

ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E SUA RELAÇÃO ESPACIAL COM A PRODUTIVIDADE DO CAFÉ ARÁBICA

Samuel de Assis Silva¹, Julião Soares de Souza Lima²

(Recebido: 16 de julho de 2012; aceito: 28 de junho de 2013)

RESUMO: Objetivou-se, neste trabalho, determinar a distribuição dos atributos físicos do solo e avaliar a sua relação espacial com a produtividade do café arábica, utilizando para isso, métodos de geoestatística multivariada. O experimento foi realizado em uma área cultivada há cinco anos com *Coffea arabica* L. cv. Catuaí, em um Latossolo Vermelho-amarelo húmico. Para o mapeamento do solo e o levantamento da produtividade da cultura, construiu-se uma malha de amostragem, totalizando 100 pontos georreferenciados. Os atributos físicos estudados foram as frações granulométricas (areia grossa, areia fina, silte e argila) e a densidade do solo. A produtividade foi avaliada pontualmente, determinando-se os valores de produção de café beneficiado. Os dados foram analisados pela estatística descritiva e exploratória, e a relação entre os atributos físicos e a produtividade foram analisadas pela correlação linear de Pearson. Em seguida, os dados foram submetidos à análise geoestatística, a fim de verificar a existência e, nesse caso, quantificar o grau de dependência espacial dos atributos e da produtividade e da relação entre esses. A produtividade do café se correlacionou com os atributos físicos do solo, com exceção do silte, uma vez que foi registrada correlação positiva com as demais frações granulométricas e negativa com a densidade do solo. Tanto a produtividade quanto os atributos físicos do solo apresentaram distribuição espacial, com elevada continuidade espacial. A cokrigagem foi eficiente para mapear a distribuição espacial da produtividade, utilizando-se como covariáveis os atributos físicos do solo.

Termos para indexação: Geoestatística, variabilidade espacial, cokrigagem, *Coffea arabica* L.

PHYSICAL ATTRIBUTES OF SOIL AND ITS RELATION WITH SPACE PRODUCTIVITY OF COFFEE ARABIC

ABSTRACT: The aim of this study was to determine the distribution of soil physical properties and assess their spatial relationship to the productivity of arabica coffee, using it, multivariate geostatistics. The experiment was conducted in a cultivated area five years ago with *Coffea arabica* L. Catuaí in an humic dystrophic Red-Yellow. For mapping soil and raising crop productivity, we constructed a sampling grid, totaling 100 georeferenced points. The physical attributes studied were the fractions (coarse sand, fine sand, silt and clay) and soil bulk density. Data were analyzed using descriptive statistics and exploratory, and the relationship between physical attributes and yield were analyzed by Pearson correlation. Then the data were subjected to geostatistical analysis in order to verify the existence and, if so, to quantify the degree of spatial dependence of attributes and productivity and the relationship between them. The productivity of coffee correlated with soil physical properties except silt, since it was recorded positive correlation with the other textural and negative fractions with soil density. Both productivity and physical soil properties showed spatial distribution with high spatial continuity. The "cokriging" was efficient to map the spatial distribution of productivity, using as covariates the physical attributes of the soil.

Index terms: Geostatistics, spatial variability, cokriging, *Coffea arabica* L.

1 INTRODUÇÃO

Os atributos físicos, como a textura e a densidade dos solos, são considerados bons indicadores da qualidade dos sistemas agrícolas (SANCHEZ et al., 2005). A sua variação tem potencial para influenciar, de forma decisiva, o manejo a ser adotado nas áreas cultivadas, além de ter importante papel na expressão produtiva das culturas (NUNES et al., 2010).

O conhecimento sobre a distribuição granulométrica de partículas sólidas do solo é essencial em várias situações, como na determinação da textura, em estudos sobre compactação e movimentação de água e, conseqüentemente, para compreensão dos

processos erosivos que envolvem transporte e deposição de partículas, inclusive de nutrientes essenciais ao desenvolvimento e produtividade das plantas (SILVA; LIMA; ZUCOLOTO, 2011).

Nas paisagens naturais, os solos apresentam heterogeneidade tanto no sentido vertical (profundidade) como no sentido horizontal, resultante das interações dos seus fatores de formação, dados por clima, organismos, relevo, material de origem e tempo (NOVAIS FILHO et al., 2007). Em diferentes estudos, no entanto, o comportamento desses atributos é, erroneamente, considerado como aleatório (WEBSTER, 2000), e sua influência sobre as características das culturas agrícolas considerados como sistemático.

¹Universidade Estadual de Santa Cruz/UESC - Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais/DCAA - 54.662-900 - Ilhéus - BA
sasilva@uesc.br

²Universidade Federal do Espírito Santo/UFES - Departamento de engenharia Rural/ERU - 29.000-500 - Alegre - ES
limajss@yahoo.com.br

Em razão do comportamento regionalizado dos atributos de solo, a caracterização da variabilidade espacial é essencial para um melhor entendimento das inter-relações existentes entre solo e planta, principalmente no que diz respeito à produtividade das culturas. Dessa forma, avaliar de forma conjunta a variação espacial desses diferentes atributos tem se tornado importante ferramenta na determinação de estratégias de manejo do solo, que procuram aumentar a produtividade agrícola (MINASNY; MCBRATNEY, 2007; SILVA; LIMA, 2012; SILVA; LIMA; SOUZA, 2010).

A cokrigagem descreve a variação espacial e/ou temporal simultânea de duas variáveis aleatórias que estão fortemente associadas entre si, sendo aplicada em situações em que existe dependência espacial para cada variável em estudo e também entre elas (SILVA et al., 2010). Han, Schneider e Evans (2003) sugerem que a técnica da cokrigagem fornece estimativas melhores do que o método de krigagem ordinária, desde que as funções do variograma cruzado sejam definidas de forma precisa.

Objetivou-se, neste estudo, determinar a distribuição dos atributos físicos do solo e avaliar a sua relação espacial com a produtividade do café arábica, utilizando, para isso, métodos de geostatística multivariada.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em uma área cultivada há cinco anos com *Coffea arabica* L. cv. Catuaí, com espaçamento de 1,0 x 0,50m. A área apresenta diferença de nível acentuada com 30° de declividade média, e está localizada no município de Reduto, região leste do estado de Minas Gerais, a 20° 45' 45,4" de latitude S e 41° 32' 9,75" de longitude W. O solo é um Latossolo Vermelho Amarelo húmico com horizonte A bastante espesso e rico em matéria orgânica, conforme classificação apresentada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (2006).

A área vem sendo cultivada há vários anos com café, entretanto a lavoura atual foi implantada há cerca de cinco anos. O cultivo da área sempre foi realizado no sistema convencional, com fertilização química, utilização de produtos fitossanitários e ausência de sistemas de irrigação e mecanização. Por se tratar de área inclinada, sujeita a processos de erosão, o plantio do café é feito em curvas de nível, de forma a evitar a perda de solo provocada pelo escoamento superficial.

O manejo da fertilização é realizado anualmente, em três parcelamentos, com base nos resultados obtidos na análise de solo, sendo a suplementação feita através de formulados contendo os macronutrientes N, P e K. Na última adubação, utilizou-se o formulado 20-00-20, na dosagem de 350g por planta.

Para o mapeamento do solo e o levantamento da produtividade da cultura, construiu-se uma malha de amostragem, totalizando 100 pontos georreferenciados (Figura 1). Cada ponto amostral, com uma área de 6 m², foi composto de três plantas, sendo as amostragens de solo, na profundidade de 0-0,20 m, realizadas na projeção da copa de cada planta com o auxílio de uma sonda inoxidável, gerando três subamostras, as quais foram homogeneizadas para formar uma amostra composta representativa do ponto.

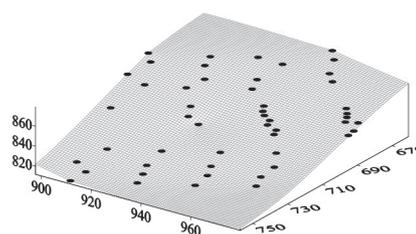


FIGURA 1 - Modelo digital de elevação (MDE) da área em estudo, com a distribuição dos pontos amostrais.

Os atributos físicos estudados foram as frações granulométricas (areia grossa, areia fina, silte e argila) e a densidade do solo. A granulometria do solo foi determinada pelo método da pipeta com agitação lenta, seguido pelo ensaio de sedimentação em tubos de ensaio, de acordo com a lei de Stokes. A densidade foi determinada pelo método do anel volumétrico. As análises físicas do solo foram realizadas conforme metodologia apresentada pela EMBRAPA (1997).

A colheita do café foi realizada em cada ponto amostral por derriça manual. Para tal foram coletados todos os grãos de café das três plantas que compunham o ponto amostral, gerando três subamostras, as quais foram homogeneizadas para formar uma amostra composta representativa do mesmo.

A produção foi avaliada, fazendo-se a pesagem do café colhido de cada ponto amostral. Para converter a produção de café úmido em café beneficiado, foi retirada da massa colhida, em cada ponto amostral, uma amostra de 1,0 kg, que foi colocada em estufa a 70° C até atingir $\pm 12\%$

de umidade. Com o café já seco, efetuou-se o beneficiamento e o cálculo do rendimento (relação café úmido/café beneficiado), convertendo os valores de produção em produtividade de café beneficiado por hectare, de acordo com Tomaz et al. (2005).

Os valores encontrados foram analisados por meio das medidas de posição e dispersão na análise da estatística descritiva e exploratória, bem como o teste Shapiro-Wilk's ($p < 0,05$), para testar a normalidade (SHAPIRO; WILK, 1965). Realizou-se também uma análise de correlação de Pearson, de forma a verificar a relação entre os atributos físicos do solo e a produtividade do café.

Em seguida, os dados foram submetidos à análise geoestatística, a fim de verificar a existência e, neste caso, quantificar o grau de dependência espacial, a partir do ajuste de funções teóricas aos modelos de variogramas experimentais, com base na pressuposição de estacionaridade da hipótese intrínseca, conforme equação 1:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

em que: $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$, separados por um vetor h . No ajuste dos modelos teóricos aos variogramas experimentais, determinou-se os coeficientes efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C_1$), variância estrutural (C_1) e alcance (A_0) pelo software GS+. Na análise geoestatística, testaram-se os modelos experimentais gaussiano, esférico, exponencial e linear. Na escolha dos modelos utilizou-se o critério dos mínimos quadrados, optando-se na seleção dos modelos com maior valor de R^2 (coeficiente de determinação), menor SQR (soma de quadrado dos resíduos) e maior valor do coeficiente de correlação obtido pelo método de validação cruzada (VIEIRA, 2000).

Para análise do índice de dependência espacial (IDE), foi utilizada a relação $C_1/(C_0 + C_1)$ e os intervalos propostos por Cambardella et al. (1994), que considera a dependência espacial forte ($IDE < 25\%$); moderada ($25\% \leq IDE < 75\%$) e fraca ($IDE \geq 75\%$).

Para estimar valores dos atributos físicos do solo e a produtividade do café em locais não amostrados e confeccionar os mapas temáticos, utilizou-se a krigagem ordinária. Esse interpolador geoestatístico utiliza-se de um estimador linear não viciado com mínima variância e leva em consideração a estrutura de variabilidade espacial

encontrada para o atributo, sendo definido pela seguinte equação:

$$z^*(x_i, x_i + h) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i, x_i + h) \quad (2)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (3)$$

em que $Z^*(x_i, x_i+h)$ é o estimador para um ponto (x_i, x_i+h) da região, e λ_i são os pesos usados na estimativa (VIEIRA, 2000).

Para espacialização da produtividade em função dos atributos físicos do solo, utilizou-se a extensão multivariada da krigagem, conhecida como cokrigagem. Essa estimativa pode ser mais precisa do que a krigagem de uma variável simples, quando o variograma cruzado mostrar dependência entre as duas variáveis (VIEIRA, 2000).

Na cokrigagem, para estimar valores, Z_2^* , para qualquer local, X_0 , o valor estimado deve ser uma combinação linear de ambos Z_1 e Z_2 , ou seja:

$$z_2^*(x_0) = \sum_{i=1}^{N_1} \lambda_{1i} z(x_{1i}) + \sum_{j=1}^{N_2} \lambda_{2j} z_2(x_{2j}) \quad (4)$$

em que N_1 e N_2 são os números de vizinhos de Z_1 e Z_2 , respectivamente, e l_1 e l_2 são os pesos associados a cada valor de Z_1 e Z_2 . Tomando $z_1(x_{1i})$ e $z_2(x_{2j})$ como sendo uma realização das funções aleatórias $Z_1(X_{1i})$ e $Z_2(X_{2j})$, respectivamente, e assumindo estacionaridade de ordem 2, o estimador pode ser reescrito em:

$$Z_2^*(x_0) = \sum_{i=1}^{N_1} \lambda_{1i} Z(X_{1i}) + \sum_{j=1}^{N_2} \lambda_{2j} Z_2(X_{2j}) \quad (5)$$

expressando que a estimativa da variável Z_2 deverá ser uma combinação linear de ambos Z_1 e Z_2 , com os pesos λ_1 e λ_2 distribuídos de acordo com a dependência espacial de cada uma das variáveis entre si e a correlação cruzada entre elas (VIEIRA, 2000).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos resultados obtidos pela análise estatística descritiva (Tabela 1), observa-se que os valores das medidas de tendência central (média e mediana) foram bem próximos, indicando distribuição simétrica, confirmada pelos valores de simetria próximos de zero. De acordo com Isaaks

e Srivastava (1989), o coeficiente de assimetria é mais sensível a valores extremos do que a média, mediana e o desvio padrão, uma vez que um único valor pode influenciar fortemente o coeficiente de assimetria, pois os desvios entre cada valor e a média são elevados à terceira potência. Igualmente ao coeficiente de assimetria, os coeficientes de curtose foram próximos de zero. Tais resultados indicam distribuição normal dos dados, o que foi confirmado pelo teste de Shapiro-Wilks, ao nível de significância de 5%.

A variabilidade dos dados, analisada exclusivamente pelos valores do coeficiente de variação (CV), apresentou baixa variação para todas as variáveis com exceção do silte e da produtividade em que a variação foi média, de acordo com a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), de baixa para $CV < 12\%$; média de $12\% < CV < 60\%$ e alta para $CV > 60\%$. Esses resultados corroboram, de forma geral, com os obtidos por Kitamura, Carvalho e Lima (2007), Lima e Carvalho (2009), Montezano, Corazza e Muraoka (2006) e Souza et al. (2004).

Com base nos valores médios de proporção de argila, silte e areia e baseado no modelo de identificação de classes texturais de amostras de solo (triângulo textural) apresentada por EMBRAPA (2006), é possível classificar o perfil do solo como textura argilosa, porém próximo à classe franco-arenosa.

O valor médio de densidade do solo foi baixo, o que, de acordo com Stone, Guimarães e Moreira (2002) é um indicativo de bom volume de macroporos no solo, reduzida resistência à penetração das raízes, aumento na concentração de oxigênio, difusão mais rápida de nutrientes e de oxigênio e maior taxa de mineralização da matéria orgânica.

A análise de correlação de Pearson evidencia correlação linear significativa (Figura 2) entre a produtividade da cultura e as frações granulométricas areia grossa, areia fina, argila e densidade, ao nível de significância de 5%, pelo teste t de Student.

A correlação foi negativa apenas para o conjunto densidade-produtividade, indicando maior produção em locais onde a densidade do solo foi menor. No caso da granulometria, a correlação positiva da produtividade com a fração areia, bem como com a fração argila, está muito relacionada à estruturação do solo. Lima e Carvalho (2009) afirmam que, outras propriedades físicas, como a consistência, estabilidade dos agregados, infiltração e aeração, são bastante afetadas pela granulometria do solo, promovendo, no geral, alterações na produtividade vegetal.

Em geral, solos de textura argilosa, são solos pesados, que apresentam baixa permeabilidade e alta capacidade de retenção de água, com maior força de coesão entre as partículas (SANTOS et al., 2005). Entretanto, a relação argila/areia total do solo em estudo foi de 0,99, e o teor de silte praticamente insignificante, o que confere a esse solo boa estrutura e condições físicas ideais para o bom desenvolvimento vegetal. Resende et al. (2002) afirmam que a fração silte, pelo tamanho diminuto da partícula, tem grande potencialidade para a obstrução de poros, porém em solos, mesmo de textura argilosa, se o teor de silte for baixo, os problemas de permeabilidade são reduzidos. Além disso, solos com elevado teor de areia permitem um acréscimo nas taxas de infiltração de água, bem como nas características físicas relacionadas a essa (SPOHR et al., 2009).

TABELA 1 - Estatística descritiva dos atributos físicos do solo e produtividade de café arábica.

Atributos	Estatística							
	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	CV(%)	C _s	C _k	w
AG	335,37	336,89	236,29	427,62	10,37	0,17	1,52	ns
AF	130,86	130,69	86,86	205,91	16,51	0,41	1,89	*
SIL	71,53	69,89	20,78	185,05	46,11	0,83	1,31	*
ARG	462,25	463,51	341,20	555,98	9,19	-0,38	0,55	ns
DS	1,00	0,99	0,88	1,19	7,11	0,70	0,65	ns
PROD	6,83	7,07	2,37	10,46	25,80	-0,26	0,27	ns

Areia grossa (AG), Areia Fina (AF), Silte (SIL) e Argila (ARG) em $g\ kg^{-1}$; Ds em $kg\ dm^{-3}$, CV (%) – coeficiente de variação; s – desvio padrão; C_s – coeficiente de simetria; C_k – coeficiente de curtose; ns – distribuição normal pelo teste Shapiro-Wilks, ao nível de significância de 5%.

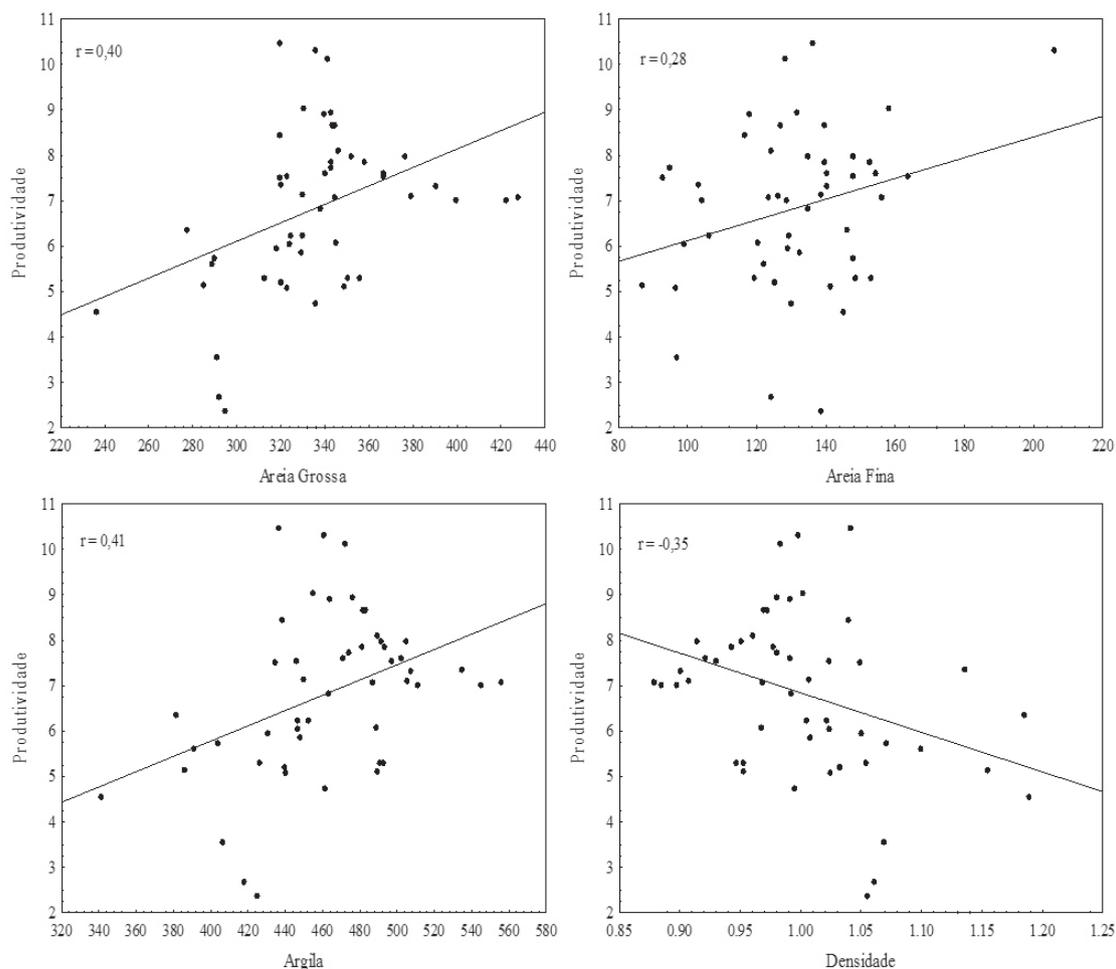


FIGURA 2 - Análise de correlação entre os atributos físicos do solo e a produtividade do café arábica.

Satisfeita a exigência da cokrigagem de que exista correlação linear entre variáveis e co-variáveis, a informação das frações granulométricas e da densidade foram utilizadas como auxiliares na estimativa da produtividade. No caso específico da granulometria, sua utilidade para a cokrigagem eleva-se, uma vez que trata-se de um atributo praticamente estável, dependendo pouco do uso e manejo do solo, e com variabilidade proveniente da sua formação natural (SOUZA et al., 2004) e, dessa forma, exime a necessidade de avaliações anuais, o que reduz muito os custos com amostragem e análise.

Através da análise geoestatística (Tabela 2), verificou-se que, com exceção do silte, existe dependência espacial para todas os atributos físicos, ajustando-se a eles variogramas experimentais univariados. A produtividade, analisada individualmente e em associação com os atributos físicos do solo, também apresentou variabilidade espacial ajustando-

se, respectivamente, variograma univariado e variogramas multivariados a essa.

Com exceção da AF e PROD, cujos alcances de semivariância foram baixos (11 e 15 m, respectivamente), os demais atributos e relações apresentaram elevada continuidade espacial, com alcances variando de 70 m (PROD-AF) até 95 m (PROD-ARG). É comum a granulometria apresentar elevada continuidade espacial (SILVA et al., 2010), principalmente devido à sua estabilidade, e a irrisória influência do manejo. O fator decisivo para alteração da distribuição da granulometria do solo é o escoamento superficial, capaz de transportar as partículas texturais para regiões mais baixas da paisagem. Entretanto, Prochnow et al. (2005), constataram que a cultura do café é eficiente no controle das perdas de solo, as quais são reduzidas já nos primeiros anos de cultivo, tornando-se insignificantes do quinto ano em diante, independentemente dos espaçamentos empregados.

TABELA 2 - Modelos e parâmetros dos variogramas e crosvariogramas ajustados aos dados.

Atributos	Modelo e Parâmetros						
	Modelo	C_0	C_0+C	A_0	R^2	IDE	R^2 (VC)
AG	Gaussiano	0,07	1,96	75	88	06	78
AF	Esférico	0,35	0,89	11	56	40	35
ARG	Gaussiano	0,07	1,88	80	88	06	60
DS	Gaussiano	0,01	2,08	85	89	01	90
PROD	Gaussiano	0,14	0,91	15	88	15	53
PROD-AG	Gaussiano	0,08	3,30	90	86	02	43
PROD-AF	Esférico	0,29	2,31	70	72	13	43
PROD-ARG	Gaussiano	0,15	2,85	95	89	05	45
PROD-DS	Gaussiano	-0,01	-0,12	90	92	09	40

AG – areia grossa; AF – areia fina; ARG- argila; DS – densidade do solo; PROD – produtividade.

O alcance de 85 m, observado para a DS, indica a sua baixa variação em toda a área de estudo, discordando dos resultados encontrados por Andrade et al. (2005), Roque et al. (2010) e Souza et al. (2004), que encontraram elevada variabilidade para esse atributo. O comportamento obtido da DS na área, dentre outros fatores, pode ser atribuído à ausência de tráfego na área, principalmente de máquinas, o qual é considerado como principal agente compactante (COLLARES et al., 2008).

Para o índice de dependência espacial, apenas a AF foi classificada como de moderada dependência, de acordo com classificação proposta por Cambardella et al. (1994), sendo os demais agrupados na classe de forte dependência. Uma justificativa para o comportamento da AF frente ao IDE, está relacionada ao seu elevado valor de efeito pepita (C_0), o qual reflete a descontinuidade entre valores separados por distâncias menores que o usado no intervalo de amostragem, e também à variação ao acaso (VIEIRA, 2000).

Para a PROD, estimada pelos atributos do solo, os variogramas cruzados apresentam ajuste considerável, reforçando o discutido anteriormente sobre a potencialidade de utilizar esses como covariáveis na estimativa da primeira. Independente do atributo utilizado, o padrão espacial da PROD é mantido, com ajuste ao mesmo modelo de semivariância e com alcances muito próximos, com exceção da AF, em que o alcance foi menor. Tais comportamentos reforçam o discutido anteriormente acerca da potencialidade desses atributos no estudo da produtividade da cultura, permitindo que essa seja estimada de forma satisfatória, como se observa na Figura 3.

A distribuição espacial da produtividade do café na área em estudo segue o mesmo padrão

de suas respectivas covariáveis areia (grossa e fina) e argila, sendo inversamente proporcional à distribuição da densidade do solo.

Os mapas de PROD estimados por cokrigagem, tendo como covariáveis a AG, ARG e DS se apresentaram de forma muito semelhante, com valores mínimos e máximos de classe coincidindo praticamente nas mesmas regiões, visto que os variogramas cruzados para esses apresentaram o mesmo padrão espacial. Por outro lado, conforme mencionado anteriormente, em relação ao mapa de cokrigagem, tendo a AF como covariável, houve uma superestimativa da produtividade na região central da área, devido principalmente à elevada variabilidade espacial observada para essa covariável.

Os maiores valores de produtividade são observados nas porções superiores da área em estudo, onde os teores de argila e areia são igualmente superiores. Miranda et al. (2006) associaram a correlação existente entre as frações granulométricas com a produtividade vegetal aos processos de retenção de água no solo, entretanto, para Silva, Lima e Souza (2010a), essa correlação se deve, principalmente, à dinâmica e disponibilidade dos nutrientes minerais, à estruturação do solo e desenvolvimento do sistema radicular das plantas e às relações de adsorção e sorção de nutrientes.

Para a DS, os limites de classes foram muito estreitos devido à sua reduzida variabilidade (maior valor de alcance de semivariância). Esses resultados, associados ao baixo valor médio indicam que, apesar da correlação inversa, a DS não foi um fator limitante para a produtividade da cultura. Stone, Guimarães e Moreira (2002) afirmam que valores reduzidos de DS são um indicativo de boa qualidade do solo.

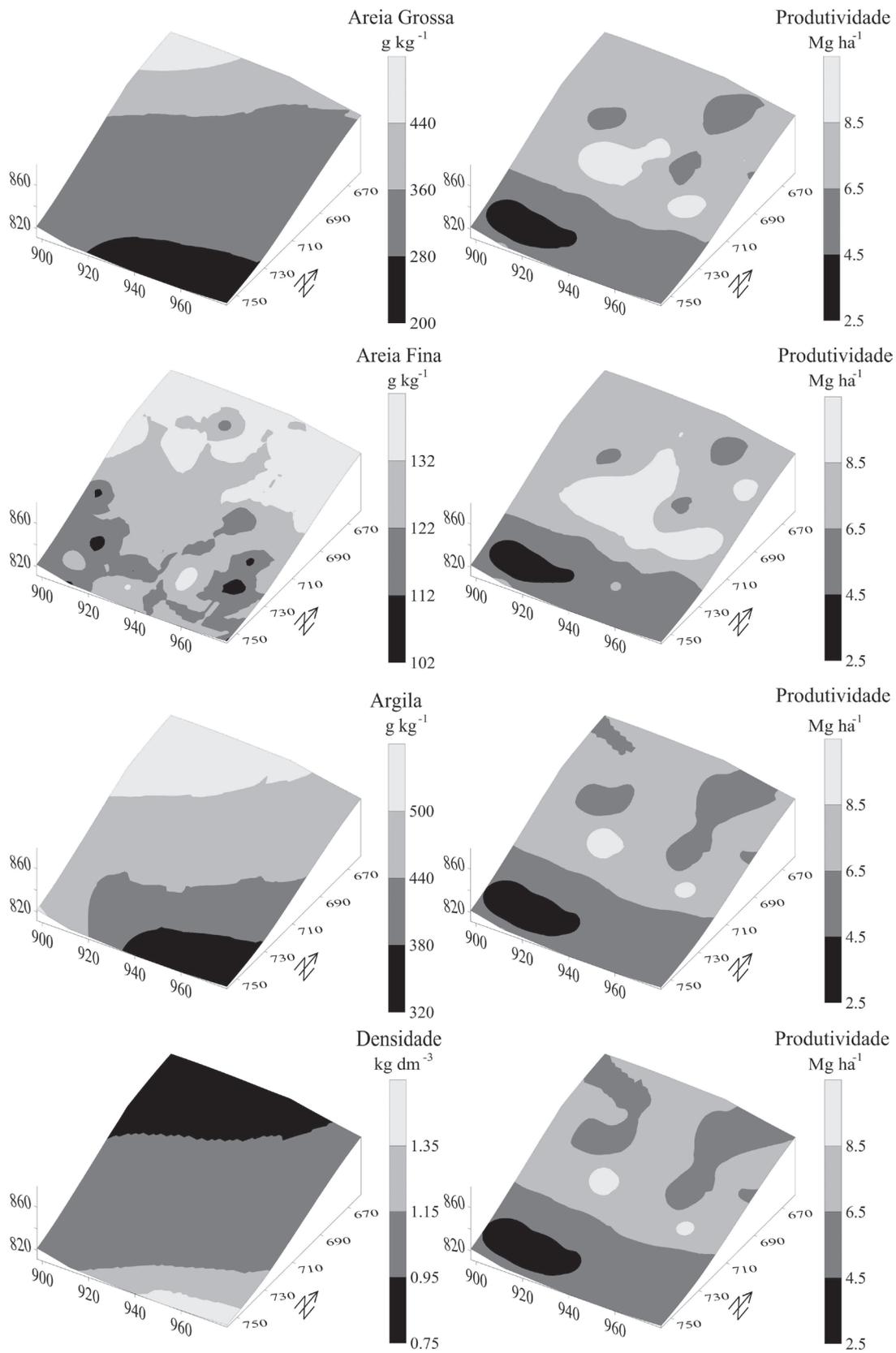


FIGURA 3 - Distribuição espacial dos atributos físicos do solo e as respectivas estimativas de produtividade através da cokrigagem.

No que tange à utilização da cokrigagem para estimativa da produtividade do café, os mapas da Figura 3 não deixam dúvidas da vantagem de utilizar tal técnica, evidenciando a possibilidade de redução de custos em agricultura de precisão, mantendo-se a confiabilidade da informação. Soares (2006) afirma que, com a utilização da cokrigagem, é possível a obtenção de erros de estimativa menores do que os gerados pela krigagem normal, principalmente quando as variáveis envolvidas tiverem variâncias significativamente diferentes, com reduzido desnível de valores entre linhas consecutivas.

4 CONCLUSÕES

A produtividade se correlacionou com os atributos físicos do solo, indicando a existência de uma relação de causa e efeito entre esses.

A produtividade do café é maior em áreas cuja proporção de areia grossa e argila é mais equilibrada.

Práticas de manejo da cafeicultura devem contemplar a redução da densidade do solo, visto que essa contribui para diminuir a produtividade da cultura.

Tanto a produtividade quanto os atributos físicos do solo apresentaram distribuição espacial, com elevada continuidade espacial.

A cokrigagem é eficiente para mapear a distribuição espacial da produtividade tendo como covariáveis os atributos físicos do solo.

5 REFERÊNCIAS

ANDRADE, A. R. S. et al. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 2, p. 322-329, mar./abr. 2005.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

COLLARES, G. L. et al. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, p. 933-942, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997.

HAN, S.; SCHNEIDER, S. M.; EVANS, R. G. Evaluating cokriging for improving soil nutrient sampling efficiency. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 46, n. 3, p. 845-849, 2003.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 560 p.

KITAMURA, A. E.; CARVALHO, M. P.; LIMA, C. G. R. Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 31, p. 361-369, 2007.

LIMA, C. G. R.; CARVALHO, M. P. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem de milho e frações granulométricas de um Latossolo vermelho distrófico. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 4, p. 985-990, 2009.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Spatial prediction of soil properties using EBLUP with the Matérn covariance function. **Geoderma**, Amsterdam, v. 140, n. 4, p. 324-336, 2007.

MIRANDA, N. O. et al. Causas da variação em produtividade e qualidade do melão em um Latossolo vermelho-amarelo fertirrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 487-493, mar./abr. 2006.

MONTEZANO, Z. F.; CORAZZA, E. J.; MURAOKA, T. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homogeneamente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 30, p. 839-847, 2006.

NOVAIS 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**, Campinas, v. 31, p. 91-100, 2007.

NUNES, L. A. P. L. et al. Atributos físicos do solo em área de monocultivo de cafeeiro na Zona da Mata de Minas Gerais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 1, p. 71-78, 2010.

- PROCHNOW, D. et al. Razão de perdas de terra e fator C da cultura do cafeeiro em cinco espaçamentos, em Pindorama, SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 29, p. 91-98, 2005.
- RESENDE, M. et al. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 4. ed. Viçosa, MG: NEPUT, 2002. 338 p.
- ROQUE, M. C. et al. Correlação da variabilidade espacial entre a produtividade do feijoeiro irrigado e a densidade do solo. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 3, n. 3, p. 22-30, 2010.
- 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**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 489-495, 2005.
- SANTOS, R. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100 p.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, London, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.
- SILVA, S. A. et al. Variabilidade espacial do fósforo e das frações granulométricas de um Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 41, n. 1, p. 1-8, 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**, Campinas, v. 36, n. 2, p. 212-216, mar./abr. 2012.
- SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S. Estudo da fertilidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo húmico sob cultivo de café arábica por meio de geoestatística. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n. 4, p. 560-567, 2010.
- SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; ZUCOLOTO, M. Distribuição espacial das frações granulométricas em um Latossolo Vermelho amarelo utilizando krigagem indicativa. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 19, n. 3, p. 195-202, 2011.
- SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. 2. ed. Lisboa: IST, 2006. 214 p.
- SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, p. 309-319, 2004.
- SPOHR, R. B. et al. Modelagem do escoamento superficial a partir das características físicas de alguns solos do Uruguai. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p. 74-81, jan./fev. 2009.
- STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro: I, efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 207-212, 2002.
- TOMAZ, M. A. et al. Porta-enxertos afetando o desenvolvimento de plantas de *Coffea arabica* L. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 570-575, maio/jun. 2005.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-53.
- WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. p. 319-344.
- WEBSTER, R. Is soil variation random? **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, n. 3/4, p. 149-163, 2000.