



## VARIABILIDADE ESPACIAL SOLO AVALIADA PELA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE E ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

A.C.C. Bernardi<sup>1</sup>, G.B. Souza<sup>1</sup>, G.B. Maranhão<sup>1</sup>, K.E.L. Santos<sup>2</sup>, A. Luchiari-Júnior<sup>3</sup>, L.H. Bassoi<sup>4</sup>,  
L.M. Rabello<sup>5</sup>, R.Y. Inamasu<sup>5</sup>, C.M.P. Vaz<sup>5</sup>

- (1) Embrapa Pecuária Sudeste, Rodovia Washington Luiz, km 234, 13560-970, São Carlos, SP, alberto.bernardi@embrapa.br, gilberto.souza@embrapa.br, giovana.bettiol@embrapa.br
- (2) Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, Rodovia Washington Luís, Km 235, SP 310, São Carlos, SP, karol.eduarda21@gmail.com
- (3) Embrapa Informática Agropecuária, Avenida Andre Tosello, 209, 13083-886, Campinas, SP, ariovaldo.luchiari@embrapa.br
- (4) Embrapa Semiárido, BR 428 km 152, 56302-970, Petrolina, PE, luis.bassoi@embrapa.br
- (5) Embrapa Instrumentação, Rua Quinze de Novembro, 1452, 13560-970, São Carlos, SP, ladislau.rabello@embrapa.br, ricardo.inamasu@embrapa.br, carlos.vaz@embrapa.br

**Resumo:** O conhecimento da variabilidade espacial das propriedades do solo é útil para subsidiar as decisões sobre o manejo tanto do solo como das culturas. O objetivo deste trabalho foi o mapear a variabilidade espacial dos parâmetros do solo da área experimental do LANAPRE. O estudo foi conduzido em área de 3 ha em São Carlos (SP). Para a caracterização dos teores totais de componentes do solo utilizou-se um espectrômetro portátil de fluorescência de raios-X (XRF). A condutividade elétrica aparente do solo (CEa) foi medida com um protótipo de sensor de contato nas profundidades de 0-30 e 0-90cm. A variabilidade espacial das propriedades do solo medidas pelas diferentes técnicas foi modelada utilizando semivariogramas. Os mapas foram obtidos por krigagem com o software Vesper. Os resultados indicaram houve correlação inversa entre o teor de Si e a condutividade elétrica aparente do solo em ambas as profundidades ( $r=-0,344$  e  $-0,369$ ).

**Palavras-chave:** fluorescência de raios-X - XRF, condutividade elétrica aparente do solo - CEa geostatística, Vesper.

### SOIL SPATIAL VARIABILITY EVALUATED BY APPARENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND X-RAY FLUORESCENCE SPECTROSCOPY

**Abstract:** Knowledge of spatial variability of soil properties is useful to support decisions about the management of both the soil and the crops. The aim of this study was to map the spatial variability of soil properties of the LANAPRE experimental area. The study was conducted in an area of 3 ha in São Carlos (SP). To characterize the total content of components of the soil it was used a portable X-ray fluorescence (XRF) spectrometer. The apparent soil electrical conductivity (ECa) was measured with a contact sensor apparatus at the 0-30 cm and 0-90 cm depth. Spatial variability of soil properties measured using these two techniques was modeled using semivariograms. The maps were obtained by kriging with Vesper software. The results indicated an inverse correlation between Si content and the apparent soil electrical conductivity at both depth ( $r=-0.344$  and  $-0.369$ ).

**Keywords:** X-ray fluorescence (XRF), apparent soil electrical conductivity (ECa), geostatistic, Vesper.

#### 1. Introdução

A Agricultura de Precisão (AP) pode ser definida como uma postura gerencial que considera a variabilidade espacial para maximizar o retorno econômico e minimizar riscos de dano ao meio ambiente (INAMASU et al., 2011). De acordo com Cambardella e Karlen (1999), as propriedades do solo podem variar espacialmente dentro de um mesmo talão, até a escala regional em função de fatores intrínsecos, como os de formação do solo, e extrínsecos, como as práticas de manejo, adubação e rotação de culturas, etc. Estas variações das propriedades do solo devem ser monitoradas e quantificadas para se compreender os efeitos do uso da terra e sistemas de gestão de solos. Este monitoramento pode ser realizado com medidas indiretas das propriedades do solo com base em sistemas ópticos, eletromagnéticos, eletroquímicos, mecânicos, fluxo de ar e acústicos (ADAMCHUK et al., 2004). A espectrometria de fluorescência de raios-X (XRF) é uma técnica não destrutiva, que permite analisar qualitativa e quantitativamente os elementos presentes em uma amostra. É uma das técnicas analíticas mais utilizadas em geoquímica. O espectrômetro de XRF portátil acoplado a um GPS permite, ainda, a análise em tempo real de forma rápida e sensível, possibilitando aplicações em estudos complexos de caracterização do solo, bem como para análises de rotina. A condutividade elétrica aparente do solo é um parâmetro que é influenciado pela textura e a

capacidade de retenção da água, duas propriedades do solo que afetam a produtividade, e pode, portanto, auxiliar na interpretação das variações de rendimento das culturas (KITCHEN et al., 1999), sendo comumente relacionada com a variabilidade espacial da produção das culturas (KITCHEN et al., 1999; LUCHIARI et al., 2001). No Brasil, Machado et al. (2006) verificaram que os valores da CEa estavam relacionados com o teor de argila do solo e sua variabilidade espacial e foi útil para o estabelecimento dos limites de zonas de manejo em lavoura de soja. O objetivo deste trabalho foi o mapear a variabilidade espacial dos parâmetros do solo da área experimental do Laboratório Nacional de Referência em Agricultura de Precisão LANAPRE.

## 2. Material e Métodos

O estudo foi conduzido na área experimental do Laboratório Nacional de Referência em Agricultura de Precisão - LANAPRE, em São Carlos, SP (21°57'12,91" S e 47°51'09,56" W; 872 m acima do nível do mar), em área de solo Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura média. Utilizou-se o equipamento XRF portátil (Thermo Scientific, UK), modelo Niton XL3t (<http://www.dairix.com.br/products/view/98>) para as medidas de espectroscopia de fluorescência de raio-X. O equipamento passou por uma calibração interna antes da análise. As medidas "point and shoot" foram realizadas por 1 minuto por amostra utilizando o "bulk mode" do equipamento para determinação de Si, Al e Fe. A condutividade elétrica aparente do solo (CEa) foi medida com um protótipo de sensor de contato descrito por Rabello et al. (2011). Os modelos de semivariograma foram ajustados e os mapas estimados pelo método da krigagem utilizando o programa VESPER (Minasny et al., 2005). E os mapas foram gerados no software ArcGIS 10.1 (ESRI, 2009). Foram realizados estudos de correlação entre os parâmetros do solo com os dados estimados pelo estudo de geoestatística. Para tanto, após obtenção das superfícies pelo método da krigagem, foram amostrados valores nas mesmas localizações em uma grade amostral virtual de 325 pontos, distribuídos regularmente sobre o conjunto de dados preditos da área de estudo, seguindo a metodologia descrita por Perez et al. (2014).

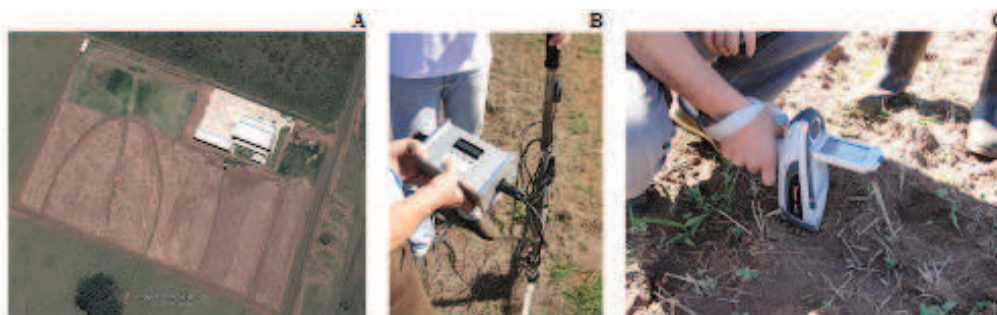


Figura 1. Localização da área experimental do LANAPRE em São Carlos, SP (A), protótipo de sensor de contato para condutividade elétrica aparente do solo (B) e o XRF portátil (C).

## 3. Resultados e Discussão

A Tabela 1 mostra a estatística descritiva dos parâmetros do solo avaliados por espectrometria de fluorescência de raio-X e da condutividade elétrica aparente nas profundidades de 0-30 e 0-90 cm. Valores teóricos de assimetria e curtose entre 0 e 3, indicam a distribuição normal dos dados, que não foram observados apenas para Si e Al. De acordo com Carvalho et al. (2002), é importante observar a normalidade dos dados, pois quando esta é satisfeita a krigagem apresenta melhores resultados. Os parâmetros medidos por XRF apresentaram coeficientes de variação médios (entre 10% e 20%), e as CEa em ambas profundidades CV% considerados altos.

Tabela 1. Estatística descritiva dos parâmetros do solo da área experimental do LANAPRE em São Carlos, SP.

Parâmetros estatísticos	Si	Al	Fe	CEa <sub>0-30cm</sub>	CEa <sub>30-90cm</sub>
Média	198558	66041	51113	2,1	0,9
Desvio padrão	30908	8433	5658	0,88	0,31
Mínimo	130585	46699	37636	0,2	0,1
Máximo	258715	80900	70831	7,5	1,8
CV	15,6	12,8	11,1	41,3	35,5
Curtose	-0,468	-0,766	1,694	0,240	0,236
Assimetria	0,208	-0,342	0,083	1,641	0,505
N	52	52	52	180	180

Os semivariogramas experimentais para as variáveis foram calculados, e todos os modelos ajustados foram delimitados para cada grade de amostragem (Tabela 2). Houve ajuste ao modelo esférico (Si e CEa<sub>30-90cm</sub>), exponencial (Al e Fe) e linear (CEa<sub>0-30cm</sub>). A dependência espacial foi calculada com base nos critérios de Cambar-

della et al. (1994), e foi considerada forte para a  $CEa_{0-30cm}$ , com efeito pepita menor que 25% do patamar; moderada para Si e  $CEa_{30-90cm}$  (com efeito pepita entre 26 e 75% do patamar) e fraca para Al e Fe, com valores acima de 76%.

Tabela 2. Estimativas dos parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados para os parâmetros do solo da área experimental do LANAPRE em São Carlos, SP.

Variável	$C_0^{\#}$	$C_1^{\#}$	$A^{\#}$	Modelo de Ajuste	Dependência $100[C_0 / (C_0 + C_1)^{-1}]$	Correspondência
Si	839863065	159527063	63,38	Esférico	28,7	Moderada
Al	62736395	13964238	22,18	Exponencial	84,0	Fraca
Fe	34555135	4387290	19,41	Exponencial	81,8	Fraca
$CEa_{0-30cm}$	0,1531	1,852	198,6	Linear	7,6	Forte
$CEa_{30-90cm}$	0,04591	0,1053	209,4	Esférico	30,4	Moderada

$^{\#}C_0$  = efeito pepita;  $C_1$  = variância estrutural;  $a$  = alcance.

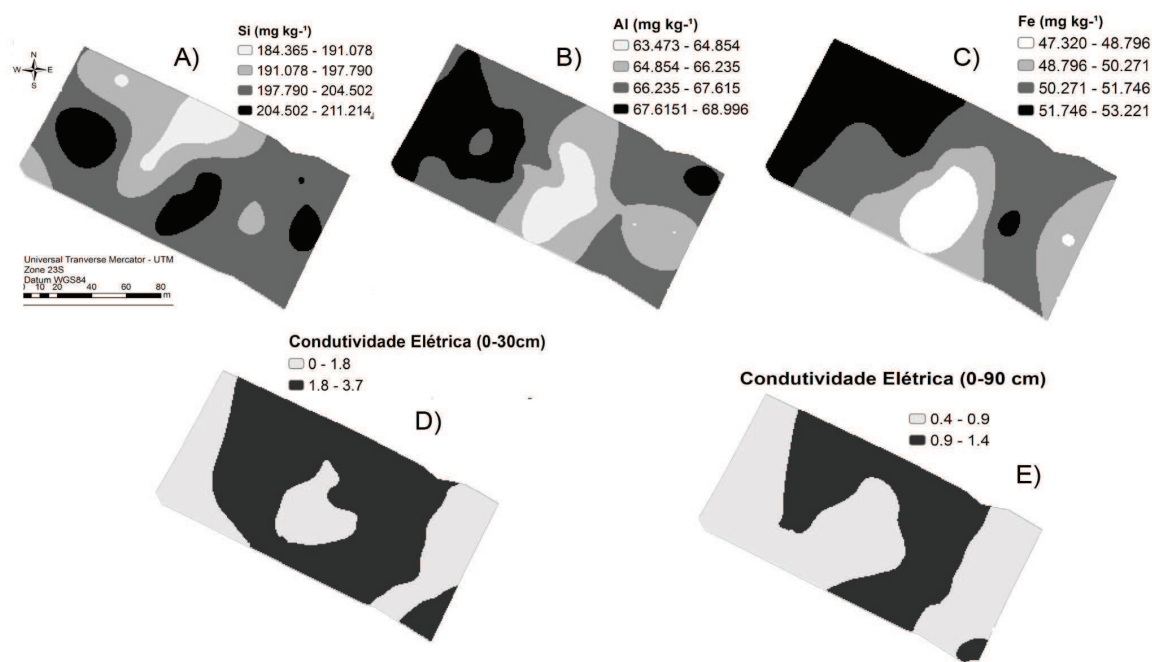


Figura 2. Mapas espacializados dos teores totais de Si (A), Al (B) e Fe (C) obtidos por espectroscopia de fluorescência de raio-X e da condutividade elétrica aparente do solo ( $mS m^{-1}$ ) nas profundidades de 0 a 30 cm (D) e de 0 a 90 cm (E).

O conhecimento do teor total de diversos elementos do solo auxilia a sua caracterização. O Si, depois do  $O_2$ , é o elemento mais abundante da crosta terrestre, por isso os valores elevados observados na Figura 2. As técnicas não destrutivas e instrumentais de espectroscopia de fluorescência de raio-X e da condutividade elétrica aparente do solo, por permitir análises rápidas, de baixo custo e sem a geração de resíduos, têm grande potencial de aplicação nos estudos de Agricultura de Precisão, em especial na caracterização edáfica. A variabilidade espacial dos mapas interpolados por krigagem (Figura 2) indicam que há uma tendência de relação inversa dos valores de Si e da  $CEa$  em ambas profundidades, confirmados pelos coeficientes de correlação (Tabela 3). Os coeficientes obtidos do conjunto de dados preditos pelos semivariogramas indica que apenas os valores de Si apresentam alguma relação com os valores de  $CEa$ . Estes estudos deverão ser aprimorados com a implementação de outras medidas, com, por exemplo, a textura e parâmetros físicos e químicos do solo, que poderão complementar a caracterização da área de estudo.

Tabela 3. Coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) entre os parâmetros do solo da área experimental do LANAPRE em São Carlos, SP preditos pelo modelo do semivariograma.

	Si	Al	Fe
$CEa_{0-30cm}$	-0,344	-0,034	0,127
$CEa_{30-90cm}$	-0,369	-0,12	0,017

#### 4. Conclusões

Os resultados indicaram houve correlação inversa entre o teor de Si e a condutividade elétrica aparente do solo.

#### Referências

- ADAMHUK, V.I.; HUMMEL, J.W.; MORGAN, M.T.; UPADHYAYA, S.K. On-the go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.44, p.71-91, 2004.
- CAMBARDELLA, C. A.; KARLEN, D. L. Spatial analysis of soil fertility parameters. *Precision Agriculture*, v.1, p.5-14, 1999.
- 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.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute) Inc., ArcGIS® 10.1: getting started with ArcGIS. Redlands, ESRI. 2009.
- INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C.; VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M.; QUEIROS, L. R.; RESENDE, A. V.; VILLELA, M. de F.; JORGE, L. A. C.; BASSOI, L. H.; PEREZ, N. B.; FRAGALLE, E. P. Agricultura de precisão para a sustentabilidade de sistemas produtivos do agronegócio brasileiro. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. de C. (Ed.). *Agricultura de precisão: um novo olhar*. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 14-26.
- KITCHEN, N.R.; SUDDUTH, K.A.; DRUMMOND, S.T. Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils. *Journal of Production Agriculture*, v.12, p.607-617, 1999.
- LUCHIARI, A.; SHANAHAN, J.; FRANCIS, D.; SCHLEMMER, M.; SCHEPERS, J.; LIEBIG, M.; SCHEPERS, A.; PAYTON S. Strategies for establishing management zones for site specific nutrient management [CD-ROM]. In P.C. Robert et al. (ed.) *Precision agriculture. Proc. Int. Conf., 5th, Minneapolis, MN. 16-19 July 2000*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. 2001.
- MACHADO, P.L.O.A.; BERNARDI, A.C.C.; ALENCIA, L.I.O.; MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.M.; SILVA, C.A.; ANDRADE, A.G.A.; MADARI, B.E.; MEIRELLES, M.S.P.M. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.41, p.1023-1031, 2006.
- MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B.; WHELAN, B.M. 2005. VESPER version 1.62. Australian Centre for Precision Agriculture, McMillan Building A05, The University of Sydney, NSW 2006. Disponível em: <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>. Consultado em 22 julho 2010.
- PEREZ, N. B.; NEVES, M. C.; SISTI, R. N.; NUNES, C. L. R.; LEITÃO, F. M. L. Condutividade elétrica do solo e produtividade: uso no sistema de integração lavoura-pecuária para determinar zonas de manejo durante o cultivo de soja. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 252-259.
- RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; MOLIN, J. P. Mapeamento da condutividade elétrica do solo - sistema protótipo. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. (Ed.). *Agricultura de precisão: um novo olhar*. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2011. pag. 41-45.