

VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO DE UM SOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR

Glaucilino Miguel da Silva Alves^{1*}; Zulema Netto Figueiredo²; Taniele Carvalho de Oliveira³; Célia Regina Grego⁴; Paulo César Lima Silva¹

SAP 15465 Data envio: 31/10/2016 Data do aceite: 30/11/2017
Sci. Agrar. Parana., Marechal Cândido Rondon, v. 17, n. 1, jan./mar., p. 59-66, 2018

RESUMO - O uso contínuo do solo e o tráfego sem controle de máquinas durante o cultivo da cana-de-açúcar podem promover alterações nas propriedades físicas do solo, provocando queda na produção. Objetivou-se com o presente trabalho avaliar a variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração de um solo, no sistema de colheita mecanizada da cana-de-açúcar. O experimento foi conduzido na fazenda Modelo, localizada em Lambari D'Oeste (MT), em uma área de aproximadamente 15 ha, em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico. A parcela experimental foi formada por uma malha experimental com 110 pontos, na linha de cultivo, sem medição de tráfego de máquinas, os pontos de amostragem foram georreferenciados com GPS, no sistema de projeção em UTM. Para determinação da resistência do solo à penetração utilizou-se um penetrômetro de impacto. Foram retiradas amostras das camadas nas profundidades de 0 - 15 cm, 15 - 30 cm e 30 - 45 cm, e foram também realizadas amostragem para determinação do conteúdo de água no solo. Os valores foram analisados utilizando-se estatística como análise exploratória e por geoestatística para identificação da variabilidade espacial e espacialização da resistência à penetração na área de estudo. Os resultados expressaram dependência espacial na variável em todas as camadas avaliadas. Conclui-se que a dependência espacial foi encontrada para a resistência do solo à penetração em todas as camadas analisadas na cultura da cana-de-açúcar colhida mecanicamente. Na camada de 10 - 45 cm ocorreu um aumento da resistência à penetração.

Palavras-chave: agricultura de precisão, atributos físicos do solo, penetrômetro.

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL PHYSICAL PROPERTIES OF A GROWN WITH CANE SUGAR

ABSTRACT - The continued soil use and mechanized traffic uncontrolled during the sugarcane crops can promote changes in the soil physical attributes, causing a fall in yields. The aim of this study was to evaluate the spatial variability of the penetration resistance of the soil in the sugarcane mechanized harvesting system area. The experiment was conducted at the farm Modelo, located in municipality of Lambari D'Oeste (MT), on area about of 15 ha in Oxisol soil. The experimental design of 110 points sampling, in the sugarcane planting line, without measuring machine traffic, random location sampling with GPS in UTM system. To determine the soil penetration resistance was used a impact penetrometer. Samples were taken at 0 - 15cm, 15 - 30 cm and 30 - 45cm depths of, and were collecting to determine the water content in the soil samples. The values were analyzed using statistical analysis exploratory and geostatistics for identification spatial variability and special dependence of penetration resistance in the study area. The results expressed spatial dependence in the variable on all evaluated depths. Concludes of that all analyzed depth was spatial dependence, and in 10 - 45 cm had increased of the soil penetration resistance.

Key words: precision agriculture, soil physical attributes, agricultural penetrometer.

INTRODUÇÃO

O Brasil não é apenas o maior produtor de cana-de-açúcar, mas também o primeiro do mundo na produção de açúcar e etanol e conquista, cada vez mais, o mercado externo com o uso do biocombustível como alternativa energética (MAPA, 2016). Aproximadamente 3,1 milhões

de hectares é ocupado pela cultura da cana-de-açúcar no Brasil. Mato Grosso produziu na safra 2013/2014, 16.948,51 mil toneladas em uma área de aproximadamente 237,86 mil ha (CONAB, 2014).

A indústria brasileira de cana-de-açúcar mantém o maior sistema de produção de energia comercial da

¹Graduando em Agronomia, Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Campus Cáceres, Cáceres, Mato Grosso, Brasil, CEP 78200-000. E-mail: glaucilino@hotmail.com, paulocesarcac@hotmail.com. *Autor para correspondência.

²Professora, Dr., Departamento de Agronomia, Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Campus Cáceres, Cáceres, Mato Grosso, Brasil, CEP 78200-000. E-mail: zulemane@hotmail.com

³Professora, Mestre, Departamento de Agronomia, Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Campus Cáceres, Cáceres, Mato Grosso, Brasil, CEP 78200-000. E-mail: tani.elle@hotmail.com

⁴Pesquisadora, Dr., Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Monitoramento por Satélite, Campinas, São Paulo, Brasil. E-mail: celia.grego@embrapa.br

biomassa, no mundo, através do etanol (substituindo em torno de 40% da gasolina) e do uso quase total do bagaço (equivalente a 11 milhões de ton. de óleo) como combustível (MACEDO, 2001). Embora a produção de etanol seja a principal opção no momento, a produção de açúcar também vem crescendo no país, de acordo com a CONAB (2014), de toda a produção nacional da indústria sucroalcooleira (658.822 mil ton.) a produção de açúcar representa 45,22% (297.920,44 mil ton.) e o restante destinado a produção de etanol 54, 78% (360.901,82 mil ton.).

Com o aumento da demanda de açúcar e etanol, a área de cultivo de cana-de-açúcar continua se expandindo no Brasil, o cenário econômico atual indica um mercado favorável, estimulando a expansão das áreas plantadas (OLIVEIRA et al., 2012). Segundo Castro et al. (2010) o aumento da área plantada de cana-de-açúcar vem ocorrendo no centro do país, no Cerrado.

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar está cada vez mais presente nos sistemas de produção no Brasil (SOUZA et al., 2005). De acordo com Iaia et al. (2006) observa-se, uma intensa degradação da qualidade física do solo ocasionado pelo tráfego dessas máquinas de forma repetitiva, induzindo mudanças no comportamento das partículas dos agregados do solo, ocasionando a deterioração de sua estrutura provocando, assim, o processo de compactação do solo.

De acordo com Pedrotti; Mello Júnior (2009), o uso contínuo do solo e o tráfego de máquinas durante o cultivo da cana-de-açúcar podem promover alterações nas propriedades físicas do solo, dentre as principais estão à taxa de infiltração de água no solo e aumento na resistência à penetração de raízes, o que conseqüentemente provoca queda na produção de cana-de-açúcar.

É de fundamental importância conhecer a dinâmica desta prática, bem como observar as possíveis melhorias da qualidade física do solo, principalmente para avaliar os efeitos deste sistema de colheita na compactação do solo (CARVALHO et al., 2008). De acordo com Fuentes et al. (2006) a resistência do solo à penetração é uma das propriedades físicas que expressa o grau de compactação ocasionada pelas condições de manejo do solo, e conseqüentemente a facilidade com que as raízes penetram no solo.

A resistência a penetração pode ser classificada de acordo as classes de resistência do solo à penetração (RP), citadas por Arshad et al. (1996), como valores baixos de 0,1 a 1,0 MPa; moderados de 1,0 a 2,0 MPa; altos de 2,0 a 4,0 MPa; muito altos de 4,0 a 8,0 MPa e extremamente altos acima de 8,0 MPa. USDA, (1993) considera o limite de 2 MPa como forte restrição ao crescimento radicular para muitas culturas anuais, sendo um critério para restrição física ao crescimento radicular.

Segundo Carvalho et al. (2008) a resistência mecânica do solo à penetração (RMP) constitui uma das variáveis físicas consideradas na avaliação da qualidade do solo, podendo apresentar grande variabilidade espacial. Os

estudos de variabilidade espacial da RP têm sido realizados em um único momento em áreas de sistema convencional (GREGO e VIEIRA, 2005) ou no sistema plantio direto (ABREU et al., 2003).

O uso de técnicas geoestatísticas possibilita a interpretação dos resultados, com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos (SOUZA et al., 2009). O seu emprego possibilita identificar e avaliar a estrutura espacial de variáveis do solo, possibilitando analisar a interação entre os atributos físicos (JUNQUEIRA Jr et al., 2008).

A análise de geoestatística também é responsável por estimar o valor do atributo em locais não amostrados, através da “krigagem”, facilitando a gestão dos recursos naturais e uso do solo (GOMES et al., 2007). Desta forma, objetivou-se com o presente trabalho avaliar a variabilidade espacial da resistência à penetração do solo, num sistema de colheita mecanizada da cana-de-açúcar.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na fazenda Modelo, área de produção mecanizada de cana-de-açúcar pertencente a Cooperativa de Produtores de Cana-de-Açúcar de Rio Branco (COOPERB), localizada em Lambari D'Oeste (MT), sob coordenadas geográficas de 15°19'08" latitude sul, 58°00'30" longitude oeste e altitude média de 186 m.

O clima da região segundo a classificação de Köppen é tropical quente e sub-úmido (Aw) com 4 meses de seca, de junho a setembro. A precipitação média anual é de 1500 mm, com intensidade máxima nos meses de janeiro, fevereiro e março. A temperatura média anual é de 24°C e a máxima de 40°C (SILVA et al., 2012). O solo da região é classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (EMBRAPA, 2006).

A área experimental ocupava aproximadamente 15 ha (Figura 1), com 400 m x 373 m, sendo manejada sob sistema plantio direto e colheita mecanizada com o cultivo da cana-de-açúcar, desde 2004. A cultura já se encontrava a cerca de 1,60 m de altura no momento da coleta de dados, sendo renovado uma única vez desde o início da atividade na fazenda.

Um dos fatores mais relevantes durante o processo de colheita da cana-de-açúcar, é que a mesma foi realizada em no período chuvoso, e com alta umidade no solo. Como este processo era incipiente na fazenda, realizado apenas com colhedoras de marca Case de sistema de esteira, muitas informações específicas referentes aos maquinários utilizados não foram obtidos (sistema de transbordo como: peso total, tipo e pressão de inflação dos pneus).

O plantio da cultura foi feito com espaçamento entrelinhas entre linhas de 1,5m. A área foi demarcada por pontos em grade de 11 colunas e 10 linhas, distanciados de 30m na direção Y e 36m na direção X, perfazendo um total de 110 pontos amostrais (Figura 2).

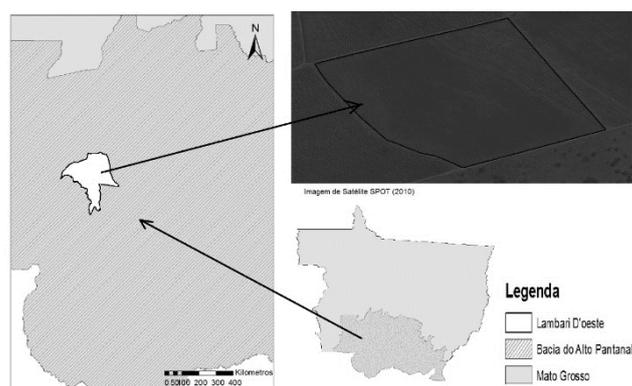


FIGURA 1 - Localização da área experimental no município de Lambari D'Oeste, MT.

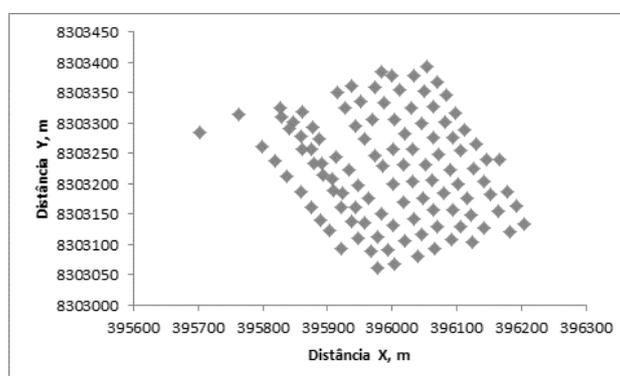


FIGURA 2 - Grade de amostragem com 110 pontos (30 x 36m).

Os pontos de amostragem foram georreferenciados com GPS, marca Garmin®, no sistema de projeção em UTM (Sistema Universal Transverso de Mercator). Após o georreferenciamento dos pontos foram realizadas as medições. Não ocorreu avaliação do tráfego da colheita, por não dispor desses dados o local de medição foi na linha da cana, pois a colheita mecanizada ainda estava em fase de organização e adaptação principalmente no planejamento dos talhões.

Para determinação da resistência do solo à penetração, utilizou-se um penetrômetro de impacto com ângulo de cone de 30° modelo IIA/Planalsucar-Stolf, onde para cada impacto (massa de 4 kg) foi anotada a profundidade atingida até chegar a 45 cm. Os dados obtidos foram apresentados em números de impactos.dm⁻¹ (N), os quais, por sua vez, foram transformados para kgf.cm⁻² usando a equação $RP = 5,6 + 6,89 N$, onde RP (resistência a penetração) representa uma estimativa da resistência do solo à penetração, porém, por não considerar a umidade do solo não pode ser indicativo da compactação do solo. Esses valores, foram multiplicados pela constante 0,0980665 para transformação das unidades em MPa, conforme Stolf (1991).

Para um melhor aproveitamento das potencialidades do penetrômetro de impacto é importante, segundo VAZ et al. (2002) que as medidas sejam realizadas nas faixas de umidade entre a capacidade de

campo e o ponto de murcha permanente, uma vez que a diferença de umidade está diretamente relacionada a variações da resistência à penetração. Por isso, simultaneamente à determinação resistência à penetração foram coletadas amostras de solo, para determinação de gravimétrica de umidade do solo. Foram feitas coletas ao acaso, totalizando 20 pontos amostrais. Sendo cada ponto com 3 profundidades de 0 a 15 cm, 15 a 30 cm e 30 cm a 45 cm. As amostras foram coletas com trado holandês e armazenadas em recipientes plásticos para evitar a perda de umidade. No laboratório foram retiradas 30 g de solo por amostra, pesadas e levadas para a estufa de circulação de ar forçado a 105°C por 24 horas. O teor de água no solo foi obtido pelo método gravimétrico, conforme Embrapa (1997), posteriormente foi calculado a média de umidade de cada camada.

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva (média, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose) e para verificação de dependência espacial, interpolação de dados e construção de mapas foi empregada análise geoestatística utilizando programa Geoest conforme Vieira (2000). Foram construídos e ajustados semivariogramas, partindo das pressuposições de estacionariedade da hipótese intrínseca e do cálculo da semivariância.

Os semivariogramas que apresentaram dependência espacial foram ajustados a um modelo onde foram definidos os parâmetros:

C_0 = efeito pepita,

a = alcance,

$C_0 + C_1$ = patamar e

C_1 = variância estrutural.

O efeito pepita é o valor da semivariância para a distância zero e representa o componente da variação ao acaso; o patamar é o valor da semivariância onde a curva estabiliza sobre um valor constante; o alcance é a distância da origem até onde o patamar atinge valores estáveis, considerando o limite da dependência espacial da grandeza medida.

Foram ajustados aos semivariogramas os seguintes modelos:

(a) esférico (Esf),

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 [1,5 (h/a) - 0,5 (h/a)^3] \text{ para } 0 < h < a,$$

a,

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \text{ para } h > a,$$

(b) exponencial (Exp),

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-3 h/a)] \text{ para } 0 < h < d,$$

onde d = distância máxima na qual o semivariograma é definido,

(c) gaussiano (Gau),

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-3 h^2/a^2)].$$

A razão entre a variância estrutural e o patamar $C_1/(C_1+C_0)$ expressa em

percentagem, permitiu a classificação do grau de dependência espacial, a qual segundo Robertson (1998) é considerada:

Fraca se esta razão for $\leq 25\%$,

Moderada quando esta razão está entre 25 e 75%

e

Forte se a razão for $> 75\%$.

Observada a existência de dependência espacial definida pelo semivariograma, os valores vizinhos semelhantes possibilitaram estimar valores para qualquer local onde a variável não foi medida usando-se a "krigagem", que estima valores com as condições de estimativa sem tendenciosidade e com desvios mínimos em relação aos valores conhecidos, ou seja, com variância mínima (VIEIRA, 2000).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de resistência à penetração analisados pela estatística descritiva estão na Tabela 1, onde pode-se observar que, os valores mínimos de resistência mecânica do solo a penetração (RMP) não variaram em todas as profundidades, apresentando o valor de 0,549 MPa, enquanto os valores máximos variaram de 6,025 a 10,13 MPa apresentando resistência penetração relativamente alta, considerando valores críticos estabelecidos por Susuki et al. (2007) em 2,0 MPa e em torno de 2,5 MPa para solos argilosos (CANARACHE, 1990).

TABELA 1 - Estatística descritiva dos dados dos valores de resistência mecânica do solo a penetração (MPa), nas várias camadas (cm) na área estudada.

Var. (cm)*	Média	Variância	DP	CV (%)
0 - 5	1,78	1,196	1,094	61,44
5 - 10	3,313	2,255	1,502	45,33
10 - 15	3,711	2,692	1,641	44,22
15 - 20	3,513	2,308	1,519	43,25
20 - 25	3,488	2,535	1,592	45,65
25 - 30	3,219	1,887	1,374	42,67
30 - 35	2,954	1,863	1,365	46,22
35 - 40	2,862	1,77	1,33	46,48
40 - 45	2,939	1,93	1,389	47,26

Var. (cm)*	VMi	VMa	CA	CC	TNKS
0 - 5	0,549	6,025	0,8286	1,164	0,258
5 - 10	0,549	7,394	0,3747	0,3259	0,207
10 - 15	0,549	10,13	1,322	3,629	0,247
15 - 20	0,549	7,394	0,7612	0,9279	0,241
20 - 25	0,549	8,763	1,021	1,201	0,268
25 - 30	0,549	7,394	1,312	2,112	0,280
30 - 35	0,549	7,394	1,179	1,668	0,258
35 - 40	0,549	7,394	1,512	2,1	0,295
40 - 45	0,549	7,394	1,056	1,543	0,241

*Var. = variáveis, DP = desvio padrão, CV = coeficiente de variação, VMi = valor mínimo, VMa = valor máximo, CA = coeficiente de assimetria, CC = coeficiente de curtose, TNKS = teste de normalidade KS [Kolmogorov Smirnov - D tab (0,05)] = 0,12970.

De acordo com USDA (1993) valores acima de 2 MPa começam a restringir o pleno crescimento das raízes de muitas culturas anuais. Contudo, estes valores altos podem ter sido influenciados pelos baixos valores de umidade do solo no momento da medição.

A variabilidade dos dados foi alta considerando os valores do CV's da Tabela 1, seguindo a classificação de Warrick; Nielsen (1980), que considera CV < 12% baixo, CV entre 12 e 24% médio e CV > 24% alto. De acordo com Oliveira et al. (2013) altos valores de CV é uma estimativa de maior heterogeneidade dos atributos, indicando maior variabilidade.

Os coeficientes de assimetria e curtose expressam a normalidade de distribuição de frequência dos dados. De

As maiores médias, consideradas como altas foram obtidas na profundidade de 10 - 25 cm, sendo semelhantes aos de Silva et al. (2012) de acordo com o autor a elevada resistência do solo pode ser devida ao tráfego das máquinas agrícolas utilizadas para a colheita mecanizada.

Arshad et al. (1996) e Fuentes et al. (2006) consideram que esses valores podem ser limitantes ao crescimento radicular, dificultando o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar e, conseqüentemente, reduzindo o potencial produtivo. De acordo com Salire et al. (1994)

acordo com o teste de normalidade de Kolmogorov Smirnov, não houve normalidade de distribuição de frequência para nenhuma profundidade medida de resistência a penetração.

Comparando os valores em profundidade, pode ser observado que o valor médio de resistência do solo à penetração na profundidade de 0 - 5 cm foi classificado como moderado segundo Soil Survey Staff (1993) e nas outras profundidades estudadas os valores foram classificados como alto. Na camada de 5 - 10 cm o valor médio encontrado foi de 3,313 MPa, sendo semelhante ao valor encontrado por Carvalho et al. (2008) que obtiveram o valor de 3,51 MPa na camada de 0 - 10 cm.

sistemas com pouco revolvimento do solo e tráfego de máquinas pesadas, podem promover compactação do solo até 0,4 m.

A análise geoestatística por meio da construção dos semivariogramas permitiu verificar a presença de dependência espacial nas propriedades analisadas, a partir do ajuste do modelo matemático que melhor ilustrasse o comportamento espacial da variável em função da distância. Todos os semivariogramas que apresentaram patamares definidos e ajustou-se a um tipo de modelo estão na Figura 3.

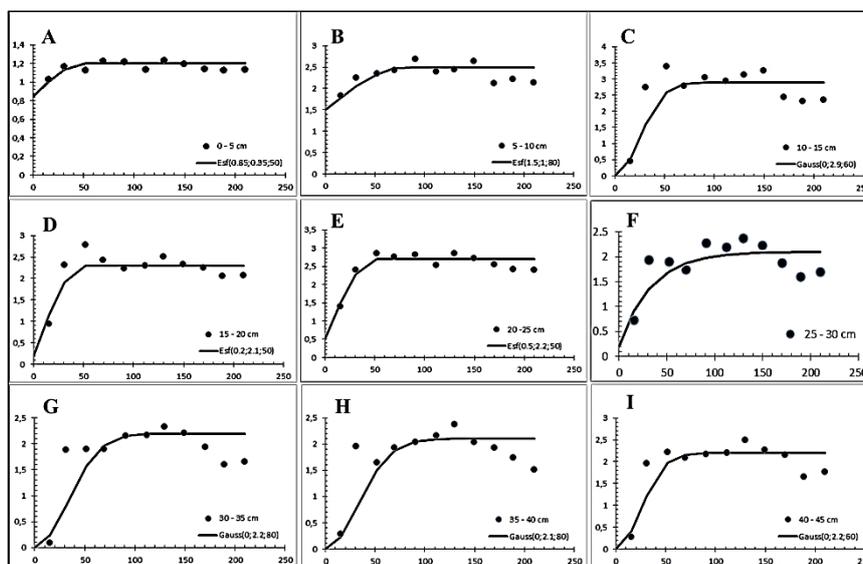


FIGURA 3 - Semivariogramas ajustados pelos modelos esféricos (Esf.) gaussiano (Gauss.) e exponencial (Exp.) para a resistência à penetração nas profundidades que apresentaram dependência espacial, juntamente com os parâmetros feito pepita (C_0), variância estrutural (C_1) e alcance (a), sendo A = 0 - 5 cm; B = 5 - 10 cm; C = 10 - 15 cm; D = 15 - 20 cm; E = 20 - 25 cm; F = 25 - 30 cm; G = 30 - 35 cm; H = 35 - 40 cm; I = 40 - 45 cm.

No nível de resistência mecânica do solo a penetração, todas as camadas apresentaram dependência espacial. Verifica-se que os modelos predominantes são os esféricos e gaussianos. Segundo Vieira (2000), o modelo matemático esférico é o que predomina nos trabalhos em ciência do solo.

A capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) são considerados os limites máximo e mínimo, respectivamente, de água disponível no solo. A cultura e seu sistema radicular são considerados na determinação do PMP. A partir destes limites, pode-se determinar a capacidade de armazenamento de água disponível em cada classe de solo (LEMOS; SANTOS,

1984). De acordo com os autores, para esse tipo de solo a CC ideal é 30% e o PMP < 15% de umidade.

As médias da umidade nas três camadas foram próximas, variando de 18,71% na primeira camada, 17,39% na segunda e 20,19% na camada de 30 - 0,45 cm, ou seja, o solo estava na condição seca, o que pode ter dificultado a obtenção da medida com o penetrômetro de impacto e elevado os valores de resistência à penetração. Segundo Vaz et al. (2002) em solos muito secos a medida é muito demorada e dificultada pela excessiva resistência do solo ao impacto e a introdução da haste do penetrômetro no solo.

Contudo, para o estudo de variabilidade espacial, onde se busca identificar manchas de variação no espaço dos valores de resistência à penetração numa mesma profundidade, não há relatos de que a umidade do solo interfira na discussão e interpretação dos mapas de valores de resistência à penetração dependentes espacialmente.

Os semivariogramas com distância máxima de 250 metros foram submetidos ao ajuste (Figuras 3A ao 3I).

A resistência do solo à penetração apresentou dependência espacial com ajuste dos modelos esféricos, exponencial e gaussiano, sendo o alcance de dependência espacial variando de 50 a 80 m, o que indica semelhança entre os vizinhos separados por uma distância de raio de até 80 m.

Concordando com Carvalho et al. (2008) e Oliveira et al. (2013) que observaram em seus estudos que as variáveis analisadas apresentaram dependência espacial, mostrada pelos modelos de semivariogramas. Pode-se observar também que todas as camadas apresentaram dependência espacial, indicando que a distância de amostragem foi adequada.

Os valores de resistência mecânica do solo à penetração foram interpolados por “krigagem” considerando a dependência espacial e construídos mapas de isolinhas (Figura 4). De acordo com os mapas de “krigagem”, verifica-se a existência de áreas compactadas em todas as profundidades, exceto na camada superficial (0 - 5 cm).

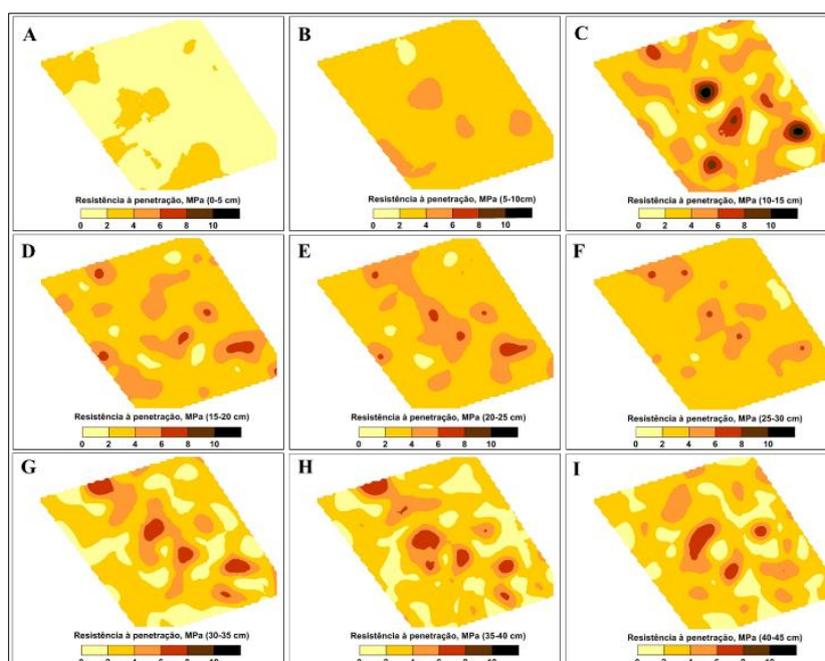


FIGURA 4 - Mapas da distribuição espacial da resistência mecânica do solo à penetração em diferentes camadas de um solo cultivado com cana-de-açúcar, sendo A = 0 - 5 cm; B = 5 - 10 cm; C = 10 - 15 cm; D = 15 - 20 cm; E = 20 - 25 cm; F = 25 - 30 cm; G = 30 - 35 cm; H = 35 - 40 cm; I = 40 - 45 cm.

Esses resultados fortalecem o entendimento de Carvalho et al. (2008) de que este resultado provavelmente tenha ocorrido em consequência do sistema de colheita mecanizada que exerce uma pressão no solo, provocando a compactação, principalmente nas camadas subsuperficiais.

Nos mapas de “krigagem”, verifica-se a existência de variabilidade espacial em todas as profundidades. Nas camadas de 0 - 5 cm e 5 - 10 cm de profundidade foi observado maior variação na resistência à penetração, sendo que os maiores valores foram localizados nas áreas

centrais do talhão de cana amostrado. Estes resultados podem ser decorrentes do tipo de sistematização do solo no talhão, tráfego intenso de maquinários nessa área central ou manejo na colheita mecanizada.

Portanto, torna-se necessário o monitoramento espacial da resistência do solo à penetração para identificação de locais mais susceptíveis a compactação do solo, auxiliando assim no planejamento para o adequado manejo do solo e consequentemente melhorias na produtividade.

CONCLUSÕES

Os dados obtidos mostraram uma dependência espacial foi encontrada para a resistência do solo à penetração em todas as camadas analisadas na cultura da cana-de-açúcar colhida mecanicamente. Na camada de 10 - 45 cm), houve aumento da resistência à penetração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; BLUME, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em argissolo franco arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.2, p.275-282, 2003.
- ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141. (SSA Special Publication, 49).
- CANARACHE, A.P.A. Generalized semiempirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil and Tillage**, Amsterdam, v.16, n.1-2, p.51-70, 1990.
- CARVALHO, L.A.; NETO, V.J.M.; SILVA, LF; PEREIRA, J.G; NUNES, W.A; CHAVES, C.H.C. Resistência mecânica do solo à penetração (RMP) sob cultivo de cana-de-açúcar, no município de Rio Brilhante - MS. **Agrarian**, Dourados, v.1, n.2, p.7-22, 2008.
- CASTRO, S.S.; ABDALA, K.; SILVA, A.A.; BORGES, V.M.S. A expansão da cana-de-açúcar no cerrado e no estado de Goiás: elementos para uma análise espacial do processo. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v.30, n.1, p.171-191, 2010.
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, safra 2013/2014**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_04_10_09_00_57_boletim_cana_portugues_-_4o_lev_-_13.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2018.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPS, 1997. 212p.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/SPI, 2006. 306p.
- FUENTES, R.L.; RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M.F.; FERREIRA, R.R.M. Evolução de propriedades físicas do solo em função dos diferentes sistemas de preparo em culturas anuais. **Semina**, Londrina, v.27, n.2, p.205-220, 2006.
- GOMES, N.M.; SILVA, A.M.; MELLO, C.R.; FARIA, M.A.; OLIVEIRA, P.M. Métodos de ajustes e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.3, p.435-443, 2007.
- 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.169-77, 2005.
- IAIA, A.M.; MAIA, J.C.S.; KIM, M.E. Uso do penetrômetro eletrônico na avaliação da resistência do solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.2, p.523-530, 2006.
- JUNQUEIRA JUNIOR, J.A.; SILVA, A.M.; MELLO, C.R.; FERREIRA PINTO, D.B. Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em sub-bacia hidrográfica de cabeceira. **Ciência & Agrotecnologia**, Lavras, v.32, n.3, p.914-922, 2008.
- LEMONS, R.C.; SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 2ª ed. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: EMBRAPA/SNLCS, 1984. 102p.
- MACEDO, I.C. **Geração de energia elétrica a partir da biomassa no Brasil: situação atual, oportunidades e desenvolvimento**. Relatório para o MCT. 2001. Disponível em: <http://www.cgee.org.br/arquivos/estudo003_02.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2018.
- MAPA. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Cana-de-açúcar**. 2016. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em: 24 mar. 2018.
- OLIVEIRA, E.G.; FERREIRA, M.E.; ARAÚJO, F.M. Diagnóstico do uso da terra na região centro-oeste de Minas Gerais, Brasil: a renovação da paisagem pela cana-de-açúcar e seus impactos socioambientais. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v.24, n.3, p.545-556, 2012.
- OLIVEIRA, I.A.; CAMPOS, M.C.C.; SOARES, M.D.R.; AQUINO, R.E.; MARQUES JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, E.P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um cambissolo háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.4, p.1103-1112, 2013.
- PEDROTTI, A.; MÉLLO JÚNIOR, A.V. **Avanços em ciência do solo: a física do solo na produção agrícola e qualidade ambiental**. 1ª ed. São Cristóvão: UFS, 2009. 212p.
- ROBERTSON, G.P. **GS+: geostatistics for the environmental sciences**. GS+ user's guide. Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152p.
- SALIRE, E.V.; HAMMEN, J.E.; HARDCASTLE, J.H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil Tillage Research**, Oxford, v.31, n.2-3, p.235-248, 1994.
- SILVA, W.R.N.; NUNES, M.C.N.; CALDEIRA, D.S.A.; ARANTES, M.A.; SOUZA L.H.C. Resistência à penetração de um latossolo vermelho sob o cultivo de cana-de-açúcar em diferentes manejos. **Revista Agrotecnologia**, Anápolis, v.3, n.2, p.49-61, 2012.
- SOIL SURVEY STAFF. **Soil survey manual**. Washington, USDA, 1993. 437p. (Handbook, 18).
- SOUSA, Z.M; PRADO, R.M; PAIXÃO, A.C.S; CESARIN, L.G. Sistemas de colheita e manejo da palhada

Variabilidade espacial...

ALVES, G. M. S. et al. (2018)

de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.3, p.271-278, 2005.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.1, p.48-56, 2009.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de formulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.1, n.15, p.229-235, 1991.

SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; LIMA, C.L.R. Grau de Compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em latossolo e argissolo.

Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.42, n.8, p.1159-1167, 2007.

USDA. **Soil survey manual**. Washington: soil Survey Division Staff, 437p. (Handbook, 18). 1993.

VIEIRA, S.R. Uso de geoestatística em estudos de variabilidade espacial de propriedades do solo. In: NOVAIS, R.F. (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo 1**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Viçosa, p.3-87, 2000.

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 Press, 1980. p.319-344.