, y, z). Los dos primeros indican la ubicación geográfica de la celda y el tercero representa la altura del terreno en el MDE o su reflectancia en la imagen satelital. En ambas fuentes de datos digitales, el tamaño de la celda determina la resolución espacial del modelo. La predicción de propiedades del suelo a partir de un MDE o de una imagen satelital o de ambos, requiere que las propiedades edáficas determinadas en cada sitio de muestreo (pedón) sean generalizadas a toda una celda del modelo. Aún más, corrientemente se generalizan a una ventana constituida por las cuatro (2x2) o nueve (3x3) celdas más cercanas al sitio de muestreo, para tomar en consideración posibles errores de ubicación en el terreno. En consecuencia, si la variabilidad del suelo en cortas distancias es importante, este procedimiento podría limitar seriamente la calidad de las predicciones. Por esta razón, es importante conocer la estructura de la variabilidad espacial del suelo dentro de una celda, en una ventana de nueve celdas, entre celdas de una misma clase del modelo digital y entre celdas de clases diferentes.

En tal sentido, es necesario cuantificar la variabilidad del suelo a través de múltiples escalas, con la finalidad de mejorar el uso de la información edáfica en diversas aplicaciones. La cuantificación de la variabilidad del suelo en múltiples escalas es de gran importancia para el modelado y la predicción, ya que suministra las bases para el desarrollo y la comprensión de la escala de influencia sobre dicha variabilidad, proporciona un esquema sobre el cual puede ser posible la representación de los datos, permite discriminar el nivel de detalle más apropiado para la planificación de posteriores muestreos de suelo, y suministra un marco de referencia para la predicción de propiedades y clases de suelos a nivel semidetallado (Arnold y Wilding, 1991; Lin *et al.*, 2005; Esfandiarpour *et al.*, 2009; Valera, 2015). Los atributos del suelo presentan escalas de variación diferentes y complejas (Burrough, 1993), por lo que la evaluación de su estructura de variación de se realiza mediante un análisis de varianza anidado o jerárquico (AVA).

Este análisis permite estimar la variabilidad existente en diferentes niveles o escalas de variación espacial, y la determinación de los componentes de variación en un área determinada, como resultado de la acción de los factores formadores de suelos que actúan sobre un continuo de escala espacial. En esta investigación, se considera el agrupamiento anidado de la resolución espacial, equivalente a la unidad mínima (tamaño de celda o píxel) representativa de clases digitales del terreno o clases geomorfométricas. En la evaluación realizada se analizaron, cuantificaron y determinaron los niveles jerárquicos que aportan la mayor variación, partiendo de la resolución espacial del MDE (una celda=15 m) considerado en la obtención de unidades digitales de paisaje, hasta las principales unidades litológicas presentes en un sector de la cuenca del río Caramacate, estado Aragua en Venezuela.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

La investigación se realizó en un área muestra de 6.761 ha de la cuenca del río Caramacate, en la región centro-norte costera, al sur del estado Aragua, Venezuela. Esta cuenca posee una superficie de 18.012 ha y representa el 8,5 % de la cuenca alta del río Guárico (Figura 1). En el área se presentan dos zonas bioclimáticas: Bosque Seco Tropical en las zonas más bajas y Bosque Húmedo Premontano en las más altas de la cuenca (Spósito y Elizalde, 2004). El paisaje está constituido principalmente por laderas de montaña, escarpadas, con pendientes medias del orden del 45% y altitudes que oscilan entre 334 y 1405 msnm. En el área muestra afloran materiales dominantes de las formaciones, geológicas El Caño-El Chino (VCñc) y El Carmen (VCca), constituidas por asociaciones meta-volcano-sedimentarias del Grupo Villa de Cura (Urbani y Rodríguez, 2004). Los suelos en su mayoría son entisoles, inceptisoles y alfisoles, con régimen de humedad ústico. La variabilidad de suelos en las laderas ha sido incrementada por la incidencia y superposición de movimientos en masa, que determinan la coexistencia de zonas con cicatrices de diferentes edades y sectores donde existe acumulación de los sedimentos superficiales (Prada et al., 2004; Pineda et al., 2011).



Figura 1. Ubicación relativa del área de estudio dentro de la cuenca del río Caramacate, estado Aragua, Venezuela.

Clasificación digital del terreno

En la zona se han definido 10 clases geomorfológicas o morfométricas que se distribuyen en el terreno siguiendo una estructura sistemática de variación espacial. Estas clases digitales se obtuvieron en trabajos previos de un modelo digital de elevación (MDE), una imagen satelital de 15 m de resolución espacial, un modelo de precipitación y un mapa de las unidades litológicas (Valera, 2015). El MDE se empleó para derivar mapas de covariables ambientales o atributos morfométricos, tales como: altitud (m), pendiente (rad), orientación de la pendiente (rad), posición relativa, curvatura vertical ($m \cdot m^{-1}$), curvatura horizontal ($m \cdot m^{-1}$), área de captación (m^2), índice topográfico de humedad y el índice de transporte de sedimentos. El índice de

vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se calculó con las bandas roja e infrarroja. Para el agrupamiento de las covariables ambientales se aplicó una red de agrupamiento borroso (FKCN, *Fuzzy Kohonen Clustering Network*) (Bezdeck *et al.*, 1992; Vilorio, 2007), lo que generó las diez clases morfométricas. Una de estas clases se relaciona con las vegas de valles intramontanos (clase B), otra corresponde a crestas y vigas de montañas (clase A) y las clases restantes se ubican en laderas de montañas, con diferencias en altura relativa, exposición, curvatura del terreno y cobertura vegetal (Valera, 2018). Una vez obtenida la clasificación digital del terreno se ubicaron las unidades de paisaje representativas de la cuenca y en cada una de ellas se realizó el muestreo y la evaluación de los suelos (Figura 2) para la cuantificación de la variabilidad del suelo y posteriormente determinar el aporte de los diferentes niveles de detalle considerados.

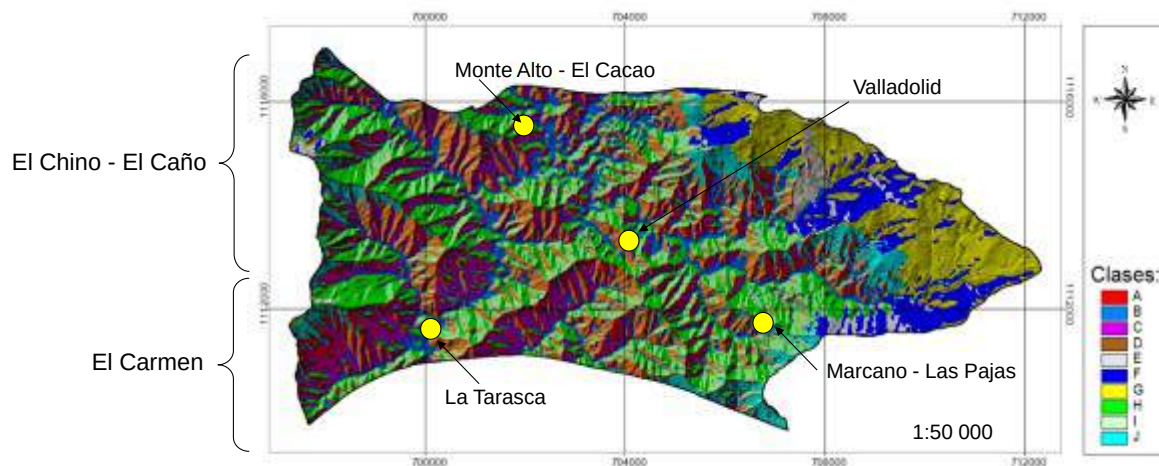


Figura 2. Distribución de las clases digitales del terreno y los sitios seleccionados para el muestreo de suelos.

Estructura del muestreo jerárquico

La estructura del análisis de varianza utilizado en esta investigación considera cinco (5) niveles de jerarquía, abarcando un amplio intervalo de escalas espaciales, para cuyo propósito se aplicó un muestreo estratificado y sistemático. El AVA utilizado fue el modelo de efectos aleatorios o Modelo II de Marcuse (1949), esquematizado por la siguiente ecuación lineal general (1):

$$Z_{ijklmn} = \mu + L_i + P_{ij} + R_{ijk} + V_{ijkl} + Px_{ijklm} + e_{ijklmn} \dots (1)$$

- Z_{ijklmn} : valor de la propiedad de suelo considerada
 μ : valor promedio de la propiedad de suelo en el área estudiada (sector de interés *en la cuenca del río Caramacate*)
 L_i : diferencia entre μ y la media de Z al nivel 1 (*unidades litológicas*)
 P_{ij} : diferencia de la media de Z al nivel 2 (*tipo de paisaje*) dentro del nivel 1 y la media del nivel 1
 R_{ijk} : diferencia de la media de Z al nivel 3 (*tipo de relieve*) dentro del nivel 2 y la media del nivel 2
 V_{ijkl} : diferencia de la media de Z al nivel 4 (*ventana de 3x3 píxeles*) dentro del nivel 3 y la media del nivel 3
 Px_{ijklm} : diferencia de la media de Z al nivel 5 (*un píxel o sitio de muestreo*) dentro del nivel 4 y la media del nivel 4
 e_{ijklmn} : efecto residual (varianza no explicada)

Los componentes **L**, **P**, **R**, **V**, **Px** y **e**, son variables independientes aleatorias con una media igual a cero y varianzas s^2_L , s^2_P , s^2_R , s^2_V , s^2_{Px} y s^2_e , respectivamente (Edmonds *et al.*, 1985; Webster y Oliver, 1990; Lin *et al.*, 2005). De acuerdo con el procedimiento del modelo lineal general, el análisis de varianza se realiza para cada uno de los niveles. El AVA permite la obtención de los valores de la suma de cuadrados (**SC**) para cada nivel. La relación entre **SC** y los grados de libertad (**GL**) genera los cuadrados medios (**CM**), los cuales se utilizan para la partición de la variabilidad aportada por cada nivel jerárquico en el diseño de muestreo. Los componentes de la varianza son estimados en cada nivel del diseño de muestreo, considerando la Tabla 1. El componente individual de un nivel determinado mide la variación atribuible a dicho nivel, y juntos suman la varianza total (σ^2).

Tabla 1. Niveles empleados en el análisis de varianza anidado y sus principales parámetros.

Nivel	Fuente de Variación	Grados de Libertad	Componentes de la Varianza
1	L	n_1-1	$\sigma^2_5 + n_5\sigma^2_4 + n_5n_4\sigma^2_3 + n_5n_4n_3\sigma^2_2 + n_5n_4n_3n_2\sigma^2_1$
2	P	$n_1(n_2-1)$	$\sigma^2_5 + n_5\sigma^2_4 + n_5n_4\sigma^2_3 + n_5n_4n_3\sigma^2_2$
3	R	$n_1n_2(n_3-1)$	$\sigma^2_5 + n_5\sigma^2_4 + n_5n_4\sigma^2_3$
4	V	$n_1n_2n_3(n_4-1)$	$\sigma^2_5 + n_5\sigma^2_4$
5	Px	$n_1n_2n_3n_4(n_5-1)$	σ^2_5
Total		N-1	$1/(n-1) \sum (Z_n - \bar{Z})^2$

n_i : número de observaciones en cada uno de los niveles, N: Tamaño de la muestra, L: Unidad litológica, P: Tipo de paisaje, R: Tipo de relieve, V: Ventana de 3x3 píxeles, Px: Píxel (15 m de resolución espacial).

Fuente: Valera (2015). Adaptado de Burrough *et al.* (1988), Ovalles (1992) y Webster (2008).

La estructura del muestreo anidado se representa como un árbol o nido (Figura 3), en la cual los componentes de un nivel contienen los componentes del nivel inferior siguiente (Wu, 1999). Es decir, cada clase del nivel inferior está comprendida completamente dentro de una clase del nivel inmediato superior, y cada punto de muestreo está comprendido dentro de una, y sólo una clase en cada uno de los niveles (Webster *et al.*, 2006; Webster, 2008).

En la jerarquía anidada, la escala del sistema se incrementa desde la más pequeña en el nivel inferior, hasta la más grande en la parte superior, y el análisis de varianza jerárquico permite la determinación de la cantidad de varianza total aportada por cada uno de los niveles en el diseño anidado (De Boer, 1992; Wollenhaupt *et al.*, 1997). Por tales razones, de acuerdo con el modelo de estructura jerárquica, en esta investigación las mediciones se realizan en el nivel jerárquico 5, el cual está representado por la resolución espacial del MDE utilizado.

Muestreo de suelos

El muestreo jerárquico se basó en cinco niveles (N1 (± 1500 m): Unidades Litológicas; N2 (± 700 m): Tipo de Paisaje; N3 (± 90 m): Tipo de Relieve (Clases Geomorfométricas); N4 (± 45 m): Ventana de 3x3 Px; N5 (± 8 m): un Px = 15 m). La evaluación de suelos se inició con cuatro puntos de muestreo superficiales en el nivel

4, con dos repeticiones en el resto de los niveles ($2 \times 2 \times 2 \times 4 \times 2$), obteniendo un diseño anidado balanceado con 64 sitios evaluados.

En cada sitio seleccionado se realizaron evaluaciones de las propiedades morfológicas

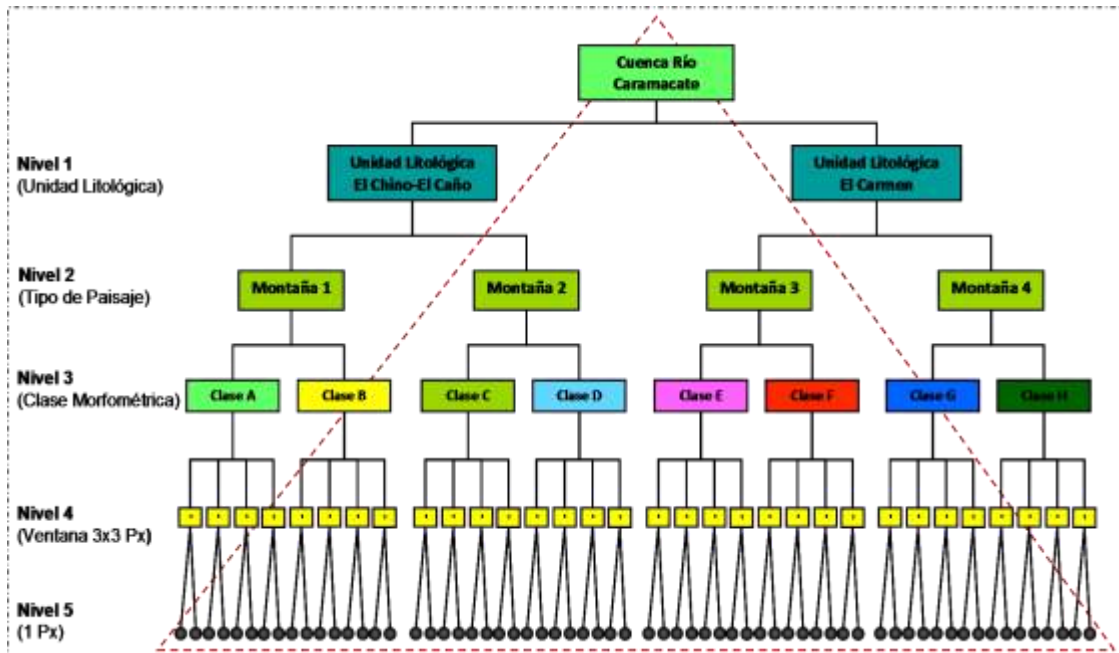


Figura 3. Diseño del muestreo balanceado con cinco niveles de jerarquía en la cuenca del río Caramacate.

por cada horizonte genético, haciendo énfasis en el tipo de perfil (secuencias 1: A/C, 2: A/BC/C, 3: A/Bw/C, 4: A/Bt/C), espesor del horizonte A (Esp_A), espesor del *solum* (Esp_AB) y los parámetros que definen el color del suelo: matiz, value (intensidad), croma (pureza), color en húmedo (Color H: ecuación lineal de Hurst), índice de palidez (IPal= *croma* x *value*), índice de rubefacción (RR). Se realizó un muestreo de suelos no disturbado en los horizontes A y B, con un implemento tipo *Uhland*, y se tomaron muestras disturbadas para análisis de laboratorio.

En cada muestra disturbada se determinó la distribución de tamaño de partículas (DTP) por el método de la pipeta; pH en agua 1:1 y KCl 1N (1:1); carbono orgánico (CO, %) por el método de Walkley y Black; capacidad de intercambio catiónico (CIC, cmol kg^{-1}) y bases cambiables por acetato de amonio 1N, a pH 7; Acidez Total ($\text{Al}^{+3} + \text{H}^+$, cmol kg^{-1}) por KCl 1N y sales solubles (CE 1:1, dS m^{-1}). En las muestras no disturbadas se determinó la capacidad de retención de humedad de los suelos a bajos potenciales (0, -5, -10, -33 y -500 kPa); y los índices estructurales: conductividad hidráulica saturada (K_s , cm h^{-1}), porosidad total (MP: macroporos, %; mP: microporos, %) y densidad aparente (D_a , Mg m^{-3}). También se evaluaron los índices de consistencia: límite superior de plasticidad (LSP, %; límite inferior de plasticidad (LIP, %) y el índice de plasticidad (IP, %) en la fracción fina menor a $425 \mu\text{m}$; se determinó la estabilidad de los agregados estables al agua (AE, %); microagregados (Mic $< 250 \mu\text{m}$) y macroagregados (Mac: 250-2000 μm) y el diámetro medio ponderado de los

agregados (DMP, %); a estos análisis se incorporó un índice del grado de estructuración de los suelos (IA= Mac/Mic) (Valera, 2003). Finalmente se determinó el contenido de esqueleto grueso en los suelos (EG, %).

Análisis estadístico y geoestadístico

Los datos de suelos se sometieron a un análisis exploratorio; se realizaron pruebas de normalidad (*Smirnov-Kolmogorov*), diferencias de medias (prueba *t*) y homogeneidad de varianzas (prueba *F*). Se aplicó la prueba de ji cuadrada de Bartlett (X^2) para demostrar la homogeneidad de varianzas y se realizó el análisis de varianza anidado. La estimación de los componentes de la varianza se corroboró con la aplicación del módulo NEST del conjunto de programas para análisis geoestadístico *PC-GEOSTAT* (Burrough y van Keulen, 1986), el cual realiza el análisis de varianza anidado hasta seis (6) niveles de jerarquía. La representación gráfica de los patrones de variación se realizó a través de variogramas, los cuales incluyen la varianza acumulada en función de los diferentes niveles jerárquicos considerados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis estadístico

La aplicación de la metodología de cercas externas e internas de Tukey (1977), permitió encontrar algunos valores atípicos para los atributos espesor del *solum* (Esp AB) y la secuencia de horizontes en el perfil (tipo de perfil) los cuales son consecuencia de procesos de erosión en algunos sitios y acumulación de materiales en otros. Debido a que los valores de los atributos considerados estadísticamente atípicos se deben a la realidad presente en el terreno, no fueron excluidos de los análisis posteriores. Los resultados del análisis descriptivo de los datos se presentan en las tablas 2 a 4, esquematizados de acuerdo con la naturaleza de las propiedades del suelo. Con respecto a la variabilidad de las propiedades morfológicas relacionadas con la profundidad del suelo (Tabla 2), los mayores coeficientes de variación (CV) lo presentaron el tipo de perfil y el espesor del *solum* con valores de 74 y 56%, respectivamente.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de las propiedades morfológicas de los suelos de un sector de la cuenca del río Caramacate.

Propiedades	Min.	Max.	Mediana	Media	S	S ²	CV (%)
Esp A (cm)	6,0	18,0	11,5	11,8	2,9	8,4	24,5
Esp B (cm)	0,0	30,0	0,0	3,1	7,4	54,7	241,6
Esp AB (cm)	6,0	44,0	12,0	14,7	8,3	68,4	56,1
PEF (cm)	15,0	66,0	28,5	31,5	10,2	104,4	32,5
T. Perfil	1	4	1	2	1	1	73,6
RR	0,0	6,7	0,0	0,7	1,5	2,3	205,9
IPal	4,0	24,0	9,0	9,6	4,3	18,5	44,8
Matiz	5	10	10	9	1	2	13
Value	2	4	3	3	1	0	17
Croma	2	6	3	3	1	1	32
Color H	11,3	30,0	20,0	21,2	6,1	36,6	28,6

Esp a: Espesor A, Esp B: Espesor B, Esp AB: espesor del *solum*, PEF: Profundidad efectiva, T. Perfil: Tipo de perfil (secuencia de horizontes), RR: Índice de rubefacción, IPal: Índice de palidez, Color H: Color en húmedo, n= 64.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de las propiedades físicas de los suelos de un sector de la cuenca del río Caramacate.

Propiedades	Min.	Max.	Mediana	Media	S	S ²	CV (%)
A (%)	7,0	29,3	18,6	18,8	5,1	26,4	27,3
L (%)	27,5	72,1	53,7	52,0	10,6	112,4	20,4
a (%)	11,4	54,7	27,9	29,2	9,5	90,5	32,6
amf (%)	0,8	22,3	3,0	4,0	3,4	11,3	85,1
af (%)	0,5	14,9	7,4	7,7	2,9	8,3	37,2
am (%)	1,6	13,0	6,0	6,0	2,4	5,9	40,7
ag (%)	0,7	11,4	6,7	6,2	2,8	7,8	45,4
amg (%)	0,2	29,5	4,2	5,3	4,9	24,0	91,6
EG (%)	3,1	73,0	31,5	33,0	20,5	422,1	62,3
DMP (mm)	0,6	3,1	1,9	1,9	0,6	0,3	31,8
AE 2-4 mm	16,9	93,5	77,5	70,5	20,1	404,3	28,5
IA (%Mac/%Mic)	0,8	16,9	7,2	7,1	3,8	14,6	54,3
LSP (%)	40,5	65,0	50,7	50,8	5,1	26,1	10,1
LIP (%)	32,4	55,7	41,1	42,1	4,7	22,5	11,3
IP	3,4	12,7	8,9	8,8	2,0	3,9	22,4
RH -10 kPa (%)	2,7	28,3	18,7	18,1	4,8	23,2	26,6
RH -33 kPa (%)	4,7	34,3	19,9	19,1	7,2	52,4	37,9
RH -500 kPa (%)	2,7	33,3	16,7	17,1	7,1	51,0	41,7
Ks (cm h ⁻¹)	1,5	131,8	13,9	28,0	31,3	982,4	112,1
PT (%)	16,8	56,0	43,3	42,2	8,2	67,2	19,4
MP (%)	6,5	25,8	10,7	10,9	2,9	8,5	26,6
mP (%)	4,8	48,3	32,4	31,3	8,1	65,4	25,9
Da (Mg m ⁻³)	1,10	1,58	1,27	1,28	0,11	0,01	8,42

A: Arcilla, a: Arena, L: Limo, amf: Arena muy fina, af: Arena fina, am: Arena media, ag: Arena gruesa, amg: Arena muy gruesa, EG: Esqueleto grueso, DMP: Diámetro medio ponderado, AE: Agregados estables al agua, IA: Índice de agregación, LSP: Límite superior de plasticidad, LIP: Límite inferior de plasticidad, IP: Índice de plasticidad, RH: retención de humedad, Ks: Conductividad hidráulica saturada, PT: Porosidad total, MP: Macroporosidad, mP: Microporosidad, Da: Densidad aparente, n= 64.

Sin embargo, la mayor varianza está fue manifestada por el espesor del horizonte B, condición que está relacionada con la ocurrencia de movimientos en masa en las laderas de los distintos paisajes del sector evaluado. En cuanto a las variables relacionadas con el color de los suelos, el mayor coeficiente de variación está dado por el índice de rubefacción (RR). Este atributo presenta altas variaciones debido posiblemente a los cambios ocurridos en la superficie del suelo por efecto de los procesos erosivos que suceden en el sector de estudio, entremezclando los materiales de arrastre de diferentes posiciones geomorfológicas, o también por la pérdida de Fe hacia las zonas más bajas de las laderas en algunos sectores.

Con relación a las variaciones de las propiedades físicas relacionadas con la granulometría de los suelos (Tabla 3), los coeficientes más altos lo presenta el contenido de arena muy gruesa (amg) (92%) y arena muy fina (amf) (85%), aunque la mayor varianza está dada por el contenido de fragmentos gruesos y la cantidad de limos en la capa superficial de los suelos. En cuanto a las propiedades físicas relacionadas con la estabilidad de los agregados del suelo, los mayores coeficientes

de variación están determinados por los componentes mayores que 250 μm , los cuales son superiores al 70%. La mayor varianza de los datos está dada por los agregados estables al agua de 2 a 4 mm y los macroagregados del suelo (0,25 a 2 mm). Con respecto a las propiedades físicas relacionadas con los índices estructurales, la mayor variación está determinada por la conductividad hidráulica saturada de los suelos (112%), cuyos valores de varianza también son elevados.

La variabilidad de las propiedades químicas de los suelos (Tabla 4) está determinada por los coeficientes de variación presentados por la acidez intercambiable (137%), el contenido de sodio cambiante (82%) y el fósforo disponible (72%). Sin embargo, la mayor varianza de los datos está dada por el porcentaje de saturación de bases. Estas variaciones se deben principalmente a la existencia de suelos con complejo de cambio más saturados que otros, con altas diferencias en la acidez total.

No obstante, la mayoría de los atributos estudiados, tanto físicos como químicos y morfológicos, tienen una baja a moderada variación (CV menor al 30%), destacándose: Esp A, Color (Matiz, Value), distribución de tamaño de partículas (%A, %L), índices estructurales (%PT, MP, mP, Da), retención de humedad (0, -5, -10 kPa), plasticidad (LSP, LIP, IP), reacción del suelo (pH 1:1 en agua, pH KCl), y disponibilidad de nutrientes (CIC, PSB y %CO).

Tabla 4. Estadísticos descriptivos de las propiedades químicas de los suelos de un sector de la cuenca del río Caramacate.

Propiedades	Min.	Max.	Mediana	Media	S	S ²	CV (%)
CIC (cmol kg^{-1})	13,8	49,1	30,4	30,9	8,1	66,0	26,3
Ca (cmol kg^{-1})	2,4	21,6	9,6	9,7	4,5	20,3	46,3
Mg (cmol kg^{-1})	1,6	16,8	7,1	7,7	3,5	12,4	45,6
K (cmol kg^{-1})	0,2	1,9	0,7	0,8	0,4	0,2	50,6
Na (cmol kg^{-1})	0,1	1,3	0,3	0,5	0,4	0,1	82,0
ΣBases	4,9	32,4	18,1	18,7	7,0	48,3	37,2
PSB (%)	23,2	86,9	58,6	59,4	13,0	169,0	21,9
Ca/Mg	0,4	3,3	1,4	1,4	0,6	0,3	42,0
pH en Agua (1:1)	4,58	6,30	5,40	5,35	0,35	0,12	6,5
pH KCl 1N (1:1)	3,7	5,6	4,5	4,4	0,4	0,1	7,9
Acidez (cmol kg^{-1})	0,0	2,8	0,3	0,3	0,4	0,2	137,5
CE (dS m^{-1})	0,00	0,34	0,13	0,14	0,07	0,00	48,7
P (mg kg^{-1})	0,0	27,0	6,0	7,1	5,1	26,1	71,7
CO (%)	0,81	2,22	1,70	1,73	0,39	0,15	13,0

CIC: Capacidad de intercambio catiónico, ΣBases : Suma de bases, PSB: Porcentaje de saturación con bases, Ca/Mg: Relación Calcio:Magnesio, CE: Conductividad eléctrica, P: Fósforo disponible, CO: Contenido de carbono orgánico, n=64.

Distribución de datos y pruebas de normalidad

En cuanto a la evaluación de la distribución de los datos y las pruebas de normalidad de los atributos considerados (prueba de *Kolmogorov-Smirnov*), 70 % de las variables edáficas presentan observaciones que cumplen con el supuesto de normalidad. Entre las variables que no presentan datos distribuidos normalmente se encuentran las morfológicas: Esp_AB, tipo de perfil, color del suelo (matiz, value, croma, RR, IPal); las químicas: Na, acidez y P, y las físicas: %amf, AE 2-4mm, %Mac, %Mic y Ks.

Los datos originales de estas variables fueron transformados a logaritmos naturales, lográndose homogeneizar las varianzas de Esp A, Esp AB, IPal y Ks. De esta manera se logró cumplir para el 78% del total de variables edáficas, con los supuestos de distribución normal requeridos por los métodos estadísticos, para la aplicación de la prueba de ji cuadrada de Bartlett (X^2) y el posterior análisis de varianza anidado. En cuanto a la aplicación de la prueba de ji cuadrada para los datos de las unidades litológicas dominantes en la zona, los resultados obtenidos evidenciaron que la mayoría de los atributos proceden de poblaciones con la misma varianza, especialmente los datos superficiales de variables morfológicas y químicas. Esta situación indicó que la mayoría de los atributos reflejan la existencia de homogeneidad de varianzas, es decir, aun cuando los valores de error del estadístico X^2 difieren entre las unidades litológicas, los resultados observados entre los valores de las varianzas se deben a un efecto aleatorio y existe la probabilidad de que las fuentes de variación sean las mismas. Algunos atributos, tales como el espesor del *solum* (Esp AB), %A, Ks y los agregados estables al agua, son altamente discrepantes por la influencia de factores condicionantes del terreno. Esto indicó que las varianzas son desiguales, por lo que se tiene la probabilidad de que existen fuentes de error o agentes de variación que no se deben al azar. Esta situación podría formar parte de la influencia de las fuertes pendientes de la zona, la estacionalidad de las lluvias y la escasa cobertura vegetal, lo que ha favorecido la ocurrencia de deslizamientos de tierra, generando un patrón muy complejo de variación espacial de suelos en las laderas de las unidades de paisaje de montaña.

Análisis de varianza anidado

Los resultados del AVA para los suelos de la cuenca del río Caramacate se organizaron de acuerdo con la naturaleza de las variables estudiadas, agrupándose en propiedades morfológicas (espesor, tipo de perfil, color), físicas (relacionadas con granulometría, índices de consistencia, retención de agua, estabilidad de agregados al agua e índices estructurales) y químicas (relacionadas con cationes intercambiables, pH, sales y disponibilidad de nutrientes). Estos resultados se presentan en las Tablas 5 al 7, los cuales muestran la distribución del porcentaje de varianza de dichas variables en los diferentes niveles jerárquicos.

La información presentada en la Tabla 5 indica que la mayoría de las variables morfológicas relacionadas con la profundidad (Esp A, Esp AB, Tipo de perfil) y el color de los suelos, presentan una alta variación de corto alcance, con varianzas superiores al 60 % en los primeros 15 m de distancia, es decir dentro de una resolución espacial equivalente a un píxel. Solamente el atributo *Value* (intensidad del color) presenta una variación inicial de 46%, pero acumula el 80% de la varianza a los 45 m de distancia. Estos resultados están asociados a los procesos de erosión que ocurren en las laderas, los cuales son tan intensos que tienen una gran influencia en el área equivalente a un píxel de 15 m x 15 m. Esta complejidad del patrón de variación espacial de las propiedades morfológicas del suelo ha dificultado los intentos previos de producir un mapa de suelos del área de estudio. Al respecto hay que señalar que los mapas convencionales de suelos se basan en clases reconocibles en campo en función de propiedades morfológicas.

Tabla 5. Distribución del porcentaje de varianza aportado por las variables morfológicas de los suelos en un sector de la cuenca del río Caramacate.

Atributo	Varianza aportada por nivel (%)				
	Pixel (15 m)	3x3 Píxeles	Tipo de Relieve	Tipo de Paisaje	Unidad Litológica
Esp A (cm)	60,9	16,1	6,0	17,0	0,0
Esp B (cm)	70,2	0,0	9,5	20,2	0,0
Esp AB (cm)	61,2	4,1	9,3	25,4	0,0
Tipo de Perfil	78,8	0,0	16,8	4,3	0,0
PEF (cm)	62,5	23,6	6,8	7,2	0,0
Matiz	79,6	0,0	20,4	0,0	0,0
Value (intensidad)	46,5	36,1	0,0	0,0	17,4
Croma (Pureza)	74,6	1,9	23,5	0,0	0,0
Color H	64,5	0,0	27,3	0,0	8,3
RR	77,5	0,0	22,5	0,0	0,0
IPal	62,1	21,1	16,8	0,0	0,0

Esp A: Espesor A, Esp B: Espesor B, Esp AB: Espesor del *solum*, PEF: Profundidad efectiva, Color H: Color en húmedo, RR: Índice de rubefacción, IPal: Índice de palidez.

Los resultados de este estudio revelan que el patrón de variación de estas propiedades del suelo puede ser representado en un mapa convencional solo por medio de unidades cartográficas consistentes en complejos de suelos. Alternativamente, para representar en un mapa la variación regional del suelo, más que la variación de corto alcance, el mapa podría basarse en valores promedios de múltiples observaciones dentro de un área pequeña (e.g. 1 px, 3x3 px), o muestras compuestas en vez de una muestra simple (Burrough *et al.*, 1988; Webster, 2008).

Algunas propiedades físicas del suelo también muestran una alta proporción (48 a 72%) de su variación total en un área de 15 m de lado, equivalente a un pixel del modelo digital de terreno (Tabla 6). Entre estas se destacan atributos relacionados con la distribución de tamaño de partículas (L, af, amf, amg), con la retención de humedad de los suelos a bajos potenciales (RH 0, -5 kPa), con índices estructurales (PT, MP, mP, Da) y algunas fracciones de agregados estables al agua (AE<0,25mm). Otros atributos físicos como A, IP, RH -10 kPa, también alcanzan una alta variación de corto alcance en los primeros 45 m. Sin embargo, los atributos am, ag, EG, RH (-33, -500 kPa), Ks, DMP y el IA acumulan la máxima cantidad de varianza a los 90 m, lo que indica que la distancia entre muestras para determinar esos atributos coincide con el espaciamiento entre el nivel jerárquico de tipos de relieve.

La variación de % limo, Arcilla y arena en cortas distancias son relativamente importantes, pero la variación espacial del porcentaje de esqueleto grueso ocurre en mayor proporción en distancias equivalentes al tipo de relieve y tipo de paisaje. Dentro de las fracciones de arena, la influencia de la variación de corto alcance tiende a disminuir a medida que aumenta el diámetro de las partículas.

De manera similar, la retención de humedad del suelo a bajos potenciales (0, -5, -10 kPa) muestra una proporción muy importante de variación en pequeñas distancias; pero a potenciales más elevados (-500 kPa) la mayor variación de esta propiedad del suelo ocurre entre diferentes tipos de paisaje.

El componente de variación de corto alcance es alto también en las variables relacionadas con los índices estructurales y la estructuración de los suelos (a excepción de la Da y el espacio poroso).

Tabla 6. Distribución del porcentaje de varianza aportado por las variables físicas de los suelos en un sector de la cuenca del río Caramacate.

Atributo	Varianza aportada por nivel (%)				
	Pixel (15 m)	3x3 Píxeles	Tipo de Relieve	Tipo de Paisaje	Unidad Litológica
A (%)	21,0	65,5	3,3	0,0	10,2
L (%)	18,5	32,5	11,5	3,2	34,3
a (%)	23,4	20,6	34,2	0,0	21,8
amf (%)	64,7	17,8	5,0	12,5	0,0
af (%)	66,0	8,4	11,9	0,0	13,7
am (%)	34,1	22,0	35,0	8,9	0,0
ag (%)	10,1	33,0	9,7	47,2	0,0
amg (%)	48,2	0,0	22,2	0,6	29,0
EG (%)	19,9	1,2	4,9	74,0	0,0
LSP (%)	50,2	35,2	6,3	0,0	8,3
LIP (%)	49,7	31,9	5,3	0,0	13,1
IP (%)	31,0	16,4	52,6	0,0	0,0
RH 0 kPa (%)	66,2	0,0	6,8	4,4	22,6
RH -5 kPa (%)	66,1	1,2	3,1	15,0	14,6
RH -10 kPa (%)	66,8	0,5	14,2	17,0	1,5
RH -33 kPa (%)	49,3	5,0	3,4	42,3	0,0
RH -500 kPa (%)	24,0	0,0	3,2	62,3	10,6
PT (%)	71,7	0,0	5,8	6,0	16,5
MP (%)	55,5	0,0	5,7	15,3	23,5
mP (%)	69,5	0,0	11,6	18,9	0,0
Da (Mg m ⁻³)	58,8	0,0	2,5	1,2	37,6
Ks (cm h ⁻¹)	27,4	10,3	0,6	51,4	10,4
DMP (mm)	32,7	0,0	0,9	66,4	0,0
%AE 2-4mm	44,8	0,0	0,0	55,2	0,0
%AE 1-2 mm	39,6	4,3	2,1	54,0	0,0
%AE 0,5-1 mm	32,9	14,6	5,4	47,1	0,0
%AE 0,25-0,5 mm	32,4	28,0	1,3	38,3	0,0
%AE <0,25 mm	58,2	2,6	0,0	39,2	0,0
%AE 0,25-2 mm	57,8	3,2	0,0	38,9	0,0
IA (%Mac/%Mic)	27,6	26,3	0,0	46,1	0,0

RH: retención de humedad, LSP: Límite Superior de Plasticidad; LIP: Límite Inferior de Plasticidad; IP: Índice de Plasticidad; PT: Porosidad Total; MP: Macroporos, mP: Microporos, DMP: Diámetro Medio Ponderado, AE: Agregados Estables al Agua, IA: Índice de agregación.

Con relación a las variables químicas (Tabla 7), la mayoría de los atributos alcanzan una elevada tasa de variación a partir del tercer nivel de abstracción (90 m de distancia). La información aportada por los cationes intercambiables, CIC, Σ Bases, Ca/Mg, reacción del suelo (pH 1:1, pH KCl) 1N (1:1), acidez, CE (1:1) y %CO, muestran un cambio abrupto a partir de los 90 m de distancia, lo que indica que muestrear a niveles inferiores implica un esfuerzo inútil porque se obtiene la misma información que muestreando a nivel de laderas de montaña. Además, muestrear a niveles superiores (tipo de paisaje) involucraría una mayor variación de dichos atributos. Las variables químicas evaluadas ejercen una gran influencia en la acumulación de la varianza en el segundo nivel jerárquico (tipo de paisaje), lo que significa que a

partir del tercer nivel (tipo de relieve) se resuelve el patrón o la estructura de variación presente en los suelos. Es decir, casi todos estos atributos edáficos son de gran importancia para la diferenciación de unidades de suelo a nivel del tipo de relieve en la zona de estudio.

Tabla 7. Distribución del porcentaje de varianza aportado por las variables químicas de los suelos en un sector de la cuenca del río Caramacate.

Atributo	Varianza aportada por nivel (%)				
	Pixel (15 m)	3x3 Píxeles	Tipo de Relieve	Tipo de Paisaje	Unidad Litológica
CIC (cmol kg ⁻¹)	12,5	22,9	7,3	57,3	0,0
Ca (cmol kg ⁻¹)	4,5	15,1	3,9	76,5	0,0
Mg (cmol kg ⁻¹)	16,3	28,2	2,2	44,2	9,1
K (cmol kg ⁻¹)	32,1	44,3	0,0	23,6	0,0
Na (cmol kg ⁻¹)	30,1	2,7	15,8	44,9	6,5
ΣBases (cmol kg ⁻¹)	6,9	21,9	5,3	65,9	0,0
PSB (%)	42,7	9,9	0,0	43,6	3,8
Ca/Mg	32,0	13,8	0,0	54,2	0,0
pH H ₂ O	16,9	15,6	4,6	26,2	36,7
pH KCl	23,2	20,3	4,7	51,9	0,0
Acidez (cmol kg ⁻¹)	45,5	0,0	3,9	27,0	23,6
CE (dS m ⁻¹)	26,6	11,3	9,8	52,4	0,0
CO (%)	49,4	0,0	4,7	21,7	24,2
P (mg kg ⁻¹)	33,4	64,0	0,0	0,0	2,6

CIC: Capacidad de intercambio catiónico, ΣBases: Suma de bases, PSB: porcentaje de saturación con bases, Ca/Mg: Relación Calcio:Magnesio, CE: Conductividad eléctrica, P: Fósforo disponible, CO: Contenido de carbono orgánico.

Patrón de variación espacial de propiedades del suelo

Los variogramas obtenidos reflejan patrones con diversos comportamientos en los niveles jerárquicos considerados, los cuales se representan en la Figura 4 mediante pares de variables con tendencias similares. El *primer patrón* se caracteriza por presentar un variograma con alta variación de corto alcance, con varianzas residuales o aleatorias comprendidas entre 60 y 80% en los primeros 15m de distancia, es decir dentro de una celda (figura 4a). Los atributos que presentan esta tendencia está formado por la totalidad de las variables morfológicas, las físicas relacionadas con la porosidad, las partículas < 0,25 mm (%af, %amf) y la retención de humedad a muy bajos potenciales (>-10 kPa). Estos resultados parecen estar asociados a los procesos de erosión que ocurren en las laderas, los cuales son tan intensos que tienen una gran influencia en el área equivalente a una celda. Las variaciones de corto alcance crean problemas al momento de cartografiar las variables responsables, por lo que es aconsejable utilizar valores promedios de múltiples observaciones dentro de un área pequeña (e.g. 1 px, 3x3 px), o muestras compuestas en vez de una muestra simple (Burrough et al., 1988).

El *segundo patrón* refleja una estructura similar al variograma anterior (figura 4b), pero en estos casos los atributos presentan varianzas residuales de 20 a 35%, y alcanzan un 90 a 100% de variación en los primeros 45m (ventana 3x3). Estas variaciones se deben posiblemente al truncamiento por arrastre de partículas y al efecto de la erosión en los horizontes superficiales, con pérdida de agentes cementantes como Fe y CO. Esta acción ha ocasionado el traslado de materiales desde las posiciones

relativas altas, y la acumulación de partículas y nutrientes en las posiciones relativas más bajas. Las variables que presentan estas tendencias son de naturaleza física relacionadas con tamaño de partículas e índices de consistencia (%A, LSP, LIP), química (P disponible). Estos atributos presentan un patrón de variación que puede cartografiarse a escalas locales comprendidas entre 1:5.000 y 1:10.000.

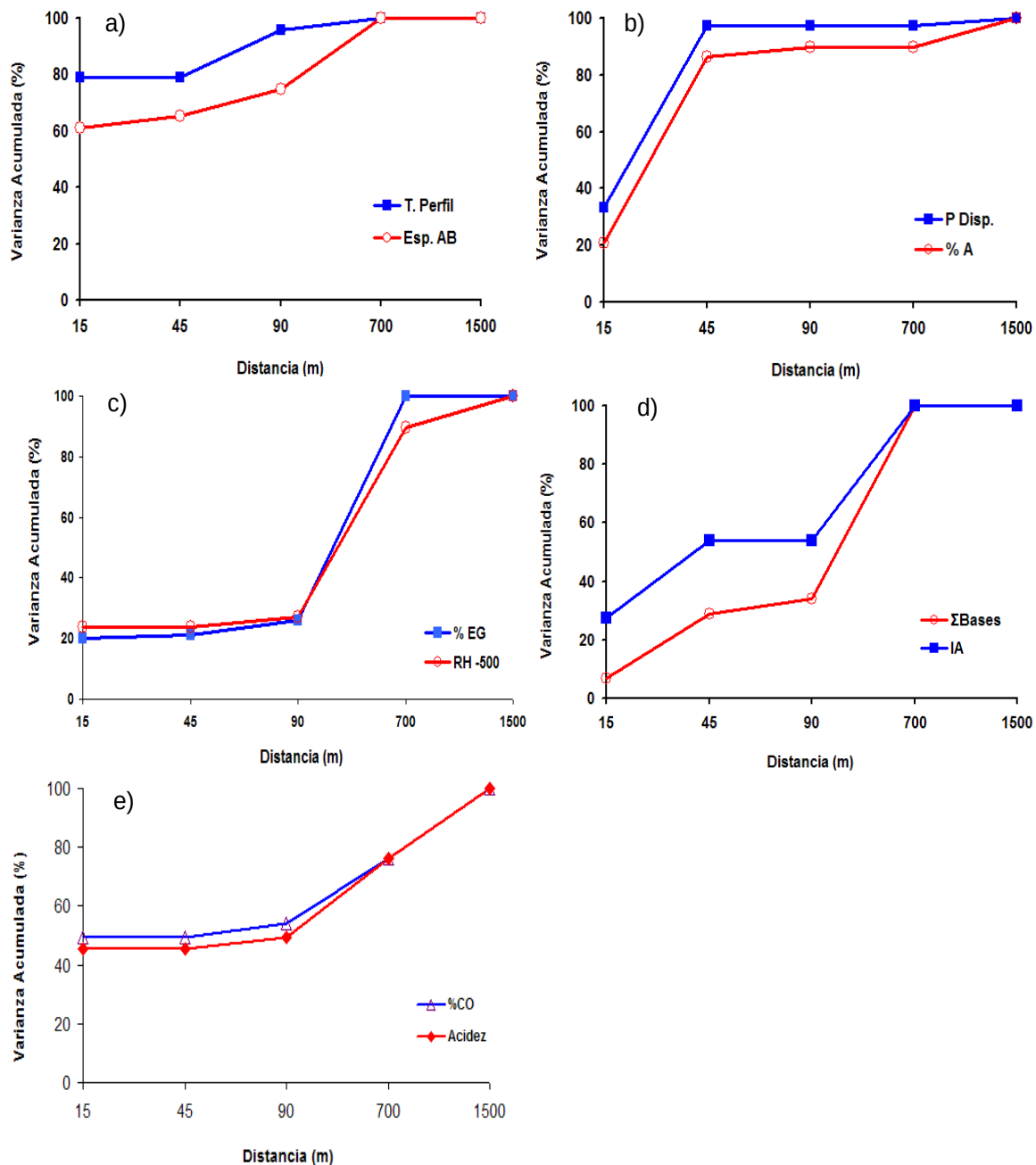


Figura 4. Variogramas representativos de los atributos en un sector de la cuenca del río Caramacate: (a) corto alcance en N5, (b) corto alcance en N4, (c) transicional N3-N2, (d) transicional N5-N4 y N3-N2, y (e) transicional N3-N1.

El *tercer patrón* se presenta en variogramas con un comportamiento constante en las primeras distancias (sin dependencia espacial) con cambios evidentes a partir de tercer nivel de abstracción (figura 4c). Es decir, los atributos inician con cierto grado de varianza residual (entre 0 y 20 %), permaneciendo invariables en los niveles jerárquicos más bajos del sistema, y posteriormente ocurre una máxima contribución de la varianza en el rango de 90 a 700 m. Las variables representativas de estos variogramas ejercen una gran influencia en la acumulación de la varianza en el segundo nivel jerárquico (tipo de paisaje), lo que significa que a partir del tercer nivel (clases geomorfométricas) se resuelve la estructura de variación presente en los suelos. Los atributos que muestran el cambio abrupto a partir del N3 son Ca^{2+} , las partículas $> 0,5 \text{ mm}$ (%am, %ag, %EG), RH (-33, -500 kPa), y los atributos relacionados con el grado de estructuración de los suelos (DMP, AE 2-4mm, AE 1-2mm). Todas estas variables tienen un patrón de variación que puede cartografiarse a escalas que varían de 1:20.000 a 1:100.000.

El *cuarto patrón* refleja una estructura transicional a medida que aumenta el intervalo de la distancia (figura 4d), presentando cierto grado de variación residual a cortas distancias (entre 7 y 45%), pero con claros saltos en la varianza ocurrida a distancias entre 90 y 700m. Esta estructura contribuye a definir la escala espacial a partir del tercer nivel jerárquico, es decir a nivel de clases geomorfométricas o del tipo de relieve considerado en el muestreo. Los atributos identificados con este comportamiento son CIC, PSB, ΣBases , Ca/Mg, Mg^{2+} , CE, pH, KCl; %a, AE < 2 mm y el IA. Todos estos atributos son de gran importancia para la diferenciación de unidades de suelo a nivel de tipos de relieve en la zona de estudio, cuyo patrón de variación puede cartografiarse a escalas regionales que varían entre 1:20.000 y 1:100.000.

El *quinto patrón* lo presentan algunas variables como la densidad aparente de los suelos (Da). Estos mantienen una tendencia sin ascensos, ni saltos entre los diferentes niveles de abstracción, indicando que son espacialmente independientes de la escala, y por ende de poca utilidad en la distinción de unidades de suelo en la cuenca del río Caramacate. Otras variables, tales como acidez total y %CO (figura 4e), se incrementan hasta el nivel superior del sistema jerárquico sin estabilizar la varianza estructural, por lo que solamente podrían ser utilizados en pequeñas escalas cartográficas (< 1:250.000).

CONCLUSIONES

La investigación demostró que la variación de los atributos edáficos y ambientales ocurre sobre un amplio rango de escalas, donde cada uno presenta diferentes contribuciones a la variación total. Los variogramas de las variables evaluadas presentaron diferentes tendencias y comportamientos de los patrones de distribución espacial de los atributos edáficos, lo cual refleja la presencia de solapamientos de la escala de variación.

Las variables morfológicas y algunas propiedades físicas muestran una alta variación de corto alcance, dentro de un píxel o en el área ocupada por un grupo de 3x3 píxeles adyacentes, lo que significa que no presentan dependencia espacial a nivel local. Esto sugiere que dicha estructura de variación debe manejarse con los métodos de análisis clásicos de estimación, sin perder eficiencia en la clasificación de las unidades

de suelos.

Existen muchas variables físicas relacionadas con la distribución de tamaño de partículas, retención de humedad, índices de consistencia, estabilidad de agregados al agua, y la totalidad de las variables químicas, que definen con claridad el aporte de dichos atributos en el tercer nivel del análisis de varianza anidado.

La evaluación del patrón de variación espacial demostró que las clases geomorfológicas (equivalentes a los tipos de relieve) y las unidades de paisaje montañoso de la zona son los niveles que contribuyen con mayor proporción a la varianza total de los paisajes de suelos en la cuenca, lo que indicó que el patrón de variación se resuelve a partir del tercer nivel jerárquico. Siendo este nivel de detalle es el más apropiado para realizar posteriores muestreos, interpolaciones y la generalización de atributos, sin limitar la calidad de las predicciones, sirviendo como base para la cartografía digital de suelos a escalas comprendidas entre 1:20.000 y 1:100.000.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arnold, R.W.; Wilding, L.P. 1991. The need to quantify spatial variability. In: M.J. Mausbach y L.P. Wilding (Eds.), *Spatial Variabilities of Soils and Landforms*, SSSA Special Publication #28. Soil. Sci. Soc. A., Inc. Madison, WI, p. 1-8.
- Bezdek, J.C.; Tsao E.C.; Pal, N.R. 1992. Fuzzy Kohonen Clustering Networks, in *Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems 1992* (San Diego), pp. 1035-1043.
- Burrough P.A., van Mensvoort, M.E.F.; Bos, J. 1988. Spatial analysis as a reconnaissance survey technique: an example from acid sulphate soil regions of the Mekong Delta, Vietnam. In: H. Dost (editor). *Selected papers of the Dakar Symposium on Acid Sulphate Soils*, 68-89. International Institute for Land Reclamation and Improvement Publication No. 44, Wageningen
- Burrough, P.A. 1993. Soil variability: a late 20th century view. *Soils and Fertilizers*, 56: 529-562.
- Burrough, P.A.; van Keulen, J. 1986. PC-GEOSTAT. Department of Physical Geography, Instituut voor Ruimtelijke Onderzoek. University of Utrecht, The Netherlands.
- De Boer, D.H. 1992. Hierarchies and spatial scale in process geomorphology: a review. *Geomorphology*, 4: 303-318.
- Edmonds, W.J.; Baker, J.C.; Simpson, T.W. 1985. Variance and scale influences on classifying and interpreting soil map units. *Soil. Sci. Soc. A. J.*, 49: 957-961.
- Esfandiarpour, B; Salehi, M.H; Toomanian, N.; Mohammadi, J.; Poch, R.M. 2009. The effect of survey density on the results of geopedological approach in soil mapping: A case study in the region, Central Iran. *Catena*, 79: 18-26.
- Lin, H.; D. Wheeler; Bell, J.; Wilding, L. 2005. Assessment of soil spatial variability at multiple scales. *Ecological Modelling*, 182: 271-290.
- Marcuse, S. 1949. Optimum allocation and variance components in mixed sampling with application to Chemicals analysis. *Biometrics*, 5: 189-206.
- Ovalles, F. 1992. Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad. FONAIAP-CENIAP-IIAG. Maracay. Serie B. 44 p.
- Pineda, M.C.; Elizalde, G.; Vilorio, J. 2011. Determinación de áreas susceptibles a

- deslizamientos en un sector de la Cordillera de la Costa Central de Venezuela. *Interciencia* 36(5): 370-377.
- Prada, R.M; Viloria, J.; Roso, R.; Pérez, J.; Ramos, J.A; Peña, J.; Núñez, M.E. 2004. Características de los suelos de la subcuenca Caramacate, principales variaciones y relaciones con atributos del paisaje. Proyecto Iniciativa Científica del Milenio. Núcleo de Investigación y Excelencia Manejo Integral de la cuenca alta del Río Guárico. Maracay. 108 p.
- Spósito, M.; Elizalde, G. 2004. Caracterización climática de la cuenca alta del Río Guárico. Proyecto Iniciativa Científica del Milenio. Núcleo de Investigación y Excelencia Manejo Integral de la cuenca alta del Río Guárico. Maracay. 39 p. 408.
- Tukey, J.W. 1977. *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley, Philippines. 691 p.
- Urbani, F.; Rodríguez, J.A. 2004. Atlas geológico de la Cordillera de la Costa, Venezuela. Mapas a escala 1:25.000. Versión Digital. Edic. Fundación Geos, UCV. Caracas.
- Valera A. 2015. Inventario de suelos y paisajes con apoyo de técnicas de cartografía digital en áreas montañosas. Caso Cuenca del Río Caramacate, Estado Aragua. Tesis de Doctorado en Ciencias del Suelo. Universidad Central de Venezuela. Postgrado en Ciencias del Suelo. Maracay, Estado Aragua, Venezuela. 263 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.1714.3920.
- Valera, A. 2003. Relación entre la estructura y la fertilidad de los suelos en la cuenca media del río Tiznados. Tesis de Maestría en Ciencia del Suelo. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay. 207 p.
- Valera, A. 2018. Geomorfometría y Edafometría. Cartografía Digital de Paisajes y Suelos con Técnicas de Inteligencia Artificial. Editorial Académica Española. Mauritius. ISBN: 978-620-2-12102-6. 317p.
- Viloria, A. 2007. Estimación de Modelos de clasificación de paisaje y predicción de atributos de suelos a partir de imágenes satelitales y modelos digitales de elevación. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 88 p.
- Webster, R. 2008. *El muestreo en los estudios del suelo*. 1ra edición. Trad. Christine Siebe. Universidad Nacional Autónoma de México. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. México, DF. 98 p.
- Webster, R.; Oliver, M.A. 1990. *Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey*. Oxford University Press. Oxford, RU. 316 p.
- Webster, R; Welham, S.J; Potts, J.M.; Oliver, M.A. 2006. Estimating the spatial scales of regionalized variables by nested sampling, hierarchical analysis of variance and residual maximum likelihood. *Computers & Geosciences*, 32: 1320-1333.
- Wollenhaupt, N.C.; Mulla D.J; Gotway, C.A. 1997. Soil sampling and interpolation techniques for mapping spatial variability of soil properties. In: Robert, P.C., et al. (Eds.), *Site-specific Management for Agricultural Systems*. ASA Miscellaneous Publication, Madison, WI.
- Wu, J. 1999. Hierarchy and scaling: extrapolating information along a scaling ladder. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 25: 367-380.