

## Geostatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar

### Geostatistics and soil attributes in area cultivated with sugar cane

Zigomar Menezes de Souza<sup>I</sup> José Marques Júnior<sup>II</sup> Gener Tadeu Pereira<sup>III</sup>

#### RESUMO

*Em solos sob cultivo de cana-de-açúcar, o tráfego intenso de máquinas agrícolas pode provocar estado de compactação ao solo. Portanto, o objetivo deste trabalho foi caracterizar a variabilidade espacial de atributos físicos e teor de matéria orgânica de um Latossolo Vermelho eutroférico gibbsítico (sob Basalto) e Latossolo Vermelho distroférico caulinitico (sob Arenito) nas profundidades de 0,0-0,2m e 0,2-0,4m, em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar. Os solos foram amostrados nos pontos de cruzamento de uma malha, com intervalos regulares de 10m, nas profundidades de 0,0-0,2m e 0,2-0,4m, totalizando 100 pontos para cada área de estudo. Em cada ponto da malha, foram determinados a densidade do solo, a macroporosidade, o teor de matéria orgânica e a resistência do solo à penetração. Os atributos físicos mostram valores de resistência do solo à penetração, da densidade do solo e da macroporosidade acima da média para esses solos. As variáveis em estudo apresentaram um maior alcance e menor coeficiente de variação no L<sub>Vef</sub> em comparação com o L<sub>Vd</sub>, nas profundidades em estudo. Recomenda-se maior número de amostragem para os atributos em estudo no Latossolo Vermelho distrófico e na profundidade de 0,2-0,4m.*

**Palavras-chave:** *Saccharum officinarum*, variabilidade espacial, latossolos.

#### ABSTRACT

*The intense traffic of agricultural machines in soils cultivated with sugar cane can cause soil compaction. Therefore, the objective of this research was to characterize the spatial variability of soil physical attributes and content organic matter*

*of a eutroferric Red Latosol gibbsitic (under Basalt) and dystroferric Red Latosol caulinitic (under Sandstone) in the depths of 0.0-0.2m and 0.2-0.4m in areas cultivated with sugar cane. Soils were sampled at the crossing points of a grid at regular intervals of 10m and at depths of 0.0-0.2m and 0.2-0.4m. Bulk density, macroporosity, organic matter content and soil penetration resistance were measured for all sampling points. The physical attributes show values of soil penetration resistance, bulk density and macroporosity above average for these soils. The studied variable presented a larger range and minor variation coefficient in the eutroferric Red Latosol (Oxisol Eutruxtox) when compared with the dystroferric Red Latosol (Oxisol Haplustox), in the studied depths. It is recommended a bigger number of samples to study the eutroferric Red Latosol attributes and the depth of 0.2-0.4m.*

**Key words:** *Saccharum officinarum*, spatial variability, oxisol.

#### INTRODUÇÃO

Atualmente, o setor sucro-alcooleiro é responsável pela geração de aproximadamente 1 milhão de empregos diretos nas várias atividades agrícolas e industriais. O Brasil é hoje o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, e o setor sozinho gera cerca de US\$8,7 bilhões de receita, ajudando o país a aumentar as exportações e reduzir sua dependência da importação de petróleo. O Estado de São Paulo responde por mais de 50% da produção de cana-de-açúcar do Brasil. Além de ser o maior Estado produtor, São Paulo conta

<sup>I</sup>Departamento de Água e Solos, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Cidade Universitária Zeferino Vaz, s/n, CP 6011, 13083-875, Campinas, SP, Brasil. E-mail: zigomarms@feagri.unicamp.br. Autor para correspondência.

<sup>II</sup>Departamento de Solos e Adubos, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), Universidade do Estado de São Paulo (UNESP), Jaboticabal, SP, Brasil.

<sup>III</sup>Departamento de Ciências Exatas, FCAV, UNESP, Jaboticabal, SP, Brasil.

atualmente com o parque sucroalcooleiro mais tecnificado, sendo o que mais emprega a colheita mecanizada (DIEESE, 2007).

A utilização de máquinas e implementos com maior peso no cultivo de cana-de-açúcar torna necessário o desenvolvimento de pesquisas para determinar o impacto dessas práticas nos seus atributos físicos e hídricos (SOUZA et al., 2005). Dentre esses atributos, destacam-se os componentes da porosidade relacionados com a retenção e o fluxo de água e ar no solo, a relação massa-volume e o impedimento mecânico ao crescimento das raízes. A capacidade do solo em resistir às cargas aplicadas é fundamental nesse contexto, pois possibilita definir regiões de maior ou menor susceptibilidade do solo à compactação.

A compactação do solo é caracterizada pela redução do volume do solo e pelo aumento da densidade do solo quando uma pressão externa é aplicada. Atualmente há uma grande preocupação com o aumento das áreas agrícolas com problemas de compactação, o que em grande parte se deve às operações mecanizadas. Tal fato está relacionado com o intenso tráfego de máquinas, principalmente em condições de umidade favorável à compactação (STRECK et al., 2004; SOUZA et al., 2006).

Dentre os atributos físicos utilizados para avaliar a compactação do solo, a resistência do solo à penetração e a densidade do solo têm sido atualmente priorizadas para avaliar sistemas de uso e manejo, por serem atributos diretamente relacionados ao crescimento das plantas e de fácil e rápida determinação (BUSSCHER et al., 2000). Além, a resistência do solo à penetração apresenta maiores correlações com o crescimento radicular (STOLF, 1991), destacando-se como a melhor estimativa do impedimento mecânico ao crescimento radicular e como um indicador mais sensível à compactação do solo (SERAFIM et al., 2008).

O estudo da variabilidade espacial por meio da geoestatística possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem. Estudos têm demonstrado que a variabilidade espacial da densidade do solo, da porosidade do solo, da resistência do solo à penetração e do teor de matéria orgânica não ocorrem ao acaso, mas apresentam correlação ou dependência espacial (CAMBARDELLA et al., 1994; VIEIRA, 2000; SILVA et al., 2004; SOUZA et al., 2006).

A definição da variabilidade espacial de atributos físicos do solo pode possibilitar o melhor controle dos fatores de produção das culturas e

proteção ambiental. Portanto, o objetivo deste trabalho foi caracterizar a variabilidade espacial de atributos físicos e o teor de matéria orgânica de um Latossolo Vermelho eutroférico gibbsítico (sob Basalto) e Latossolo Vermelho distrófico caulinitico (sob Arenito) nas profundidades de 0,0-0,2m e 0,2-0,4m, em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar.

## MATERIAL E MÉTODOS

As áreas de estudo localizam-se no nordeste do Estado de São Paulo (SP), nos Municípios de Guariba (SP) e Jaboticabal (SP). As coordenadas geográficas são 21° 19' de latitude sul e 48° 13' de longitude oeste, com altitude média de 600m acima do nível do mar. O relevo é predominantemente suave ondulado, com declividades médias variando de 3 a 8%. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo mesotérmico com inverno seco (Cwa), com precipitação média de 1.400mm, com chuvas concentradas no período de novembro a fevereiro. A vegetação natural era constituída por floresta tropical subcaducifolia e mata ciliar.

Os solos das áreas foram classificados como Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa caulinitico (LVd), com 354 e 368g kg<sup>-1</sup> de argila, 68 e 64g kg<sup>-1</sup> de silte e 578 e 568g kg<sup>-1</sup> de areia, para as profundidades de 0,0-0,2m e 0,20-0,4m, respectivamente, desenvolvido dos Arenitos do Grupo Bauru, Formação Adamantina, área 1, e Latossolo Vermelho eutroférico de textura muito argilosa gibbsítico (LVef), com 622 e 637g kg<sup>-1</sup> de argila, 210 e 200g kg<sup>-1</sup> de silte e 168 e 163g kg<sup>-1</sup> de areia, para as profundidades de 0,0-0,2m e 0,20-0,4m, respectivamente, desenvolvido dos Basaltos do Grupo São Bento, Formação Serra Geral, área 2 (EMBRAPA, 2006). Essa relação litoestratigráfica ocupa grandes áreas da região nordeste do Estado de São Paulo. As áreas experimentais estão sob cultivo de cana-de-açúcar há mais de trinta anos, com plantio convencional semi-mecanizado e sulcação mecanizada, simultaneamente à aplicação de defensivos e fertilizantes. O manejo apresenta uma escarificação até a profundidade de 0,3m, e as duas áreas encontram-se no quinto corte da cultura de cana-de-açúcar.

Os solos foram amostrados em março de 2003, nos pontos de cruzamento de uma malha (georreferenciados), com intervalos regulares de 10m, nas profundidades de 0,0-0,2m e 0,2-0,4m. Cada área teve uma dimensão de 100x100m (1ha), totalizando 100 pontos por área. Foram abertas 100 trincheiras de 0,60m de profundidade (0,3 x 0,3m de largura) em cada área de estudo, para coleta das amostras indeformadas em

anéis volumétricos de 0,05m de diâmetro e 0,03m de altura. A microporosidade foi determinada em mesa de tensão e correspondeu à umidade volumétrica da amostra submetida a uma tensão de 0,006MPa, após saturação. A porosidade total e a densidade do solo foram obtidas segundo EMBRAPA (1997), e a macroporosidade foi obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade. O teor de matéria orgânica do solo foi obtido por meio da metodologia proposta pela EMBRAPA (1997).

A resistência do solo à penetração foi determinada, em cada ponto da malha, utilizando um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar, com ângulo de cone de 30°, que foi inserido ao solo até a profundidade de 0,50m. A transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm/impacto) em resistência à penetração foi obtida pela fórmula de STOLF (1991) descrita a seguir:

$$R = \frac{Mg + mg + \left( \frac{M}{M+m} * \frac{Mg * h}{x} \right)}{A} \quad (1)$$

em que R é a resistência do solo à penetração, kgf cm<sup>-2</sup> (kgf cm<sup>-2</sup> \* 0,098=MPa); M é a massa do êmbolo, 4kg (Mg=4kgf); m é a massa do aparelho sem êmbolo, 3,2kg (mg=3,2kgf); h é a altura de queda do êmbolo, 40cm; x é a penetração da haste do aparelho, cm/impacto; e A é a área do cone, 1,29cm<sup>2</sup>. No momento da determinação da resistência do solo à penetração, o teor de água no solo foi de 21,52 e 23,26kg kg<sup>-1</sup> para o LVef e 19,61 e 20,12kg kg<sup>-1</sup> para o LVd, nas profundidades de 0,0-0,2m e 0,2-0,4m, respectivamente.

Os atributos físicos do solo foram analisados por meio da análise estatística descritiva, sendo calculados a média, mediana, o coeficiente de variação, o coeficiente de assimetria e o coeficiente de curtose. A hipótese de normalidade dos dados foi testada pelo teste de *Kolmogorov-Smirnov*, por meio do programa computacional SAS (SCHLOTZHAVER & LITTELL, 1997).

A dependência espacial foi analisada por meio de ajustes de semivariogramas (VIEIRA, 2000), com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca, a qual é estimada por:

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

em que N(h) é o número de pares experimentais de observações Z(x<sub>i</sub>) e Z(x<sub>i</sub> + h) são separados por uma distância h. O semivariograma é representado pelo gráfico  $\hat{\gamma}(h)$  versus h. Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de  $\hat{\gamma}(h)$ , são estimados os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma (o efeito pepita, C<sub>0</sub>; patamar, C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub>; e o alcance, a).

Para analisar o grau da dependência espacial dos atributos em estudo, utilizou-se a classificação de CAMBARDELLA et al. (1994), em que são considerados de dependência espacial forte os semivariogramas que têm um efeito pepita <25% do patamar, moderada quando está entre 25 e 75% e fraca, >75%.

Os modelos de semivariogramas considerados foram o esférico, o exponencial, o linear e o gaussiano, sendo ajustados por meio do programa GS<sup>+</sup> (versão 7.0) (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 2004). Posteriormente, tais modelos foram usados no desenvolvimento de mapas de isolinhas (krigagem). Em caso de dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, considerou-se o maior valor do coeficiente de correlação obtido pelo método de validação cruzada. Para elaboração dos mapas de distribuição espacial das variáveis, foi utilizado o programa Surfer 8.0 (GOLDEN SOFTWARE, 1999). Os mapas gerados no Surfer foram exportados para o programa Idrisi Kilimanjaro (versão 14.2) (EASTMAN, 2003), em que foram calculadas as áreas que cada classe do atributo estudado tinha em relação à área total.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios encontrados para a resistência do solo à penetração nos solos LVef e LVd (Tabela 1) estão compreendidos nas classes alta e muito alta em ambas profundidades estudadas (SOIL SURVEY STAFF, 1993). SOUZA et al. (2006), estudando a dependência espacial da resistência do solo à penetração e o teor de água do solo sob cultivo de cana-de-açúcar, verificaram valores altos para a resistência do solo à penetração com teor de água no solo em torno 0,19kg kg<sup>-1</sup>. Maiores valores de resistência do solo à penetração no LVef em relação ao LVd foram verificados por CENTURION et al. (2004), para a cultura de cana-de-açúcar, com teor de água no solo em torno de 0,16kg kg<sup>-1</sup>.

Segundo ARSHAD et al. (1996), o valor de resistência do solo à penetração de 2,0MPa, promove significativa restrição ao crescimento radicular de culturas em sistemas de preparo convencional, com a resistência determinada na umidade na capacidade de campo (0,01MPa). Entretanto, segundo esses autores, em solos não revolvidos anualmente, são toleráveis valores de resistências até 4,0MPa, devido à permanência e continuidade de poros, atividade biológica mais ativa e maior estabilidade de agregados. Assim, pode-se inferir que o valor de resistência do solo à penetração, encontrado na profundidade de 0,0-0,2m e 0,2-0,4m para a cana-de-açúcar, não deve

Tabela 1 - Estatística descritiva para as variáveis densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ), macroporosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), matéria orgânica ( $\text{g dm}^{-3}$ ) e resistência do solo à penetração (MPa) em um Latossolo Vermelho eutroférico (LVef) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd), nas profundidades de 0,0-0,2m e 0,2-0,4m.

Atributos	Profundidade (m)	Média	Mediana	CV	Assimetria	Curtose	d <sup>5</sup>
-----Latossolo Vermelho eutroférico-----							
DS <sup>1</sup> ( $\text{Mg m}^{-3}$ )	0,0-0,2	1,41	1,40	5,45	0,13	-0,53	0,04 <sup>ns</sup>
	0,2-0,4	1,41	1,42	8,57	0,31	0,60	0,07 <sup>ns</sup>
Macro <sup>2</sup> ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )	0,0-0,2	0,15	0,13	26,10	0,06	-0,80	0,05 <sup>ns</sup>
	0,2-0,4	0,13	0,11	32,21	0,01	-0,31	0,04 <sup>ns</sup>
MO <sup>3</sup> ( $\text{g dm}^{-3}$ )	0,0-0,2	27,01	27,50	10,37	-0,27	-0,19	0,13
	0,2-0,4	23,07	23,00	16,02	-0,12	-0,86	0,13
RP <sup>4</sup> (MPa)	0,0-0,2	4,40	4,54	38,73	-0,20	-0,88	0,07 <sup>ns</sup>
	0,2-0,4	5,11	5,06	28,12	0,30	-0,19	0,06 <sup>ns</sup>
-----Latossolo Vermelho distrófico-----							
DS ( $\text{Mg m}^{-3}$ )	0,0-0,2	1,56	1,57	9,22	-0,02	-0,26	0,07 <sup>ns</sup>
	0,2-0,4	1,58	1,59	9,76	0,04	-0,50	0,06 <sup>ns</sup>
Macro ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )	0,0-0,2	0,13	0,12	35,33	0,36	-0,87	0,10
	0,2-0,4	0,11	0,12	38,78	0,28	-0,90	0,12
MO ( $\text{g dm}^{-3}$ )	0,0-0,2	16,08	16,02	14,05	0,25	-0,31	0,15
	0,2-0,4	14,03	14,01	19,89	0,02	-0,45	0,12
RP (MPa)	0,0-0,2	3,95	3,91	44,16	0,25	-0,35	0,06 <sup>ns</sup>
	0,2-0,4	3,62	3,60	36,22	0,09	0,98	0,07 <sup>ns</sup>

<sup>1</sup>DS = densidade do solo; <sup>2</sup>Macro = macroporosidade do solo; <sup>3</sup>MO = matéria orgânica; <sup>4</sup>RP = resistência do solo à penetração; <sup>5</sup>d=estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov, <sup>ns</sup> não significativo a 5% de probabilidade.

provocar acentuados prejuízos ao crescimento das plantas.

Na análise do mapa de resistência do solo à penetração e da porcentagem de área de cada classe, verifica-se que 89 e 98% no LVef e 90 e 80% no LVd, nas profundidades de 0,0-0,2m e 0,2-0,4m, respectivamente, apresentam valores de resistência do solo à penetração acima de 3,5MPa, considerado restritivo ao desenvolvimento radicular das culturas (Tabela 2 e Figura 1). DEXTER (1987) afirma que a compactação do solo é mais prejudicial em solo seco, e em condições de maior conteúdo de água, pode haver crescimento radicular em valores de resistência do solo à penetração superior a 4,0MPa.

Os valores médios da densidade do solo foram considerados altos para o LVef e LVd. Segundo ARSHAD et al. (1996), valores acima de 1,40Mg m<sup>-3</sup> restringem o crescimento radicular em solo argiloso (Tabela 1). VASCONCELOS et al. (2004), estudando o desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar e as características físico-hídricas e químicas

dos ambientes de produção, verificaram valores de densidade do solo de 1,45Mg m<sup>-3</sup> em latossolo com teor de argila em torno de 400 a 600g kg<sup>-1</sup>. Os autores afirmam que esse valor de densidade do solo é muito alto e restringe o desenvolvimento do sistema radicular da cultura da cana-de-açúcar na profundidade de 0,10 a 0,30m. Observa-se que 77 e 80% no LVef e 100 e 95% no LVd, nas profundidades de 0,0-0,2m e 0,2-0,4m, respectivamente, apresentam valores de densidade do solo acima de 1,40Mg m<sup>-3</sup> (Tabela 2 e Figura 1).

A macroporosidade apresentou valores baixos nos dois solos estudados. Segundo SILVA et al. (1994), valores abaixo de 0,16m<sup>-3</sup> m<sup>-3</sup> restringem o movimento de água no perfil do solo para a maioria das culturas e classe de solo (Tabela 1). Verifica-se que, aproximadamente, 85 e 96% no LVef e 85 e 95% no LVd, nas profundidades de 0,0-0,2m e 0,2-0,4m, respectivamente, apresentam valores de macroporosidade abaixo de 0,16m<sup>-3</sup> m<sup>-3</sup> (Tabela 2 e Figura 1). CARVALHO et al. (1991) afirmam que a macroporosidade é o atributo físico mais afetado pelo cultivo contínuo de cana-de-açúcar.

Tabela 2 - Porcentagem de área de cada classe para os atributos densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ), macroporosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), matéria orgânica ( $\text{g dm}^{-3}$ ) e resistência do solo à penetração (MPa) nas profundidades de 0,0-0,2m e 0,2-0,4m, em um Latossolo Vermelho eutroférico (LVef) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd).

Porcentagem de classe (%)							
-----Latossolo Vermelho eutroférico (0,0-0,2m)-----							
Classe	<sup>1</sup> DS	Classe	Macroporosidade	Classe	<sup>2</sup> MO	Classe	<sup>3</sup> RP
–	$\text{Mg m}^{-3}$	–	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	–	$\text{g dm}^{-3}$	–	MPa
1,24-1,31	7	0,05-0,09	10	25-26	6	2,4-3,2	1
1,31-1,38	16	0,09-0,13	30	26-27	44	3,2-4,0	10
1,38-1,45	70	0,13-0,17	45	27-29	37	4,0-4,8	74
1,45-1,52	6	0,17-0,21	14	29-30	7	4,8-5,6	13
>1,52	1	>0,21	1	>30	6	>5,6	2
-----Latossolo Vermelho eutroférico (0,2-0,4m)-----							
1,34-1,37	5	0,04-0,10	12	19-21	12	3,2-4,0	2
1,37-1,39	15	0,10-0,12	25	21-23	19	4,0-4,8	12
1,39-1,41	36	0,12-0,16	59	23-24	46	4,8-5,6	82
1,41-1,44	35	0,16-0,20	4	24-26	17	5,6-6,4	3
>1,44	9	>0,20	0	>26	6	>6,4	1
-----Latossolo Vermelho distrófico (0,0-0,2m)-----							
1,44-1,50	3	0,07-0,10	16	13-15	16	2,9-3,4	10
1,50-1,56	30	0,10-0,12	31	15-16	30	3,4-3,9	38
1,56-1,62	58	0,12-0,15	38	16-18	41	3,9-4,4	18
1,62-1,68	8	0,15-0,17	10	18-19	9	4,4-4,9	24
>1,68	1	>0,17	5	>19	4	>4,9	10
-----Latossolo Vermelho distrófico (0,2-0,4m)-----							
1,38-1,48	14	0,07-0,10	19	11-12	8	2,9-3,2	4
1,48-1,58	30	0,10-0,13	37	12-14	34	3,2-3,5	16
1,58-1,68	45	0,13-0,16	39	14-16	45	3,5-3,8	59
1,68-1,78	11	0,16-0,19	4	16-17	10	3,8-4,1	20
>1,78	0	>0,19	1	>17	3	>4,1	1

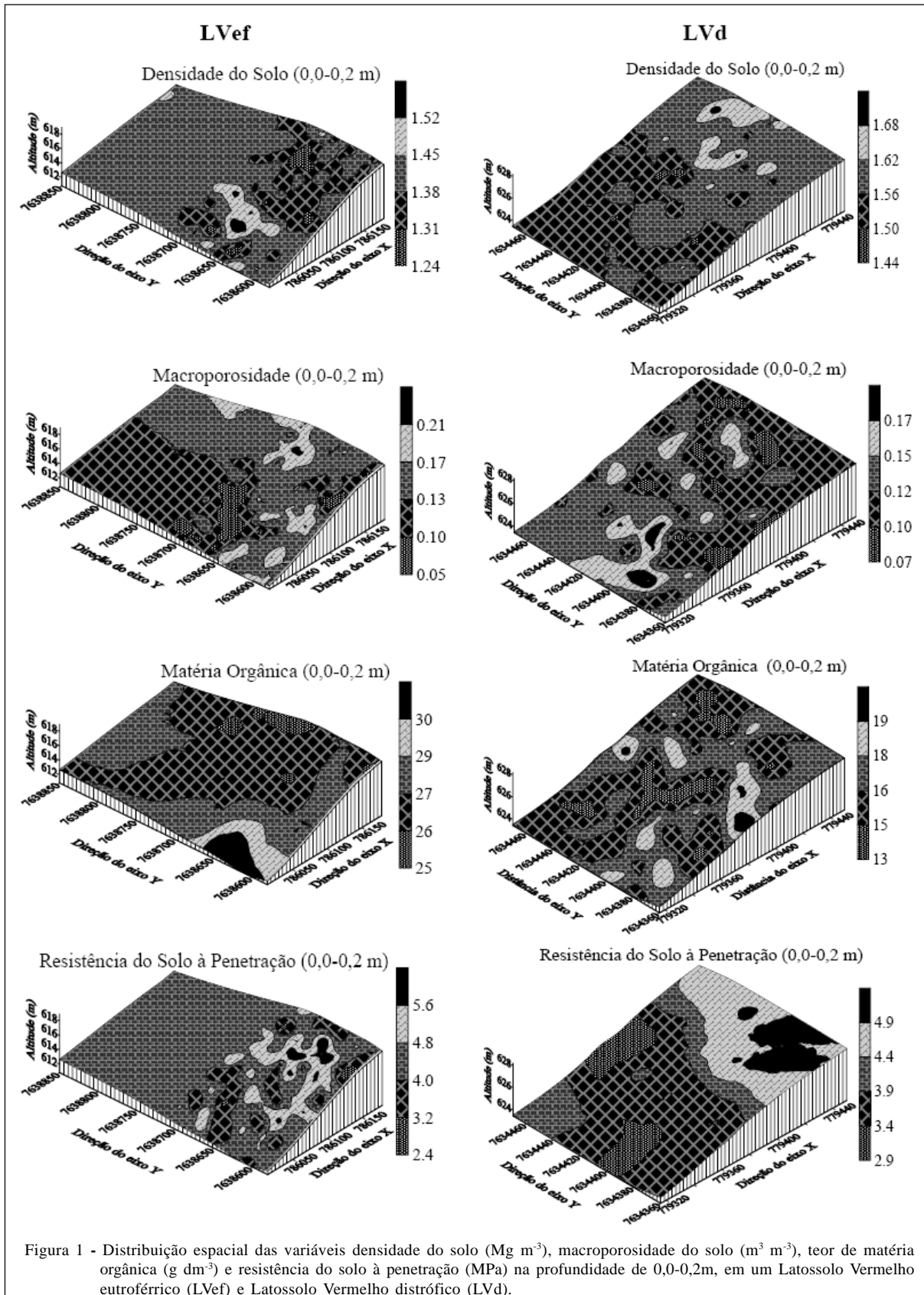
<sup>1</sup>DS = densidade do solo; <sup>2</sup>MO = matéria orgânica; <sup>3</sup>RP = resistência do solo à penetração.

O teor de matéria orgânica apresentou valores baixos nos solos estudados, sendo considerados valores altos acima de  $52 \text{g dm}^{-3}$  (SOUSA & LOBATO, 2002) (Tabela 1). Na análise do mapa do teor de matéria orgânica e da porcentagem de área de cada classe (Tabela 2 e Figura 1), verifica-se que 100% apresentou valores baixos no LVef e LVd para as profundidades estudadas. Segundo BAYER & MIELNICZUK (2008), nas condições de clima tropical, é grande a produção de biomassa, mas a velocidade de mineralização da matéria orgânica também é muito elevada; portanto, a manutenção de matéria orgânica do solo em áreas com manejo intensivo se torna difícil.

Os valores elevados para a densidade do solo e resistência do solo à penetração e baixos para a macroporosidade no LVef e LVd, em grande parte da área, refletem a influência do manejo da cultura da cana-de-açúcar, que recebe um excessivo tráfego de máquinas pesadas, uma vez que a área de cana-de-açúcar está em seu quinto corte. A diminuição da macroporosidade

e o aumento dos valores de densidade do solo demonstram compactação na área de estudo e modificações na estrutura do solo. Resultados semelhantes foram observados por CENTURION et al. (2007) em latossolo cultivado com cana-de-açúcar. As alterações dos atributos físicos do solo promovem redução da infiltração de água no solo e condutividade hidráulica saturada. Segundo SOUZA et al. (2005), sistemas com menor revolvimento do solo e intenso tráfego de máquinas pesadas podem provocar compactação do solo. Os mapas de krigagem e a distribuição dos atributos físicos por classe de ocorrência (Tabela 2 e Figura 1) podem auxiliar os agricultores no manejo de descompactação de áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

Os resultados do teste Kolmogorov-Smirnov indicaram normalidade para as variáveis densidade do solo, macroporosidade e resistência do solo à penetração no LVef, nas duas profundidades estudadas (Tabela 1). Para o LVd, as variáveis



densidade do solo e resistência do solo à penetração apresentaram normalidade nas profundidades estudadas. Porém, os valores da média e mediana, para todas as variáveis, estão próximos, mostrando distribuições simétricas. Isso pode ser um indicativo de que as medidas de tendência central não são dominadas por valores atípicos na distribuição (CAMBARDELLA et al., 1994), demonstrando que todos os atributos em estudo estão aproximando-se de uma distribuição normal e indicando que os dados estão adequados para o uso da geoestatística.

De acordo com a classificação de WARRICK & NIELSEN (1980), os valores do coeficiente de variação foram altos para as variáveis resistência do solo à penetração e macroporosidade em ambas as profundidades dos solos estudados (Tabela 1). A variável matéria orgânica apresentou média variação nas profundidades em estudo no LVef e LVd, e a variável densidade do solo apresentou CV baixo. O coeficiente de variação foi menor na profundidade de 0,0-0,2m em relação à profundidade de 0,2-0,4m para a maioria das variáveis estudadas. Todas as variáveis

em estudo apresentaram um menor CV no LVef em comparação ao LVd nas profundidades em estudo.

Os resultados da análise geoestatística mostraram que todas as variáveis analisadas apresentaram dependência espacial nas duas profundidades estudadas (Tabela 3). Todos os dados dos atributos em estudo ajustaram-se ao modelo esférico, com exceção da variável densidade do solo no LVef e LVd, que se ajustou ao modelo exponencial na profundidade de 0,2-0,4m. A análise da relação  $C_0/(C_0+C_1)$  mostrou que todas as variáveis apresentam grau de dependência espacial forte, exceto para as variáveis matéria orgânica no LVef e resistência do solo à penetração no LVd, na profundidade de 0,0-0,2m. A distribuição dos atributos físicos do solo e do teor de matéria orgânica no espaço não é aleatória, uma vez que todos os atributos do solo estudados apresentaram grau de dependência espacial, conforme estabelecido pela relação  $C_0/(C_0+C_1)$ . Isso demonstra que os semivariogramas explicam a maior parte da variância dos dados experimentais.

Tabela 3 - Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais para as variáveis densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ ), macroporosidade ( $m^3\ m^{-3}$ ), matéria orgânica ( $g\ dm^{-3}$ ) e resistência do solo à penetração (MPa) em um Latossolo Vermelho eutroférico (LVef) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd), nas profundidades de 0,0-0,2m e 0,2-0,4m.

Variáveis	Profundidade (m)	$^5C_0$	Patamar	Alcance	Modelo	VC <sup>6</sup>	$C_0/(C_0+C_1)^7$
-----Latossolo Vermelho eutroférico-----							
DS <sup>1</sup> ( $Mg\ m^{-3}$ )	0,0-0,2	0,002	0,008	25	Esférico	0,90	25
	0,2-0,4	0,009	0,001	69	Exponencial	0,87	9
Macro <sup>2</sup> ( $m^3\ m^{-3}$ )	0,0-0,2	0,0007	0,004	20	Esférico	0,94	18
	0,2-0,4	0,0002	0,001	26	Esférico	0,90	20
MO <sup>3</sup> ( $g\ dm^{-3}$ )	0,0-0,2	1,45	3,00	77	Esférico	0,91	48
	0,2-0,4	0,21	6,15	60	Esférico	0,89	3
RP <sup>4</sup> (MPa)	0,0-0,2	0,09	0,96	20	Esférico	0,88	9
	0,2-0,4	0,15	0,74	25	Esférico	0,94	20
-----Latossolo Vermelho distrófico-----							
DS ( $Mg\ m^{-3}$ )	0,0-0,2	0,0002	0,003	21	Esférico	0,89	7
	0,2-0,4	0,00004	0,002	24	Exponencial	0,76	4
Macro ( $m^3\ m^{-3}$ )	0,0-0,2	0,0002	0,001	16	Esférico	0,90	20
	0,2-0,4	0,0003	0,002	18	Esférico	0,89	15
MO ( $g\ dm^{-3}$ )	0,0-0,2	0,08	2,85	21	Esférico	0,91	3
	0,2-0,4	0,27	3,44	22	Esférico	0,90	8
RP (MPa)	0,0-0,2	0,54	0,56	84	Esférico	0,87	49
	0,2-0,4	0,02	0,1	19	Esférico	0,85	20

<sup>1</sup>DS = densidade do solo; <sup>2</sup>Macro = macroporosidade do solo; <sup>3</sup>MO = teor de matéria orgânica; <sup>4</sup>RP = resistência do solo à penetração; <sup>5</sup> $C_0$  = efeito pepita; <sup>6</sup>VC = coeficiente de determinação do teste de validação cruzada; <sup>7</sup> $C_0/(C_0+C_1)$  = grau de dependência espacial.

Observou-se um aumento dos valores do alcance em profundidade para todas as variáveis em estudo, exceto para o teor de matéria orgânica no LVef e para a resistência do solo à penetração no LVd (Tabela 3). Isso indica a maior continuidade na distribuição espacial dos atributos físicos do solo, na camada de 0,2-0,4m, concordando com o estudo de SOUZA et al. (2001). Todas as variáveis em estudo apresentaram um maior alcance no LVef quando comparado com o LVd, com exceção da resistência do solo à penetração na profundidade de 0,0-0,2m. Considerando que as áreas estão a 18km uma da outra, os resultados indicam que, analisando-se em uma escala menor (baixo nível de detalhe), a dependência da variabilidade dos atributos físicos está ligada ao material de origem e às ações de manejo ao longo do tempo.

Na região em estudo, o basalto, material de origem do LVef, é geologicamente mais velho e constituído de minerais menos resistentes quando comparado com o arenito, material de origem do LVd (MARQUES JÚNIOR & LEPSCH, 2000). Portanto, o Latossolo Vermelho eutroférico (LVef) apresenta maior grau de intemperismo em relação ao Latossolo Vermelho distrófico (LVd), concordando com os resultados obtidos por MONTANARI et al. (2005). Os resultados estão de acordo com os conceitos de gênese do solo que definem ambientes pedogenéticos mais evoluídos e estáveis (LVef), sendo mais homogêneos, confirmado pelo menor CV e maior alcance.

## CONCLUSÕES

Os atributos físicos mostram valores de resistência do solo à penetração, densidade do solo e macroporosidade acima da média para esses solos. As variáveis em estudo apresentaram um maior alcance e menor coeficiente de variação no LVef quando comparado com o LVd, nas profundidades em estudo. Recomenda-se maior número de amostragem para os atributos em estudo no Latossolo Vermelho distrófico na profundidade de 0,2-0,4m.

## REFERÊNCIAS

- ARSHAD, M.A. et al. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Eds). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141 (SSSA Special Publication 49).
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: GABRIEL, A.S. et al. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 1999. p.7-16.
- BUSSCHER, W.J. et al. Timing effects of deep tillage on penetration resistance and wheat and soybean yield. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.64, n.3, p.999-1003, 2000. Disponível em: <<http://soil.scijournals.org/cgi/content/full/64/3/999>>. Acesso em: 18 ago. 2009.
- CAMBARDELLA, C.A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.
- CARVALHO, S.R. et al. Tassement des sols ferrallitiques Podzólico Vermelho Amarelo sous culture de canne à sucre (état de Rio de Janeiro, Brésil): apport d'une analyse de la porosité associée a une connaissance détaillée de la phase minérale. **Série Pedologie**, Cahiers Orstom, v.26, n.1, p.195-212, 1991.
- CENTURION, J.F. et al. Physical attributes of kaolinitic and oxidic oxisols resulting from different usage systems. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v.47, n.5, p.725-743, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/babt/v47n5/a07v47n5.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2009. doi: 10.1590/S1516-89132004000500007.
- CENTURION, J.F. et al. Influência do cultivo de cana-de-açúcar e da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos Vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.199-209, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v31n2/a02v31n2.pdf>>. Acesso em: 16 ago. 2009. doi: 10.1590/S0100-06832007000200002.
- DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS. **Estudos e Pesquisas. Desempenho do setor sucroalcooleiro brasileiro e os trabalhadores**. São Paulo: DIEESE, 2007. 34p. (Ano 3, n.30).
- DEXTER, A.R. Mechanics of root growth. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.98, n.3, p.303-312, 1987. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/4g83614390615m3j>>. Acesso em: 17 ago. 2009. doi: 10.1007/BF02378351.
- EASTMAN, R.J. **Guide to GIS and image processing**. Worcester: Idrisi Production, 2003. V.1. 306p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- GAMMA DESIGN SOFTWARE. **Geostatistics for the environmental sciences** (version 7.0 for windows). Michigan: 2004. 1 CD.
- GOLDEN SOFTWARE INC. (Golden, Estados Unidos). **Surfer for windows: release 7.0, contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers user's guide**. New York, 1999. 619p.
- MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I.F. Depósitos superficiais neocenozóicos, superfícies geomórficas e solos em Monte Alto, SP. **Geociência**, São Paulo, v.19, n.2, p.265-281, 2000.



MONTANARI, R. et al. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.1, p.69-77, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v40n1/23244.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2009. doi: 10.1590/S0100-204X2005000100010.

SCHLOTZHAVER, S.D.; LITTELL, R.C. **SAS: system for elementary statistical analysis**. 2.ed. Cary: SAS, 1997. 905p.

SERAFIM, M.E. et al. Intervalo hídrico ótimo em um latossolo vermelho distroférrico sob diferentes sistemas de produção. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.4, p.654-665, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v28n4/05.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2009. doi: 10.1590/S0100-69162008000400005.

SILVA, A.P. et al. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.6, p.1775-1781, 1994. Disponível em: <[http://appp.sisiknowledge.com/full\\_record.do?product=UA&search\\_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=V1LM4ccbGI1FGG4m2jm&page=1&doc=7&colname=WOS](http://appp.sisiknowledge.com/full_record.do?product=UA&search_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=V1LM4ccbGI1FGG4m2jm&page=1&doc=7&colname=WOS)>. Acesso em: 16 ago. 2009.

SILVA, V.R. et al. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.2, p.399-406, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v34n2/a10v34n2.pdf>>. Acesso em: 16 ago. 2009. doi: 10.1590/S0103-84782004000200010.

SOIL SURVEY STAFF. **Soil survey manual**. Washington, USDA-SCS. U.S. Gov. Print. Office, 1993. 437p. (Handbook, 18).

SOUZA, Z.M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrofíco sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p.699-707, 2001.

SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E. (eds.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. 416p.

SOUZA, Z.M. et al. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.3, p.271-278, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v40n3/a11v40n3.pdf>>. Acesso em: 16 ago. 2009. doi: 10.1590/S0100-204X2005000300011.

SOUZA, Z.M. et al. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e teor de água do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.1, p.128-134, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v36n1/a19v36n1.pdf>>. Acesso em: 16 ago. 2009. doi: 10.1590/S0103-84782006000100019.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.15, n.3, p.229-235, 1991.

STRECK, C. A. et al. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, p.755-760, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v34n3/a16v34n3.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2009. doi: 10.1590/S0103-84782004000300016.

VASCONCELOS, A.C.M et al. **Desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar e características físico-hídricas e químicas dos ambientes de produção**. Americana: Adonis, 2004. 31p. (Projeto Rhizocana: relatório de pesquisa).

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F. et al. (Eds). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: 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.