

Variabilidade espacial e estimativa de locais críticos de densidade do solo em um Latossolo Amarelo

Spatial variability and estimate of critical sites for bulk density in an Oxisol

Renato Paiva de Lima¹, Anderson Rodrigo da Silva¹, Maurício Javier de León²

¹ Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Av. Pádua Dias, 11 – Piracicaba-SP. CEP-13418-900

² Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Solos e Engenharia Rural, Rodovia BR 079, km 12, Areia-PB. CEP - 58397-000

RESUMO

O estado físico do solo se apresenta de forma complexa e deve ser analisado em função de um conjunto de indicadores específicos e suas inter-relações. O trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial da densidade do solo e efeitos correlatos de outros atributos físicos em área experimental de Latossolo Amarelo com a finalidade de detectar e estimar frações da área com valores críticos para o desenvolvimento radicular. Modelos lineares espaciais foram ajustados para a densidade do solo nas camadas 0-0,2 e 0,2-0,4 m, considerando o processo gaussiano. Foram ajustados modelos, com e sem uma componente principal, além de modelos contendo como covariável a densidade na camada anterior, para a profundidade de 0,2-0,4 m. Uma vez realizada a krigagem, mapas de probabilidade de se obter densidades acima de $1,4 \text{ kg dm}^{-3}$ foram construídos por meio de 1000 simulações da distribuição preditiva. Houve a presença de frações da área que apresentaram valores críticos de densidade do solo. Não houve efeitos correlatos dos teores de umidade, areia, silte e argila nos níveis de densidade do solo, no entanto, houve influência da camada superior nos níveis de densidade da camada de 0,2-0,4 m. Foi evidenciada, nas duas camadas, a presença de locais com mais de 80% de

probabilidade de ocorrência de níveis críticos de densidade do solo.

Palavras-chave: manejo do solo, geoestatística, física do solo.

ABSTRACT

The soil physical condition is complex and must be analyzed in terms of a set of specific indicators and their inter-relations. This work aimed to evaluate the spatial variability of bulk density and its related effects from other physical attributes in an experimental area of Oxisol in order to detect and estimate sites with critical values for root development. Spatial linear models were fitted to the bulk density in layers 0-0.2 and 0.2-0.4 m, considering the Gaussian process. Models were adjusted with and without a principal component covariate, and models containing the covariate bulk density in the previous layer, to depth of 0.2-0.4 m. Performed kriging, probability maps to obtain bulk density above 1.4 kg dm^{-3} were constructed based on 1000 simulations from the predictive distribution. There were sites with critical values of bulk density. There were no related effects of moisture, sand, silt and clay content with the bulk density levels. However, there was influence of the upper layer on the layer 0.2-0.4 m for the bulk density levels. There was evidence of sites with over 0.80 probability

of occurrence of critical levels of bulk density, in the two layers.

Key words: soil tillage, geostatistics, physical soil.

INTRODUÇÃO

O conhecimento da variabilidade dos atributos do solo constitui-se numa importante ferramenta para o emprego do manejo adequado, considerando a aplicação de fertilizantes, estratégias de amostragem e planejamento de delineamento de pesquisa em campo (Cavalcante et al., 2007). Sabe-se que esta variabilidade ocorre em função de vários fatores, como: tipo de solo, manejo adotado no solo e nas plantas, da cultivar, processos erosivos, do relevo, entre outros (Silva et al., 2009).

Carneiro et al. (2009) comentam que o desempenho das culturas agrícolas está relacionado a fatores que envolvem a dinâmica dos componentes do solo. Modificações nos atributos físicos, causados principalmente pelo manejo, refletem em diferentes manifestações de seus atributos físicos, os quais poderão ser desfavoráveis à conservação do solo. No entanto, a qualidade física do solo pode ser avaliada pelo comportamento de suas propriedades (Lima et al., 2013; Pignataro Netto et al., 2009).

Essa avaliação é complexa e deve ser realizada em função de um conjunto de indicadores específicos (atributos) e suas inter-relações (Carneiro et al., 2009), com sua eventual inclusão em um modelo de avaliação da qualidade do solo, já que se tem verificado, que indicadores isolados não são suficientes para se apontar uma análise segura das condições física de determinado sistema (Gao et al., 2012; Vaz et al., 2011).

Ribon e Tavares Filho (2008) destacam que propriedades importantes como: densidade do solo, umidade, teor de argila, juntamente com outros componentes indicadores da qualidade física do solo, podem favorecer o diagnóstico do grau de compactação do solo, sendo de fundamental importância para escolha

do sistema de preparo mais adequado ao crescimento e desenvolvimento das culturas.

A compactação do solo pelo uso de práticas inadequadas de manejo resultam diretamente em aumento na densidade do solo, diminuição do teor de umidade e modificação do movimento da água no solo (Carvalho et al., 2008), sendo um fator altamente influenciado pela textura (Ribon e Tavares Filho, 2008). De acordo com Assis et al. (2009) e Gao et al. (2012), a densidade do solo afeta consideravelmente a quantidade de poros, modificando o movimento de água no solo e o fluxo de oxigênio dentro do sistema.

Para o acompanhamento desses atributos físicos do solo de forma precisa, Carvalho et al. (2010) comentam que o conhecimento espacial dos atributos do solo em determinada área pode ser importante para a avaliação dos efeitos da agricultura sobre a qualidade ambiental, assim como é importante para a definição da intensidade de amostragem do solo para sua caracterização.

Neste contexto, o trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial da densidade do solo levando em consideração os efeitos correlatos de outros atributos físicos em área experimental de Latossolo Amarelo com a finalidade de detectar e estimar frações da área com valores críticos para o desenvolvimento radicular.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados são provenientes de análises físicas do solo, a partir de amostras coletadas no período de agosto de 2010 a maio de 2011, em uma área na Fazenda Experimental Chã-de-Jardim, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, município de Areia, localizado na microrregião do Brejo Paraibano, sob as coordenadas geográficas 6° 58' 12" S e 35° 42' 15" W.

Segundo Köppen, o clima é As', quente e úmido com chuvas de outono-inverno com precipitações médias anuais de 1.200 a 1.400 mm (sendo que mais de 75% destas estão concentradas no período de março a agosto), temperatura média anual oscilando entre 22 e

26 °C e umidade relativa do ar entre 75 e 87% (Brasil, 1972).

De acordo com Embrapa (2006), o solo é classificado como Latossolo Amarelo, textura argilo-arenosa, conforme a Tabela 1. A área em

estudo vem sendo utilizada sob intervalos de cultivos nos últimos 25 anos e no momento da amostragem estava sob pousio após colheita de milho. No último cultivo, preparo do solo foi realizado com uma aração e uma gradagem.

Tabela 1. Granulometria e classificação textural da área experimental, Fazenda Experimental Chã-de-Jardim

Profundidade (m)	----- g kg ⁻¹ -----		
	Areia	Silte	Argila
0,0-0,2	537	77	386
0,2-0,4	442	102	456
	Classificação textural		
0,0-0,2	----- Argilo arenoso -----		
0,2-0,4	----- Argilo arenoso -----		

As amostras foram coletadas nas camadas de 0,0-0,2m e 0,0-0,4 m de profundidade, referenciadas em um “grid” de 30 × 30 m, com

um total de 49 pontos por camada, espaçados a cada 5 m (Figura 1), totalizando 98 pontos amostrais.

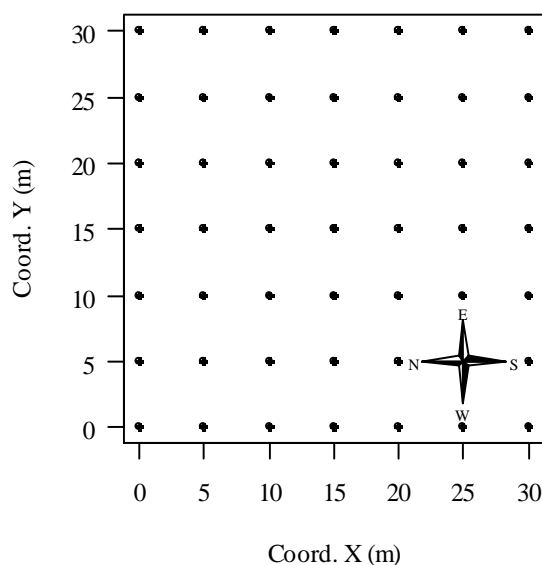


Figura 1. Grade amostral da área experimental.

Os atributos físico-hídricos utilizados no estudo foram: densidade do solo (kg dm⁻³), umidade (g g⁻¹), textura (areia, silte e argila, em g kg⁻¹). Anéis metálicos de volume conhecido (90,5 cm³) foram utilizados na coleta de amostras não deformadas para determinação da densidade do solo.

As amostras foram coletadas e transportadas até o Laboratório de Física do Solo do Centro de Ciências Agrárias da

Universidade Federal da Paraíba, onde a umidade foi determinada através do método padrão da estufa e a granulometria pelo método do densímetro, conforme metodologia da Embrapa (1997).

A distribuição gaussiana para a densidade do solo em cada camada foi verificada por meio de análise gráfica de histogramas e análise da curva do máximo da função log-verossimilhança

de acordo com a transformação potência ótima de Box-Cox.

A dependência espacial foi verificada pressupondo estacionariedade do processo

espacial, construindo semivariogramas experimentais clássicos (Matheron), de acordo com a equação (1):

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

em que, $\gamma(h)$ é a semivariância estimada para um dado $N(h)$ número de pares de observações $[Z(s_i), Z(s_i + h)]$ separados pela distância h .

Para a análise do grau de dependência espacial (GD) das variáveis utilizou-se a

classificação adaptada de Cambardella et al. (1994), de acordo com a equação (2):

$$GD\% = \frac{\tau^2}{\tau^2 + \sigma^2} \times 100 \quad (2),$$

em que em que τ^2 é o efeito pepita e $\tau^2 + \sigma^2$ é o patamar do semivariograma teórico. Considerou-se forte dependência espacial quando GD entre 0 e 25%, moderada quando entre 25 e 75% e de fraca quando superior a 75%.

Modelos lineares espaciais foram ajustados para a densidade do solo em cada camada, considerando o processo gaussiano $\{Z(s), s \in S\}$, $S \subset \mathfrak{R}^2$, sendo \mathfrak{R}^2 um espaço euclidiano bidimensional e supondo que os dados $Z(s) = [Z(s_1), \dots, Z(s_n)]$ deste processo foram tomados em locais conhecidos s_i e gerados a partir do modelo $Z(s) = X\beta + \varepsilon(s)$, com $Z(s) \sim N_n(X\beta, \Sigma)$.

Análises de componentes principais a partir da matriz de correlações foram realizadas com os atributos umidade, argila, silte e areia de cada camada com a finalidade de utilizar os escores da primeira (ou primeira e segunda) componente como covariável nos modelos assumidos para descrever a densidade do solo.

Para a camada 0,0-0,2 m foram ajustados dois modelos, com e sem covariável componente principal da respectiva camada. Para a camada 0,2-0,4 m, além dos modelos com e sem covariável componente principal, também foram considerados modelos contendo como covariável a densidade na camada anterior, isto é, na camada 0,0-0,2 m.

A estimação dos parâmetros da parte determinística dos modelos lineares espaciais e aqueles do semivariograma foram realizados pelo método da máxima verossimilhança (MMV), considerando a distribuição gaussiana, de modo a maximizar a função log-verossimilhança, dada pela expressão (3):

$$\ell_{\Theta}[\theta | Z(s)] = -\frac{1}{2} (n \log(2\pi) + \log|\Sigma| + [Z(s) - X\beta]^T \Sigma(\alpha)^{-1} [Z(s) - X\beta]) \quad (3),$$

em que Θ representa o espaço paramétrico do vetor $\hat{\theta} = [\hat{\beta}, \hat{\alpha}]^T$ que maximiza a função $\ell_{\Theta}[\theta | Z(s)]$, sendo β o vetor de parâmetros de posição e $\alpha = [\tau^2, \sigma^2, \phi]$ os parâmetros do semivariograma; $Z(s) = [Z(s_1), \dots, Z(s_n)]$ representa o vetor de observações do atributo densidade do solo na localização s ; X é a matriz de incidência dos efeitos β ; Σ é a matriz de

variâncias e covariâncias das observações, cuja forma paramétrica é $\Sigma(\alpha) = \tau^2 I + \sigma^2 R(\phi)$, em que τ^2 é o efeito pepita (variância de pequena escala), σ^2 é a variância do processo espacial e $R(\phi)$ é a matriz de correlações, função da distância entre as observações e do parâmetro ϕ . O modelo exponencial foi utilizado para descrever a dependência espacial entre as

observações em cada camada, isto é, foi o modelo adotado para constituir a matriz de covariâncias.

Para a escolha dos modelos lineares espaciais foi adotado o critério da informação de Akaike (AIC), de acordo com a expressão (4):

$$AIC = -2\log \text{Likelihood} + 2p \quad (4)$$

sendo 'p' o número de parâmetros do modelo. O modelo com menor AIC foi adotado.

Além disso, testes da razão de verossimilhanças (TRV) também foram

realizados para comparar modelos encaixados, de acordo com a aproximação (5):

$$2[\log \text{Likelihood}(\text{maior}) - \log \text{Likelihood}(\text{menor})] \sim \chi_v^2 \quad (5),$$

sendo 'v' obtido pela diferença entre o número de parâmetros do maior e do menor modelo em comparação.

Uma vez escolhido um modelo linear espacial para uma dada camada contendo covariável, os resíduos do modelo foram extraídos, calculando $\hat{\varepsilon}(s) = \mathbf{Z}(s) - \mathbf{X}\hat{\beta}$, para proceder à interpolação por krigagem ordinária destes resíduos e posteriormente adicionando às predições o valor da média de densidade na camada, isto é, foi realizada krigagem universal quando da escolha de modelos com covariável.

Realizada a krigagem, mapas de probabilidade de se obter densidades acima de $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ foram construídos por meio de 1000 simulações da distribuição preditiva. Como limite crítico da densidade do solo ($1,4 \text{ g cm}^{-3}$) para elaboração dos mapas preditivos, foi utilizada a classificação de Reichert et al. (2003), em que o mesmo destaca que solos com teores de argila acima de 500 g kg^{-1} (50%), tem seu limite crítico ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas estabelecido em $1,4 \text{ kg dm}^{-3}$. Embora a Tabela 1 não apresente em média, na caracterização do perfil, em ambas as camadas, 50% de argila, em análise individual dos 49 pontos coletados, dados utilizados para construção dos modelos de predição, foram constatadas amostras com teores desta fração granulométrica que chegaram a 535 g kg^{-1} , evidenciando possíveis pontos semelhantes à abordagem realizada por Reichert et al. (2003) com relação a textura e densidade do solo.

Todas as análises foram realizadas com o pacote geoR (Diggle e Ribeiro Jr., 2007) do software R versão 2.15.2 (R Core Team, 2012).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 observa-se que a densidade do solo (DS) nas duas camadas apresentam distribuição aproximadamente simétrica em torno dos seus valores médios. A aproximação da distribuição gaussiana é mais evidente na camada 0,0-0,2 m. Além disso, os máximos das funções log-verossimilhança em função do parâmetro da transformação potência são obtidos com $\lambda \approx 1,5$, de modo que se considerou não necessária a transformação para proceder à estimação considerando a distribuição gaussiana.

Através dos histogramas (Figura 2), observam-se os níveis de densidade do solo dentro das duas camadas analisadas. Verifica-se que houve pontos que apresentaram densidade acima de $1,4 \text{ kg dm}^{-3}$. Na camada de 0,0-0,2 m, grande parte dos valores ficaram compreendidos entre 1,2 e $1,4 \text{ kg dm}^{-3}$, porém, houve valores acima de $1,5 \text{ kg dm}^{-3}$, rompendo o limite crítico.

Na camada 0,2-0,4 m os valores de densidade também se concentraram entre 1,2 e $1,4 \text{ kg dm}^{-3}$. No entanto, esta camada apresentou com mais frequência pontos acima de $1,4 \text{ kg dm}^{-3}$, ultrapassando em algumas amostras, $1,5 \text{ kg dm}^{-3}$.

Pela análise de componentes principais para a camada 0,0-0,2 m, a primeira componente principal reteve 84% da variância total, com o seguinte autovetor: CP1 = - 0,39umidade + 0,62argila - 0,50silte - 0,46areia.

Para a camada 0,2-0,4 m, a primeira componente reteve 57% da variância total, com autovetor: CP1 = - 0,19umidade + 0,71argila -

0,05silte - 0,68areia, cuja interpretação prática é de diferença entre os teores de argila e areia na camada 0,2-0,4 m.

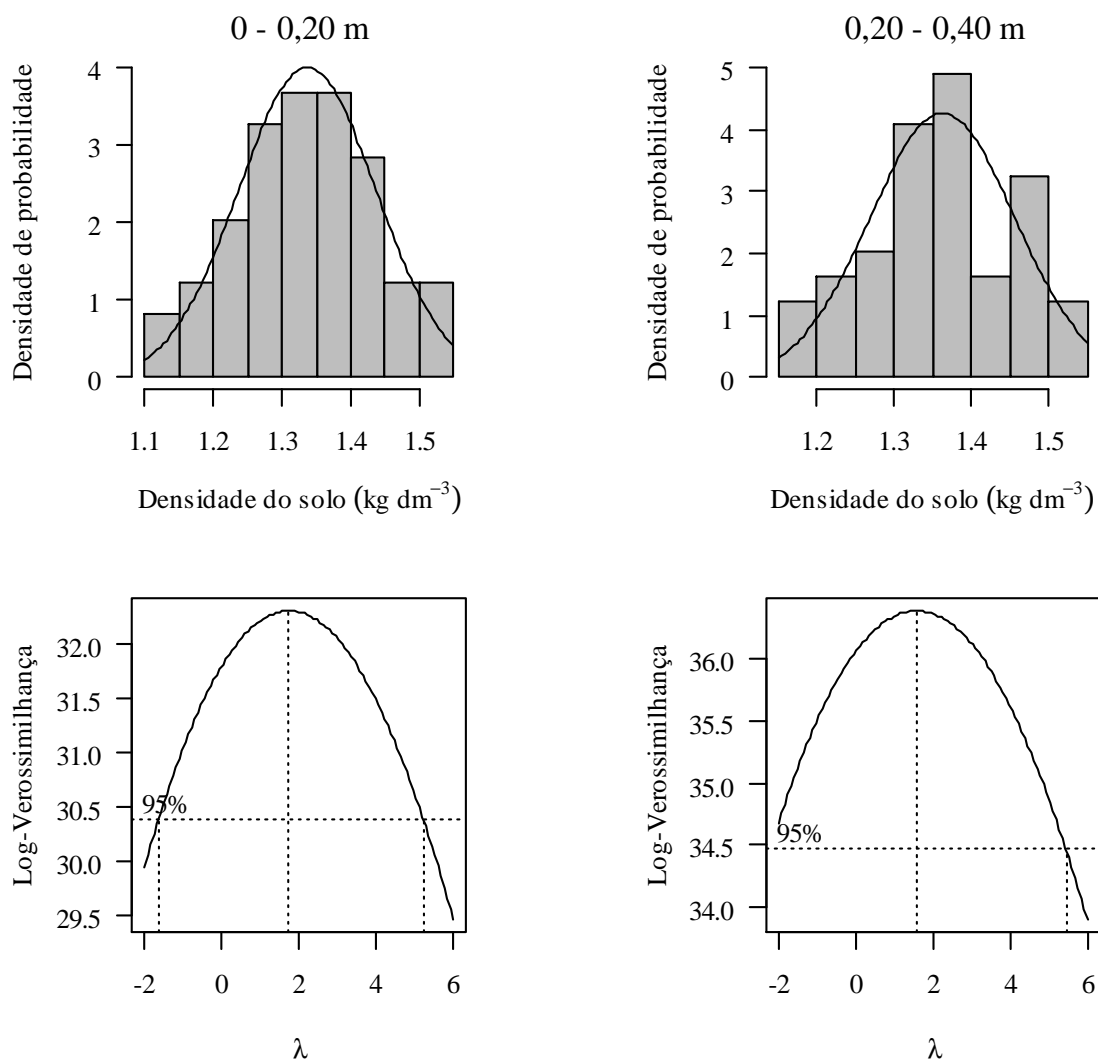


Figura 2. Histograma da densidade do solo nas duas camadas (0-0,20 e 0,20-0,40 m) e valores da função log-verossimilhança em função do parâmetro de transformação potência ótima de Box-Cox, considerando a distribuição gaussiana.

Apenas os escores das primeiras componentes foram utilizados como covariáveis de suas respectivas camadas. Na Tabela 2 encontram-se as estimativas de máxima verossimilhança dos parâmetros dos modelos ajustados à densidade do solo das camadas.

Pela análise do índice GD%, verifica-se que há dependência espacial forte das densidades das duas camadas, em todos os modelos. Para a camada 0,0-0,2 m, observa-se que o modelo sem covariável apresentou menor AIC (-88,33) que o modelo contendo os escores da CP1 como covariável, isto é, não houve efeito das demais

variáveis (umidade, areia, silte e argila), aqui representadas pela CP1, na densidade do solo nesta camada. Além disso, o teste da razão de verossimilhanças indica que não há diferença significativa ($p > 0,05$) entre os modelos. Assim sendo, o modelo geoestatístico básico (média e variância constante) foi adotado para a primeira camada. Neste modelo, o alcance prático ficou em torno de 18 m.

Na camada 0,2-0,4 m o modelo com menor valor de AIC (-93,05) foi aquele com apenas a densidade da camada anterior como covariável.

Tabela 2. Estimativas, medidas da qualidade do ajuste e comparação de modelos.

Camada	$X\hat{\beta}$	$\hat{\tau}^2$	$\hat{\sigma}^2$	$\hat{\phi}$	GD%	AIC	TRV
0,0-0,2 m	1,3158	0,0011	0,0101	6,0546	10,19	-88,33	
	1,3164 + 0,002CP1	0,0011	0,0101	6,1229	10,13	-86,38	0,04 ^{NS}
0,2-0,4 m	1,3619	0,0011	0,0065	3,0449	24,42	-90,47	
	0,9249 + 0,3299DS1	0,0011	0,0066	5,0853	24,12	-93,05	4,58*
	1,3618 + 0,0043CP1	0,0011	0,0066	3,1650	24,15	-88,68	0,21 ^{NS}
	0,9239+0,3307DS1+0,0052CP1	0,0011	0,0065	5,0903	24,23	-91,45	0,39 ^{NS}

CP1 - componente principal da camada em análise; DS1 - densidade do solo na camada 0,0-0,2 m; GD% - grau de dependência espacial em porcentagem; AIC - critério da informação de Akaike; TRV - valor de qui-quadrado do teste da razão de verossimilhanças para modelos encaixados.

O TRV deste modelo em relação ao modelo com média constante indicou diferença significativa ($p < 0,05$). O TRV do terceiro modelo em relação ao primeiro foi não significativo ($p > 0,05$) e o TRV do maior modelo (com mais parâmetros) em relação ao modelo com Dens1 também não foi significativo ($p > 0,05$). Assim, para a segunda camada o modelo considerando a densidade da camada 0,0-0,2 m foi adotado, ou seja, não houve influência das demais variáveis físicas nos níveis de densidade

do solo desta camada, aqui representada pela CP1 (da camada de 0,2-0,4 m), porém, houve efeito da densidade do solo da camada superior. Neste modelo, o alcance prático ficou em torno de 15 m.

Na Figura 3 podem-se observar os mapas da probabilidade de se obter valores de densidade do solo acima de $1,4 \text{ kg dm}^{-3}$ nas duas camadas analisadas. Os mapas proporcionam a observação dos locais propensos a altos e baixos níveis de densidade do solo.

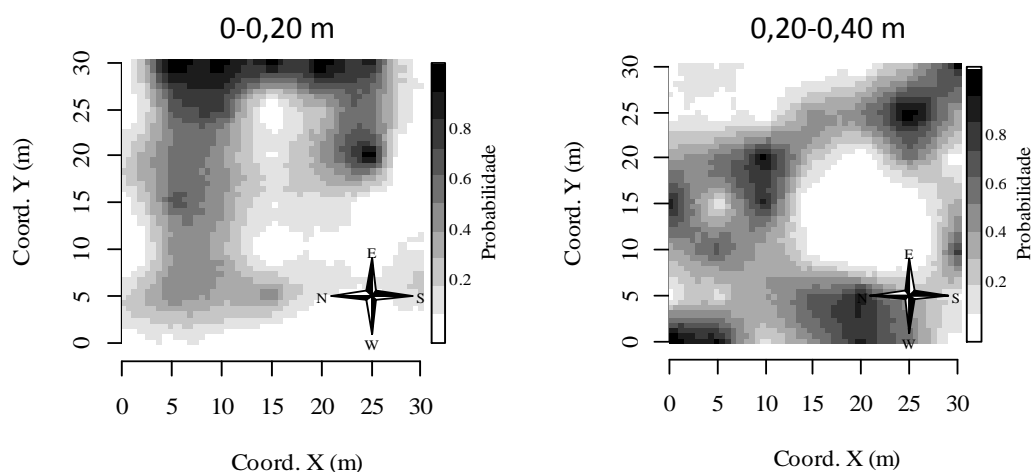


Figura 3. Distribuição espacial da probabilidade de ocorrência de densidade do solo acima de $1,4 \text{ kg dm}^{-3}$ nas camadas 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m com base em 1000 simulações da distribuição preditiva.

Na camada 0,0-0,2 m nota-se que há maior propensão (probabilidade) de valores críticos de densidade nas regiões mais ao leste da área experimental, evidenciando frações com mais de 80% de se obter locais mais densos neste setor e proporcionando a visualização de locais tendenciosos a altos níveis de densidade do solo.

A densidade do solo na camada 0,2-0,4 m não se comportou do mesmo modo que na camada anterior. Pode-se observar que há maior distribuição de pontos com valores críticos, porém, apresentando-se com distribuição aleatória ao longo da área experimental.

Os maiores níveis de probabilidade de ocorrência de densidade do solo acima de 1,4 kg dm⁻³ foram construídos através de simulações, porém, com dados reais. Estes pontos propensos a níveis críticos de densidade podem ser associados ao tráfego (Hamza et al. 2011; Han et al. 2010), uma vez que máquinas e implementos foram utilizados para o preparo do solo e conseqüentemente atuam mais constantemente em determinados locais do que em outros, afetando e proporcionando variações ao longo da área, principalmente em carregadores nas bordas da área, onde há maior tráfego, influenciando na distribuição preditiva da densidade. Cavalieri et al. (2009) reforçam que as diferentes cargas mecânicas aplicadas ao solo pelas máquinas agrícolas alteram o arranjo estrutural do solo, modificando sua densidade.

Portanto, a variação da densidade do solo na área experimental pode ser atribuída a entrada de máquinas na área para realização de operações de preparo do solo, que alteram as condições estruturais pela aplicação de pressão, culminando em aumento da densidade e formação de camadas compactadas (Lima et al., 2013).

CONCLUSÕES

Houve a presença de frações da área que apresentaram valores críticos de densidade do solo. Não houve efeitos correlatos dos teores de umidade, areia, silte e argila nos níveis de densidade do solo. No entanto, houve influência

da camada superior nos níveis de densidade da camada de 0,2-0,4 m.

Foi evidenciada, nas duas camadas, a presença de locais com mais de 80% de probabilidade de ocorrência de níveis críticos de densidade do solo.

REFERÊNCIAS

Assis RL, Lazarini GD, Lanças KP, Cargnelutti Filho, A (2009) Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. Engenharia Agrícola, 29: 558-568.

Brasil, Ministério da Agricultura. I - Levantamento exploratório reconhecimento de solos da Paraíba. II - Interpretação para uso agrícola dos solos do Estado da Paraíba. Rio de Janeiro: 1972, 670p. (MA, Boletim Técnico, 15, Série Pedologia, 8).

Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlem DL, Turvo RF, Konopa AE (1994) Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. Soil Science of América Journal, 47: 1501-1511.

Carneiro MAC, Souza ED, Reis EF, Pereira HS, Azevedo WR (2009) Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33: 147-157.

Carvalho LA, Neto VJM, Silva LF, Pereira JG, Nunes WAGA, Chaves CHC (2008) Resistência mecânica do solo à penetração (RMP) sob cultivo de cana-de-açúcar, no município de Rio Brilhante-MS. Agrarian, 01: 7-22.

Carvalho SRL, Vilas Boas GS, Fadigas FS (2010) Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos em solos originados nos sedimentos da formação barreiras. Cadernos de Geociências, 07: 63-79.

Cavalcante EGS, Alves MC, Souza ZM, Pereira GT (2007) Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, 31: 1329-1339.

Cavaliere KMV, Silva AP, Arvidsson J, Tormena CA (2009) Influência da carga mecânica de máquina sobre propriedades físicas de um Cambissolo Háplico. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33: 477-485.

Diggle PJ and Ribeiro Junior PJ. Model Based Geostatistics. New York: Springer, 2007. 228p.

Embrapa, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

Embrapa, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

Gao W, Watts CW, Ren T, Whalley WR (2012) The effects of compaction and soil drying on penetrometer resistance. Soil & Tillage Research, 125: 14-22.

Hamza MA, Al-Adawi SS, Al-Hinal KA (2011) Effect of combined soil water and external load on soil compaction. Soil Research, 49: 135-142.

Han W, Shi S, Zhu Z, Xue L, Juanli ZA (2011) Simulation test of the impact on soil moisture by agricultural machinery. African Journal of Biotechnology, 10: 16536-16540.

Lima RP, Leon RP, Silva AR (2013) Comparação entre dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração. Revista Ceres, 60: 577-581.

Pignataro Neto IT, Kato E, Goedert WJ (2009) Atributos físicos e químicos de um Latossolo vermelho-amarelo sob pastagens com diferentes históricos de uso. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33: 1441-1448.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation

for Statistical Computing, 2012. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 08 nov., 2012.

Reichert JM, Reinert DJ, Braida JA (2003) Qualidade dos solos sustentabilidade de sistemas agrícolas. Ciência e Ambiente, 27: 29-48.

Ribon AA, Tavares Filho J (2008) Estimativa da resistência mecânica à penetração de um Latossolo vermelho sob cultura perene no norte do estado do Paraná. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32: 1817-1825.

Silva JM, Passos ALR, Beltrão FAZ (2009) Análise espacial da densidade, umidade e resistência mecânica do solo à penetração sob sistemas de cultivo. Engenharia Ambiental, 06:103-118.

Vaz CMP, Manieri JM, Maria IC, Tuller M (2011) Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. Geoderma, 166: 92-101.