



## VARIABILIDAD ESPACIAL DE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE UN ALFISOL EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA

Lina Amparo Arango<sup>1</sup> ✉, Daniel Francisco Jaramillo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ingeniera Forestal,  
Magister en  
Geomorfología y Suelos –  
Grupo SOLUM –  
Directora de  
Sostenibilidad ✉  
[larango@gruposolum.co](mailto:larango@gruposolum.co)

<sup>2</sup> Ingeniero Agrónomo,  
Especialista en  
Fotointerpretación  
aplicada a Estudios de  
Suelos, Magister en Suelos  
y Aguas – Profesor Titular  
y Maestro Universitario –  
Universidad Nacional de  
Colombia, Sede Medellín,  
Facultad de Ciencias,  
Escuela de Geociencias –

**Palabras clave:**  
variabilidad espacial de  
suelos, geoestadística,  
estadística espacial,  
agricultura de precisión,  
Alfisol, bosque seco  
Tropical (bs-T).

### RESUMEN

En “Cotové” (bs-T) se llevó a cabo un estudio, para evaluar la variabilidad espacial de la producción y del contenido de nutrientes en el forraje seco del pasto ángleton (*Dichanthium aristatum*), así como la de algunas propiedades físicas y químicas de los suelos (Vertic Haplustalf) relacionadas con ella. El muestreo de suelos y pasto se hizo en una cuadrícula regular con celdas de 10 m x 10 m. La evaluación de la composición del pasto se hizo en dos cortes consecutivos. En el forraje seco se determinó el contenido de los elementos: N, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, P, B y S. En el suelo se evaluaron las propiedades físicas: Resistencia a la Penetración (RP), Contenidos de Arena (A), de Limo (L) y de Arcilla (Ar), Densidad real (Dr), Densidad aparente (Da), Coeficiente de Dispersión (CD), Contracción Total (CT), retención de humedad del suelo a capacidad de campo (WCC) y en el punto de marchites permanente (WPM), contenido gravimétrico de agua en el campo (W), distribución volumétrica de poros por tamaño (Macrop, Mesop y Microp); las propiedades químicas evaluadas fueron: pH, contenido de Materia Orgánica (MO) y contenidos de Ca, Mg, K, P, Fe, B, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. La información obtenida fue sometida a análisis estadísticos descriptivos, de correlación, de tendencia espacial y de variabilidad espacial. Pocas propiedades edáficas correlacionaron con la producción de forraje seco y esta última no presentó variabilidad espacial en ninguno de los cortes. Pocas propiedades foliares y edáficas presentaron variabilidad espacial, pero la mayoría presentó tendencia espacial y alta variabilidad aleatoria. Se presentaron diferencias importantes entre la producción de forraje seco y el contenido de nutrientes en él, al comparar los cortes hechos. El comportamiento observado en las propiedades estudiadas dificulta la implementación de sistemas de agricultura de precisión en el sitio estudiado.

### SPACE VARIABILITY OF SOME PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF AN ALPHYSOL IN THE DEPARTMENT OF ANTIOQUIA

**Keywords:** spatial  
variability of soils,  
geostatistics, spatial  
statistics, precision  
agriculture, Alfisol,  
Tropical dry forest (bs-  
T).

SUELOS  
ECUATORIALES  
47(1 y 2):9-16p  
ISSN 0562-5351

### ABSTRACT

In "Cotové" (bs-T) a study was carried out to evaluate the spatial variability of production and nutrient content in the dry forage of the Angleton grass (*Dichanthium aristatum*), as well as that of some physical and chemical properties of soils (Vertic Haplustalf) related to it. Soil and grass sampling was done in a regular grid with 10 m x 10 m cells. The evaluation of the composition of the grass was made in two consecutive cuts. In the dry forage the content of the elements was determined: N, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, P, B and S. In the soil the physical properties were evaluated: Resistance to Penetration (RP), Sand (A), Limo (L) and Clay (Ar), Real Density (Dr), Apparent Density (Da), Dispersion Coefficient (CD), Total Shrink (CT), Soil Moisture Retention at field capacity (WCC) and at the point of permanent wilting (WPM), gravimetric content of water in the field (W), volumetric distribution of pores by size (Macrop, Mesop and Microp); The chemical properties evaluated were: pH, content of Organic Matter (MO) and contents of Ca, Mg, K, P, Fe, B, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. The information obtained was subjected to descriptive statistical analysis, correlation, spatial tendency and spatial variability. Few edaphic properties correlated with dry forage production and the latter did not show spatial variability in any of the cuttings. Few leaf and edaphic properties showed spatial variability, but most showed spatial tendency and high random variability. There were important differences between the production of dry forage and the content of nutrients in it, when comparing the cuts made. The behavior observed in the properties studied makes it difficult to implement precision agriculture systems at the site studied.

Rec.: 09.07.2016 Acep.: 14.11.2016

## INTRODUCCIÓN

La agricultura es una actividad fundamental sobre la que descansa, no sólo la calidad de vida, sino también la propia existencia. Si los esfuerzos para el desarrollo de una agricultura sostenible son exitosos, no sólo los agricultores lograrán éxito económico sino que la sociedad se beneficiará de diversas maneras (Scientific American 1990). Desde comienzos de la década del 90 se han planteado estrategias, tecnologías y principios para manejar la variabilidad espacial y temporal asociada con los aspectos de la producción agrícola como “el manejo por sitio específico en sistemas agrícolas”, la definición de “Zonas homogéneas de manejo”, “Tecnología de Dosis Variable (VRT)” y la “Agricultura de Precisión” (Ovalles 2003).

Con respecto al suelo, una de las primeras y mayores exigencias que se plantean para implementar aquellos sistemas de producción es el conocimiento detallado de sus propiedades incluyendo su distribución y su variabilidad espacial. Esta variabilidad debe conocerse y ser de suficiente magnitud para que un manejo diferenciado por sitios resulte en un mayor beneficio frente al manejo uniforme. Una diferencia básica entre los sistemas de manejo agrícola convencionales y la Agricultura de Precisión, es la aplicación de tecnologías modernas de información para proveer, procesar y analizar datos de múltiples fuentes, con una alta resolución espacial y temporal, para la toma de decisiones y para establecer las operaciones para el manejo de la producción de los cultivos.

La Agricultura de Precisión es la aplicación de tecnologías y principios para el manejo de la

variabilidad espacial y temporal asociada con todos los aspectos de la producción agrícola, con el propósito de mejorar la producción e ingresos económicos y reducir los impactos ambientales negativos (Pierce & Nowak 1999; Blackmore 2003 citado por Martínez 2003).

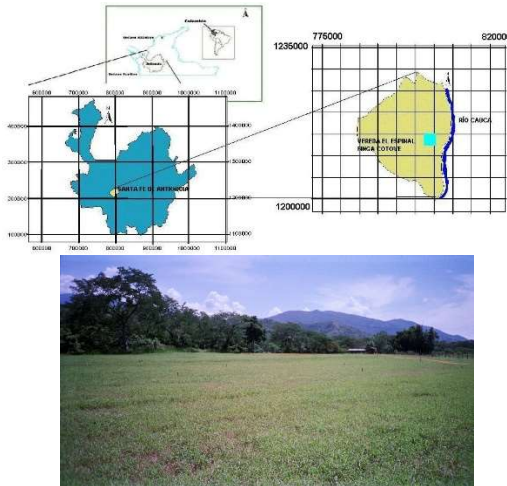
Los mapas específicos de rendimiento y de las cualidades y propiedades del suelo, procesados con Sistemas de Información Geográficos (SIG) y apoyados por los Sistemas de Posicionamiento Satelital (GPS, GPSD), se convierten en el conjunto ideal para llevar a cabo las tareas de la Agricultura de Precisión. De acuerdo con Amezcuita & Rubiano (2001), el análisis de la variabilidad espacial de las características de un campo es uno de los pilares en los que se fundamenta la Agricultura de Precisión.

La variabilidad es una condición inherente del suelo debido a que en su formación intervienen varios procesos diferentes, controlados, a su vez, por los factores de formación. Las interacciones factores-procesos de formación pueden ser muy variadas dando como consecuencia una alta cantidad de suelos posibles (Amezcuita & Rubiano 2001; Ovalles 2003). La variabilidad depende de la propiedad que se analice, siendo más variables las propiedades químicas que las físicas (Ovalles 1992; Jaramillo et al. 2012).

En este trabajo se estudió la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas y químicas de un lote aparentemente muy homogéneo, sometido a cultivo de pasto ángletón (*Dichanthium aristatum*) para henificación en un clima seco de Antioquia.

## LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL SITIO DE ESTUDIO

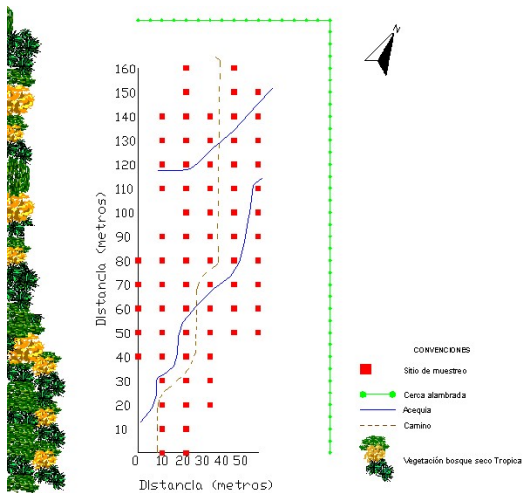
El trabajo se desarrolló en el Centro de Producción Agropecuaria “Cotové”, propiedad de la Universidad Nacional de Colombia y ubicado en la vereda El Espinal del municipio de Santa Fe de Antioquia (Figura 1).



**Figura 1.** Ubicación geográfica del sitio de estudio y aspecto general del lote experimental.

**MÉTODOS**

Se hizo un muestreo sistemático en una cuadrícula regular con celdas de 10 m x 10 m. En cada intersección de la cuadrícula se hizo una minicalicata de 30x30x30 cm, en la cual se tomaron las muestras de suelo entre 0 y 20 cm de profundidad. Cada intersección fue georreferenciada en un sistema de coordenadas cartesianas con origen arbitrario (Figura 2).



**Figura 2.** Esquema de la parcela establecida mostrando los sitios de muestreo.

En el suelo se evaluaron las propiedades físicas: Resistencia a la Penetración (RP en kg cm<sup>-2</sup>), Contenidos de Arena (A en %), de Limo (L en %) y de Arcilla (Ar en %), Densidad real (Dr en Mg m<sup>-3</sup>),

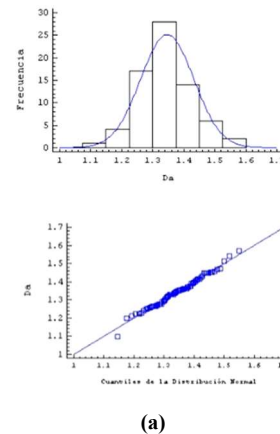
Densidad aparente (Da en Mg m<sup>-3</sup>), Coeficiente de Dispersión (CD en %), Contracción Total (CT en %), Retención de humedad del suelo a capacidad de campo (W<sub>CC</sub> en %) y en el punto de marchites permanente (W<sub>PM</sub> en %), Contenido gravimétrico de agua en el campo (W en %) y, Distribución volumétrica de poros por tamaño (Macrop, Mesop y Microp a contenido volumétrico (%): para los macroporos transformando el contenido de humedad gravimétrica determinada a -0.3 (W<sub>CC</sub>) y para los microporos a -15 atm (W<sub>PM</sub>)). Las propiedades químicas evaluadas fueron: pH, Contenido de Materia Orgánica (MO en %) y Contenidos de Ca (cmol (+) kg<sup>-1</sup>), Mg (cmol (+) kg<sup>-1</sup>), K (cmol (+) kg<sup>-1</sup>), P (ppm), Fe (ppm), B (ppm), N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (ppm), N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (ppm) y S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (ppm).

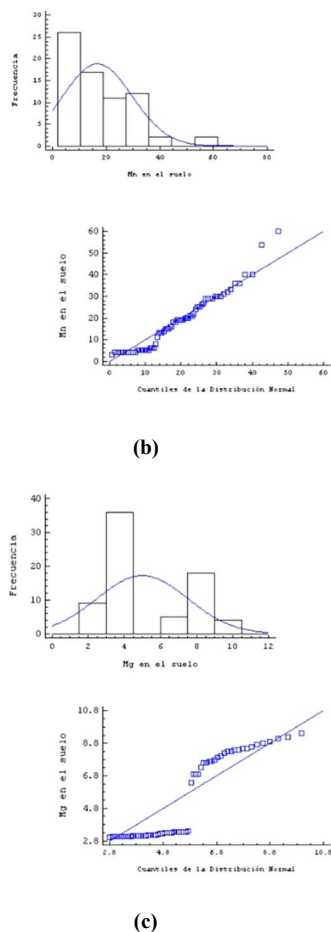
La información obtenida fue sometida a análisis estadísticos descriptivos, de correlación, de tendencia espacial mediante análisis de regresión múltiple de segundo orden con las coordenadas como variables independientes (Diggle y Ribeiro 2007; Jaramillo 2008, 2009, 2012) y de variabilidad espacial (Webster y Oliver 2007, Jaramillo 2012).

**RESULTADOS**

**Análisis Descriptivos**

Se obtuvieron distribuciones de los datos como las que se presentan en las Figura 3.





**Figura 3.** Diferentes Formas en que se distribuyen las variables en el suelo. (a) Distribución Normal y simétrica. (b) Distribución No-Normal y asimétrica con sesgo a la derecha. (c) Distribución bimodal.

En las Tablas 1 y 2, se presentan los resultados de los análisis descriptivos para las propiedades físicas y químicas del suelo, respectivamente.

**Tabla 1.** Estadísticos básicos de las propiedades físicas del suelo.

| Variabl e | Medi a | Median a | Valor Mínim o | Valor Máxim o | Desviació n Estándar | Coefficien te de Variación (%) |
|-----------|--------|----------|---------------|---------------|----------------------|--------------------------------|
| Da        | 1.35   | 1.35     | 1.09          | 1.57          | 0.08                 | 6.36                           |
| Dr        | 2.60   | 2.61     | 2.23          | 2.95          | 0.12                 | 4.64                           |
| RP        | 2.27   | 2.17     | 1.50          | 3.83          | 0.49                 | 21.62                          |
| CD        | 3.96   | 3.67     | 0.0           | 17.56         | 3.07                 | 77.52                          |
| A         | 38.00  | 39.00    | 12.00         | 58.00         | 10.52                | 27.70                          |
| L         | 34.78  | 34.00    | 18.00         | 60.00         | 9.56                 | 27.50                          |
| Ar        | 27.50  | 28.00    | 6.00          | 50.00         | 9.24                 | 33.60                          |

| Variabl e | Medi a | Median a | Valor Mínim o | Valor Máxim o | Desviació n Estándar | Coefficien te de Variación (%) |
|-----------|--------|----------|---------------|---------------|----------------------|--------------------------------|
| CT        | 12.71  | 12.95    | 3.16          | 17.22         | 2.67                 | 20.99                          |
| W         | 31.79  | 31.82    | 18.40         | 42.99         | 5.01                 | 15.76                          |
| Macrop    | 5.93   | 4.49     | 0.55          | 20.67         | 4.51                 | 76.14                          |
| Mesop     | 12.06  | 11.36    | 7.27          | 25.55         | 3.05                 | 25.26                          |
| Microp    | 30.96  | 31.51    | 16.32         | 39.95         | 4.40                 | 14.21                          |

**Tabla 2.** Estadísticos básicos de las propiedades químicas del suelo.

| Variabl e                       | Medi a | Median a | Valor Mínim o | Valor Máxim o | Desviació n Estándar | Coefficien te de Variación (%) |
|---------------------------------|--------|----------|---------------|---------------|----------------------|--------------------------------|
| N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 25.08  | 24.60    | 5.35          | 39.27         | 7.06                 | 28.14                          |
| N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 9.01   | 8.40     | 2.59          | 24.27         | 3.84                 | 42.66                          |
| P                               | 11.24  | 10.00    | 2.00          | 30.00         | 6.26                 | 55.76                          |
| K                               | 0.24   | 0.23     | 0.1           | 0.52          | 0.080                | 33.93                          |
| Ca                              | 18.02  | 17.8     | 11.70         | 23.80         | 2.72                 | 15.07                          |
| Mg                              | 5.00   | 3.30     | 2.80          | 9.80          | 2.50                 | 49.94                          |
| S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 5.91   | 5.84     | 0.86          | 16.89         | 3.20                 | 54.24                          |
| Fe                              | 24.60  | 25.00    | 14.00         | 43.00         | 5.58                 | 22.70                          |
| Mn                              | 16.80  | 15.50    | 2.00          | 60.00         | 12.96                | 77.12                          |
| Cu                              | 5.51   | 6.00     | 2.00          | 7.00          | 0.90                 | 16.39                          |
| Zn                              | 1.06   | 1.00     | 0.50          | 4.00          | 0.39                 | 36.99                          |
| B                               | 0.36   | 0.39     | 0.24          | 0.54          | 0.08                 | 21.82                          |
| MO                              | 4.38   | 4.40     | 1.00          | 9.10          | 1.70                 | 38.81                          |
| pH                              | 6.84   | 6.80     | 6.50          | 7.80          | 0.16                 | 2.36                           |

Físicamente los suelos son de texturas medias, con densidades promedias. Presentan alta resistencia a la penetración y contracción total, y la macroporosidad está en un bajo nivel que puede causar problemas de aireación y/o mal drenaje, todo esto debido a la presencia de arcillas expandibles. Químicamente los suelos tienen un pH neutro, buen contenido de MO y de bases, y medio de P. En general, las propiedades químicas fueron más variables que las físicas, como ha sucedido en otros trabajos (Jaramillo *et al.* 2012).

### Análisis de Tendencia Espacial

Los resultados del análisis de tendencia realizado con las propiedades físicas del suelo se presentan en la Tabla 3. Las propiedades físicas del suelo que no presentaron ninguna tendencia espacial fueron W y Microp. Al hacer la comprobación de los supuestos con los residuales de la regresión de la tendencia, la única propiedad que cumplió con todos ellos fue la Da; las demás propiedades debieron ser transformadas y sometidas nuevamente a análisis de tendencia (Webster y Oliver 2007; Jaramillo 2008, 2009, 2012; Jaramillo *et al.* 2012) quedando, en definitiva, para ser sometidas a los análisis de dependencia espacial, las variables Res\_Da, Res\_LOG(RP), Res\_Ar, Res\_PT, Res\_IAS, W y Microp (Res: Residuales; LOG: Logaritmo base 10).

**Tabla 3.** Resultados del análisis de tendencia de las propiedades físicas del suelo.

| Modelo   | R <sup>2</sup> ajustado (%) | Valor P del modelo |
|--|-----------------------------|--------------------|
| Da = 1.41407 – 0.000805557Y                              | 14.69                       | 0.0005             |
| RP = 2.62282 – 0.0135139X                                | 16.47                       | 0.0002             |
| Ar = 31.8724 – 0.0523809Y                                | 4.42                        | 0.0422             |
| PT = 46.316 + 0.0315675Y                                 | 14.38                       | 0.0006             |
| IAS = 3.2953 – 0.0675623X – 0.0231109Y + 0.00220231XY    | 45.97                       | 0.0000             |
| IAH = 8.4178 – 0.163896X – 0.0460525Y + 0.0028231XY      | 18.69                       | 0.0007             |
| Macrop = 3.30885 – 0.0372731X + 0.06097Y – 0.000617428XY | 16.29                       | 0.0017             |

Los resultados del análisis de tendencia hecho con las propiedades químicas del suelo se presentan en la Tabla 4. La única variable química del suelo, que no presentó tendencia espacial fue N-NO<sup>3-</sup>, y, todas las variables que presentaron tendencia tuvieron un componente de ella en la coordenada X. Al comprobar los supuestos con los residuales de los análisis de tendencia, transformar las variables que no los cumplieron y repetir el análisis con las transformaciones, las variables que finalmente quedaron para hacer los análisis de dependencia espacial fueron: N-NO<sup>3-</sup>, Res\_LOG(P), Res\_LOG(K), Res\_Ca, Res\_Fe, Res\_LOG(Mn), SQRT(MO) y Res\_pH (Res: Residuales; LOG: Logaritmo base 10; SQRT: Raíz Cuadrada).

**Tabla 4.** Propiedades químicas de los suelos que presentaron alguna tendencia.

| Modelo  | R <sup>2</sup> ajustado (%) | Valor P del modelo |
|---|-----------------------------|--------------------|
| P = 12.5659 – 0.043168X – 0.0811518Y + 0.00273511XY | 21.79                       | 0.0002             |
| K = 0.31404 – 0.00295309X                           | 30.52                       | 0.0000             |
| Ca = 24.8134 – 0.215403X 0.0632681Y + 0.00173423XY  | 41.74                       | 0.0000             |
| S = 3.07196 + 0.107579X                             | 25.05                       | 0.0000             |
| Fe = 21.8475 + 0.104202X                            | 6.76                        | 0.0156             |
| Mn = -1.69561 + 0.186291X + 0.162751Y               | 38.85                       | 0.0000             |
| pH = 6.9676 + 0.00547581X                           | 24.98                       | 0.0000             |

### Variabilidad Espacial: Semivariografía

Para este análisis las variables discretas o que no se pudieron normalizar ni simetrizar con las transformaciones, no se tuvieron en cuenta. Después

de varios ensayos se estableció que un lag activo de 40 m y un intervalo lag de 10 m eran los que producían los mejores modelos para todas las variables consideradas en este análisis. Los parámetros geoestadísticos obtenidos para las propiedades físicas y químicas del suelo analizadas se presentan en la Tabla 5 y sus respectivos semivariogramas en las Figuras 4 y 5.

**Tabla 5.** Parámetros geoestadísticos de las propiedades físicas y químicas del suelo. (Res = Residuales de la tendencia; LOG = Logaritmo de la variable; SQRT = Raíz cuadrada de la variable).

| Variable           | Modelo      | Nugget (C <sub>0</sub> ) | Rango (m) | R <sup>2</sup> (%) | C <sub>0</sub> /Si II (%) | Dependencia espacial |
|--------------------|-------------|--------------------------|-----------|--------------------|---------------------------|----------------------|
| Res_Da             | Exponencial | 0.002                    | 14.85     | 95.6               | 28.57                     | Alta a Media         |
| Res_LOG(RP)        | Esférico    | 0.002                    | 17.76     | 70.9               | 25.00                     | Alta                 |
| W                  | Esférico    | 6.180                    | 16.55     | 96.3               | 24.18                     | Alta                 |
| Microp             | Esférico    | 8.440                    | 33.08     | 100                | 42.03                     | Alta a Media         |
| Ar                 | Nugget Puro | 90.467                   | -         | -                  | 0                         | No hay               |
| N-NO <sup>3-</sup> | Exponencial | 14.400                   | 14.91     | 83.2               | 27.39                     | Alta a Media         |
| Res_LOG(P)         | Exponencial | 0.015                    | 35.91     | 100                | 28.30                     | Alta a Media         |
| Res_LOG(K)         | Exponencial | 0.004                    | 15.75     | 100                | 30.77                     | Alta a Media         |
| Res_Ca             | Exponencial | 1.181                    | 17.16     | 99.8               | 28.05                     | Alta a Media         |
| Res_Fe             | Lineal      | 24.730                   | -         | 100                | -                         | No determinada       |
| Res_LOG(Mn)        | Esférico    | 0.019                    | 23.86     | 99.5               | 23.75                     | Alta                 |
| Res_pH             | Lineal      | 0.01                     | -         | 99.0               | -                         | No determinada       |

En la Tabla 5 se observa que, a excepción del contenido de arcilla (Figura 4), todas las otras propiedades evaluadas presentaron dependencia espacial, aunque para el Fe y el pH ésta no pudo ser determinada debido al modelo de semivariograma que se ajustó a los datos (Figura 5). En general se presentó una dependencia espacial alta, según criterios de Cambardella *et al.* (1994), ya que la variabilidad aleatoria (C<sub>0</sub>) representó menos del 30% de la variabilidad total en casi todas las propiedades. El rango promedio de las propiedades que presentaron dependencia espacial fue de 20.1 m que, teniendo en cuenta el tamaño y espaciado de la cuadrícula utilizada, hace que la variabilidad espacial sea de un rango relativamente grande.

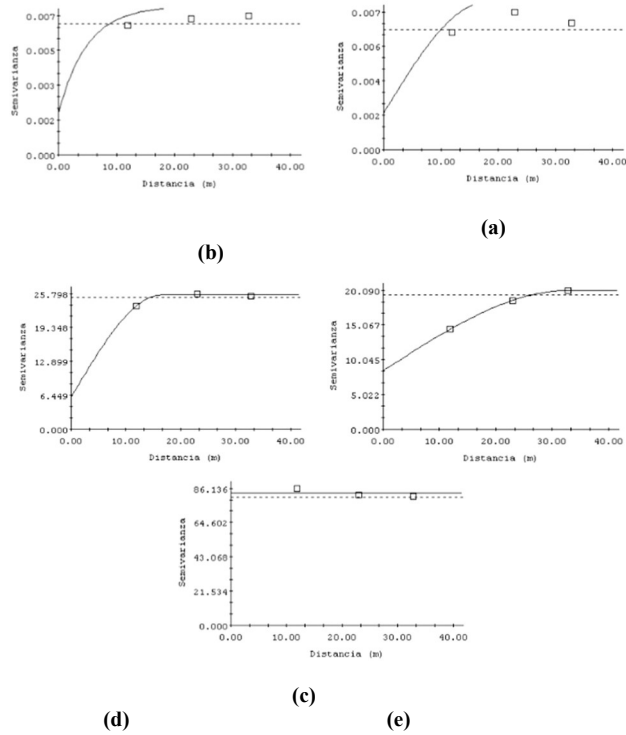


Figura 4. Semivariogramas de las propiedades físicas del suelo. (a) Da. (b) RP. (c) W. (d) Microp. (e) Ar.

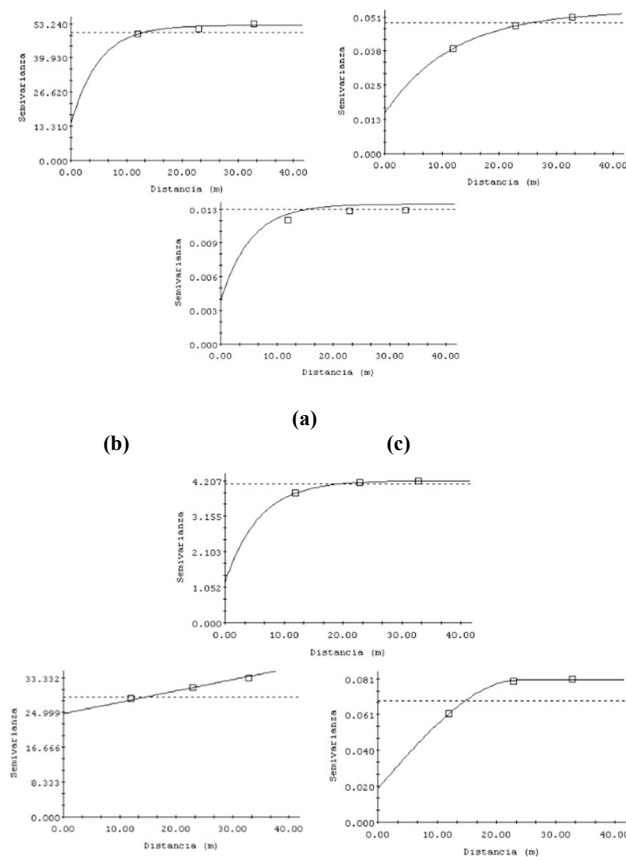
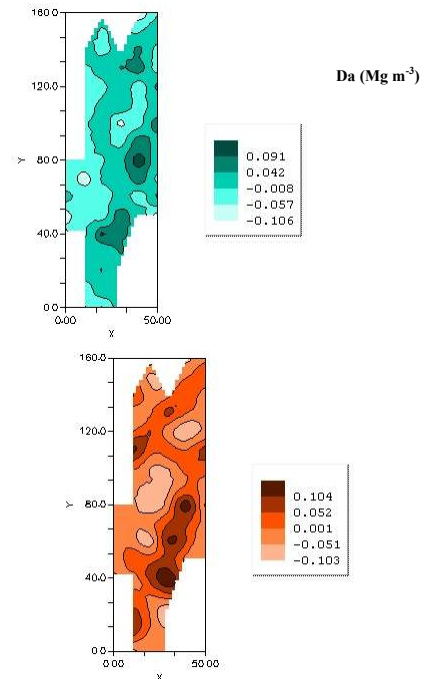
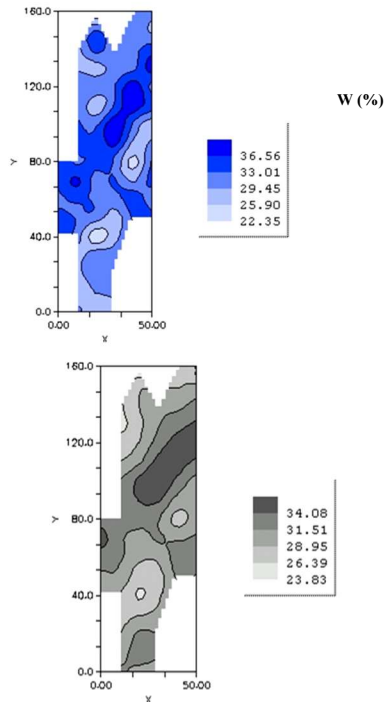


Figura 5. Semivariogramas de las propiedades químicas del suelo. (a) N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. (b) P. (c) K. (d) Ca. (e) Fe. (f) Mn. (g) pH.

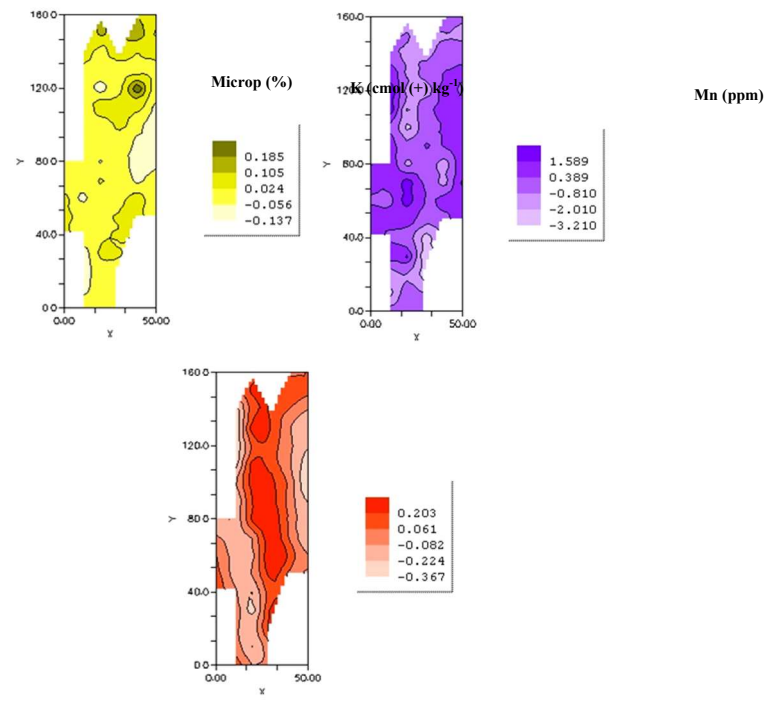
### Variabilidad Espacial: Interpolación

Mediante la técnica del kriging puntual, y utilizando los modelos de semivariogramas teóricos ajustados, se procedió a elaborar los respectivos mapas de cada una de las propiedades que presentaron dependencia espacial con el fin de poder observar la distribución de sus valores en el campo. Los mapas de isolíneas obtenidos se presentan en las Figuras 6 y 7.



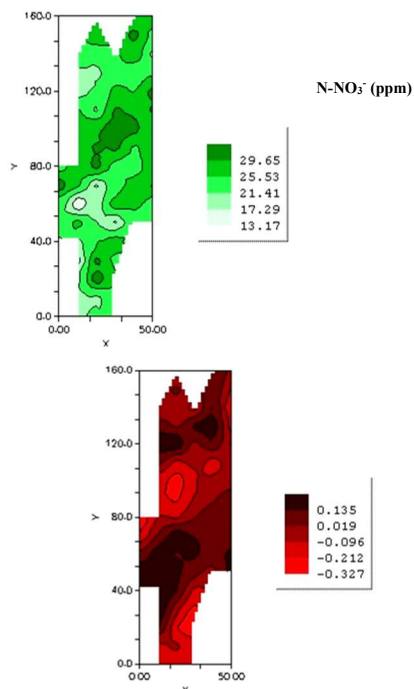


**Figura 6.** Mapa de la distribución espacial de las propiedades físicas de un Alfisol.



**Figura 7.** Mapa de la distribución espacial de las propiedades químicas de un Alfisol.

Los mapas de los contenidos de  $N-NO_3^-$  y de P muestran un patrón de distribución de estos elementos en forma de parches pequeños que hace que el manejo de estas propiedades con prácticas de agricultura de precisión no sea recomendable. Con el K, Ca y Mn sí es posible diseñar prácticas de manejo más racionales, como por ejemplo el manejo por sitio específico, debido a que con la distribución que presentan los valores de estas propiedades se pueden definir áreas homogéneas de manejo.



### CONCLUSIONES

Los suelos estudiados presentaron niveles de fertilidad altos, debido a sus propiedades químicas. Físicamente pueden tener limitaciones en la aireación y en la resistencia a la penetración. De las 26 propiedades estudiadas, sólo se presentó dependencia espacial en 11 y ésta tuvo un rango promedio de 20.1 m y una dependencia espacial alta pues la variabilidad aleatoria representó menos del 30% de la variabilidad total en la gran mayoría de las propiedades. El comportamiento espacial observado hace difícil la implementación de prácticas de manejo relacionadas con la agricultura de precisión en esta parcela.

**REFERENCIAS**

- AMEZQUITA, E. & RUBIANO, Y. 2001. Aplicabilidad de la Agricultura de Precisión en el trópico. En: Manejo productivo de suelos para cultivos de alto rendimiento. Editores: M. Triana, R. Silva, M. Gómez y G. Peñalosa. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo - Comité Regional del Valle del Cauca. Palmira. pp. 77-93.
- CAMBARDELLA, C. et al. 1994. Field-Scale variability of soil properties in Central Iowa soils. En: Soil Sci. Soc. Am. J. 58:1501-1511.
- DIGGLE, P. J. y P. J. RIBEIRO. 2007. Model-based geostatistics. Springer. New York. 212 p.
- JARAMILLO, 2012. Variabilidad espacial del suelo: Bases para su estudio. Revista de la Facultad de Ciencias 1(1): 73-87.
- JARAMILLO, D. F. 2009. Variabilidad espacial de las propiedades ándicas de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño (Colombia). Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín 62(1): 4907-4921.
- JARAMILLO, D. F. 2008. Variabilidad espacial de las propiedades químicas del epipedón de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño (Colombia). Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín 61(2): 4588-4599.
- JARAMILLO, D. F.; S. SADEGHIAN y L. A. LINCE. (2012). Agricultura de precisión en el manejo de la fertilización en el cultivo del café en Colombia. Informe de año sabático. Universidad Nacional de Colombia-CENICAFÉ. Medellín. 71 p.
- MARTÍNEZ, L. 2003. Bases para evaluar la fertilidad del suelo en Agricultura de Precisión. En: Manejo integral de la fertilidad del suelo. Editores: M. Triana, R. Silva, M. Gómez y G. Peñalosa. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo - Comité Regional del Valle del Cauca. Palmira. Bogotá. pp. 139-152.
- PIERCE, F. & NOWAK, M. 1999. Aspects of precision agriculture. En: Advances in Agronomy. 67:1-85.
- OVALLES, F. 1992. Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad. FONAIAP-CENIAP-IIAG. Maracay. 44 p.
- \_\_\_\_\_. 2003. Memorias del Curso-Taller de Geoestadística Aplicada a Estudios Ambientales. [CD-ROM]. Universidad de Caldas. Manizales.
- WEBSTER, R. and M. OLIVER. (2007). Geostatistics for environmental scientists. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd. England. 315 p.