

Marcos S. Rodrigues^{1*}

Ricardo R. D. Ramos²

Tomas P. de Azevedo²

Antonio P. Patrocínio Filho²

Lineker G. de Oliveira²

*Autor para correspondência

Recebido para publicação em 12/11/13. Aprovado em 23/03/2014.

¹ Eng. Agro. D. Sc., Professor Adjunto do Colegiado de Engenharia Agrônoma - UNIVASF - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Ciências Agrárias, Rodovia BR 407, 12 Lote 543, Projeto de Irrigação -Nilo Coelho - S/N C1, CEP: 56300-990. Petrolina-PE. E-mail: marcos.rodrigues@univasf.edu.br.

² Graduando em Engenharia Agrônoma, Colegiado de Engenharia Agrônoma - UNIVASF - Universidade Federal do Vale do São Francisco.

Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em área de capineira irrigada no semiárido

RESUMO

As restrições climáticas do semiárido nordestino para a produção animal é suprida por meio do fornecimento de alimentos através de capineiras irrigadas. Contudo, as constantes colheitas mecanizadas podem modificar as propriedades físicas e dinâmicas do solo, aumentando a compactação do solo. Portanto, objetivou-se neste trabalho avaliar o padrão de distribuição espacial da resistência do solo à penetração (RP) em área de capineira irrigada no semiárido nordestino. O experimento foi conduzido em uma capineira cultivada com capim-elefante em Petrolina-PE sob um Argissolo. A RP foi obtida com um penetrômetro de impacto IAA/Planalsucar Stolf nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 m seguindo uma grade amostra de 60 pontos com espaçamento equidistante de 10 m entre pontos. Os dados foram submetidos a análise de estatística descritiva e geoestatística. A RP do solo apresentou dependência espacial em todas as camadas avaliadas, com valores acima do limite para solos arenosos, indicando necessidade de intervenção e remoção da camada compactada. Houve incremento da RP com o aumento da profundidade, atingindo níveis máximos principalmente entre 20 e 30 cm de profundidade. Os métodos geoestatísticos permitiram o zoneamento da área definindo regiões específicas com maiores níveis de compactação (RP).

Palavras-chave: compactação, geoestatística, capim-elefante

Spatial variability of soil penetration resistance in an irrigated forage area in Brazilian semi-arid

ABSTRACT

The Brazilian semi-arid region has some constraints to animal production, but these problems may be overcome through irrigated forage. However, the mechanized harvesting constants may change the physical and dynamic properties of the soil, so that soil compaction increases. Therefore, this study aimed to evaluate the spatial distribution of soil penetration resistance (PR) in an irrigated forage area in Brazilian semi-arid. The experiment was conducted in an irrigated area cultivated with elephant grass in Petrolina city, Pernambuco state, under Ultisol. The PR was obtained with an impact penetrometer IAA / Planalsucar Stolf at 0-10, 10-20, 20-30 and 30-40 m depth following a sample grid of 60 equidistant points with 10 m spacing between points. Statistical analyses consisted of data description and geostatistics. The PR soil showed spatial dependence in all layers evaluated, with values above the threshold for sandy soils, indicating a need for intervention and compacted soil layer removal. There was an increase of

PR with increasing depth, reaching maximum levels from 20 to 30 cm. The geostatistical methods allowed the zoning of the area defining specific regions with higher levels of compression (PR).

Keywords: soil compaction, Geostatistics, elephant grass.

INTRODUÇÃO

As regiões do semiárido nordestino apresentam baixos índices pluviométricos, elevados níveis de evapotranspiração e insolação, condições as quais podem ser adversas para criação de animais devido a escassez de alimento durante o longo período seco (VALE & AZEVEDO, 2013). Como alternativa ao suplemento de alimentos, criadores de bovinos, caprinos e ovinos da região semiárida tem utilizado de capineiras irrigadas. Dentre as forrageiras utilizadas, pode-se destacar o uso do capim-elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum.), que é bastante difundido no Nordeste brasileiro, por apresentar fácil implantação, elevada produção de matéria fresca e ser bem adaptado à região (LIMA JÚNIOR et al., 2013).

Contudo, a utilização intensiva de máquinas e implementos agrícolas para a colheita da capineira podem contribuir para modificar as propriedades físicas e dinâmicas dos solos, causando compactação no solo. A compactação pode ser definida como a modificação da estrutura natural do solo no qual as partículas e seus agregados são reorganizados, resultando na redução da macroporosidade, porosidade total e aumento da microporosidade e densidade do solo (STONE et al., 2002). Os problemas causados pela compactação do solo podem resultar na redução da produção devido à formação de uma camada coesa, que prejudica o desenvolvimento radicular, reduz a taxa de infiltração de água, absorção de nutrientes e atividade microbiana do solo (BUSSCHER et al., 1997).

Adicionalmente, as características pedoclimáticas da região semiárida, tais como altas taxas de evaporação, solos rasos e geralmente arenosos fazem com que aumente o risco de compactação do solo e acúmulo de sais (SANTOS et al., 2012). Exigindo, portanto, cuidados especiais no manejo do solo de áreas irrigadas do semiárido, principalmente, no que se refere aos atributos físico-hídricos do solo.

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) é um importante atributo físico do solo que está relacionado inversamente com o crescimento das raízes e a produtividade das culturas. Portanto, é de fundamental importância o entendimento do padrão de distribuição espacial deste atributo para definir áreas específicas de manejo (ROSALEN et al., 2011) tanto do solo como da irrigação e minimizar os efeitos da compactação nas culturas.

Para se conhecer o padrão de distribuição espacial dos atributos do solo é necessária a aplicação dos conceitos de geoestatística. Isto porque, sabe-se que os solos podem variar ao longo da paisagem devido à intensidade de seus fatores e processos de formação, assim como do manejo e das práticas agrícolas realizadas (RODRIGUES et al., 2012). A geoestatística tem como

base o entendimento de que as amostras de uma determinada variável não são aleatórias, mas sim dependentes da posição no espaço em que se encontram. Portanto, seus conceitos têm sido aplicados no manejo específico de áreas agrícolas, com a denominação de Agricultura de Precisão (AP).

Buscando o entendimento do padrão de distribuição espacial da RP, Oliveira et al. (2013) estudaram um Cambissolo Háplico sob diferentes tipos de cultivo (Mandioca, cana-de-açúcar e mata nativa) na Amazônia e verificaram que houve dependência espacial para RP em todas os tipos de manejos avaliados e que o cultivo de cana-de-açúcar foi o que apresentou maior variabilidade em comparação com a mata nativa. Cortez et al. (2012), estudando a variabilidade espacial da RP em um Vertissolo Háplico sob cultivo de Manga no perímetro irrigado de Juazeiro, verificaram forte dependência espacial da RP e que os métodos geoestatísticos permitiram o zoneamento da área, definindo regiões específicas com maiores níveis de compactação, o que possibilita o manejo localizado nessa área. Apesar dos trabalhos existentes, ainda são escassos trabalhos na literatura que estudaram a RP em áreas de capineira irrigada.

Nesse sentido, objetivou-se neste trabalho avaliar o padrão de distribuição espacial da resistência do solo à penetração em área de capineira irrigada no semiárido nordestino.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição da área

O experimento foi conduzido na fazenda experimental do Campus Ciências Agrárias da Universidade Federal do Vale do São Francisco, perímetro irrigado Nilo Coelho, Petrolina-PE (latitude 9°19'10.47"S, longitude 40°33'48.91"W, elev. 400 m). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Bsw h', muito quente e semiárido, com a estação chuvosa no verão e elevada evaporação. A temperatura média anual fica em torno de 26 °C, e a precipitação pluviométrica, próxima de 400 mm anuais, é irregularmente distribuída, caracterizando uma semiaridez bem acentuada. O solo da área é classificado como Argissolo Amarelo com 10,7% de argila, 82,9% de areia e 6,4% de silte. Na área é cultivado capim-elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum.) com irrigação por aspersão convencional e corte mecanizado.

Coleta de dados

Para a análise da resistência mecânica do solo à penetração (RP) utilizou-se um penetrômetro de impacto IAA/Planalsucar Stolf, que provoca impacto com massa de 4 kg quando colocada em curso de queda livre de 40 cm; cone com ângulo sólido de 30° e 1,28 cm de diâmetro; haste com diâmetro de 0,95 cm. Os dados foram coletados seguindo uma malha amostral de 10 x 10 m totalizando 60 pontos georreferenciados, sendo as coordenadas obtidas por meio de um GPS de navegação (Figura 1). Os dados

de RP foram tomados até a profundidade de 40 cm e transformados para MPa (STOLF, 1991).

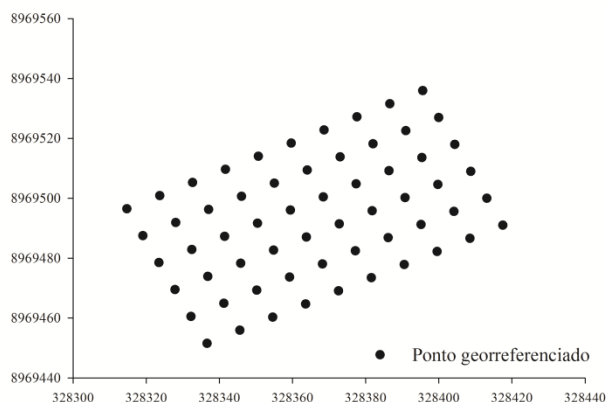


Figura 1. Esquema amostral da resistência do solo à penetração em uma área de capineira irrigada no semiárido nordestino.

Processamento dos dados, análises estatísticas e mapeamento

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva para determinação da média, valores máximos e mínimos, coeficiente de variação (CV), coeficientes de assimetria e curtose. Para estimar a dependência espacial entre as amostras, bem como identificar se as variações foram sistemáticas ou aleatórias, foi utilizado modelos de semivariogramas. A seleção dos modelos foi realizada com base na menor soma de quadrados do resíduo (SQR) e melhor coeficiente de determinação (R^2). Os semivariogramas foram validados pelo método de validação cruzada descritos por Isaaks e Srivastava (1989).

Para a análise do grau de dependência espacial foi utilizada a classificação de Cambardella et al. (1994), que considera de dependência espacial forte os

semivariogramas que têm efeito pepita igual a 25% do patamar, de dependência espacial moderada quando o efeito pepita está entre 25 e 75% e dependência espacial fraca, quando o efeito pepita é maior que 75%. Posteriormente a estimação dos semivariogramas experimentais e ajuste dos modelos teóricos realizaram-se a interpolação dos dados pelo método da krigagem. Optou-se pela krigagem em blocos por gerar mapas com uma superfície mais suavizada quando comparada a krigagem pontual, já que a krigagem em blocos representa o valor médio de uma área ao redor do ponto estimado (BURROUGH&MCDONNELL, 1998).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se por meio da análise estatística descritiva que a resistência do solo à penetração (RP) apresentou aumento das médias à medida que se aprofunda as camadas e que este aumento foi mais pronunciado a partir da camada de 20 cm de profundidade (Tabela 1). Considerando o limite proposto por Sene et al. (1985), que considera, para solos arenosos, valores de RP maiores que 6,0 MPa como limitadores para o crescimento radicular, verifica-se que os valores médios de RP na área estudada estão abaixo deste limite em todas as camadas avaliadas. Contudo, verifica-se que existem valores acima deste limite quando se observa os valores de máximo nas camadas de 20-30 e 30-40 cm de profundidade, indicando que pode haver limitação física ao crescimento do sistema radicular em certas áreas da capineira. Estes resultados demonstram que a tomada de decisão quanto ao manejo baseado em valores médios pode acarretar em erros, enfatizando, desta forma, a necessidade do conhecimento do padrão de distribuição espacial da RP para o manejo específico da área.

Tabela 1. Estatística descritiva da resistência do solo à penetração (MPa) nas camadas avaliadas.

Estatística descritiva	Camadas (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Média	1,44	2,82	3,98	3,99
CV (%)	46	32	40	32
Curtose	1,60	-1,01	0,26	1,19
Assimetria	1,05	0,05	0,91	1,11
Mínimo	0,56	1,01	1,88	1,95
Máximo	3,66	4,81	8,78	7,79

*CV = Coeficiente de variação

Baseado na classificação por meio do CV sugerida por Pimentel-Gomez e Garcia (2002), os valores de RP nas camadas avaliadas apresentaram muito alta variabilidade (CV > 30%) demonstrando a necessidade de

se avaliar modelos mais satisfatórios para descrever esse parâmetro. Estes resultados concordam com os obtidos por Rosalen et al. (2011) que verificaram muita alta variabilidade da RP em um Latossolo Vermelho

eutroférico. Verifica-se por meio dos valores de mínimo e máximo que houve grande variação em todas as camadas da RP, indicando que o uso de valores médios para a determinação da RP da área poderia ocasionar em erros de sub ou superestimando, o que poderia acarretar em errôneas decisões quanto ao manejo do solo na área.

Os valores observados de assimetria e curtose sugerem que os dados não apresentam distribuição normal. A distribuição normal é a base para a inferência estatística clássica para a aplicação da maioria dos testes de significância e das técnicas de correlação e regressão. Devido a assimetria da curva, pode-se inferir que a média é influenciada pelos valores elevados de RP. A consequência desse resultado é a impossibilidade de uso da média como valor representativo do conjunto de dados, implicando interpretação mais segmentada quando se pretende determinar valores médios de resistência à penetração em uma área agrícola (SILVEIRA et al., 2010). Portanto, o uso de técnicas geoestatísticas em detrimento da estatística clássica permite o conhecimento, não apenas da existência da variabilidade, mas também de como está distribuído esta variabilidade na área. Adicionalmente, a normalidade dos dados não é uma

exigência da geoestatística (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

A RP apresentou dependência espacial em todas as camadas avaliadas, sendo ajustado o modelo exponencial nas camadas de 0 - 10 e 10 - 20 cm e esférico nas camadas de 20 - 30 e 30 - 40 cm (Tabela 2). Em trabalho realizado por Coelho et al. (2012) em um Vertissolo Háptico no semiárido nordestino foi ajustado aos dados de RP o modelo esférico nas camadas de 0 - 10, 10 - 20, 20 - 30, 30 - 40 cm. Para garantir a qualidade dos semivariogramas foi observado se o número de pares para o cálculo da semivariância nos 'lags' eram superiores a 50 pares como recomendado por Gonçalves et al. (2001), sendo confirmado esta premissa obtendo semivariogramas experimentais com 104 pares no primeiro 'lag' em todas as camadas estudadas. Segundo a classificação de CAMBARDELLA et al. (1994), a RP apresentou dependência espacial moderada nas camadas avaliadas, com exceção da camada de 20 - 30 cm, que apresentou dependência espacial forte (Tabela 2). Em trabalho realizado por Coelho et al. (2012) a dependência espacial foi classificada como forte nas mesmas camadas avaliadas do presente estudo

Tabela 2. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas ajustados aos dados de resistência mecânica do solo à penetração nas camadas avaliadas

Profundidade(cm)	Modelo	C ₀	Patamar	Alcance(m)	[C ₀ /(C ₀ +C)] x100	GDE	R ²	SQR
00 - 10	Exponencial	0,18375	0,449	23	41	M	0,791	1,27E-03
10 - 20	Exponencial	0,31853	0,856	23	37	M	0,486	0,0161
20 - 30	Esférico	0,285	2,7	27	11	F	0,846	0,174
30 - 40	Esférico	0,52947	1,74	19	30	M	0,429	0,119

C₀ = Efeito pepita; C = Variância estrutural; GDE = Grau de dependência espacial; M = Moderado; F = Forte; SQR = Soma de quadrados do resíduo.

O alcance indica o limite da dependência espacial da variável, ou seja, determinações realizadas a distâncias maiores que o alcance tem distribuição espacial aleatória, sendo independentes entre si, fazendo-se uso então da estatística clássica. Já as determinações realizadas em distâncias menores que o alcance estão correlacionadas umas com as outras, o que permite que se façam interpolações para espaçamentos menores que os amostrados (SILVA et al., 2003). Desta forma, conhecendo-se o alcance, define-se o raio de amostragem. No presente trabalho o maior alcance foi verificado na camada de 20-30 cm de profundidade (27 m), enquanto o menor foi o da camada de 30 - 40 cm de profundidade (19 m) (Tabela 2). Em todas as camadas o valor do alcance foi maior do que a menor distância da malha amostral, indicando que o espaçamento da malha amostral foi suficiente para capturar a dependência espacial para a RP na área da capineira. Cortez et al. (2010) estudando a RP em um Argissolo Amarelo cultivado com manga no semiárido nordestino utilizando uma malha amostral de 50 x 50 m obteve valores de alcance de 68; 132; 72; e 88 m para as camadas de 0 - 10, 10 - 20, 20 - 30 e 30 - 40 cm de profundidade, respectivamente.

Observando os mapas de isolinhas da RP (Figura 2A, B, C e D) verifica-se que os maiores valores são encontrados nas camadas de 20-30 (Figura 2C) e 30 - 40 cm (Figura 2D). O aumento da resistência a penetração do solo com o aumento da profundidade, pode ter ocorrido devido ao intenso uso de maquinário para a colheita do capim-elefante para alimentação dos animais, que conforme Cortez et al. (2010) ressalta, as cargas advindas do uso do maquinário agrícola recebidas são armazenadas nas camadas de 20-30 e 30-40 cm. Como o capim-elefante pode ser enquadrado como uma cultura perene não há preparo periódico do solo, ou seja, a cada manejo da área com máquinas, há a tendência do aumento da RP nestas camadas. Adicionalmente, como se trata de um Argissolo, que é caracterizado pela presença de um horizonte B textural, o acúmulo de argila na camada subsuperficial pode ocasionar um adensamento do solo. Além disso, a redução do teor de matéria orgânica em profundidade pode reduzir a estruturação do solo e formação de agregados tornando o solo mais suscetível a compactação. Baseado nos mapas de isolinhas é possível verificar que há zonas na área em que a RP atingiu valores que podem ser considerado limitantes para solos arenosos, ou seja, valores de RP acima de 6 Mpa (SENE et al., 1985).

Portanto, medidas para quebrar esta camada compactada, tais como subsolagem e escarificação, deverão ser tomadas para que não haja redução na produção de biomassa nestas regiões da capineira.

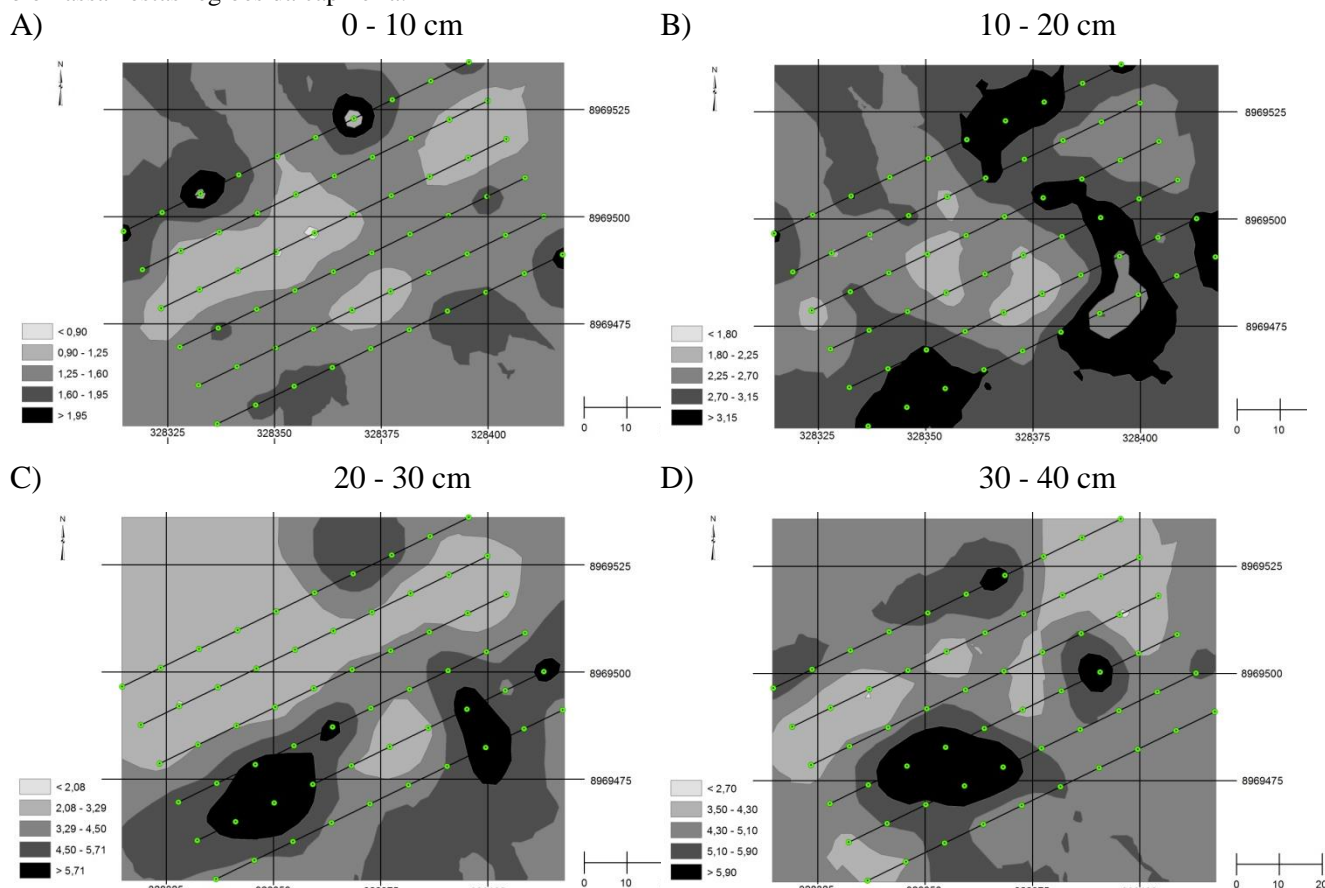


Figura 2. Mapas de isolinhas da resistência do solo à penetração (Mpa) na área de capineira irrigada com capim-elefante obtidos pelo método de interpolação krigagem.

CONCLUSÕES

1. A resistência do solo a penetração apresentou variabilidade espacial ao longo da área, de modo a apresentar zonas com valores acima do limite para Argissolos de textura arenosa, indicando necessidade de intervenção e remoção da camada compactada.
2. Houve incremento da resistência do solo a penetração (RP) com o aumento da profundidade, atingindo níveis máximos entre 20 e 30 cm de profundidade.
3. Os métodos geoestatísticos permitiram o zoneamento da área definindo regiões específicas com maiores níveis de compactação (RP), o que possibilita o manejo localizado nessa área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BURROUGH, P. A., MCDONNELL, R. A. *Principles of geographical information systems*. Oxford: University Press, 1998. 333p.

BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; CAMP, C. R.; SOJKA, R. E. Correction of cone index for soil water

content differences in a coastal plain soil. *Soil and Tillage Research*, v. 43, p. 205-217, 1997.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

COELHO, D. S.; CORTEZ, J. W.; OLSZEWSKI, N. Variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração em Vertissolo cultivado com manga no perímetro irrigado de Mandacaru, Juazeiro, Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 3, p. 755-763, 2012.

CORTEZ, J. W.; FERREIRA, B. J. M.; OLSZEWSKI, N.; LOPES, H. L.; DE JESUS NAGAHAMA, H. Variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração em Argissolo Amarelo no semiárido nordestino. *Nucleus*, v. 2, n. 2, p. 1-10, 2010.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; MATA, J. D. D. V. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo

- Vermelho. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 23, n. 5, p. 1149-1157, 2001.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. Oxford University Press: New York, 1989. p. 561.
- LIMA JÚNIOR, D. M.; RANGEL, A. H. N.; URBANO, S. A.; OLIVEIRA, J. P. F.; ARAÚJO, T. L. A. C. Silagem para vacas leiteiras no semiárido. *Agropecuária Científica no Semiárido*, v. 9, n. 2, p. 33-42, 2013.
- OLIVEIRA, I. A. D.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; AQUINO, R. E. D.; MARQUES JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, E. P. D. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 1103-1112, 2013.
- PIMENTEL-GOMEZ, F.; GARCIA, C. H. Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.
- RODRIGUES, M. S.; CORÁ, J. E.; FERNANDES, C. Spatial relationships between soil attributes and corn yield in no-tillage system. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 2, p. 599-609, 2012.
- ROSALEN, D. L.; RODRIGUES, M. S.; CHIODEROLI, C. A.; BRANDÃO, F. J. C.; SIQUEIRA, D. S. GPS receivers for georeferencing of spatial variability of soil attributes. *Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 6, p. 1162-1169, 2011.
- SANTOS, K. S.; MONTENEGRO, A. A.; ALMEIDA, B.; MONTENEGRO, S.; ANDRADE, T. D. S.; FONTES JÚNIOR, R. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 8, p. 828-835, 2012.
- SENE, M.; VEPRASKAS, M. J.; NADERMAN, G. C.; DENTON, H. P. Relationships of Soil Texture and Structure to Corn Yield Response to Subsoiling1. *Soil Science Society of America Journal*, v. 49, n. 2, p. 422-427, 1985.
- SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; STORCK, L.; FEIJÓ, S. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n. 6, p. 1013-1020, 2003.
- SILVEIRA, D. D. C.; MELO FILHO, J. F. D.; SACRAMENTO, J. A. A. S. D.; SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 3, p. 659-667, 2010.
- 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*, v. 15, n. 3, p. 229-235, 1991.
- STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro – 1: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, n. 2, p. 207-212, 2002.
- VALE, M. B.; AZEVEDO, P. V. Avaliação da produtividade e qualidade do capim elefante e do sorgo irrigados com água do lençol freático e do rejeito do dessalinizador. *Holos*, v. 3, p. 181-195, 2013.