

# Determinação de locais com valores críticos de densidade do solo em um Latossolo Amarelo

Anderson Rodrigo da Silva<sup>1</sup>

## Resumo

O objetivo deste trabalho foi 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 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. Para a camada 0,0-0,2 m foram ajustados dois modelos, com e sem uma componente principal como covariável, formada a partir dos atributos umidade, argila, silte e areia 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. Uma vez 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. Foi possível observar que há locais com valores de densidade possivelmente críticos para o desenvolvimento das raízes. É razoável tomar medidas corretivas distintas para cada camada antes da implantação de novos experimentos.

**Palavras-chave:** resistência do solo a penetração, geoestatística, física do solo.

## 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., 2008).

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 (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

---

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Estatística e Experimentação Agronômica – ESALQ/USP

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.

Ribon & 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 no 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 & Tavares Filho, 2008). 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.

De acordo com Assis et al. (2009), a densidade do solo afeta consideravelmente a quantidade de poros, modificando o movimento de água no solo e o fluxo de oxigênio. 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 frações da área com valores críticos para o desenvolvimento radicular.

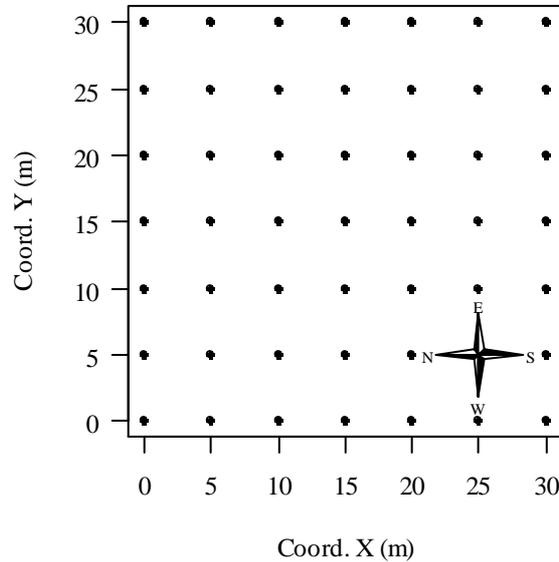
## **Material e Métodos**

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).

Segundo Embrapa (2006), o solo é classificado como Latossolo Amarelo, textura argilo-arenosa. 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 ultimo cultivo o preparo do solo foi realizado com uma aração e uma gradagem.

As amostras foram coletadas nas camadas de 0,0-0,2 m 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).



**Figura 1.** Grade amostral da área experimental.

Os atributos físico-hídricos utilizados no estudo foram: densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), umidade ( $\text{g g}^{-1}$ ), textura (areia, silte e argila, em  $\text{g kg}^{-1}$ ). Anéis metálicos de volume conhecido ( $90,5 \text{ cm}^3$ ) 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, segundo 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:

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

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 (GD) espacial das variáveis utilizou-se a classificação adaptada de Cambardella et al. (1994), de acordo com a equação:

$$GD\% = \frac{\tau^2}{\tau^2 + \sigma^2} \times 100$$

em que em que  $\tau^2$  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  $\{\mathbf{Z}(s), s \in S\}$ ,  $S \subset \mathfrak{R}^2$ , sendo  $\mathfrak{R}^2$  um espaço euclidiano bidimensional e supondo que os dados  $\mathbf{Z}(s) = [\mathbf{Z}(s_1), \dots, \mathbf{Z}(s_n)]$  deste processo foram tomados em locais conhecidos  $s_i$  e gerados a partir do modelo  $\mathbf{Z}(s) = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}(s)$ , com  $\mathbf{Z}(s) \sim N_n(\mathbf{X}\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\Sigma})$ .

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 foi realizada pelo método da máxima verossimilhança (MMV), considerando a distribuição gaussiana, de modo a maximizar a função log-verossimilhança, dada pela expressão:

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

em que  $\Theta$  representa o espaço paramétrico do vetor  $\hat{\boldsymbol{\theta}} = [\hat{\boldsymbol{\beta}}, \hat{\boldsymbol{\alpha}}]^T$  que maximiza a função  $\ell_{\Theta}[\boldsymbol{\theta} | \mathbf{Z}(s)]$ , sendo  $\boldsymbol{\beta}$  o vetor de parâmetros de posição e  $\boldsymbol{\alpha} = [\tau^2, \sigma^2, \phi]$  os parâmetros do semivariograma;  $\mathbf{Z}(s) = [\mathbf{Z}(s_1), \dots, \mathbf{Z}(s_n)]$  representa o vetor de observações do atributo densidade do solo na localização  $s$ ;  $\mathbf{X}$  é a matriz de incidência dos efeitos  $\boldsymbol{\beta}$ ;  $\boldsymbol{\Sigma}$  é a matriz de variâncias e covariâncias das observações, cuja forma paramétrica é  $\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\alpha}) = \tau^2 \mathbf{I} + \sigma^2 \mathbf{R}(\phi)$ , em que  $\tau^2$  é o efeito pepita (variância de pequena escala),  $\sigma^2$  é a variância do processo espacial e  $\mathbf{R}(\phi)$  é a matriz de correlações, função da distância entre as observações e do parâmetro  $\phi$ . 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:

$$AIC = -2\log \text{Likelihood} + 2p,$$

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:

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

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

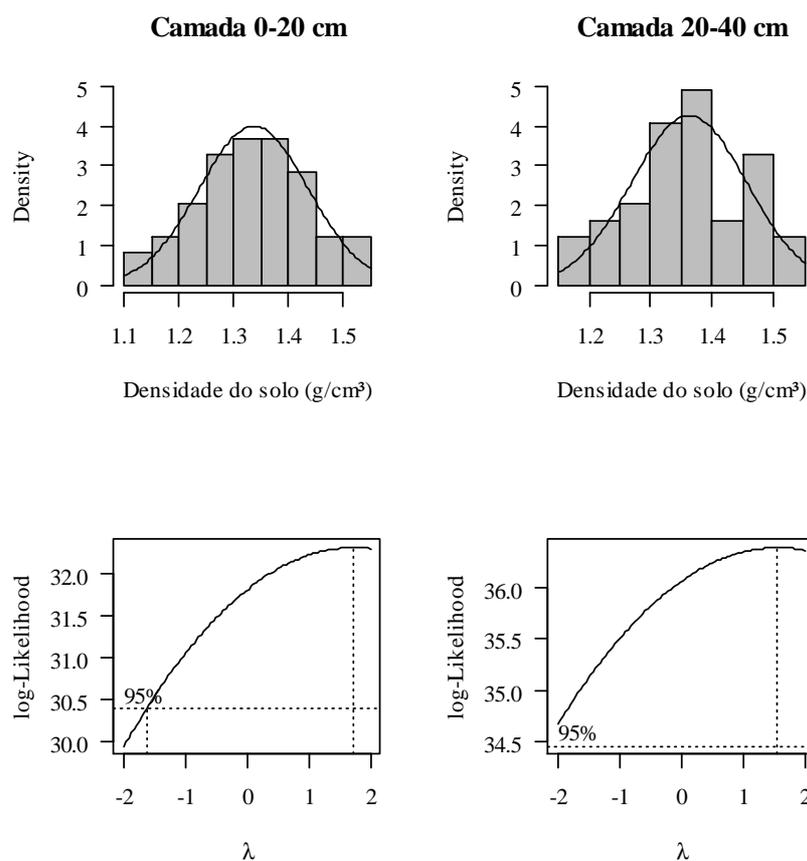
Uma vez escolhido um modelo linear espacial para uma dada camada contendo covariável, os resíduos do modelo foram extraídos, calculando  $\hat{\epsilon}(s) = \mathbf{Z}(s) - \mathbf{X}\hat{\beta}$ , para proceder à interpolação por krigagem ordinária destes resíduos e posteriormente adicionando às predições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

A área em estudo apresenta alguns pontos com teores de argila acima de  $500 \text{ g kg}^{-1}$ , que, segundo Reichert et al. (2003), solos com mais de 50% desta fração granulométrica, tem seu limite crítico de densidade do solo estabelecido em  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ . Portanto, valores de densidade acima de  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$  são consideradas restritivos ao desenvolvimento radicular pra esta condição textural. Uma vez realizada a krigagem e, de acordo com a premissa de Reinert et al. (2003), 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.

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

## Resultados e Discussão

Na Figura 1 observa-se que a densidade do solo 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.



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

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:  $CP1 = -0,39\text{umidade} + 0,62\text{argila} - 0,50\text{silte} - 0,46\text{areia}$ . Para a camada 0,2-0,4 m, a primeira componente reteve 57% da variância total, com autovetor:  $CP1 = -0,19\text{umidade} - 0,71\text{argila} + 0,05\text{silte} + 0,68\text{areia}$ , cuja interpretação prática é de diferença entre os teores de argila e areia na camada 0,2-0,4 m.

Os escores de apenas as primeiras componentes foram utilizados como covariáveis de suas respectivas camadas. Na Tabela 1 encontram-se as estimativas de máxima verossimilhança dos parâmetros dos modelos ajustados à densidade do solo das camadas.

**Tabela 1.** Estimativas, medidas da qualidade do ajuste e comparação de modelos.

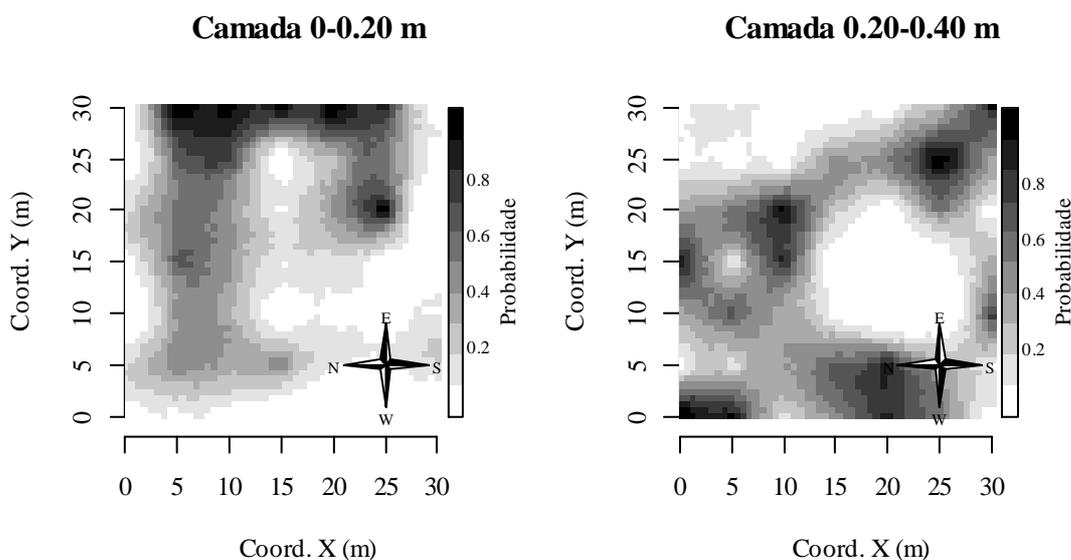
Camada	$X\hat{\beta}$	$\hat{\tau}^2$	$\hat{\sigma}^2$	$\hat{\phi}$	GD%	AIC	TRV
0,0-0,2 m	1.3158	0.0011	0.0101	6.0546	10.19	-88.33	
	1.3164 + 0.002CP1	0.0011	0.0101	6.1229	10.13	-86.38	0.04 <sup>NS</sup>
0,2-0,4 m	1.3619	0.0011	0.0065	3.0449	24.42	-90.47	
	0.9249 + 0.3299Dens1	0.0011	0.0066	5.0853	24.12	-93.05	4.58*
	1.3618 + 0.0043CP1	0.0011	0.0066	3.1650	24.15	-88.68	0.21 <sup>NS</sup>
	0.9239+0.3307Dens1+0.0052CP1	0.0011	0.0065	5.0903	24.23	-91.45	0.39 <sup>NS</sup>

CP1: componente principal da camada em análise; Dens1: densidade do solo na camada 0-20 cm; 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.

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. 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. 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. Neste modelo, o alcance prático ficou em torno de 15 m.

Na Figura 2 podem-se observar os mapas da probabilidade de se obter valores de densidade do solo acima de  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$  nas duas camadas analisadas.



**Figura 2.** Distribuição espacial da probabilidade de ocorrência de densidade do solo acima de  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$  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, o que pode diminuir a confiabilidade das informações coletadas de experimentos nessa área, pois os canteiros são formados na direção leste-oeste.

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, mas parece que aleatoriamente.

Os efeitos dos maiores níveis de probabilidade da densidade do solo podem ser associados ao tráfego, 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. 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.

## Conclusões

Há na área experimental locais com valores de densidade possivelmente críticos para o desenvolvimento das raízes.

É razoável tomar medidas corretivas distintas para cada camada antes da implantação de novos experimentos.

## Referências

- ASSIS, R. L.; LAZARINI, G. D.; LANÇAS, K. P.; CARGNELUTTI FILHO, A.. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v.29, p.558-568, 2009.
- 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, C. A.; MOOMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEM, D.L.; TURVO, R.F. & KONOPA, A.E. (1994) Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. **Soil Science of América Journal**, v.47, p.1501-1511.
- CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PEREIRA, H. S. AZEVEDO, W, R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 147-157, 2009.
- CARVALHO, L. A.; NETO, V. J. M.; SILVA, L. F.; PEREIRA, J. G.; NUNES, W. A. G. A.; CHAVES, C. H. C.. Resistência mecânica do solo à penetração (RMP) sob cultivo de cana-de-açúcar, no município de Rio Brillhante-MS. **Agrarian**, v.1, p.7-22, 2008.
- CARVALHO, S. R. L.; VILAS BOAS, G. S.; FADIGAS, F. S. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos em solos originados nos sedimentos da formação barreiras. **Cadernos de Geociências**, v.7, p.63-79, 2010.
- DIGGLE, P.J.; RIBEIRO Jr., P.J. **Model Based Geostatistics**. New York: Springer, 2007.
- 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.
- PIGNATARO NETO, I. T.; KATO, E. GOEDERT, W, J.. Atributos físicos e químicos de um Latossolo vermelho-amarelo sob pastagens com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1441-1448, 2009.
- 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.
- RIBON, A. A.; TAVARES FILHO, J.. 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**, v. 32, p. 1817-1825, 2008.
- SILVA, J. M.; PASSOS, A. L. R.; BELTRÃO, F. A. S.. Análise espacial da densidade, umidade e resistência mecânica do solo à penetração sob sistemas de cultivo. **Engenharia Ambiental**, v.6, p.103-118, 2009.

- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, v.27, p.29-48, 2003.
- CAVALIERI, K. M. V.; SILVA, A. P.; ARVIDSSON, J.; TORMENA, C. A. Influência da carga mecânica de máquina sobre propriedades físicas de um Cambissolo Háplico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.477-485, 2009.