

Avaliação da produção e propriedades químicas espacializadas e da calagem e adubação a taxas variadas em lavoura de milho para silagem em São Carlos, SP

Alberto C. de Campos Bernardi^{1,3*}, Giovana Maranhão Bettiol¹,
Ricardo Y. Inamasu^{2,3}, Ladislau Rabello²

¹ Embrapa Pecuária Sudeste, CP 339, CEP 13560-970, São Carlos, SP, Brasil

² Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos, SP, Brasil

³ Bolsista do CNPq

*e-mail: alberto@cnpq.embrapa.br

Resumo: O conhecimento da variabilidade espacial das propriedades do solo é útil para o uso racional dos insumos, como na aplicação a taxa variável de calcário e fertilizante. O objetivo deste trabalho foi o mapear a variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo e elaborar mapas de necessidade de aplicação de insumos de forma localizada, em área cultivada com milho para silagem. O estudo foi conduzido em área de 18 ha de produção de silagem de milho em São Carlos (SP). A amostragem de solo georreferenciada foi feita utilizando-se uma grade de amostragem com 6 subamostras antes do plantio do milho. Os valores de P, K, CTC, saturação por bases foram determinados por métodos tradicionais de análise de solo nas amostras georreferenciadas coletadas a 0-0,2 m de profundidade. A produtividade do talhão foi avaliada na época da colheita do milho. A variabilidade espacial da produção de material seca, das propriedades químicas do solo e da necessidade de calagem e adubação foram modeladas utilizando semivariogramas e os mapas foram obtidos por krigagem com o software Vesper. Os resultados indicaram que a calagem a taxas variáveis tem potencial de ser adotada na área em estudo.

Palavras-chave: geoestatística, fertilidade do solo, Vesper, taxa variável.

Evaluation of spatialized yield and chemical soil properties and varied rates of liming and fertilizer of corn silage crop in São Carlos, SP

Abstract: The knowledge of spatial variability soil properties is useful in the rational use of inputs, as in the variable rate application of lime and fertilizers. The objective of this work was to map and evaluate the spatial variability of the silage corn yield, soil chemical properties and map the site specific liming and fertilizer need in a silage corn area. The study was conducted in a silage corn production area of 18 ha in Sao Carlos, SP, Brazil. A sampling grid with 6 sub-samples was adopted before sowing. The values of soil P, K, CEC and basis saturation were analyzed by traditional soil testing in georeferenced samples collected at 0-0.2 m depth. The site was evaluated for dry matter production at the harvest time. Spatial variability of crop yield, soil properties and site specific liming and fertilizer need were modeled using semivariograms and maps were obtained by kriging with Vesper software. Results showed that variable rate of liming has the potential to be adopted in the study area.

Keywords: geostatistics, soil fertility, Vesper, variable rate.

1. Introdução

A agricultura de precisão auxilia os produtores na tomada de decisões gerenciais para os diferentes sistemas de cultivo (KOCH; KHOSLA, 2003). O uso desse conjunto de tecnologias permite quantificar a variabilidade espacial dos fatores produtivos e, portanto, da produtividade das culturas. A partir dessas informações torna-se possível interferir ou manejar as diferenças quantificadas, por meio da aplicação localizada dos insumos agrícolas, de acordo com a necessidade específica local (SEARCY, 1995). O uso dessa tecnologia tem possibilitado aos produtores manejar ou variar as taxas de aplicação de fertilizantes, de acordo com as diferenças de produtividade das culturas ou dos parâmetros de fertilidade dentro de um campo de produção. Essa prática conhecida como “taxa variável de aplicação de fertilizantes” (LARSON; ROBERT, 1991) é a principal vantagem do uso da AP, ou seja, a possibilidade de aplicar os insumos no local correto, no momento adequado, nas quantidades necessárias à produção agrícola, para áreas cada vez menores e mais homogêneas, tanto quanto a tecnologia e os custos envolvidos o permitam. Diferentemente da aplicação uniforme de fertilizantes e corretivos, que podem resultar em áreas com aplicações abaixo ou acima da dose necessária, a aplicação com taxas variáveis pode aumentar a produtividade e a eficiência do uso de nutrientes, ao mesmo tempo em que reduz o potencial para poluição ambiental (MULLA et al., 1992; ROBERT, 1993; WOLLENHAUPT; WOLKOWSKI; CLAYTON, 1994; MULLA; SCHEPERS, 1997; BERNARDI et al., 2004; BONGIOVANNI; LOWENBERG-DEBOER, 2004). O objetivo deste trabalho foi o mapear a variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo e elaborar mapas de necessidade de aplicação de insumos de forma localizada, em área cultivada com milho para silagem em São Carlos (SP).

2. Material e métodos

O estudo foi conduzido na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos, SP (21° 57' 15 S e 47° 50' 53,5 O; 856 m acima do nível do mar), em

área de solo Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura média (CALDERANO et al., 1998). O clima da região é tropical de altitude, com 1502 mm de precipitação pluvial anual e médias de temperatura mínima e de temperatura máxima de 16,3° C (julho) e de 23° C (fevereiro), respectivamente (CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA, 2010). O milho (*Zea mays* L.), da variedade AG 1051, foi semeado em novembro de 2009, em sistema de plantio direto, sobre palhada da vegetação espontânea germinada durante a entressafra. Utilizou-se a população de cinco plantas por metro linear e o espaçamento entre linhas de 0,8 m. A irrigação por aspersão foi realizada através de sistema autopropulsor de movimentação circular do tipo pivô central e o manejo da água (frequência e lâmina de irrigação) foi estabelecida com base no balanço entre a demanda climática (evapotranspiração) e as condições edáficas (capacidade de armazenamento de água disponível) do local, de acordo com Rassini (2002).

Em parceria com a empresa APAgri foram realizadas as amostragens de solo em outubro de 2009, as quais precederam a semeadura do milho. A amostragem de solo georreferenciada foi feita utilizando-se uma grade irregular de amostragem com 6 subamostras para formar uma amostra composta os pontos de amostragem estão na Figura 1a. A coleta de amostras de solo foi realizada com um quadriciclo equipado com GPS e trado de rosca de aço inoxidável, com regulagem de profundidade e de acionamento elétricos, que possibilitou a delimitação dos pontos com suas respectivas coordenadas geográficas. As amostras de solo foram secas ao ar, peneiradas em peneira de malha de 2 mm e analisadas para determinação do pH em água, da matéria orgânica, do P disponível pelo método da resina, dos teores trocáveis de K, Ca e Mg, da acidez trocável e potencial, e dos teores de argila e areia. Indiretamente foram calculados, através do uso dos parâmetros anteriores, a soma de bases, a saturação por bases e a capacidade de troca de cátions (CTC) ao pH 7,0 (PRIMAVESI et al., 2005).

A produtividade de milho para silagem foi avaliada em abril de 2010, quando a cultura

atingiu o ponto de colheita correspondente à fase de grão farináceo (matéria seca entre 28 e 35%). A estimativa da produção de biomassa fresca foi realizada manualmente em grade regular de 40 pontos georreferenciados (Figura 1b), nestes pontos foram amostradas 3 subamostras de 4 m de comprimento em duas linhas para compor uma amostra composta. Amostras do material colhido foram levadas à estufa com circulação forçada de ar a 70° C, até peso constante, para determinação da matéria seca. Adotou-se, para cálculo da necessidade de calagem e adubação com P e K a recomendação de Van Raij et al. (1996). O cálculo da calagem considerou o nível de acidez atual e a capacidade tampão do solo, expressa pela

CTC ao pH 7,0, e a saturação por bases ideal para a cultura, que no caso, foi de 70%, por se tratar de área de cultivo de milho. O cálculo da dose de fósforo e potássio baseou-se na análise de solo. Os modelos de semivariograma foram ajustados e os mapas estimados pelo método da krigagem utilizando o programa Vesper (MINASNY; McBRATNEY; WHELAN, 2005).

3. Resultados e discussão

Valores teóricos de assimetria e curtose entre 0 e 3, indicam a distribuição normal dos dados (CARVALHO; SILVEIRA; VIEIRA, 2002). Apenas os valores de CTC e argila apresentam

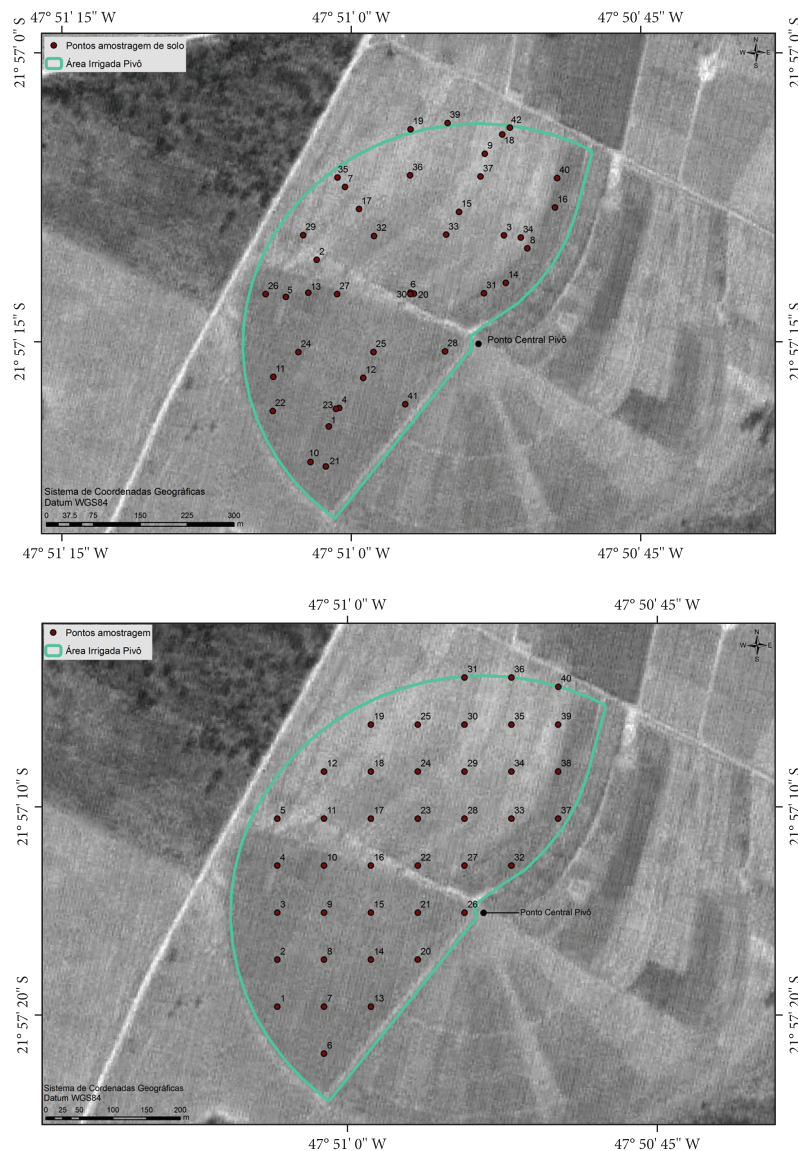


Figura 1. Localização da área de produção milho para silagem da Embrapa Pecuária Sudeste e pontos de amostragem para avaliação da fertilidade do solo (a) e produtividade (b).

valores de assimetria e curtose não compatíveis com a normalidade (Tabela 1). Os demais parâmetros apresentaram distribuição normal. Essa determinação é importante uma vez que a krigagem apresenta melhores resultados quando a normalidade dos dados é satisfeita (CARVALHO; SILVEIRA; VIEIRA, 2002). Somente o pH apresentou o coeficiente de variação baixo (<10%), de acordo com a classificação sugerida por Pimentel-Gomes (1984). As demais variáveis apresentaram coeficientes de variação altos (>20%), com exceção da M.O. e argila que apresentaram coeficiente de variação médio (entre 10 e 20%). As tendências de variação dos valores dos atributos de solo obtidos nesse estudo estão de acordo aos

observados por Mulla e McBratney (2000) para diversos parâmetros de solo.

Os semivariogramas experimentais para as variáveis foram calculados, e todos os modelos ajustados foram delimitados (Tabela 2). O modelo exponencial foi o que melhor se ajustou aos variogramas experimentais dos atributos do solo, à exceção do P cujo modelo foi o gaussiano. Este modelo foi que melhor ajustou-se à produção de M.S., doses calculadas de calcário, P e K. Os atributos do solo pH e K apresentaram efeito pepita puro, indicando ausência de dependência espacial. Os atributos do solo que apresentaram dependência espacial (Tabela 2), de acordo com os critérios de Cambardella et al. (1994), consideradas

Tabela 1. Parâmetros estatísticos das variáveis pH, M.O., P, K, CTC, V%, argila e produção de MS de uma área cultivada com milho para silagem em São Carlos, SP.

Parâmetros estatísticos	pH	MO	P	K	CTC	V	Ar-gila	Produção MS
	CaCl ₂	g.kg ⁻¹	mg.dm ⁻³	mmol _c .dm ⁻³		%	g.kg ⁻¹	kg.ha ⁻¹
Média	5,3	23,3	40,0	2,1	68,5	60,6	252,2	14137
Desvio padrão	0,5	2,4	17,3	0,6	14,3	13,3	44,3	2401
Mínimo	4,6	17,0	17,0	0,9	28,0	41,0	174,0	9810
Máximo	6,6	31,0	88,0	3,5	87,0	96,0	340,0	20104
CV	9,5	10,2	43,3	28,0	20,9	22,0	17,6	17,0
Curtose	2,0	2,4	0,3	0,5	2,2	1,7	-0,7	0,010
Assimetria	1,5	0,4	0,9	0,7	-1,5	1,3	0,1	0,340
n	42	42	42	42	42	42	42	42

Tabela 2. Estimativas dos parâmetros dos modelos dos semivariograma ajustados para as variáveis pH (CaCl₂), M.O., P, K, CTC, V%, argila e produção de MS de uma área cultivada com milho para silagem em São Carlos, SP.

Variável	C ₀ *	C ₁ **	a***	Modelo de ajuste	Dependência 100[C ₀ / (C ₀ + C ₁) ⁻¹]
pH (CaCl ₂)	-	-	-	Efeito pepita puro	-
MO	0,774	5,164	42,4	Exponencial	13,0
P	44,63	259,5	40,6	Gaussiano	14,6
K	-	-	-	Efeito pepita puro	-
CTC	50,43	204,7	145,4	Exponencial	19,8
V	22,27	223,0	163,3	Exponencial	9,1
Argila	70,18	1856,0	62,4	Exponencial	3,6
Produção MS	5806492	577853	206,2	Gaussiano	90,9
NC	291810	47801	122,7	Gaussiano	85,9
K ₂ O	299,4	138,2	541,9	Gaussiano	68,4
P ₂ O ₅	48,27	262,6	34,9	Gaussiano	15,5

*C₀ = efeito pepita; **C₁ = variância estrutural; ***a = alcance.

como forte (efeito pepita $\leq 25\%$ do patamar) foram M.O., P, CTC, V% argila, e doses de P_2O_5 , como dependência moderada (efeito pepita entre 26-75% do patamar), doses de K_2O . E a produção de M.S. e doses de calcário apresentaram dependência fraca. Na Figura 2 é apresentada a espacialização da produção de MS pelo milho para silagem e dos parâmetros argila, M.O., P, CTC e V% da camada de 0-0,2 m de profundidade obtidos pelo método da krigagem. A partir da malha de pontos amostrados, estabeleceram-se as informações para serem utilizadas no manejo da cultura no campo. Dessa forma, o mapa com as doses de fósforo, potássio e calcário para

aplicação em taxas variáveis são apresentados na Figura 3. A espacialização da necessidade de calagem observam-se 3 faixas de doses que poderiam ser utilizadas na aplicação a taxas variáveis: 600, 900 e 1100 $kg.ha^{-1}$. A recomendação de P apresentou-se bem mais localizada, como várias manchas ao longo da área. Já a adubação com potássio não seria recomendada para ser realizada com taxas variáveis devido às pequenas diferenças nas doses recomendadas. Observa-se que o mapa de produção de MS seguiu a tendência inversa da necessidade de calcário, apresentando distribuições semelhantes pela área.

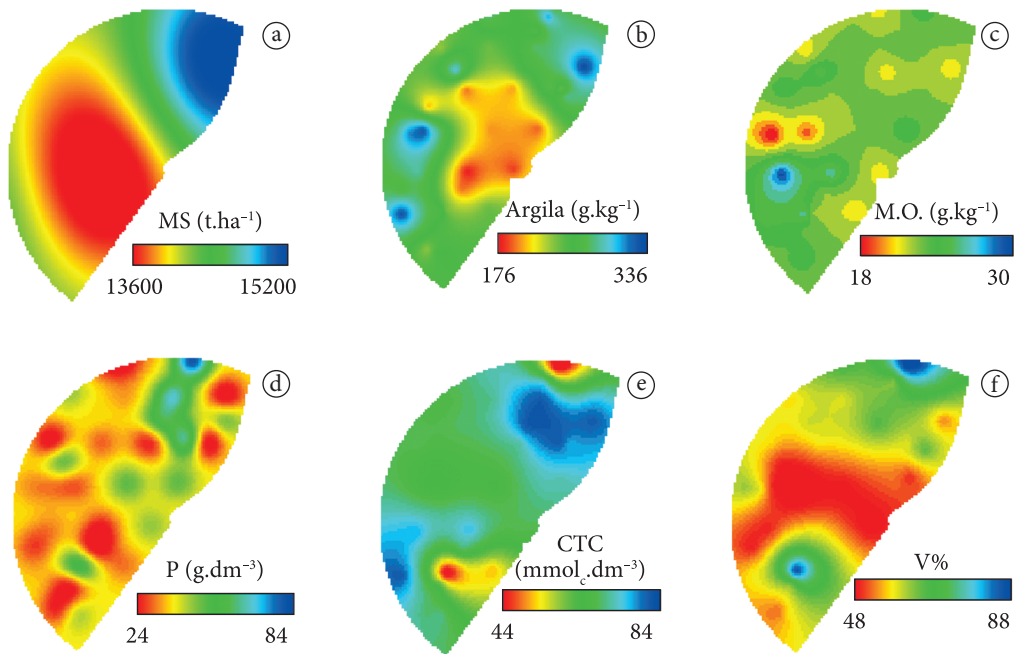


Figura 2. Mapas espacializados da produção de MS ($t.ha^{-1}$) e argila (B) M.O. (C), P (D), CTC (E), V% (F).

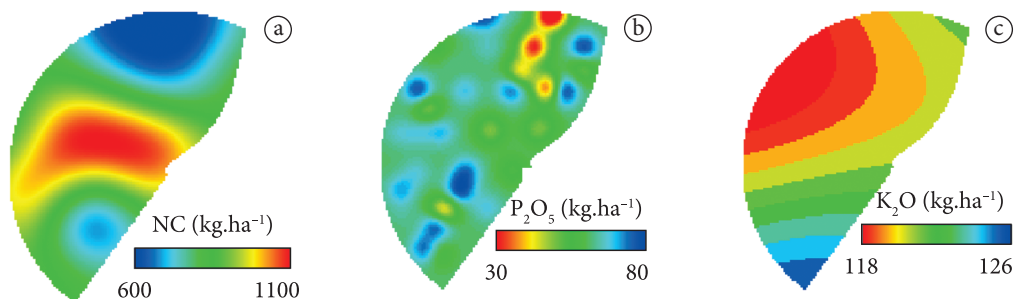


Figura 3. Recomendação espacializada da estimativa da necessidade de calagem (A) e doses de P_2O_5 (B) e K_2O (C) para o plantio de milho para silagem em São Carlos, SP.

4. Conclusões

Os resultados indicaram que a calagem a taxas variáveis tem potencial de ser adotada na área em estudo.

Agradecimentos

À APAgri e *International Potash Institute* – IPI pelo apoio no desenvolvimento deste projeto.

Referências

- BERNARDI, A. C. C.; GIMENEZ, L. M.; MACHADO, P. L. O. A.; SILVA, C. A. Aplicação de fertilizantes a taxas variáveis. In: MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A. (Eds.). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. p. 153-164.
- BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. Precision agriculture and sustainability. **Precision Agriculture**, v. 5, n. 3, p. 359-387, 2004. <http://dx.doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa>
- CALDERANO FILHO, B.; SANTOS, H. G.; FONSECA, O. O. M.; SANTOS, R. D.; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. **Os solos da fazenda Canchim**. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPS, 1998. 95 p. (EMBRAPA/CNPS, Boletim de Pesquisa, n. 7).
- 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. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M. & VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 1151-1159, 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2002000800013>
- CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA - CEPAGRI. **Clima dos municípios paulistas - a classificação climática de koeppen para o Estado de São Paulo**. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_549.html>. Acesso em: 01 jun. 2010.
- KOCH, B.; KHOSLA, R. The role of precision agriculture in cropping systems. **Journal of Crop Production**, v. 8, p. 361-381, 2003. http://dx.doi.org/10.1300/J144v09n01_02
- LARSON, W. E.; ROBERT, P. C. Farming by soil. In: LAL, R.; PIERCE, F. J. **Soil management for sustainability**. Ankeny: Soil Water Conservation Society, 1991. p. 103-112.
- MANZATTO, C. V.; BHERING, S. B.; SIMÕES, M. **Agricultura de precisão**: propostas e ações da Embrapa solos. EMBRAPA, 1999. Disponível em: <<http://www.cnps.embrapa.br/search/pesqs/proj01/proj01.html>>. Acesso em: 3 maio 2009.
- MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. **VESPER version 1.62**. Australian Centre for Precision Agriculture, 2005. Disponível em: <<http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>>. Acesso em: 22 jul. 2010.
- MULLA, D. J.; BHATTI, A. U.; HAMMOND, M. W.; BENSON, J. A. A comparison of winter wheat yield and quality under uniform versus spatially variable fertilizer management. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 38, n. 3, p. 301-311, 1992. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-8809\(92\)90152-2](http://dx.doi.org/10.1016/0167-8809(92)90152-2)
- MULLA, D. J.; MCBRATNEY, A. B. Soil spatial variability. In: SUMNER, M. E. **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p. A321-352.
- MULLA, D. J.; SCHEPERS, J. S. Key processes and properties for site-specific soil and crop management. In: PIERCE, F. J.; SADLER, E. J. (Ed.). **The state of site-specific management for agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1997. p. 1-18.
- PIMENTEL-GOMES, F. **A estatística moderna na pesquisa agropecuária**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1984. 160 p.
- PRIMAVESI, A. C.; ANDRADE, A. G.; ALVES, B. J. R.; ROSSO, C.; BATISTA, E. M.; PRATES, H. T.; ORTIZ, F. R.; MELLO, J.; FERRAZ, M. R.; LINHARES, N. W.; MACHADO, P. L. O. A.; MOELLER, R.; ALVES, R. C. S.; SILVA, W. M. Métodos de análise de solo. In: NOGUEIRA, A. R. A.; SOUZA, G. B. **Manual de laboratórios**: Solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. p. 67-130.
- RASSINI, J. B. **Irrigação de pastagens**: Frequência e quantidade de aplicação de água em Latossolos de textura média. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2002. 7 p. (Embrapa Pecuária Sudeste, Circular Técnica, n. 31).
- ROBERT, P. C. Characterization of soil conditions at the field level for soil specific management. **Geoderma**, v. 60, n. 1, p. 57-72, 1993. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90018-G](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061(93)90018-G)
- SEARCY, S. W. Engineering systems for site specific management: opportunities and limitations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SITE-SPECIFIC MANAGEMENT FOR AGRICULTURAL SYSTEMS, 2., 1994, Minneapolis. **Proceedings...** Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1995. p. 603-647.
- VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, Fundação IAC, 1996. 285 p. (Instituto Agronômico de Campinas, Boletim Técnico, n. 100).
- WOLLENHAUPT, N. C.; WOLKOWSKI, R. P.; CLAYTON, M. K. Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application. **Journal of Production Agriculture**, v. 7, p. 441-448, 1994.