

GEOESTATÍSTICA E ANÁLISE FATORIAL EXPLORATÓRIA PARA REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO, NA CAFEICULTURA

Leandro da Silva Almeida¹, Ednaldo Carvalho Guimarães²

(Recebido: 08 de julho de 2015 ; aceito: 08 de dezembro de 2015)

RESUMO: Objetivou-se, neste estudo, avaliar a dependência espacial dos atributos químicos do solo por meio da associação da geoestatística e da análise multivariada (Análise Fatorial Exploratória), buscando entender o comportamento dos atributos no solo e contribuir para o planejamento das adubações, a produtividade e sustentabilidade da cafeicultura. O experimento foi desenvolvido em uma malha de 63 pontos amostrais, disposto em uma lavoura de *Coffea arabica* L., na região de cerrado. Foi realizada inicialmente a análise fatorial exploratória que gerou quatro fatores que representaram, juntos, 97,05 % da variação total dos dados. Na análise geoestatística foi verificado que os fatores 1 e 3 apresentaram dependência espacial, para os quais os dados foram interpolados por krigagem ordinária (geoestatística). Já os fatores 2 e 4 apresentaram efeito pepita puro (independência espacial), sendo realizada a interpolação dos dados pelo método do inverso do quadrado das distâncias (estatística clássica). Sendo que os fatores 1 e 3 representam fortemente a acidez do solo, fertilidade e matéria orgânica do solo. Os fatores 2 e 4 representam a relação entre estes atributos no solo. Os resultados mostraram que a utilização de técnicas multivariadas em associação com geoestatística podem contribuir para o manejo da cafeicultura na região do cerrado.

Termos para indexação: Cafeicultura, atributos do solo, planejamento da adubação, geoestatística, análise multivariada.

GEOSTATISTICS AND EXPLORATORY FACTOR ANALYSIS FOR SPACIAL REPRESENTATION OF SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES IN COFFEE GROWING

ABSTRACT: The objective of this study was to evaluate the spatial dependence on chemical soil attributes by means of the geostatistical association and multivariate analysis (exploratory factor analysis), aiming to understand the behavior of the attributes in the soil, thus being able to contribute to the planning of fertilization, seeking greater productivity and sustainability of coffee growing. The research was carried in a grid of 63 sampling points, mounted on a *Coffea arabica* L. plantation in the cerrado region. Initially was held exploratory factor analysis that generated four factors that together accounted for 97.05% of the total variation of the data. In the geostatistical analysis it was found that the factors 1 and 3 showed spatial dependence, for which the data were interpolated by ordinary kriging (geostatistical). Already the factors 2 and 4 showed pure nugget effect (spatial independence) which held data interpolation by the inverse square of the distance method (classical statistics). The factors 1 and 3 strongly represent the acidity of soil fertility and the soil organic matter. Factors 2 and 4 represent the relationship between the attributes of the ground. The results showed that the use of multivariate techniques in combination with geostatistics can contribute to the coffee crop management in the Cerrado region.

Index terms: Coffee growing, soil attributes, fertilization planning, geostatistics, multivariate analysis.

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura, atualmente, ocupa uma área de 1,9 milhões de hectares plantados no Brasil, segundo os dados da Companhia Nacional do Abastecimento- CONAB (2015), sendo que o Brasil é maior produtor e o maior exportador mundial de café e deve colher, na safra 2015 mais de 42 milhões de sacas beneficiadas, sendo que, deste total, cerca de 73 % é de café arábica e o restante de café conilon.

Segundo Lopes e Guilherme (2007), o manejo da fertilidade do solo por meio do uso eficiente de corretivos agrícolas e fertilizantes, sejam eles de origem orgânica ou mineral, é responsável, dentre os diversos fatores de produção, por cerca de 50 % dos aumentos de produção e

produtividade das culturas. Souza et al. (2008) reforçam ainda que os atributos químicos do solo possuem uma dinâmica de distribuição bastante diferenciada, decorrente das alterações provocadas pelo sistema de manejo agrícola adotado e dos processos.

Sabe-se que as características do solo e da cultura variam no espaço e no tempo. A agricultura de precisão busca entender estas variações por meio da quantificação da variabilidade espacial e temporal dos fatores ligados às interações solo-água-planta, visando aperfeiçoar o uso de insumos agrícolas, realizando a distribuição adequada, em cada setor do campo de produção, além de trazer possíveis benefícios ambientais (MOLIN; CASTRO, 2008).

¹Universidade Federal de Uberlândia/UFU - Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG/UFU) - Rua Manoel Camargo da Cruz, 78 Sala103 A - 38.408-084 - Uberlândia - MG - almeidalean26@gmail.com

²Universidade Federal de Uberlândia/UFU- Faculdade de Matemática (FAMAT/UFU) - Av. João Naves de Ávila, 2121 Campus Santa Mônica - Bloco 1F - Sala 1F120 - 38.408-100 - Uberlândia -MG- ecg@ufu.br

A variabilidade das características do solo pode ser tratada por meio de diferentes métodos estatísticos. Alguns autores têm demonstrado que os atributos de solo, muitas vezes, não revelam uma variação puramente aleatória ao longo de um terreno, apresentando correlação espacial (GOMES et al., 2007). Assim, a geoestatística tem sido utilizada como importante ferramenta de análise dos dados, a fim de modelar e estudar a estrutura de dependência espacial dos atributos do solo, por meio do ajuste de semivariogramas experimentais (MANZIONE; ZIMBACK, 2011).

A associação da geoestatística com a análise fatorial busca estudar a interação entre as variáveis, estabelecendo, para este fim, um conjunto de fatores, calculados pela combinação linear das variáveis originais (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2010).

Silva et al. (2010), avaliando a variabilidade espacial de atributos químicos em um Latossolo Vermelho-Amarelo Húmico, cultivado com cafeeiro, usando em conjunto técnicas de análise multivariada e geoestatística, verificaram que esta associação facilita avaliação da variabilidade do solo, o que permitiu melhor caracterização da acidez do solo.

Já os pesquisadores Silva e Lima (2012), trabalhando com análise multivariada e geoestatística verificaram que o agrupamento de informações permitiu uma redução dimensional dos atributos do solo, sem perdas na qualidade da informação gerada. Assim, a combinação de geoestatística e análise multivariada permitiu de forma eficiente estudar o estado nutricional de café arábica.

Santos et al. (2015), estudando a variabilidade espacial dos macronutrientes em lavouras de café no norte do estado do Espírito Santo, observaram que os macronutrientes apresentaram dependência espacial e concluíram que a geoestatística é uma ferramenta fundamental na tomada de decisão, para atender às necessidades nutricionais da lavoura cafeeira.

Objetivou-se, neste estudo, avaliar a dependência espacial dos atributos químicos do solo por meio da associação de técnicas geoestatísticas e de análise multivariada, visando contribuir com a tomada de decisões que visem à produtividade e sustentabilidade da cafeicultura.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido na fazenda Brasil, localizada no município de Araguari-MG,

região de cerrado, cujas coordenadas geográficas são: 18°32'55.99"S, 48°24'10.46"O. A altitude é de 940 metros, temperatura média anual e 21,2 ° C, com pluviosidade média 1.566 milímetros por ano.

A propriedade possui 65 hectares cultivados com *Coffea arabica* L., todos irrigados por gotejamento. Foram coletadas, em toda a propriedade, 63 amostras de solos georeferenciadas (utm), na profundidade de 0 a 20 cm, para quais foram realizadas as análises químicas de rotina no Laboratório de Solos, do Instituto de Ciências Agrárias, da Universidade Federal de Uberlândia. Os atributos avaliados são apresentados na Tabela 1.

Foi realizada a análise exploratória dos dados obtidos, a fim de verificar a existência de dados discrepantes (outliers), pois a existência desse tipo de dados pode interferir significativamente nos resultados das análises estatísticas. Foi realizado também o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, com significância de 5%.

Atendidas as premissas da análise fatorial, realizaram-se os seguintes procedimentos: escolha do método de extração de fatores (método de componentes principais); escolha do método de rotação de fatores (Varimax); e, por fim, análise dos fatores gerados (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2010).

Com os fatores obtidos pela análise fatorial e no intuito de utilizar a geoestatística para representação espacial, realizaram-se algumas verificações primordiais: análise descritiva espacial para verificar tendências; análise de dependência espacial; escolha do melhor modelo para ajuste do semivariograma. Após estas verificações, para as variáveis que possuem dependência espacial, aplicou-se a *krigagem* ordinária para a interpolação. Já para as variáveis que não apresentaram modelo estruturado de dependência espacial, foi utilizado outro método de interpolação, nesses casos, usou-se pelo método de inverso do quadrado das distâncias (RIBEIRO JÚNIOR et al., 2009).

As análises foram realizadas usando o programa R versão 3.2.1 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2015), utilizando o pacote de dados geoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGGLE, 2001).

No ajuste de semivariogramas foram avaliados os modelos, por meio da técnica de validação cruzada, sendo selecionados aqueles que melhor descreveram o comportamento espacial dos fatores (NANNI et al., 2011; YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

TABELA 1 - Atributos do solo avaliados.

Atributo	Abreviação*	Atributo	Abreviação*
Matéria Orgânica	MOS	Teor de magnésio	Mg
Cap. de troca de cátions	CTC	Relação Ca/V	Ca /V
Pot. Hidrogênio	pH	Relação Mg/V	Mg /V
Saturação de bases	V	Relação Ca/Mg	Ca/Mg
Teor de Cálcio	Ca	Relação K/V	K/V
Teor de potássio	K	Relação Ca/Mg/K	Ca/Mg /K
Teor de alumínio	Al	Relação cálcio /potássio	Ca /K
CTC efetiva do solo	T	Relação Mg/K	Mg /K
Saturação de bases	SB	Relação H + Al/T	H + Al/T
Hidrogênio + Alumínio	H + Al	Relação Al/V	Al/V
Fósforo remanescente	P-res		

* Abreviação adotada no texto.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise descritiva por meio de *box-plot*, constatarem-se valores de *outliers* para a matéria orgânica do solo (MOS), CTC, P-res, saturação de bases (V%) e para os teores de Ca e Mg, sendo que estes valores foram excluídos do banco de dados, para que não comprometessem as análises multivariadas e geoestatísticas. Neste processo, houve uma redução de cinco pontos, reduzindo de 63 para 58 as amostras georeferenciadas.

Foi realizado o teste de normalidade de *Kolmogorov-Smirnov*, com significância de 0,05, para verificar a normalidade das variáveis. As variáveis P-res, Mg, Al/V, t e Al não atenderam a normalidade e apresentaram assimetria acentuada, podendo influenciar na análise fatorial (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2010) e na geoestatística (YAMAMOTO; LANDIN, 2013) e, portanto, foram eliminadas das análises, e analisadas por métodos univariados.

A partir da análise fatorial exploratória dos atributos do solo, foram definidos quatro fatores que apresentaram esfericidade satisfatória pelo teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), estes quatro fatores acumulados representam 97,05 % da variação total dos dados. Na Tabela 02, são apresentados para os quatro fatores obtidos, os pesos rotacionados de cada atributo do solo.

Observa-se na Tabela 2 que os atributos que mais pesaram para o Fator 01, estão todos associados ao processo de correção da acidez do

solo, sendo o Al+ H e Al+H/V correlacionados inversamente e os Ca; Mg/V; Ca/V; V e o pH correlacionados de forma positiva. No Fator 03, os atributos que contribuem com maior peso são a CTC e MOS, representam a capacidade deste solo em reter cátions, e como não poderia ser diferente, neste fator, o segundo atributo com maior peso é a MOS, que no caso dos solos de cerrado é a grande responsável pela CTC, em torno de 50 % (ROSOLEN et al., 2012).

Por fim, os Fatores 02 e 04, retratam a relação potássio/cálcio/magnésio e cálcio/magnésio do solo, respectivamente. Medeiros et al. (2008), trabalhando com a cultura do milho e Oliveira, Pavan e Chaves (1994), trabalhando com mudas de café, concluíram que o equilíbrio nutricional é um fator muito importante para o crescimento e produtividade das plantas, especialmente quanto aos nutrientes cálcio, magnésio e potássio, que, para estes, devem existir uma proporção de suas disponibilidade no solo, sendo considerada adequada a relação na faixa 9:3:1 (Ca/Mg/K), na CTC, o cálcio deve ocupar de 40-50%, o magnésio de 15-20% e o potássio de 3-5%.

Na Tabela 03 são apresentadas as constantes para equação fatorial, para cada característica do solo, em cada um dos quatro fatores. A equação geral (1) é dada por:

$$\text{Fator (n)} = \text{Var1} * K(\text{Var1}) + \text{Var2} * K(\text{Var2}) + \dots + \text{VarZ} * K(\text{VarZ}) \dots \dots \dots (1)$$

TABELA 2 - Tabela dos pesos dos Fatores rotacionados.

	Fatores					Fatores			
	1	2	3	4		1	2	3	4
MOS	0.10	0.01	0.87	-0.17	K	0.54	-0.78	0.28	0.01
CTC	-0.21	0.04	0.92	0.24	K/V	0.61	-0.76	-0.11	-0.08
pH	0.92	-0.05	-0.14	-0.25	Ca/Mg /K	0.19	0.97	0.10	0.01
V	0.98	-0.05	-0.06	-0.16	H + Al	-0.90	0.04	0.34	0.21
Ca	0.88	0.05	0.46	0.09	SB	0.88	-0.01	0.46	-0.03
Ca /V	0.99	0.01	-0.06	-0.04	Ca /K	0.17	0.97	0.10	0.12
Mg /V	0.82	0.02	-0.02	-0.56	Mg /K	0.26	0.82	0.10	-0.46
Ca/Mg	-0.21	-0.02	0.02	0.97	H + Al/T	-0.98	0.05	0.06	0.16

*Os valores maiores mostram em que Fator cada variável tem maior peso. Sendo que, quando negativos, agem inversamente ao fator e, quando positivo, contribuem diretamente ao Fator.

TABELA 3 - Constantes para cada variável e fator do modelo.

Atributo	Fatores				Atributo	Fatores			
	1	2	3	4		1	2	3	4
MOS	-0.062	-0.019	0.369	-0.206	K	0.038	-0.17	0.095	0.011
CTC	-0.048	0.002	0.361	0.043	K/V	0.059	-0.163	-0.06	-0.002
pH	0.107	0.008	-0.081	-0.034	Ca/Mg /K	0.061	0.239	0.013	0.084
V	0.126	0.017	-0.064	0.034	H + Al	-0.123	-0.017	0.169	-0.018
Ca	0.123	0.042	0.123	0.155	SB	0.103	0.021	0.137	0.062
Ca /V	0.148	0.038	-0.079	0.127	Ca /K	0.075	0.244	0	0.165
Mg /V	0.041	0	0.005	-0.284	Mg /K	-0.007	0.177	0.065	-0.262
Ca/Mg	0.114	0.049	-0.085	0.675	H + Al/T	-0.126	-0.017	0.064	-0.034

* Constantes para ser atribuída a equação de cada fator.

onde: n representa o fator a ser calculado e K a constante do modelo para cada variável (Var1... VarZ) em cada fator, multiplicado pelo próprio valor original da variável.

Para os quatros fatores (novas variáveis criadas), a análise exploratória espacial dos dados não indicou tendência, pois não se observa predominância dos quartis, em setores específicos da área avaliada. Conforme argumentam Yamamoto e Landim (2013), quando a tendência é verificada, esta pode mascarar a dependência espacial.

A análise de dependência espacial foi determinada a partir dos semivariogramas. Os semivariogramas ajustados para os Fatores 1 e 3 apresentaram dependência espacial para as distâncias em estudo, já os dos Fatores 2 e 4

apresentaram efeito pepita puro (independência espacial) para as distâncias avaliadas, conforme pode ser visualizado na Figura 2.

Na Tabela 04 estão apresentados os parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados para os Fatores 1 e 3 cujos modelos foram ajustados a sentimento (VIEIRA et al., 1983), sendo que, foram selecionados os modelos que apresentaram melhores parâmetros quando validados (validação cruzada), ou seja, quando foram verificados os coeficientes de regressão e os interceptos, e se eles foram estatisticamente iguais a 1 e 0, respectivamente (MELLO et al., 2005). A Tabela 04 também apresenta o grau de dependência espacial dos fatores pelo método proposto por Cambardella et al. (1994).

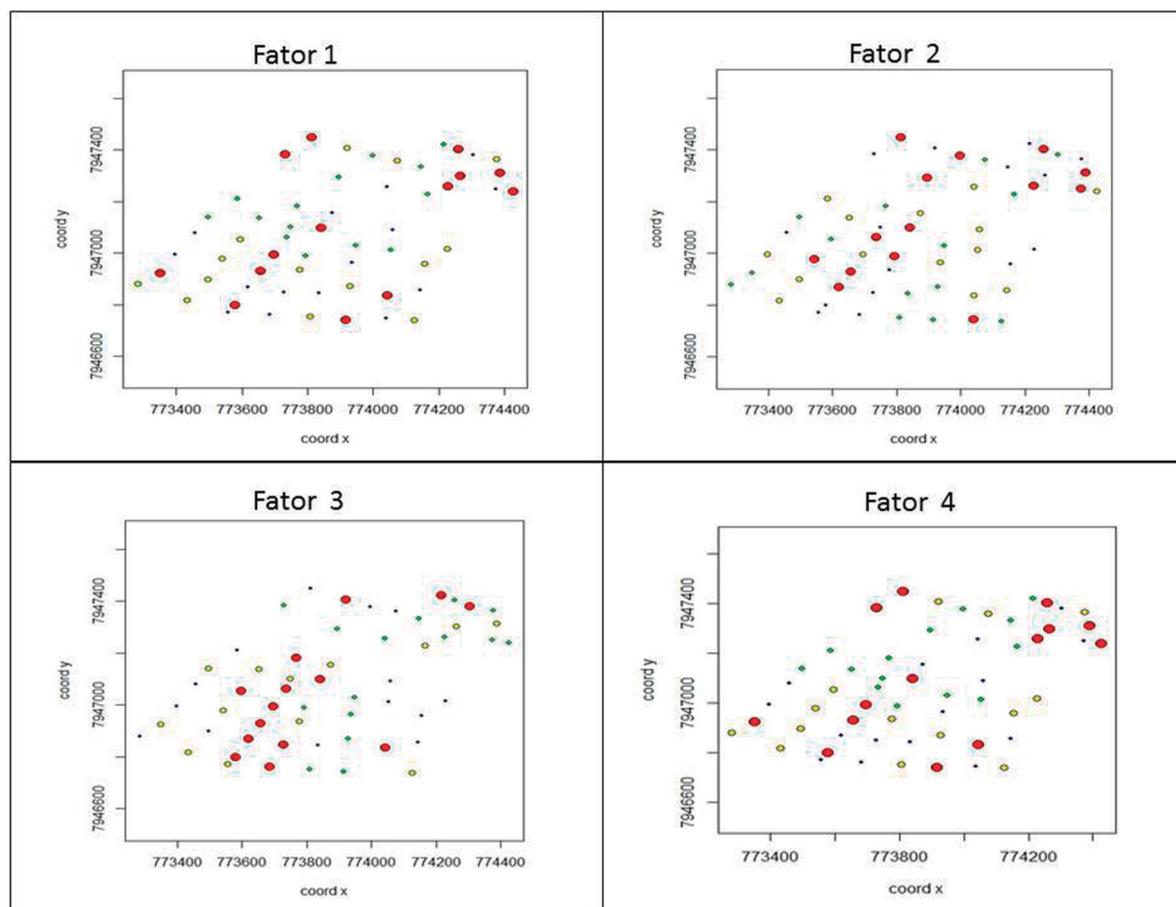


FIGURA 1 - Distribuição espacial dos pontos amostrados de acordo com os quartis (classes definidas na sequência de tamanhos das representações: Min |-- Q1; Q1 |-- Q2; Q2 |-- Q3; Q3 |-- Max).

Para os Fatores 1 e 3, realizou-se a interpolação por Krigagem ordinária para uma malha de 115 (X) x 73 (Y) estimando-se um total de 8.395 pontos. Os mapas com os resultados estratificados em quatro níveis são apresentados na Figura 03. Os Fatores 2 e 4 não apresentaram dependência espacial, mostrando assim incertezas em pequenas distâncias, impossibilitando realizar a sua inferência espacial por meio da geoestatística. Para estes dois fatores, os mapas foram gerados pelo método do inverso do quadrado da distância (IDW) também utilizando a malha de 115 x 73 pontos. Os mapas também são apresentados na Figura 3.

Os resultados apresentados para os fatores 1 e 3 (FIGURA 3) são muito semelhantes aos encontrados por Lima, Silva e Silva (2013), quando utilizaram a análise multivariada e geoestatística para avaliar os atributos do solo na região de cerrado, onde obtiveram também um fator

(componente) que explicava da mesma maneira a fertilidade do solo (pH, e os macronutrientes) em um segundo fator (componente) que representava a matéria orgânica e a CTC, assim como os fatores 1 e 3 do presente estudo.

Silva e Lima (2012), também encontraram resultados muito semelhantes, trabalhando com análise multivariada e geoestatística, obtiveram dois agrupamentos que representaram 79,8 % da variação total dos dados. O primeiro agrupamento referia-se a características que descreviam a acidez de solo e a sua fertilidade. E um segundo agrupamento que representava os micronutrientes. Sendo que o primeiro agrupamento destes autores corresponde ao Fator 1.

Nos mapas dos fatores 2 e 4 (FIGURA 3) que tiveram distribuição aleatória na área, a interpolação foi realizada pelo IDW e os mapas gerados indicam onde estão ocorrendo problemas pontuais, na relação mútua de Ca: Mg: K, e na

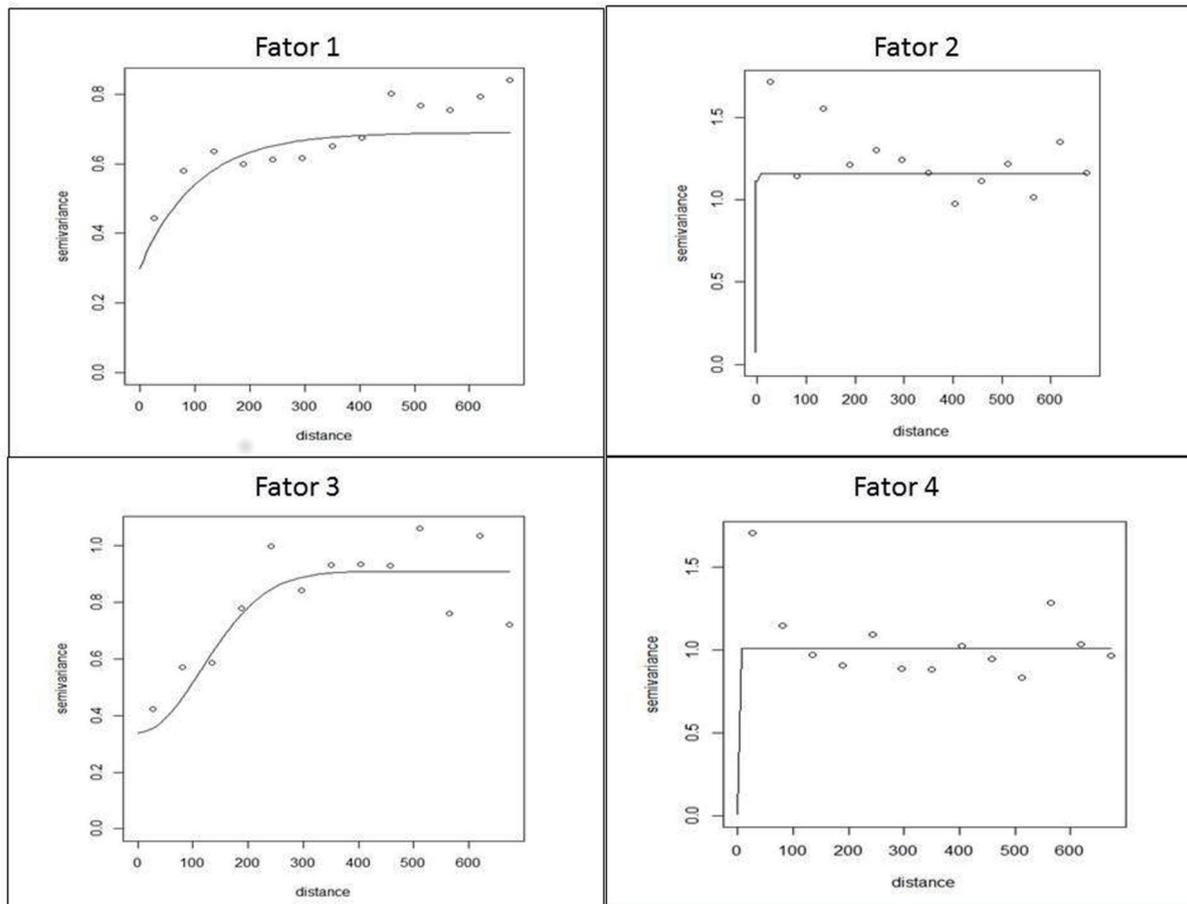


FIGURA 2 - Semivariogramas ajustados para os quatro fatores.

relação Ca:Mg, que, segundo Matiello, Garcia e Almeida (2006), a relação ideal é de 9:3:1 e 3:1, respectivamente. Estas relações necessitam de grande atenção, pois o excesso de um, inibe a absorção do outro, pela competição pelos sítios de absorção, o que além da deficiência nutricional, gera perdas na produtividade e suscetibilidade a pragas e doenças (CARVALHO et al., 2013; MATIELLO; GARCIA; ALMEIDA, 2006).

Oliveira et al. (2008), trabalhando em uma área de lavoura cafeeira por duas safras e Ferraz et al. (2012) verificaram que os macronutrientes e a acidez do solo, que estão representados neste estudo pelo Fator 1, apresentaram dependência espacial, e nas conclusões dos trabalhos os autores destacam a importância do uso da geoestatística para a avaliação destes atributos nos solos.

A importância da aplicação de técnicas mais precisas na avaliação de atributos do solo, como

a geoestatística na atividade cafeeira vêm sendo discutidas em vários estudos como os de Ferraz et al. (2012), Lima, Silva e Silva (2013), Oliveira et al. (2008), Santos et al. (2015), Silva et al. (2007, 2010) e Silva e Lima (2012), onde os autores verificam a dependência espacial dos atributos em área cultivadas com cafeeiro, quando avaliam o atributo separadamente ou em associação com a estatística multivariada.

Além da importância de se estudar o atributo do solo entendendo o seu comportamento na área, a associação com a análise multivariada pode permitir a delimitação na propriedade de zonas de manejos homogêneas para o solo (CORÁ et al., 2004). Nas zonas de manejo, pode-se estudar a interação destes atributos de maneira rápida, ou seja, observado um mapa final da interação dos atributos do solo e a partir deles, podendo verificar as suas interações com outros atributos relacionados à atividade cafeeira.

TABELA 4 - Parâmetros dos modelos de semivariogramas ajustados.

Fator	Modelo	C_0 (utm)	C_0+C (utm)	Alcance Prático (utm)	Grau dependência espacial ¹
1	Exponencial	0,30	0.69	314.6	0.43 (moderado)
3	Gaussiano	0.34	0,91	283,3	0.37 (moderado)
2	IDW	NA ³	NA	NA	Ausente
4	IDW	NA	NA	NA	Ausente

Co – efeito pepita; Co+ C- Patamar; 1- C_0/C_0+C (<0,25 Forte; >0,25<0,75 (moderado); >0,75 fraco)

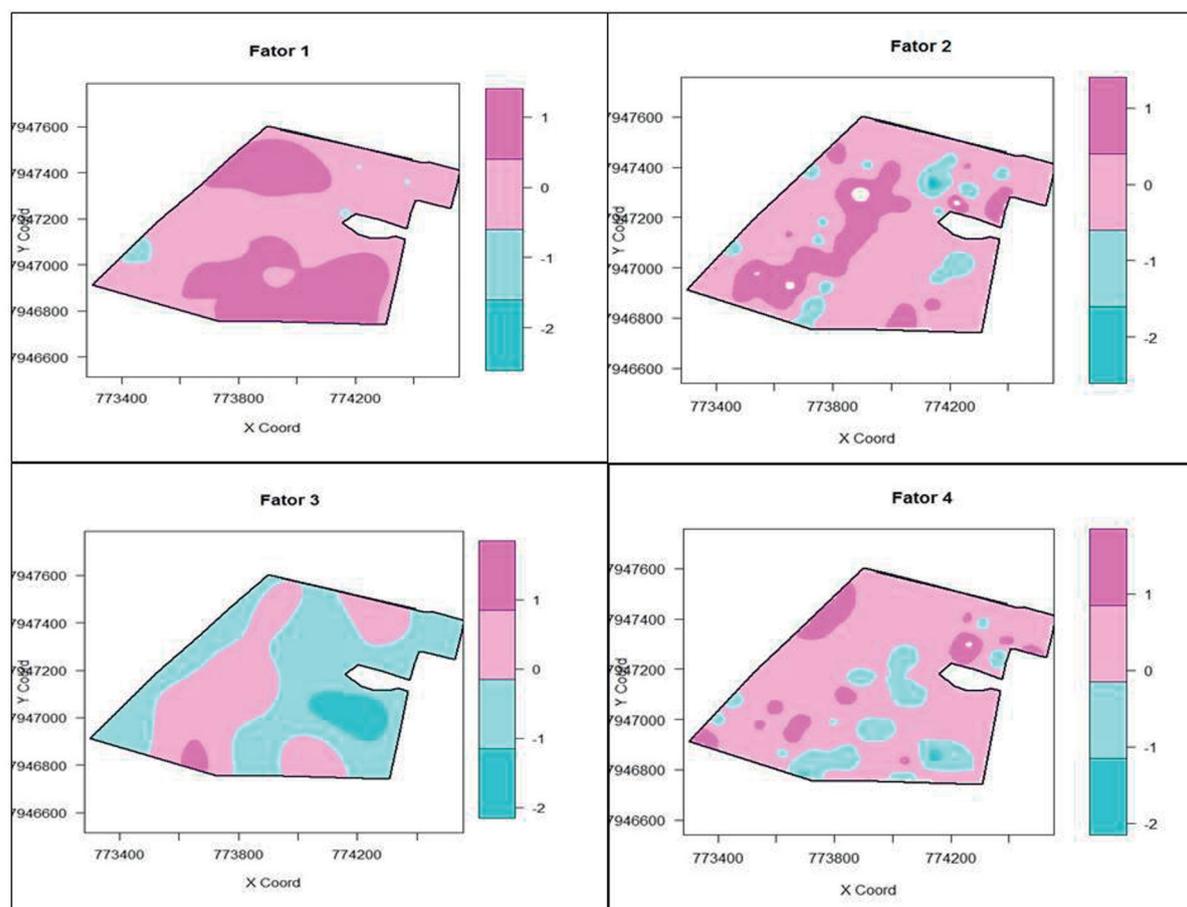


FIGURA 3 - Mapas gerados para os quatro fatores (Fatores 01 e 03 por krigagem ordinária e os Fatores 02 e 04 por IDW).

4 CONCLUSÕES

A geoestatística associada à análise fatorial fornece resultados interessantes a respeito da distribuição espacial dos atributos químicos do solo, podendo assim facilitar ou permitir o estudo da interação dos atributos dos solos, quando estes apresentam dependência espacial, como nos resultados obtidos nos fatores 1 e 3.

Os fatores 1 e 3 representaram fortemente os atributos químicos do solo e tiveram dependência espacial. Já os fatores 2 e 4, não apresentaram dependência espacial.

Os resultados obtidos em relação aos fatores (1, 2, 3 e 4), são úteis para o planejamento das adubações das propriedades cafeeiras, assim como o monitoramento da produtividade nestas áreas, conduzindo a melhores resultados no manejo das propriedades.

5 REFERÊNCIAS

- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1240-1248, 1994.
- CARVALHO, D. O. et al. Adubação nitrogenada e potássica na severidade da antracnose em dois cultivares de milho. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, n. 3, p. 380-387, jun. 2013.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Estimativas de safras agrícolas: levantamento café**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 6 jan. 2015.
- CORÁ, J. E. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, dez. 2004.
- FERRAZ, G. A. E. S. et al. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 140-150, fev. 2012.
- FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. Visão além do alcance: uma introdução à análise fatorial. **Opinião Pública**, Campinas, v. 16, n. 1, p. 160-185, 2010.
- GOMES, N. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 4, p. 427-435, 2007.
- LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; SILVA, J. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado em plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 16-23, mar. 2013.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2007. p. 1-64.
- MANZIONE, R. L.; ZIMBACK, C. R. L. Análise espacial multivariada aplicada na avaliação da fertilidade do solo. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 19, n. 3, p. 227-235, 2011.
- MEDEIROS, J. C. et al. Relação cálcio: magnésio do corretivo da acidez do solo na nutrição e no desenvolvimento inicial de plantas de milho em um Cambissolo Húmico Álico. **Revista Semina**, Londrina, v. 29, n. 4, p. 799-806, out./dez. 2008.
- MELLO, J. M. de et al. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 1, n. 69, p. 25-37, 2005.
- MOLIN, J. P.; CASTRO, C. N. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 65, n. 6, p. 567-573, dez. 2008.
- NANNI, M. R. et al. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 68, n. 3, p. 386-392, June 2011.
- OLIVEIRA, E. F.; PAVAN, M. A.; CHAVES, J. C. D. Respostas das mudas de cafeeiro ao equilíbrio entre cátions trocáveis em solos com cargas variáveis. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, Curitiba, v. 37, n. 4, p. 973-979, 1994.
- OLIVEIRA, R. B. de et al. Comparação entre métodos de amostragem do solo para recomendação de calagem e adubação do cafeeiro conilon. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 176-186, mar. 2008.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2015. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>. Acesso em: 4 nov. 2015.
- RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. geoR: a package for geostatistical analysis. **R-NEWS**, Pelotas, v. 1, n. 2, p. 15-18, 2001.
- RIBEIRO JÚNIOR, P. J. et al. Spatial pattern detection modeling of thrips (*Thrips tabaci*) on onion fields. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 66, n. 1, p. 90-99, Feb. 2009.
- ROSOLEN, V. et al. Variações nos teores do C total e isotópico do solo após substituição do cerrado em sistemas agrícolas no Triângulo Mineiro. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 24, n. 1, p. 157-168, 2012.
- SANTOS, E. O. J. et al. Variabilidade espacial de macronutrientes em uma lavoura de café conilon no Norte do Espírito Santo. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 3, p. 469-476, set. 2015.

SILVA, F. M. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 401-407, abr. 2007.

SILVA, S. A. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 15-22, fev. 2010.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S. Multivariate analysis and geostatistics of the fertility of a humic rhodic hapludox under coffee cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 467-474, 2012.

SOUZA, G. S. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos em um Argissolo sob pastagem. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 4, p. 589-596, 2008.

VIEIRA, S. R. et al. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 31, n. 3, p. 1-75, 1983.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 215 p.