

# VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS DA CULTURA DO CAFÉ

Luis Carlos Cirilo Carvalho<sup>1</sup>, Fábio Moreira da Silva<sup>2</sup>,  
Gabriel Araújo e Silva Ferraz<sup>3</sup>, Flávio Castro da Silva<sup>4</sup>, Juliana Stracieri<sup>5</sup>

(Recebido: 26 de abril de 2012; aceito: 22 de novembro de 2012)

**RESUMO:** A agricultura de precisão difere da convencional por unir relações espaciais à variabilidade existente no campo, tornando-se uma importante ferramenta de gestão do sistema agrícola. Objetivou-se, no presente trabalho, avaliar, por meio da estatística clássica, geoestatística e de princípios de agricultura de precisão, alguns atributos físicos do solo indicativos de compactação, como a densidade do solo, resistência mecânica à penetração e teor de argila, além de algumas características agronômicas da planta de café, como a altura e a produtividade. O trabalho foi realizado na fazenda Brejão, localizada no município de Três Pontas, MG. Em uma malha irregular de 24 pontos, foram coletados dados de densidade do solo, resistência do solo à penetração e teor de argila, em diferentes profundidades, bem como a altura e produtividade das plantas de café. De modo geral, as variáveis apresentaram dependência espacial moderada ou forte. Observando os mapas de solo com os de mapas da cultura do café, de modo geral, percebe-se que a produtividade e a altura das plantas são maiores em regiões em que há maiores valores de densidade do solo, para todas as camadas de solo avaliadas. Houve também maior produtividade e altura de plantas nas regiões com menores teores de argila e menores valores de resistência do solo à penetração, em todas as camadas de solo avaliadas.

**Termos para indexação:** Agricultura de precisão, geoestatística, física do solo, café arábica.

## SPATIAL VARIABILITY OF SOIL PHYSICAL ATTRIBUTES AND AGRONOMIC CHARACTERISTICS OF COFFEE CROP

**ABSTRACT:** Precision agriculture differs from the conventional by uniting spatial relationships to the variability in the field, becoming an important management tool of the agricultural systems. Thus, the present study aimed to evaluate, by classical statistics, geostatistics and principles of precision agriculture, some physical attributes indicative of soil compaction, such as bulk density, soil penetration resistance and clay content, and some agronomic characteristics of the coffee plant, such as height and yield. The study was conducted at Brejão farm, located in Três Pontas, MG. As data base were collected bulk density, soil resistance to penetration and clay content, at different depths, and also the height and yield of coffee plants in a 24 points irregular grid. The variables generally presented moderate to strong spatial dependence. Observing the maps of soil variables with of coffee's variables, it was possible to note that the plant height and yield was high where bulk density, for all evaluated soil layers. There was also higher yield and plant height in regions with lower clay content and lower values of soil resistance to penetration, in all soil layers evaluated.

**Index terms:** Precision agriculture, geostatistics, soil physics, arabica coffee.

## 1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura é uma atividade econômica de grande importância para o Brasil, sobretudo para o estado de Minas Gerais, que é o principal estado produtor. A produção da cultura do café é influenciada por uma série de fatores, dentre eles a compactação do solo ocasionada pelo tráfego de equipamentos agrícolas na lavoura. Lima (2004) destaca que práticas de manejo do solo e das culturas ocasionam mudanças nos atributos físicos do solo, sendo essas mudanças permanentes ou

temporárias. Com a modernização da agricultura, o peso das máquinas e a intensidade de uso do solo têm aumentado, resultando em significativas alterações nas suas propriedades físicas (FREDDI et al., 2007).

Os atributos físicos do solo relacionados com a produtividade e desenvolvimento das culturas, segundo Silva, Tormena e Imhoff (2002), podem ser divididos em duas categorias: aqueles diretamente relacionados com o desenvolvimento das plantas, como temperatura, água, oxigênio e a resistência do solo à penetração das raízes;

<sup>1</sup>Universidade Federal de Lavras /UFLA - Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola/PPGEA - Departamento de Engenharia/DEG - Cx. P. 3037 - 37.200-000 - Lavras - MG - lccc.87.ufla@hotmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Lavras /UFLA - Departamento de Engenharia/DEG - Cx. P. 3037 - 37.200-000 Lavras - MG - famsilva@ufla.br

<sup>3</sup>Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro/UFRRJ - Instituto de Tecnologia - Departamento de Engenharia - (IT/DE) - Rodovia BR 465 - Km 7 - 23.890-000 - Seropédica - RJ - gabrielferraz@ufrj.br

<sup>4</sup>Universidade Federal Fluminense/UFF - Escola de Engenharia - Rua Passo da Pátria, 156 - Bloco D - Sala 235 - São Domingos- Niterói - RJ -24210-240 - flavio-ter@vm.uff.br

<sup>5</sup>Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP Câmpus de Jaboticabal - Departamento de Produção Vegetal - Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane s/n, 14884-900 - Jaboticabal - SP juliana\_unesp@hotmail.com

e os indiretamente relacionados, tais como a porosidade, agregação, textura e a densidade do solo. Muitas pesquisas já foram realizadas com o intuito de demonstrar o efeito da compactação nos atributos físicos do solo, afirmam Ferreira e Dias Júnior (2001). Os autores destacam que a compactação aumenta a densidade do solo e a resistência mecânica do solo à penetração e diminui a porosidade total, tamanho e continuidade dos poros. Richart et al. (2005) ainda destacam a textura do solo no processo de compactação, uma vez que a composição mineralógica da fração argila e o seu teor no solo atuam de forma a transmitir a pressão recebida para camadas mais profundas, acentuando a compactação do solo.

Com a finalidade de reduzir os custos de produção e aumentar o retorno financeiro, são adotados novos métodos de manejo, dentre eles a agricultura de precisão (AP), que une relações espaciais a uma variável do sistema produtivo, tornando a atividade mais competitiva, aumentando sua eficiência e com menor impacto ambiental (QUEIROZ; DIAS; MANTOVANI, 2000). Marques Júnior e Corá (1998) afirmam que, para a implantação da AP, é preciso conhecer detalhadamente as causas e a variabilidade espacial dos fatores que controlam o sistema solo - planta - atmosfera e que, controlam a produção das culturas. Dessa maneira, é possível entender como a variabilidade desses fatores se relaciona com a variabilidade espacial da produção agrícola.

A geoestatística é a ferramenta utilizada na agricultura de precisão para analisar os fatores envolvidos nos sistemas produtivos. Ela difere da estatística clássica por considerar que os dados amostrados são dependentes espacialmente. Por meio dela, é possível identificar se há ou não dependência espacial para os fatores analisados, possibilitando a criação de mapas temáticos que auxiliam na tomada de decisões na lavoura.

Objetivou-se, neste estudo, avaliar, por meio da estatística clássica, geoestatística e de princípios de agricultura de precisão (variabilidade dos fatores e sua relação com a variabilidade espacial da produção agrícola), alguns atributos físicos do solo indicativos de compactação, como a densidade do solo, resistência mecânica à penetração e teor de argila, além de algumas características agronômicas da planta de café, como a altura e a produtividade.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na fazenda Brejão, em um LATOSSOLO VERMELHO

distrófico (LVd) de textura argilosa (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2006), localizada no município de Três Pontas - Sul do Estado de Minas Gerais, nas coordenadas geográficas médias 21°26'08" de latitude Sul e 45°24'53" de longitude Oeste de Greenwich. A área experimental possui 10,52 ha cultivados com café (*Coffea arabica* L.) cultivar Mundo Novo 376/4, sendo a lavoura implantada em 2005, no espaçamento 3,8 metros entre linhas e 0,8 metros entre plantas. Por meio do uso de um GPS geodésico foram obtidos os pontos limites da área experimental. A coleta dos dados foi realizada em uma malha irregular de 24 pontos georreferenciados (em média 2,3 pontos por hectare), demarcados pelo uso de um GPS de navegação. Ferraz et al. (2012) citam que a grade amostral comercialmente utilizada para se amostrar solos em cafeicultura é a de um ponto por hectare. Dessa maneira, a grade amostral utilizada apresenta-se vantajosa, uma vez que possui um número maior de pontos amostrais do que utilizado comercialmente, sem perder a capacidade de ser viável para aplicações práticas. A maior distância entre dois pontos da grade amostral é igual a 377,5 metros e a menor distância igual a 39,7 metros. A coleta dos dados foi realizada em 2010, sendo os dados das características agronômicas coletados em junho, época de colheita da cultura, e os dados dos atributos do solo coletados em dezembro, época recomendada em virtude da facilidade para retirar as amostras do solo.

Para todos os atributos físicos do solo, a metodologia de coleta das amostras, para os diferentes pontos, foi a mesma. As amostras foram tomadas na metade da distância da planta de café que corresponde ao ponto demarcado e a planta ao lado, na linha do transplantio.

A determinação da densidade do solo (Ds) foi feita, por meio do método do anel volumétrico, de volume igual a 84,53 cm<sup>3</sup>, com auxílio de um amostrador de Uhland (BLAKE; HARTGE, 1986). Foram coletadas amostras indeformadas, a cada intervalo de 10 centímetros de profundidade, da superfície até a profundidade de 60 centímetros.

A coleta dos dados da resistência do solo à penetração (RSP) também foi feita a cada intervalo de 10 centímetros de profundidade, da superfície do solo até a profundidade de 60 centímetros. Para isso, foi utilizado um penetrômetro eletrônico PenetroLOG, da marca Falker, segundo norma ASAE S.313.3 (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - ASAE, 1999). O aparelho registra, a cada camada de solo de

cinco milímetros, a pressão necessária, em KPa, para seu rompimento. O aparelho foi programado para operar até a profundidade de 60 centímetros, sendo os dados posteriormente enviados para o computador e, de forma manual, transformados em média a cada camada de 10 centímetros. Por fim, foi feita a conversão dos dados para a unidade de MPa. A RSP, entre outros fatores, é dependente da umidade do solo (CARVALHO FILHO et al., 2004). Para complementar a avaliação da RSP, também foi determinada a umidade gravimétrica (U) de acordo com Reichardt (1985), do ponto, uma vez que essa influencia a expressão da RSP. Para tanto, foi utilizado o valor médio de U das seis camadas avaliadas, uma vez que essas não apresentaram variações significativas de umidade ao longo do perfil do solo, não sendo necessário a criação mapas de umidade para cada camada avaliada.

Para determinação do teor de argila, as amostras foram coletadas nas camadas de solo de 0 a 20 centímetros e de 20 a 40 centímetros. Posteriormente, as amostras foram enviadas e processadas no Laboratório de Análises de Solo da Universidade Federal de Lavras, utilizando o método de Bouyoucos (BOUYOUCOS, 1927).

Foram avaliadas as seguintes características agrônomicas: produtividade e altura. Os dados foram obtidos com a média observada de avaliações de quatro plantas, sendo o valor encontrado como o referente ao ponto demarcado. Para a determinação do valor médio, foi usada a planta referente ao ponto, uma planta ao lado na mesma linha, uma planta na linha abaixo e outra acima à planta do ponto demarcado. Com auxílio de uma trena graduada em milímetros, foi medida a altura das plantas de café, da superfície do solo, com resultados expressos em metros. A produtividade foi obtida por meio de derriça manual dos grãos de café no pano, sendo posteriormente feita a abanação para retirada de galhos e folhas. Os grãos foram, então, colocados no interior de um recipiente graduado, em mililitros, para determinação do volume colhido (L/planta).

Inicialmente, todas as variáveis foram analisadas por meio da estatística descritiva. A dependência espacial das variáveis foi analisada por meio do ajuste dos semivariogramas, pelo estimador clássico (VIEIRA et al., 1983), como segue:

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

em que  $N(h)$  o número de pares de valores medidos  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i+h)$ , separados por um vetor  $h$ . O ajuste dos semivariogramas escolhido foi em função da Máxima Verossimilhança Restrita (REML - *residual maximum likelihood*, em inglês), uma vez que é a mais recomendada para uma pequena amostragem (KERRY; OLIVER, 2007). O modelo do semivariograma ajustado foi o esférico, uma vez que é o mais utilizado em estudos da área de geoestatística ligada ao solo e à cultura do café (GREGO; VIEIRA, 2005; SILVA et al., 2007). Foi calculado o erro médio (EM) (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989) para todos os semivariogramas, a fim de verificar se os ajustes para o modelo esférico atenderam às exigências da validação. Para tanto, o EM deve apresentar o valor mais próximo possível de zero. Quando identificada a variabilidade espacial da variável, após o ajuste dos semivariogramas, foi realizada a interpolação dos dados por meio de krigagem ordinária. Dessa forma, é feita uma estimativa da variável em locais em que a mesma não foi amostrada, permitindo visualizar sua distribuição no espaço na forma de mapas temáticos. Os mapas criados foram gerados em coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) na zona 23K, que é onde se localiza a área experimental. Para completar a análise geoestatística, foi analisado, também, o grau de dependência espacial (GDE) das variáveis, seguindo classificação proposta por Cambardella et al. (1994). Para a análise geoestatística e para gerar os mapas temáticos, foi utilizado o software estatístico R, de distribuição livre, por meio do pacote geoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGGLE, 2001).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise descritiva dos atributos físicos do solo e das características agrônomicas da cultura do café está apresentada na Tabela 1. Em relação ao teste Kolmogorov-Smirnov, observa-se normalidade para todas as variáveis avaliadas, exceto para a Ds 40-50 cm, RSP de 0-10 cm e 20-30 cm. Apesar da distribuição normal ser desejada, a mesma não é exigida para análises geoestatísticas (CRESSIE, 1991).

Para Gomes e Garcia (2002), a variabilidade de um atributo pode ser classificada de acordo com a magnitude do seu coeficiente de variação (CV), que pode ser: baixa, quando inferior a 10%; moderada, entre 10 e 20%; alta, entre 20 e 30%; e muita alta quando acima de 30%. Dessa forma, variáveis que apresentam CV

inferior a 10% são consideradas homogêneas. Frogbrook et al. (2002) afirmam que valores elevados de CV são os primeiros indicadores de existência de heterogeneidade dos dados. Para a RSP, foi encontrado CV alto ou muito alto para todas as camadas avaliadas, principalmente nas superiores, mais sujeitas à influência de forças impostas pelo tráfego de equipamentos agrícolas na superfície do solo. Nesse caso, o valor médio encontrado tem pouco significado, pois não será representativo da série de dados coletada.

Conforme observado, os dados apresentados referentes à média, valor mínimo e máximo encontrados na Tabela 1 permitem observar a variação de valores que podem ser expressos pelas variáveis estudadas. Entretanto, apenas o conhecimento dessas medidas não pode ser utilizado como único modo de identificar a expressão da variável em uma área. Para tanto, é feita a análise geoestatística com o objetivo de verificar a variabilidade espacial de uma variável e, caso identificada, confeccionam-se

mapas temáticos que auxiliam a entender o seu comportamento no campo.

Os parâmetros de ajuste dos semivariogramas do modelo esférico, bem como o erro médio (EM) calculado pela validação cruzada, estão apresentados na Tabela 2.

Observa-se que, para todas as variáveis, o EM apresentou valores muito próximos de zero, indicando que os ajustes para o modelo esférico foram bem feitos e preencheram os requisitos da validação.

Por meio dos resultados da análise geoestatística, todas as variáveis apresentaram dependência espacial (Tabela 2), uma vez que o valor absoluto da diferença entre duas amostras aumentou para distâncias entre coletas cada vez maiores, até chegar a um valor estável. Dessa forma, ocorreu a estabilidade do semivariograma, definindo a distância máxima em que a variável apresenta dependência espacial.

A ocorrência de efeito pepita zero foi observada somente para Ds 20-30 cm, resistência

**TABELA 1** – Estatística descritiva das variáveis Densidade do solo (Ds, em g/cm<sup>3</sup>), Resistência do solo à penetração (RSP, em MPa), Umidade gravimétrica (U, em %), Teor de argila (Arg, em %), em diferentes camadas, e da altura (m) e da produtividade (L/planta) das plantas de café.

Variável	Estatística descritiva									
	Mín	Máx	Md	Méd	Var	DP	C <sub>s</sub>	C <sub>k</sub>	CV	D
Ds 0-10 cm	0,92	1,43	1,13	1,16	0,03	0,18	0,14	-1,43	15,3	0,15
Ds 10-20 cm	0,99	1,63	1,35	1,31	0,04	0,20	-0,29	-1,06	14,9	0,12
Ds 20-30 cm	1,08	1,78	1,52	1,47	0,04	0,21	-0,23	-1,13	14,0	0,13
Ds 30-40 cm	1,24	1,74	1,55	1,51	0,02	0,13	-0,33	-0,67	8,7	0,15
Ds 40-50 cm	1,20	1,64	1,48	1,44	0,02	0,13	-0,46	-0,67	9,0	0,18*
Ds 50-60 cm	0,98	1,68	1,40	1,38	0,03	0,18	-0,51	-0,08	12,9	0,12
RSP 0-10 cm	0,18	0,66	0,27	0,33	0,02	0,15	1,12	0,21	44,5	0,23*
RSP 10-20 cm	0,17	1,42	0,43	0,47	0,06	0,25	2,48	8,77	52,8	0,17
RSP 20-30 cm	0,20	2,28	0,61	0,69	0,15	0,39	3,14	12,18	56,6	0,26*
RSP 30-40 cm	0,57	1,99	1,04	1,13	0,16	0,40	0,76	-0,20	35,0	0,16
RSP 40-50 cm	0,82	2,12	1,15	1,25	0,13	0,35	0,78	-0,11	28,3	0,16
RSP 50-60 cm	0,50	1,36	1,01	0,99	0,06	0,24	-0,32	-0,98	24,8	0,12
U	18,85	28,45	21,92	22,33	5,37	2,31	0,74	0,59	10,3	0,13
Arg 0-20 cm	32,00	55,00	45,00	44,04	58,99	7,68	-0,17	-1,52	17,4	0,16
Arg 20-40 cm	34,00	55,00	46,00	45,21	47,91	6,92	-0,18	-1,25	15,3	0,13
Altura	1,86	2,48	2,16	2,16	0,23	0,15	-0,07	-0,07	7,1	0,08
Produtividade	2,40	12,52	7,49	7,40	7,78	2,79	0,28	-0,42	37,7	0,11

Mín - Valor mínimo; Máx - Valor máximo; Md - Mediana; Méd - Média; Var - Variância; DP - Desvio padrão; C<sub>s</sub> - Coeficiente de assimetria; C<sub>k</sub> - Coeficiente de curtose; CV - Coeficiente de variação; D - Teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, \* não significativo

do solo à penetração 20-30 cm e 30-40 cm e para ambas as camadas do teor de argila. Para as demais variáveis, o valor do efeito pepita foi superior a zero, indicando a variabilidade que não foi explicada considerando a distância de amostragem entre os pontos utilizada (MCBRATNEY; WEBSTER, 1986). O alcance do semivariograma (a) representa a zona de influência de uma observação e separa o campo estruturado (amostras correlacionadas) do campo aleatório (amostras independentes) (ANDRIOTTI, 2003). Houve uma variação de valores entre as camadas de solo avaliadas para os atributos do solo. Essa variação nos valores de alcance demonstra que, utilizando-se a grade amostral proposta, a distância de coleta das amostras deve ser diferente para cada variável e camada a ser avaliada. Já as características agrônômicas avaliadas apresentaram valores de alcance muito próximos (246,53 metros para a altura e 287,66 metros para a produtividade), indicando que podem ser amostradas em um espaçamento intermediário próximo aos valores de alcance encontrados.

A avaliação da densidade do solo em diferentes camadas de profundidade, de acordo com Amaro Filho et al. (2007), Andrade et al. (2005) e Cruz et al. (2010), resultou em diferentes valores encontrados de alcance e efeito pepita. Souza et al. (2006), em um LATOSSOLO VERMELHO distrófico argiloso, avaliou a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em duas épocas diferentes e em diferentes camadas de solo. Para a primeira época, todas as camadas apresentaram efeito pepita puro, justificado pelo autor em razão da elevada umidade do solo. Já na segunda época, os valores de efeito pepita e alcance foram próximos, exceto para a camada de solo mais superficial. Amaro Filho et al. (2007), Leão et al. (2010) e Rámirez-Lopez et al. (2008) encontraram diferentes valores de efeito pepita e de alcance, avaliando o teor de argila em diferentes profundidades. Tais diferenças encontradas pelos autores citados para os atributos do solo, podem ser em função do tipo de manejo do solo utilizado, cultura implantada, declividade e relevo da área.

**TABELA 2** – Parâmetros de ajuste dos semivariogramas do modelo esférico, pelo método da Máxima Verossimilhança Restrita, das variáveis avaliadas.

Variável	$C_0$	$C_1$	$C_0+C_1$	a	GDE	EM
Ds 0-10 cm	0,005	0,027	0,032	294,78	Forte	-0,0020
Ds 10-20 cm	0,031	0,007	0,038	39,27	Fraco	0,0000
Ds 20-30 cm	0,000	0,039	0,039	147,04	Forte	0,0004
Ds 30-40 cm	0,001	0,015	0,016	129,23	Forte	0,0040
Ds 40-50 cm	0,014	0,003	0,017	39,59	Fraco	0,0000
Ds 50-60 cm	0,007	0,033	0,04	303,24	Forte	-0,0002
RSP 0-10 cm	0,017	0,005	0,022	223,68	Fraco	0,0003
RSP 10-20 cm	0,039	0,025	0,065	168,31	Moderado	0,0004
RSP 20-30 cm	0,000	0,154	0,154	50,11	Forte	0,0001
RSP 30-40 cm	0,000	0,158	0,158	52,86	Forte	0,0000
RSP 40-50 cm	0,083	0,047	0,131	248,62	Moderado	0,0000
RSP 50-60 cm	0,058	0,002	0,06	209,8	Fraco	0,0000
U	0,856	3,621	4,477	205,57	Forte	-0,0371
Arg 0-20 cm	0,000	59,000	59	39,18	Forte	0,0000
Arg 20-40 cm	0,000	36,480	36,48	265,75	Forte	-0,2608
Altura	0,004	0,029	0,033	246,53	Forte	-0,0052
Produtividade	3,201	6,179	9,38	287,66	Moderado	0,0436

Ds - densidade do solo ( $\text{g/cm}^3$ ); RSP - Resistência do solo à penetração (MPa); Arg - Teor de argila (%); Altura (metros); Produtividade (L/planta);  $C_0$  - efeito pepita;  $C_1$  - contribuição;  $C_0+C_1$  - patamar; a - alcance (metros); GDE - grau de dependência espacial; EM - erro médio

Avaliando a produtividade da cultura do café, os trabalhos de Ferraz et al. (2012) e Silva et al. (2008, 2010) encontraram diferentes valores de efeito pepita e alcance. Essas diferenças podem ser justificadas, entre outros fatores, por: manejo da cultura, idade da lavoura, cultivar escolhida, manejo e tipo de solo, clima.

Conforme observado na Tabela 2, de forma geral, todas as variáveis não apresentam distribuição aleatória no espaço, uma vez que possuem GDE forte ou moderado. Todos os mapas

confeccionados (Figuras 1, 2, 3, 4 e 5) apresentaram uma grande amplitude em seus valores. Essa amplitude demonstra como a adoção da média de observações no campo pode ocasionar erros no manejo realizado. Relatos semelhantes são citados nos trabalhos de Ferraz et al. (2012) e Silva et al. (2007, 2008). Isso demonstra a importância da agricultura de precisão no manejo das culturas e a necessidade de utilizar uma ferramenta estatística que considere as relações espaciais existentes para suas análises.

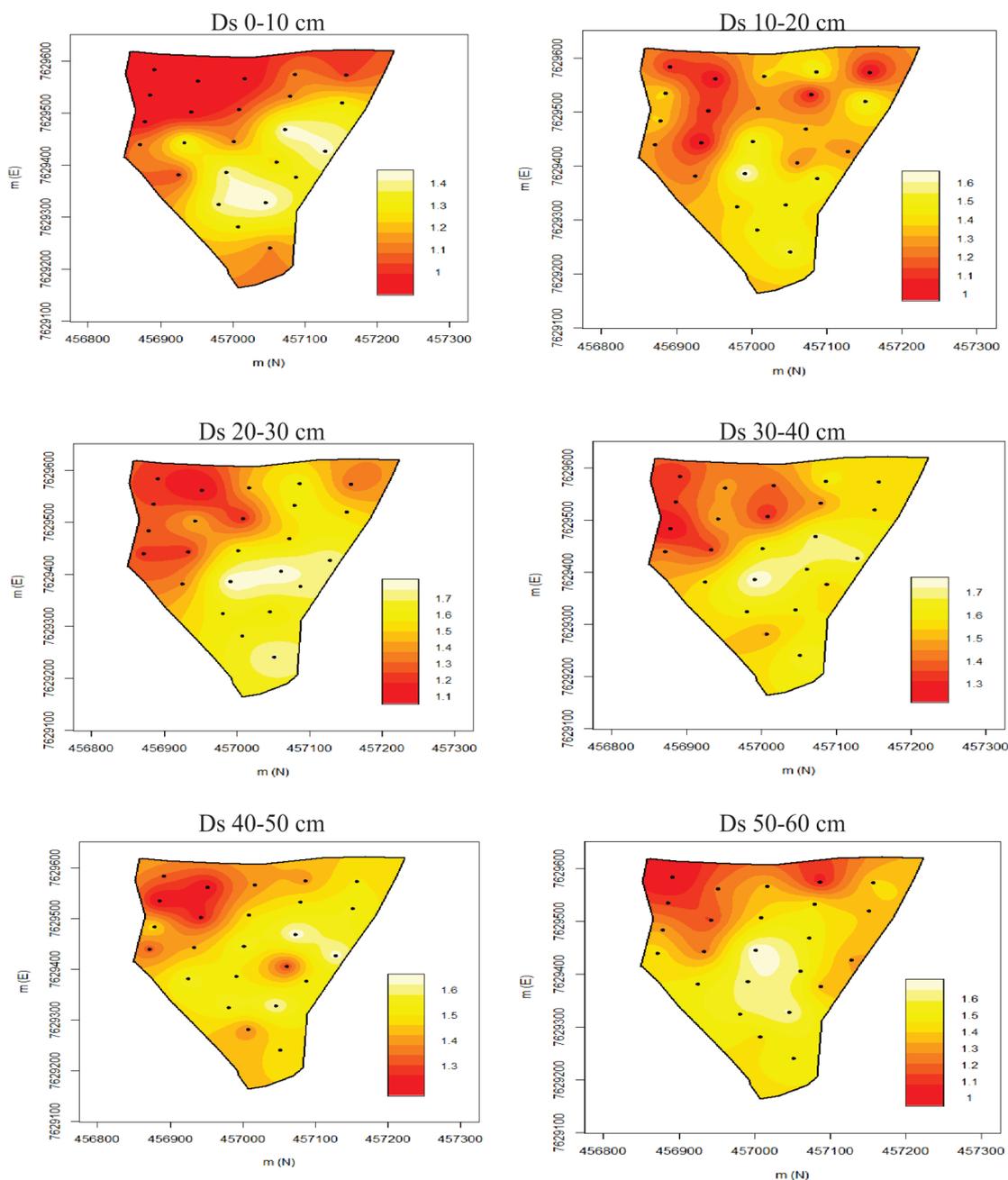
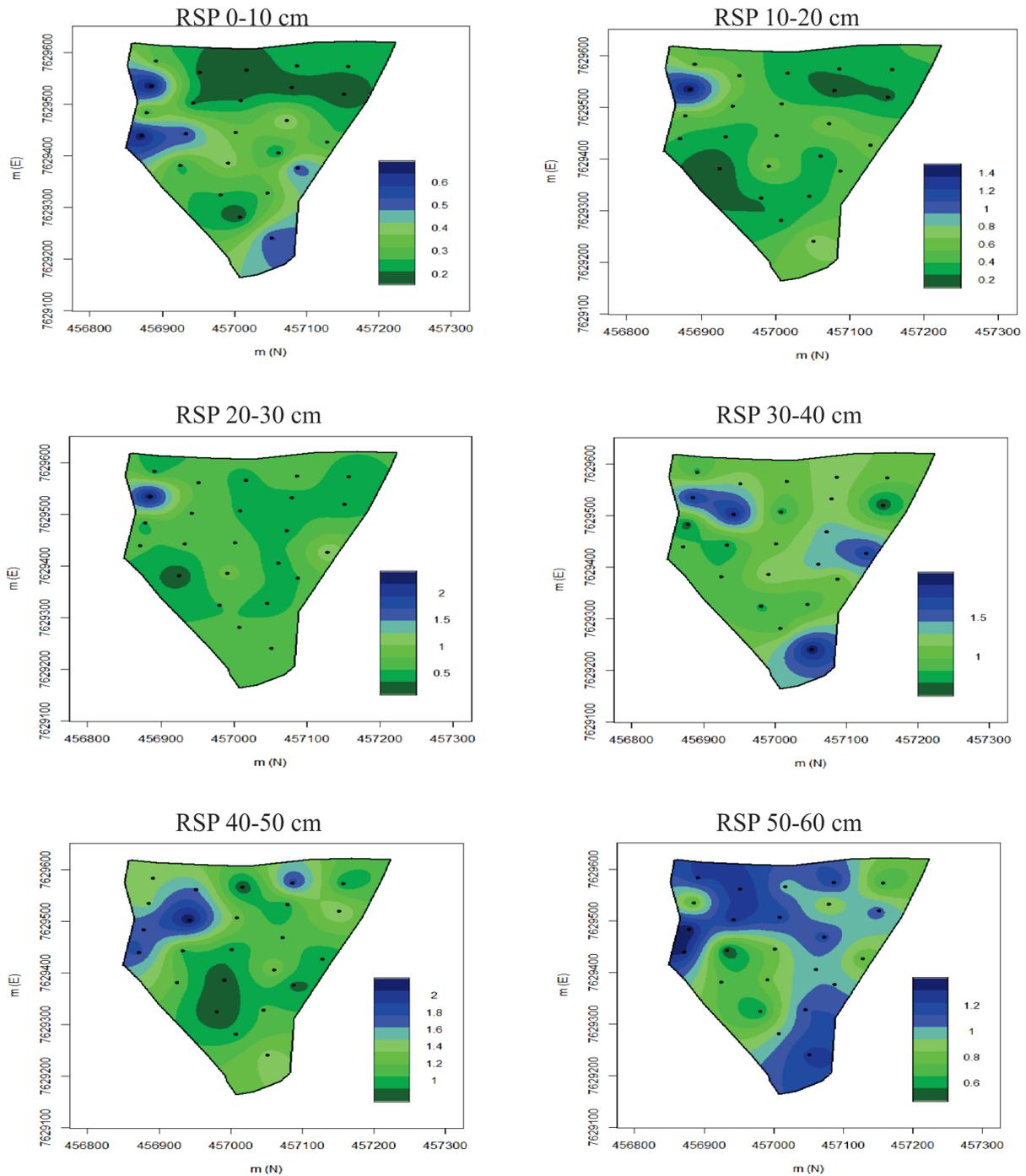


FIGURA 1 – Distribuição espacial da variável densidade do solo - Ds ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), em diferentes camadas de solo.



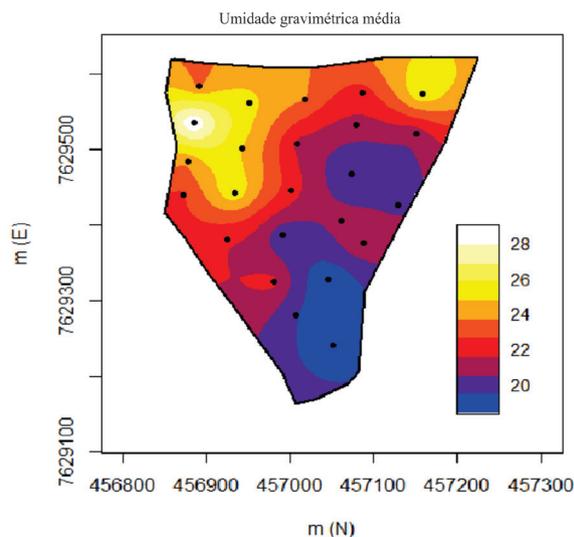
**FIGURA 2** – Distribuição espacial da variável resistência do solo à penetração - RSP (MPa), em diferentes camadas de solo.

É importante ressaltar que os mapas confeccionados possuem escalas diferentes, ou seja, a mesma cor em diferentes mapas podem indicar valores distintos.

No geral, os mapas de densidade do solo (Figura 1) apresentaram um padrão em que os menores valores (cores avermelhadas) são encontrados na parte

superior dos mapas, enquanto os maiores valores (cores esbranquiçadas) situam-se na parte central e inferior.

Observa-se que nos mapas de resistência do solo à penetração (Figura 2), não existe um padrão de valores em profundidade, para um mesmo ponto amostrado, em diferentes mapas, bem como entre pontos próximos.



**FIGURA 3** – Distribuição espacial da variável umidade gravimétrica média (%).

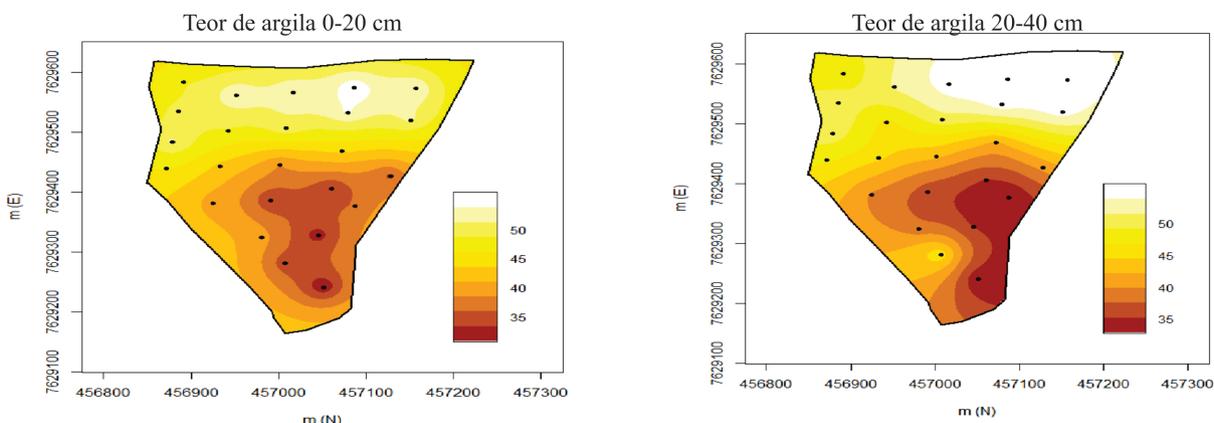
Por meio da comparação dos mapas de densidade do solo (Figura 1) com os de resistência do solo à penetração (Figura 2), observa-se que, no geral, regiões em que ocorrem os maiores valores de densidade do solo (cor amarela) coincidem com as de menores valores de resistência do solo à penetração (cor verde escuro e verde), discordando do observado por Assis et al. (2009).

Os principais fatores que devem ser considerados no uso de penetrômetros e na interpretação dos valores medidos, segundo Campbell e O'Sullivan (1991), são: presença de pedras; efeito da profundidade e a variabilidade dos valores. Para os autores citados, o número de dados a serem coletados para estudos de RSP depende do coeficiente de variação (CV) e da porcentagem dos dados contidos dentro de um determinado intervalo (L), com determinado nível

de probabilidade. A quantidade de coletas a serem feitas será igual ao quadrado da razão entre duas vezes o CV e o intervalo L. No presente estudo, a amostragem utilizada apresentou elevados valores de CV para a RSP, uma vez que para cada ponto foi feita uma única coleta. Recomenda-se que, para estudos de variabilidade espacial desse atributo, seja adotado como valor do ponto a média de sete a nove observações, a fim de obter valores mais representativos da RSP na área a ser avaliada.

O aumento da resistência do solo à penetração está relacionado a baixos valores de umidade do solo (ASSIS et al., 2009). O mapa de umidade gravimétrica média do perfil do solo (Figura 3) apresenta valores inferiores (18 a 21%) na parte inferior e na região central do lado direito, sendo valores intermediários e superiores (21% a 28%) encontrados na parte superior e na região central do lado esquerdo. A maior umidade encontrada na parte superior esquerda do mapa coincide com valores mais elevados de resistência do solo à penetração, nas camadas avaliadas. Essa relação pode indicar que na região há compactação do solo, afetando negativamente as características agrônômicas avaliadas (Figura 5). Para o restante da área, observa-se que regiões com menores valores de umidade gravimétrica apresentam menores valores de resistência do solo à penetração.

Da mesma forma que a densidade do solo, os mapas do teor de argila (Figura 4) indicam um padrão ao longo do perfil, em que maiores teores de argila são encontrados na parte superior dos mapas e menores teores estão localizados na região central e inferior dos mapas. Percebe-se, também, comparando os mapas de teor de argila (Figura 4) com os de resistência do solo à penetração (Figura 2), que as regiões com maiores teores de argila



**FIGURA 4** – Distribuição espacial da variável teor de argila (%), em diferentes camadas de solo.

(cores amarela e branca, com valores entre 45 e 55%, para os dois mapas) coincidem com as de menores valores de resistência mecânica do solo à penetração (cor verde escuro e verde, com valores inferiores a 1,0 Mpa, exceto para a camada de 50-60 cm) concordando com Assis et al. (2009) e Sene et al. (1985).

Na parte superior dos mapas das características agronômicas (Figura 5), são encontrados os menores valores dessas variáveis, exceto para o canto superior direito em que ambas as variáveis apresentaram maiores valores. O mapa da altura apresenta, em sua região central e inferior, valores intermediários. Ao analisar-se o de produtividade, verifica-se que valores elevados e intermediários estão localizados na parte inferior do mapa. À medida que se caminha para a parte superior e esquerda, os valores encontrados vão diminuindo, provavelmente por a planta encontrar um ambiente mais favorável para seu desenvolvimento.

Comparando-se os mapas de densidade do solo (Figura 1) com os de características agronômicas (Figura 5), verifica-se que as regiões com maiores valores de densidade do solo (cor amarela) coincidem com as de maior produtividade e de maior altura (cores roxa e branca). Reichert, Reinert e Braida (2003) propuseram como densidade do solo crítica para algumas classes texturais: 1,30 a 1,40 g/cm<sup>3</sup> para solos argilosos (acima de 35% de argila), 1,40 a 1,50 g/cm<sup>3</sup> para os franco-argilosos (de 28 a 40% de argila) e de 1,70 a 1,80 g/cm<sup>3</sup> para os franco-arenosos (de 0 a 20% de argila). Nota-se que, mesmo a densidade do solo do presente estudo sendo superior ao limite

crítico recomendado para a classe argilosa, ela não limitou à altura e produtividade da cultura do café.

Em relação à comparação dos mapas de resistência do solo à penetração (Figura 2) com os de características agronômicas, observa-se que até a profundidade de 40 centímetros, ocorreu baixa resistência do solo à penetração na maior parte da área, proporcionando maior altura e maior produtividade da cultura do café, haja vista que maior atividade do sistema radicular dessa cultura encontra-se até a profundidade de 20 cm (SOARES et al., 2007). Nas camadas abaixo de 40 cm, ocorre maior resistência do solo à penetração e, essas camadas mais profundas não sofrem os efeitos de compactação impostos por máquinas e implementos utilizados. As camadas superficiais do solo sofrem maiores efeitos (DANIEL; MARETTI, 1990). Canarache (1990) sugere que valores acima de 2,5 MPa começam a restringir o pleno crescimento das raízes e o desenvolvimento da maioria das plantas. Já para Sene et al. (1985) os valores críticos para solos argilosos são aqueles em que a RSP está igual ou acima de 2,5 MPa.

Para os mapas de teor de argila (Figura 4), em comparação com os de altura e produtividade da cultura do café (Figura 5), nota-se que, em regiões com menor teor de argila, encontram-se valores intermediários de altura (intervalo de 2,0 a 2,2 metros) e valores intermediários e maiores (8 a 12 L/planta) para a produtividade. Também se verifica que regiões com maior teor de argila (45 a 55%) coincidem com as que apresentam maior umidade (24 a 28%), conforme Ferreira e Dias Júnior (2001).

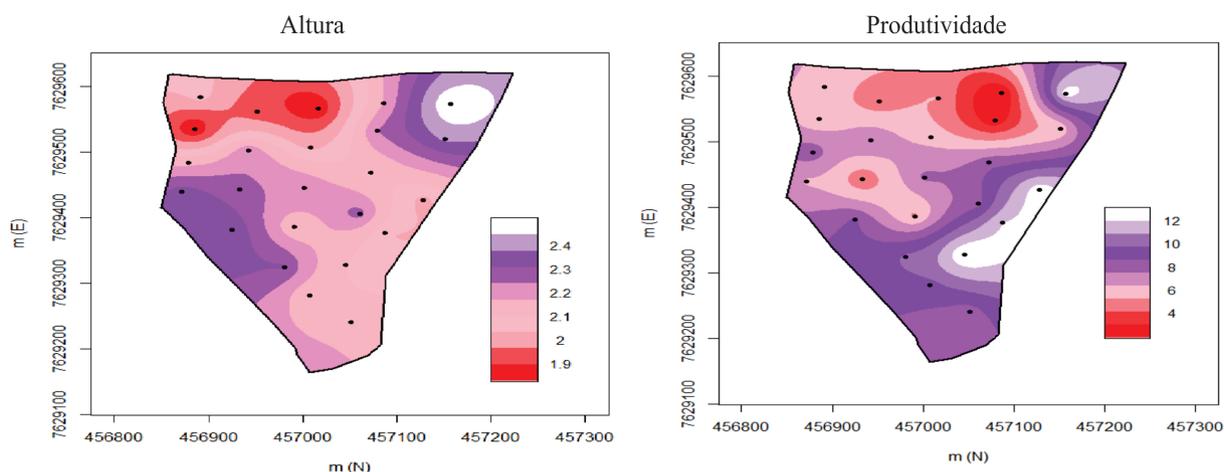


FIGURA 5 – Distribuição espacial das variáveis altura de plantas (metro) e produtividade (L/planta).

#### 4 CONCLUSÕES

Por meio da análise geoestatística, observou-se que, de modo geral, as variáveis avaliadas possuem grau de dependência espacial forte ou moderado, demonstrando que os valores que as variáveis apresentam ao longo da área não são aleatórios.

Com malha de amostragem proposta, foi possível criar os mapas temáticos para observação da distribuição espacial das variáveis na área experimental. Para a resistência do solo à penetração, sugere-se como valor da variável no ponto o valor médio de sete a nove determinações, a fim de obter mapas representativos da área a ser avaliada.

Observa-se que as regiões com maiores valores de altura e produtividade coincidem com as regiões em que ocorre maior densidade do solo, menor teor de argila e menor resistência do solo à penetração.

#### 5 AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao proprietário da fazenda Brejão, Eric Miranda Abreu.

#### 6 REFERÊNCIAS

AMARO FILHO, J. et al. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO em Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 415-422, jun. 2007.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Soil cone penetrometer. In: \_\_\_\_\_. **ASAE standards 1999: standards engineering practices data**. 46<sup>th</sup> ed. Saint Joseph, 1999. p. 834-835.

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.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: UNISINOS, 2003. 165 p.

ASSIS, R. L. et al. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 558-568, 2009.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. Madison: ASA, 1986. p. 363-375.

BOUYOUCOS, G. J. The hydrometer method for studying soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 25, p. 265-371, 1927.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CAMPBELL, D. J.; O'SULLIVAN, M. F. The cone penetrometer in relation to, trafficability, compaction and tillage. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. (Ed.). **Soil analysis**. New York: M. Dekker, 1991. p. 399-423.

CANARACHE, A. PENETR: a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, n. 1, p. 51-70, 1990.

CARVALHO FILHO, A. et al. **Compactação do solo em cafeicultura irrigada**. Uberaba: UNIUBE, 2004. 44 p. (Boletim Técnico, 3).

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: J. Wiley, 1991. 900 p.

CRUZ, J. S. et al. Análise espacial de atributos físicos e carbono orgânico em ARGISSOLO VERMELHO AMARELO cultivado com cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 32, p. 271-278, mar./abr. 2010.

DANIEL, L. A.; MARETTI, H. J. Avaliação de camada de solo compactado e análise de crescimento de plantas. In: CICLO DE ESTUDOS SOBRE MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA, 4., 1990, Campinas. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1990. p. 22-33.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

FERRAZ, G. A. 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, jan./fev. 2012.

FERREIRA, M. M.; DIAS JÚNIOR, M. S. **Física do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 117 p.

FREDDI, O. S. et al. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 627-636, maio/jun. 2007.

- FROGBROOK, Z. L. et al. Exploring the spatial relations between cereal yield and soil chemical properties and the implications for sampling. **Soil Use and Management**, Oxon, v. 18, n. 1, p. 1-9, Feb. 2002.
- GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 305 p.
- GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 169-177, mar./abr. 2005.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 561 p.
- KERRY, R.; OLIVER, M. A. Sampling requirements for variograms of soil properties computed by the method of moments and residual maximum likelihood. **Geoderma**, Amsterdam, v. 140, n. 4, p. 383-396, 2007.
- LEÃO, M. G. A. et al. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo sob cultivo de citros. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 1, p. 121-131, jan./fev. 2010.
- LIMA, C. L. R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 70 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura de "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2004.
- MARQUES JÚNIOR, J.; CORÁ, J. E. Atributos do solo para agricultura de precisão. In: SILVA, F. M. (Ed.). **Mecanização e agricultura de precisão**. Lavras: UFLA/SBEA, 1998. p. 31-70.
- MCBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 37, n. 3, p. 617-639, June 1986.
- QUEIROZ, D. M.; DIAS, G. P.; MANTOVANI, E. C. Agricultura de precisão na produção de grãos. In: BORÉM, A. et al. (Ed.). **Agricultura de precisão**. Viçosa, MG: UFV, 2000. p. 1-42.
- RAMÍREZ-LOPEZ, L. et al. Variabilidad espacial de atributos físicos de un typic Haplustox de los llanos orientales de Colômbia. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 55-63, jan./mar. 2008.
- REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 447 p.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 29-48, 2003.
- RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. GeoR a package for geostatistical analysis. **R-News**, New York, v. 1, n. 2, p. 14-18, June 2001.
- RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Ciências Agrárias**, Teresina, v. 26, n. 3, p. 321-344, jul./set. 2005.
- SENE, M. et al. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, n. 2, p. 422-427, 1985.
- SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H.; MULLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. (Ed.). **Qualidade física do solo: métodos de estudo, sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: FUNEP, 2002. p. 1-18.
- SILVA, F. M. et al. Efeitos da colheita manual na bionalidade do cafeeiro em Ijaci, Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 625-32, maio/jun. 2010.
- \_\_\_\_\_. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 401-407, mar./abr. 2007.
- \_\_\_\_\_. Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 231-241, jan./fev. 2008.
- SOARES, A. R. et al. Produção e distribuição de raízes em cafeeiros irrigados por gotejamento. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 15, n. 2, p. 130-140, 2007.
- SOUZA, Z. M. et al. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 128-134, jan./fev. 2006.
- VIEIRA, S. R. et al. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Oakland, v. 51, n. 1, p. 1-75, 1983.