

Aplicação de lógica fuzzy e geoestatística na análise da fertilidade de um solo sob pastagem¹

Application of fuzzy logic and geostatistic in the analysis of the fertility of a soil under pasture

Gustavo Soares de Souza^{2*}, Julião Soares de Souza Lima³, Samuel de Assis Silva⁴ e Alexandre Cândido Xavier³

Resumo - O objetivo desta pesquisa foi espacializar os atributos químicos do solo, utilizando lógica fuzzy e análise geoestatística como procedimentos de mapeamento adequado à representação de fenômenos contínuos em solos. A área em estudo localiza-se ao sul do estado do Espírito Santo, município de Alegre. O experimento foi conduzido em um Argissolo Vermelho-Amarelo textura argilosa sob cultivo de pastagem *Brachiaria decumbens*. O solo foi amostrado na profundidade de 0-0,2 m, nos 64 pontos de uma malha regular, com dimensão de 90 x 90 m. Os atributos químicos estudados foram K, Ca, Mg, Al, SB, T e V. Com auxílio da lógica fuzzy, realizou-se uma classificação contínua dos atributos. Os dados foram submetidos à análise descritiva e, em seguida, à análise geoestatística, por meio do ajuste de semivariogramas. Os atributos apresentaram variabilidade moderada e alta medida pelo CV. Todos os atributos apresentaram dependência espacial, demonstrada pelo ajuste dos semivariogramas esférico e exponencial. Os mapas em estudo apresentaram uma suavização dos limites de variação dos graus de pertinência dos atributos químicos do solo, tornando-os mais representativos. A lógica fuzzy associada à análise geoestatística é uma técnica indicada para ser aplicada na espacialização de atributos do solo, que naturalmente apresentam uma variação gradual no terreno.

Palavras-chave - Variabilidade espacial. Semivariograma. Lógica difusa.

Abstract - The objective of this research was to generate a representation of the chemical attributes of the soil, using fuzzy logic and geostatistic analysis as procedures of appropriate mapping to the representation of continuous phenomena. The area in study is located in the south of Espírito Santo state, county district of Alegre. The experiment was done in an Ultisol Yellow-Red loamy texture under cultivation of pasture *Brachiaria decumbens*. The soil was sampled in the depth of 0-0,2 m, in the 64 points of a regular grid, with dimension of 90 x 90 m. The studied chemical attributes were K, Ca, Mg, Al, SB, T and V. It took place a continuous classification of the attributes, using the fuzzy logic. The data were submitted to the descriptive analysis and, soon afterwards, the geostatistic analysis, through the semivariograms adjustment. The attributes presented moderate and high variability measured by CV. All of the attributes presented spatial dependence, demonstrated by the adjustment of the spherical and the exponential semivariogram. The maps in study presented a mild representation of the limits of variation of the degrees of pertinence of the chemical attributes of the soil, turning them more representative. The fuzzy logic associated to the geostatistic analysis is a suitable technique to be applied to generate a representation of soils attributes, which naturally present a gradual variation in the land.

Key words - Spatial variability. Semivariogram. Fuzzy logic.

* Autor para correspondência

¹Recebido para publicação em 20/08/2008; aprovado em 22/04/2009

Trabalho desenvolvido durante o Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal CCA/UFES

²Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola UNICAMP, Av. Candido Rondon, 501, Cidade Universitária, 13083-875, Campinas-SP, Brasil, gdsouza@hotmail.com

³Departamento de Engenharia Rural, CCA/UFES, Vitória-ES, Brasil, limajss@yahoo.com.br, xavier@cca.ufes.br

⁴Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola/UFV, Viçosa-MG, Brasil, samuel-assis@hotmail.com

Introdução

A lógica booleana é uma das ferramentas mais usadas na manipulação de dados numéricos, tendo como características a simplicidade dos modelos e a fácil aplicabilidade. No entanto, esta técnica proporciona uma descontinuidade do fenômeno, apresentando limites rígidos e, conseqüentemente, uma grande perda de informação (MEIRELLES et al., 2007). Um dos problemas relacionados à definição de limites rígidos para os fatores são os erros e as incertezas associados, pois nem sempre os fenômenos naturais são representados corretamente, tornando-se necessário o uso ou desenvolvimento de métodos que representem de forma mais complexa os fenômenos naturais.

Nos últimos anos, observou-se avanço no uso de modelos quantitativos, utilizados em estudos de fatores da natureza. De acordo com Bönisch et al. (2004), países como Austrália, Estados Unidos, França e Holanda, têm mudado a abordagem tradicional de estudo dos recursos naturais, adotando modelos quantitativos, técnicas de predição espacial e integração de dados em sistema de informações geográficas, com objetivo de compreender a distribuição de dados oriundos de fenômenos ocorridos no espaço, o que constitui um grande desafio para solucionar questões centrais em diversos campos da ciência.

Entre as técnicas quantitativas de análise espacial de dados cita-se a geoestatística para a predição de dados por krigagem ordinária, que estima valores sem tendenciosidade e com variância mínima (GREGO; VIEIRA, 2005). A utilização de técnicas de geoestatística permite analisar adequadamente dados de experimentos, com possibilidade de obter informações encobertas pela estatística clássica (RIBEIRO et al., 2006). Outra possibilidade para tratar de dados quantitativos é através da aplicação de lógica fuzzy, utilizada em problemas de classificação, em que vetores de entrada são combinados por regras e atribuídos a um dos conjuntos de classes de saída especificado (BRESSAN et al., 2006). De acordo com Meirelles et al. (2007) o emprego de lógica fuzzy pode reduzir a propagação de erros nos modelos lógicos, proporcionando resultados mais confiáveis, se comparados à utilização da classificação booleana.

Dessa forma, contrariamente aos conjuntos tratados na lógica booleana, que permitem apenas o uso de funções de associação binária, que identificam valores verdadeiros ou falsos, o conjunto fuzzy admite a possibilidade de uma associação parcial (MEIRELLES et al., 2007), ou seja, caracteriza classes que não possuem limites rígidos entre si, ou estes não podem ser definidos. De acordo com Bönisch et al. (2004), um elemento pode pertencer com certo grau a uma classe, sendo denominado grau de pertinência

a um determinado conjunto fuzzy, refletindo uma ordem, não baseada em probabilidade, mas sim em possibilidade.

A lógica fuzzy foi utilizada por Vargens et al. (2003) na previsão da produção de cacau, visando a desenvolver um sistema mais simples e preciso, através de informações sobre fatores que podem afetá-la, como distribuição de chuva, adubação e calagem, sendo o sistema avaliado favoravelmente por especialistas. Bönisch et al. (2004) também aplicou a lógica fuzzy na representação acompanhada de medida espacial de incerteza de atributos do solo. Por meio da geração de um mapa de fertilidade fuzzy, pode ser observada variação gradual dos níveis de fertilidade de uma determinada região, representando assim fronteiras não rígidas entre áreas férteis e não férteis (MEIRELLES et al., 2007).

Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa foi espacializar os atributos químicos do solo, utilizando lógica fuzzy e análise geoestatística como procedimentos de mapeamento adequado à representação de fenômenos contínuos.

Material e métodos

A área em estudo localiza-se ao sul do Estado do Espírito Santo, no distrito de Rive, município de Alegre. As coordenadas geográficas do local são 20°46'2,8'' de latitude Sul e 41°27'39,2'' de longitude Oeste e altitude média de 150 m. A região apresenta clima tropical (Aw), segundo a classificação de Köppen, com verão quente e úmido e inverno frio e seco, temperatura média anual de 23,1 °C e precipitação anual média de 1.346 mm.

O relevo é predominantemente ondulado, sendo escolhido o terço médio de uma encosta. A área experimental está sob cultivo de pastagem *Brachiaria decumbens*. O solo da área foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), textura argilosa (EMBRAPA, 2006). A pastagem foi implantada na área há 8 anos, após o revolvimento do solo com aração em nível com tração animal e correção da acidez do solo com calcário dolomítico na época do plantio.

O solo foi amostrado com trado tipo sonda, na profundidade de 0-0,2 m, nos pontos de cruzamento de uma malha, com intervalos regulares de 10 m, com dimensão de 90 x 90 m, considerando 10 m de bordadura em cada um dos lados, totalizando 64 pontos (Figura 1), conforme plano amostral utilizado por Guimarães (2000). Os pontos foram georreferenciados, determinando-se as coordenadas planas e as cotas altimétricas.

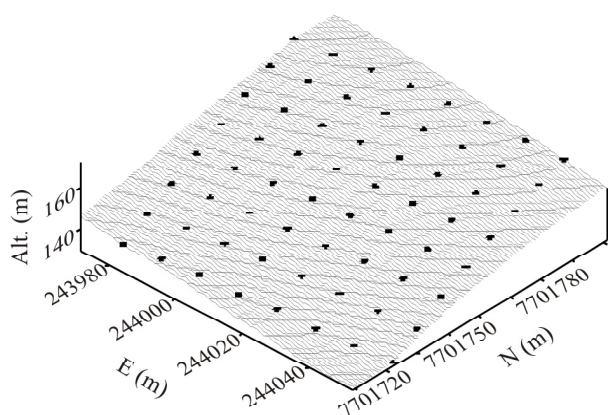


Figura 1 - Modelo digital de elevação (MDE) do terreno e identificação dos pontos de amostragem de solo na área sob pastagem de *Brachiaria decumbens*

Não existe uma literatura específica com o objetivo de definir a distância entre as amostras de solo para aplicar a geoestatística. Quando se utiliza a técnica das variáveis regionalizadas, busca-se definir a distância (alcance) a partir da qual os atributos estudados são independentes, segundo a amostragem utilizada, e nesse caso utilizar o método de interpolação krigagem ordinária para estimar valores em locais não medidos.

O que se pode fazer preliminarmente é um teste com amostragem em uma determinada distância entre os pontos e construir os semivariogramas. Se na distância adotada não apresentar dependência espacial é sinal que as amostras apresentam ausência de correlação espacial para a distância maior que a menor utilizada. Nesse caso, deve-se refinar a malha, ou seja, coletar pontos mais próximos e refazer o cálculo do semivariograma de um determinado atributo. Cabe ressaltar que à medida que mais amostras são coletadas aumenta-se o custo do experimento, portanto,

é uma decisão que leva em consideração a experiência e necessidade do pesquisador.

A análise química do solo foi realizada no Laboratório de Solos do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, conforme preconiza a Embrapa (1997). Os atributos químicos estudados foram: potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (T) e saturação por bases (V).

A classificação contínua dos dados dos atributos químicos K, CaMg, Al, SB, CTC e V foi realizada utilizando a lógica fuzzy. Os limites dos graus de pertinência para cada atributo foram definidos de acordo com cada classe de fertilidade (Tabela 1).

A função de associação escolhida na classificação continua dos dados foi a linear, utilizada por Bönisch et al. (2004) no estudo de atributos químicos do solo, apresentada a seguir para:

- Conjunto de dados com valores crescentes:

$$\begin{aligned} MF_A(Z) &= 0 && \text{se } z < p \\ MF_A(Z) &= (1/\alpha).(z-p) && \text{se } p \leq z < q \\ MF_A(Z) &= 1 && \text{se } z \geq q \end{aligned}$$

- Conjunto de dados com valores decrescentes:

$$\begin{aligned} MF_A(Z) &= 1 && \text{se } z \leq q \\ MF_A(Z) &= (-1/\beta).(z-r) && \text{se } q < z \leq r \\ MF_A(Z) &= 0 && \text{se } z > r \end{aligned}$$

em que:

$MF_A(Z)$ é o grau de pertinência com que um elemento Z pertence ao conjunto fuzzy, $\alpha = q-p$, $\beta = r-q$ e p, q e r são valores dos limites de classe de dois conjuntos fuzzy

Tabela 1 - Critérios para classificação dos graus de pertinência dos atributos químicos do solo¹: potássio (K), cálcio e magnésio (CaMg), alumínio (Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (T) e saturação por bases (V)

| Atributos | Unidades | Classes dos níveis dos atributos | | |
|-----------|---------------------------------------|----------------------------------|---------------|----------------|
| | | Adequado | Intermediário | Insatisfatório |
| K | (mg dm ⁻³) | >135 | 20-135 | <20 |
| CaMg | (cmol _c dm ⁻³) | >3 | 1-3 | <1 |
| Al | (cmol _c dm ⁻³) | <0,3 | 0,3-4 | >4 |
| SB | (cmol _c dm ⁻³) | >4 | 2-4 | <2 |
| T | (cmol _c dm ⁻³) | >8 | 4-8 | <4 |
| V | (%) | >80 | 35-80 | <35 |

¹⁾ Fonte: Meirelles et al. (2007), com modificações

pertencentes a um conjunto A. Os valores dos parâmetros p , q e r foram definidos em função dos valores dos limites dos intervalos dos atributos químicos (Tabela 2), que foram relacionados com uma fertilidade baixa (p e r) e com uma fertilidade boa (q). Neste caso, as classes dos níveis dos atributos químicos: adequado, intermediário e insatisfatório, referem-se às classes de fertilidade do solo boa, intermediária e baixa, respectivamente.

Em seguida, foram feitas as representações gráficas das funções de pertinência para cada atributo químico do solo em estudo (Figura 2). Atribuiu-se grau de pertinência (MF) “zero” para cada valor menor que o limite inferior (p e r) e para os valores maiores que o limite superior (q) foi atribuído grau de pertinência “um”, enquanto que para os valores intermediários aos

Tabela 2 - Parâmetros das funções lineares fuzzy utilizadas na classificação contínua das representações dos atributos: potássio (K), cálcio e magnésio (CaMg), alumínio (Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (T) e saturação por bases (V)

| Atributo | Unidade | Parâmetros | | |
|----------|------------------------------------|-------------|-----|----------------------|
| | | $p^1 - r^2$ | q | $\alpha^1 - \beta^2$ |
| K | mg dm ⁻³ | 20 | 135 | 115 |
| CaMg | cmol _c dm ⁻³ | 1 | 3 | 2 |
| Al | cmol _c dm ⁻³ | 4 | 0,3 | 3,7 |
| SB | cmol _c dm ⁻³ | 2 | 4 | 2 |
| T | cmol _c dm ⁻³ | 4 | 8 | 4 |
| V | % | 35 | 80 | 45 |

¹Dados com valores crescentes (K, CaMg, SB, T e V); ²dados com valores decrescentes (Al)

limites inferiores e superiores foram atribuídos graus de pertinência entre “zero” e “um”, segundo a função linear fuzzy descrita. Centeno et al. (2001) relataram que os valores intermediários descrevem um grau de pertinência parcial e um elemento pode ser associado a mais de um conjunto.

Os graus de pertinência para cada atributo foram submetidos à análise descritiva, determinando as medidas de posição (média, mediana e valores mínimo e máximo) e dispersão (coeficientes de variação, assimetria e curtose). A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (KS), ao nível de 5% de probabilidade.

A dependência espacial dos atributos foi quantificada pela análise geoestatística, por meio do ajuste de semivariogramas. A análise de semivariogramas proporcionou à determinação dos parâmetros: efeito pepita (C_0), variância estrutural (C_1), patamar (C_0+C_1), alcance (a) e índice de dependência espacial (IDE), dado pela relação $[C_1/(C_0+C_1)]*100$.

Para os atributos que apresentaram dependência espacial, utilizou-se a interpolação por krigagem ordinária, a fim de inferir valores para locais não amostrados, gerando os mapas temáticos. A krigagem estima valores por meio de uma função linear, sendo suas estimativas combinações lineares ponderadas das observações, apresentando média residual próxima de zero e mínima variância dos erros.

Para determinar o mapa da fertilidade média do solo na área utilizou-se o efeito combinado das representações por meio do operador fuzzy soma convexa, atribuindo peso igual para todos os atributos, ou seja, considerando a mesma contribuição na estimativa da fertilidade,

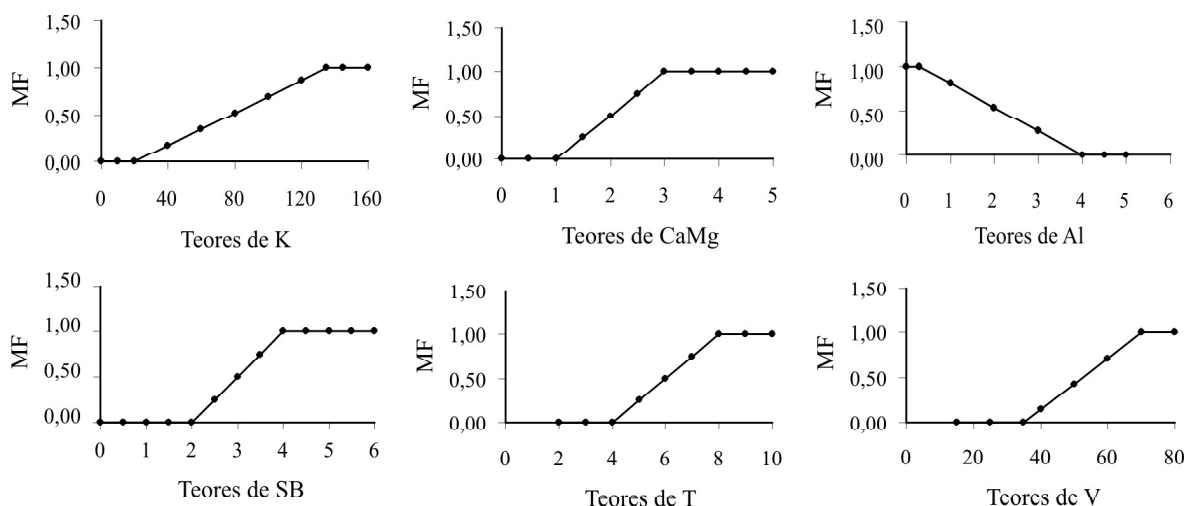


Figura 2 - Função de pertinência fuzzy para atributos químicos do solo com comportamento crescente (K, CaMg, SB, T e V) e decrescente (Al)

conforme sugerido por Bönisch et al. (2004). Tomé Junior (1997) afirmou que não há diferença quanto à importância de um elemento essencial em relação aos demais para o metabolismo vegetal e para a produtividade das culturas, sendo que todos são igualmente necessários.

Resultados e discussão

De acordo com o critério proposto por Wilding e Drees (1983), a variabilidade dos graus de pertinência medidos pelo coeficiente de variação (CV) foi classificada em moderada (15-35%) para Al e T, e alta (>35%) para os demais atributos (Tabela 3). Um dos motivos para esta variabilidade elevada seria o fato de se ter feito uma amostragem simples em cada um dos 64 pontos de coleta de solo (CARVALHO et al., 2002). A utilização dos valores de referência para o cálculo dos graus de pertinência (MF), também pode ter influenciado na variabilidade dos dados em relação aos dados originais. Considerando o tamanho da parcela, os coeficientes de variação demonstraram a importância de se amostrar intensamente mesmo em áreas pequenas (GREGO; VIEIRA, 2005).

Os valores da média e mediana dos atributos em estudo foram bem próximos, indicando distribuições normais, contrastando com alguns valores dos coeficientes de assimetria e curtose não compatíveis com a distribuição normal. O teste de normalidade mostrou distribuição normal somente para CaMg e T.

Todos os atributos em estudo apresentaram dependência espacial para os graus de pertinência, demonstrada pelo ajuste de modelos de semivariogramas (Tabela 4). Os modelos apresentaram ajuste isotrópico, ou seja, variabilidade igual em todas as direções na área. Os modelos esférico e exponencial proporcionaram os melhores ajustes dos semivariogramas teóricos, com R² variando de 80 a 96%. Vários autores têm constatado predomínio do modelo esférico e exponencial para os atributos do solo (BERNER et al., 2007; CAMPOS et al., 2007; CARVALHO et al., 2002; SANCHEZ et al., 2005).

Os graus de pertinência dos atributos em estudo apresentaram alcance (a) superiores ao menor espaçamento de amostragem adotado (10 m). De acordo com Novaes Filho et al. (2007) este fato permitiu a rejeição da hipótese de aleatoriedade dos

Tabela 3 - Estatística descritiva dos atributos do solo potássio (K), cálcio e magnésio (CaMg), alumínio (Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (T) e saturação por bases (V%), na área em estudo

| Atributos | \bar{x} | Md. | Mínimo | Máximo | Coeficientes | | | KS |
|-----------|-----------|------|--------|--------|--------------|-------|-------|----------------------|
| | | | | | CV | Cs | Ck | p-valor |
| K | 0,05 | 0,04 | 0,00 | 0,22 | 112 | 1,00 | 0,00 | p<0,05* |
| CaMg | 0,40 | 0,40 | 0,00 | 1,00 | 67 | 0,20 | -0,90 | p>0,20 ^{ns} |
| Al | 0,98 | 1,00 | 0,85 | 1,00 | 3 | -1,90 | 3,40 | p<0,01* |
| SB | 0,10 | 0,00 | 0,00 | 0,58 | 149 | 1,40 | 0,90 | p<0,01* |
| T | 0,56 | 0,53 | 0,22 | 0,96 | 32 | 0,20 | -0,60 | p>0,20 ^{ns} |
| V | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,34 | 202 | 2,20 | 4,60 | p<0,01* |

\bar{x} - média; Md- mediana; CV- coeficiente de variação; Cs- coeficiente de assimetria; Ck- coeficiente de curtose; *- distribuição não normal ao nível de 5% de probabilidade; ^{ns}- distribuição normal

Tabela 4 - Análise geoestatística dos graus de pertinência dos atributos do solo potássio (K), cálcio e magnésio (CaMg), alumínio (Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (T) e saturação por bases (V%), na área em estudo

| Atributos | Modelo | C ₀ | C ₁ | C ₀ +C ₁ | a(m) | IDE(%) | R ² (%) |
|-----------|-------------|----------------|----------------|--------------------------------|------|--------|--------------------|
| K | Exponencial | 0,27 | 0,67 | 0,94 | 26 | 71 | 96 |
| CaMg | Esférico | 0,48 | 0,62 | 1,10 | 50 | 56 | 95 |
| Al | Esférico | 0,53 | 0,56 | 1,09 | 51 | 51 | 80 |
| SB | Exponencial | 0,28 | 0,76 | 1,04 | 30 | 73 | 85 |
| T | Esférico | 0,45 | 0,50 | 0,95 | 44 | 53 | 95 |
| V | Esférico | 0,55 | 0,56 | 1,11 | 58 | 50 | 83 |

C₀- efeito pepita; C₁- variância estrutural; C₀+C₁- patamar; a- alcance; IDE- índice de dependência espacial; R²- coeficiente de determinação do semivariograma

dados, ou seja, independência espacial. O alcance indica o limite da dependência espacial do atributo, ou seja, determinações realizadas a distâncias menores que o alcance são correlacionadas (RIBEIRO et al., 2006; SILVA et al., 2003). De acordo com Bressan et al. (2006), a continuidade espacial existe na maioria das observações de atributos do solo, sendo os valores em locais mais próximos entre si mais semelhantes, até um determinado limite (alcance).

Os graus de pertinência apresentaram um índice de dependência espacial moderado, conforme Zimback (2001), com IDE entre 25 e 75%. Souza et al. (2004), Sanchez et al. (2005) e Mello et al. (2006) também encontraram moderada dependência espacial para atributos químicos do solo na profundidade de 0-0,2 m.

A espacialização dos graus de pertinência para cada atributo químico do solo na área experimental, utilizando krigagem ordinária, está apresentada na Figura 3. Observa-

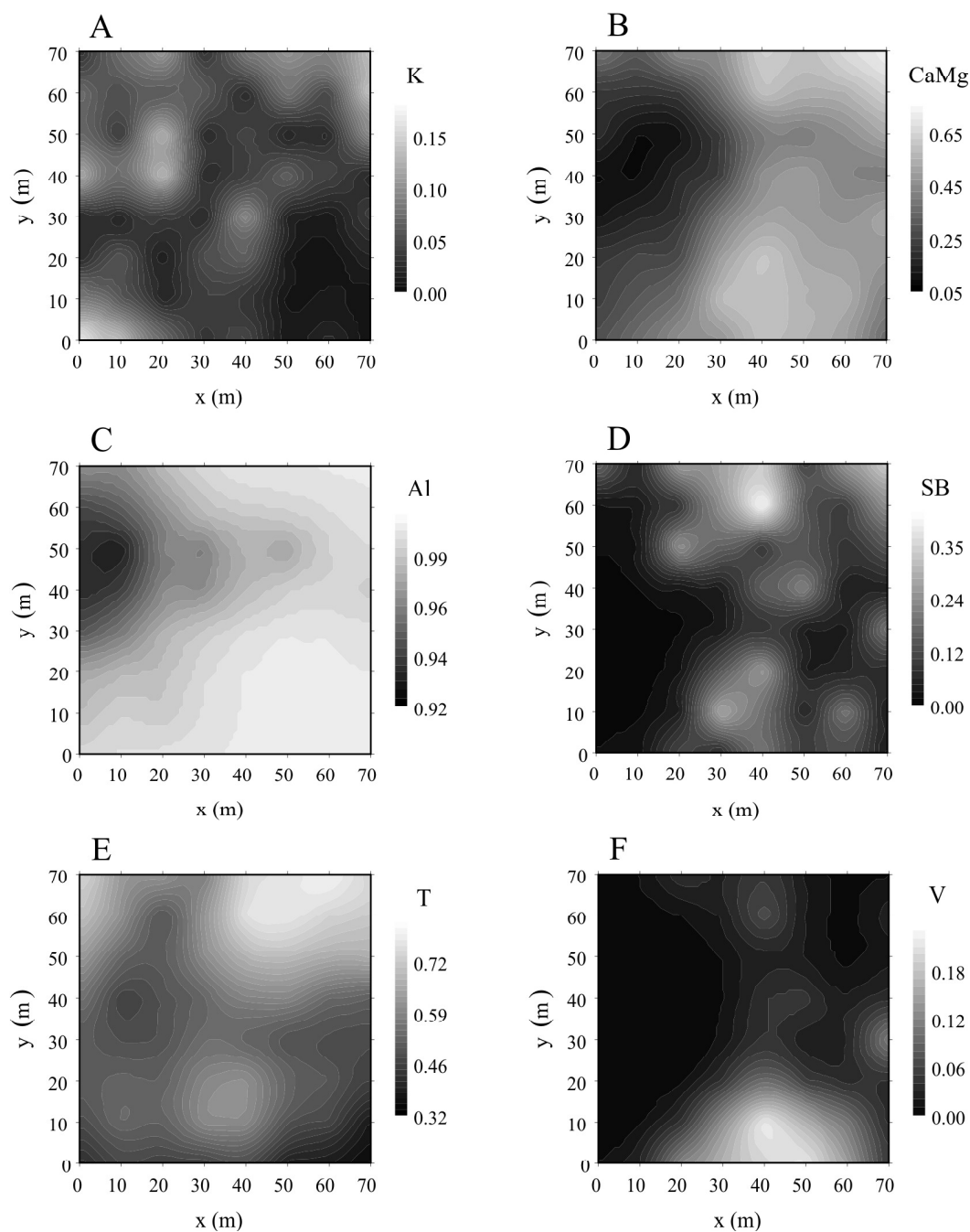


Figura 3 - Espacialização da classificação fuzzy dos atributos químicos K, CaMg, Al, SB, T e V, na área experimental em estudo

se na escala dos atributos que valores mais próximos de “um”, apresentaram cores mais claras, enquanto valores mais próximos de “zero”, cores mais escuras. Com o advento da informática e de novas técnicas de análise espacial, a aplicação da geoestatística em mapeamento digital de solos traz enorme contribuição, principalmente para locais não contemplados com levantamentos detalhados (NOVAES FILHO et al., 2007).

Para o Al, valores de pertinência superiores a 0,85 foram observados, indicando que os teores deste atributo foram próximos para uma boa fertilidade do solo (Figura 3C). De acordo com Sousa et al. (2007), solos que contém teores elevados de Al, em condições de acidez elevada, podem apresentar limitações ao bom crescimento e desenvolvimento radicular das plantas.

Os mapas de CaMg e T indicaram valores de fertilidade do solo intermediários entre fértil e não fértil (Figuras 3B e 3E). Baixos teores de CaMg limitam o desenvolvimento das plantas, principalmente, por serem macronutrientes, exigidos em maior quantidade pelas plantas. Com relação a T, Tomé Júnior (1997) relatou que se a maior parte das cargas do solo está ocupada por cátions essenciais como Ca, Mg e K, pode-se dizer que este é um solo bom, por outro lado, se grande parte das cargas está ocupada por cátions potencialmente tóxicos como H e Al, sobrando poucas cargas para os cátions nutrientes, este será um solo pobre. Neste último caso, uma T elevada pode indicar falsa fertilidade elevada do solo.

O K, SB e V foram os atributos que apresentaram os menores graus de pertinência, mostrando que a elevação dos níveis destes atributos no solo deve ser o primeiro passo na recuperação da fertilidade (Figuras 3A, 3D e 3F). A falta de condições adequadas de fertilidade para o desenvolvimento da gramínea pode levar ao surgimento

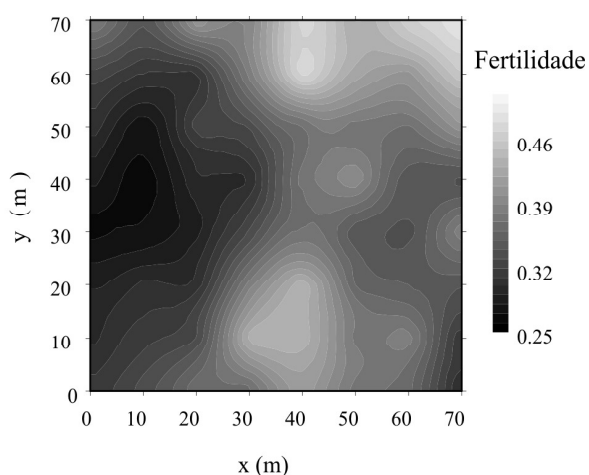


Figura 4 - Espacialização da classificação fuzzy da fertilidade do solo na área experimental

de deficiências nutricionais, proporcionando redução tanto na quantidade como na qualidade da produção.

A Figura 4 mostra o mapa final de fertilidade do solo com base nos graus de pertinência dos atributos em estudo, utilizando lógica fuzzy. Observa-se que a área em estudo apresentou valores de pertinência variando de 0,25 a 0,49 e que os menores valores estão concentrados na região esquerda do mapa, mostrando que a área em estudo apresenta graves restrições para o desenvolvimento vegetal. No entanto, Prezotti et al. (2007) citaram que os solos do Estado do Espírito Santo apresentam bom potencial de produção, todavia é necessária a utilização de práticas adequadas de correção e de convivência com suas limitações, devido à baixa fertilidade natural.

Os mapas dos graus de pertinência para os atributos químicos em estudo apresentaram uma suavização dos limites de variação dos teores no solo, ao invés de classificar as informações em classes definidas de forma rígida, conforme obtido na classificação booleana, tornando-os mais representativos do comportamento real, que naturalmente apresenta uma variação gradativa ao longo do terreno. Como comentado por Meirelles et al. (2007), a utilização da lógica fuzzy pode ser aplicada no planejamento regional ou de recursos naturais, pois possibilita análises integradas do ambiente, fornecendo um modelo mais próximo da realidade.

Conclusões

1. Os graus de pertinência dos atributos do solo apresentaram dependência espacial moderada e os mapas construídos proporcionaram a compreensão de forma mais nítida da variabilidade espacial na área em estudo.
2. A lógica fuzzy associada à análise geoestatística é uma técnica indicada para ser aplicada na espacialização de atributos do solo, que naturalmente apresentam uma variação gradual no terreno.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de mestrado concedida ao primeiro autor.

Referências

BERNER, P. G. M. et al. Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um Cambissolo sob dois sistemas de manejo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, n. 05, p. 837-844, 2007.

- BÖNISCH, S. et al. Representação e propagação de incertezas em dados de solo. II - Atributos numéricos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 01, p. 33-47, 2004.
- BRESSAN, G. M. et al. Sistema de classificação fuzzy para o risco de infestação por plantas daninhas considerando a sua variabilidade espacial. **Planta Daninha**, v. 24, n. 02, p. 229-238, 2006.
- CAMPOS, M. C. C. et al. Variabilidade espacial da textura de solos de diferentes materiais de origem em Pereira Barreto, SP. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 38, n. 02, p. 149-157, 2007.
- CARVALHO, J. R. P. de; SILVEIRA, P. M. da; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 08, p. 1151-1159, 2002.
- CENTENO, J. A. S. et al. Mapeamento de áreas permeáveis usando uma metodologia orientada a regiões e imagens de alta resolução. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 01, n. 55, p. 48-56, 2001.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise do Solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPq, 1997. 212 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006. 306 p.
- GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 02, p. 169-177, 2005.
- GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Vermelho escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional**. 2000. 92 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- MEIRELLES, M. S. P.; MOREIRA, F. R.; CAMARA, G. Técnicas de inferência espacial. In: MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. **Geomática: modelos e aplicações ambientais**. Brasília: Embrapa. Informação Tecnológica, 2007. cap. 3, p. 105-190.
- MELLO, G. de; BUENO, C. R. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo em áreas intensamente cultivadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 02, p. 294-305, 2006.
- NOVAES FILHO, J. P. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo usada na identificação de classes pedológicas de microbacias na Amazônia Meridional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 01, p. 91-100, 2007.
- PREZOTTI, L. C. et al. **Manual de recomendação de calagem e adubação para o estado do Espírito Santo**. 5 ed. Vitória: SEEA/INCAPER/CEDAGRO, 2007. 305 p.
- RIBEIRO, A. I. et al. Diagnóstico de uma área compactada por atividade minerária, na floresta amazônica, empregando métodos geoestatísticos à variável resistência mecânica à penetração do solo, **Acta Amazônica**, v. 36, n. 01, p. 83-90, 2006.
- SANCHEZ, R. B. et al. Variabilidade espacial de propriedades de Latossolo e da produção de café em diferentes superfícies geomórficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 09, n. 04, p.489-495, 2005.
- SILVA, V. R. et al. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 06, p. 1013-1020, 2003.
- SOUSA, D. M. G. de; MIRANDA, L. N. de; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. cap. 5, p. 205-274.
- SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v. 34, n. 06, p. 1763-1771, 2004.
- TOMÉ JÚNIOR, J. B. **Manual para interpretação de análise de solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997. 247 p.
- VARGENS, J. M.; TANSCHKEIT, R.; VELLASCO, M. M. B. R. Previsão de produção agrícola baseada em regras lingüísticas e lógica fuzzy. **Revista Controle & Automação**, v. 14, n. 02, p. 114-120, 2003.
- WILDING, L.P.; DREES, L.R. Spatial variability and pedology. In: WILDING, L. P.; SMECK, N. E.; HALL, G. F. **Pedogenesis and soil taxonomy I**. Concepts and interactions. Amsterdam: Elsevier, 1983. p. 83-116.
- ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (Livre Docência) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.