



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbccs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

Brasil

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; STORCK, L.; FEIJÓ, S.

VARIABILIDADE ESPACIAL DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO E PRODUTIVIDADE
DE MILHO EM UM ARGISOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO ARÊNICO

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 27, núm. 6, noviembre-diciembre, 2003, pp. 1013-1020

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180214033005>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

SEÇÃO IV - FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS

VARIABILIDADE ESPACIAL DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE MILHO EM UM ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO ARÊNICO⁽¹⁾

V. R. SILVA⁽²⁾, J. M. REICHERT⁽³⁾, L. STORCK⁽⁴⁾ & S. FEIJÓ⁽⁵⁾

RESUMO

O conhecimento da variação espacial de atributos de solo e de planta pode contribuir para o planejamento e otimização na condução de experimentos, bem como para o planejamento de lavouras comerciais, objetivando a agricultura de precisão. O objetivo deste estudo foi avaliar a distribuição e a dependência espacial de atributos químicos do solo e a produtividade de milho de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. A área recebeu calcário e fósforo, os quais foram incorporados juntamente com os resíduos culturais de aveia cerca de dois meses antes da amostragem. A coleta de amostras de solo foi realizada em intervalos de seis metros no sentido leste-oeste e a cada dois metros no sentido norte-sul. Determinaram-se pH do solo em água, índice SMP, fósforo disponível, potássio trocável, cálcio trocável, magnésio trocável, alumínio trocável, percentual de matéria orgânica do solo e produtividade de milho. Os dados foram avaliados por estatística descritiva e pela análise da dependência espacial, com base no ajuste de semivariogramas. Ajustou-se o modelo esférico para pH em água, índice SMP, fósforo disponível e saturação por bases; o modelo gaussiano, para potássio trocável e matéria orgânica, e o modelo exponencial, para produtividade de milho, alumínio trocável, cálcio trocável, magnésio trocável e H + Al. Todos os atributos estudados apresentaram de moderada a forte dependência espacial. O alcance da dependência espacial foi de 4,5 m para a produtividade de milho e foi muito próximo ao alcance da saturação por alumínio, H + Al e alumínio trocável. Para pH em água, índice SMP, potássio trocável, cálcio trocável, magnésio trocável, CTC efetiva e saturação por bases, o alcance foi de 20 m. É provável que o manejo recente da área tenha contribuído para o aumento da variabilidade dos atributos fósforo e potássio.

Termos de indexação: fertilidade do solo, separação de unidade experimental, dependência espacial.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em abril de 2001 e aprovado em agosto de 2003.

⁽²⁾ Doutor em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. CEP 97105-900 Santa Maria (RS). E-mail: silavr@bol.com.br

⁽³⁾ Professor Titular do Departamento de Solos – CCR, UFSM. Bolsista do CNPq. E-mail: reichert@ccr.ufsm.br

⁽⁴⁾ Professor Titular do Departamento de Fitotecnia – CCR, UFSM. E-mail: storck@ccr.ufsm.br

⁽⁵⁾ Engenheira-Agrônoma, MSc, UFSM.

SUMMARY: SPATIAL VARIABILITY OF CHEMICAL SOIL PROPERTIES AND CORN YIELD ON A SANDY LOAM SOIL

Knowledge on spatial dependence characterization of plant and soil properties can help plan and optimize research studies, and be used for commercial agricultural cultivation aiming at precision agriculture. The objective of this study was to evaluate the spatial variability and dependence of several chemical soil properties and of corn yield on a sandy loam Paleudalf. The area was treated with lime and phosphorus by plowing the fertilizers into the soil along with oat residues two months prior to soil sampling. To quantify the soil properties in the field, soil samples were collected at 6 m intervals in the east-west direction and 6 m in the north-south direction. The soil pH in water, SMP index, available phosphorus, exchangeable cations (potassium, calcium, magnesium, and aluminum), organic matter percentage, and corn yield were determined. The data were analyzed with descriptive statistics and geostatistics, by fitting semivariogram models. The spatial dependence of all studied plant and soil properties was moderate to strong. The spherical model was adjusted for pH in water, SMP value, available phosphorous, and base saturation; the gaussian model described the spatial dependence of exchangeable potassium and organic matter; and the exponential model was adjusted to corn yield and to exchangeable cations (aluminum, calcium, and magnesium), H + Al. The range of spatial dependence was 4.5 m for corn yield and very close to exchangeable aluminum, aluminum saturation, and H + Al. The range for soil pH in water, SMP value, exchangeable cations (potassium, calcium, and magnesium), effective CTC, and base saturation was 20 m. Recent soil management operations probably had a part in the increased variability of soil characteristics like phosphorus and potassium.

Index terms: soil fertility, experimental unit separation, spatial dependence.

INTRODUÇÃO

O estudo da variabilidade espacial de propriedades do solo tem grande importância não só na escolha de uma área experimental, locação das unidades experimentais, coleta de amostras e interpretação de resultados, mas também no levantamento e classificação de solos e nos esquemas de uso racional de fertilizantes. A variação das características do solo está relacionada com fatores de sua formação (Jenny, 1941) e com o efeito do manejo do solo (Dobermann & George, 1994).

A análise da variância é uma ferramenta importante no estudo e comparação de tratamentos. Todavia, exige o cumprimento de pressuposições básicas, tais como: os efeitos dos tratamentos e os efeitos ambientais devem ser aditivos e os erros experimentais devem ser todos independentes, ter uma variância comum e apresentar distribuição normal. Dessa forma, é necessário que as unidades experimentais sejam homogêneas e independentes entre si. Se tais pressuposições não forem satisfeitas, a análise dos dados e a comparação entre tratamentos podem apresentar erros que comprometerão a interpretação dos resultados.

Santos et al. (1998) avaliaram o emprego dos testes de comparação de médias em artigos da revista Pesquisa Agropecuária Brasileira (PAB) nos anos de 1980 a 1994. Os autores concluíram que 57 % dos artigos utilizaram o teste de comparação

de médias de maneira adequada, 31 % de forma inadequada e 11 % parcialmente adequada. Concluindo: boa parte dos artigos foram analisados estatisticamente de forma inadequada.

Um conjunto de dados tem distribuição normal quando os valores de sua média aritmética, mediana e moda apresentam valores semelhantes (Little & Hills, 1978). A mediana é o valor central quando os valores são arranjados em ordem crescente e a moda é o valor mais frequente. Em conjunto com essas estatísticas, tem-se que uma distribuição normal apresenta coeficiente de assimetria próximo a zero e coeficiente de curtose próximo a três (Snedecor & Cochran, 1974), embora alguns programas estatísticos utilizem uma maneira de cálculo do coeficiente de curtose que resulta em zero.

A geostatística, ferramenta estatística utilizada para estudar a variabilidade espacial, possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem. O estudo da variabilidade espacial pode ser feito em grandes áreas, abrangendo diversos tipos de solos (Berg & Klamt, 1997; Couto et al., 2000), e em áreas menores (Albuquerque et al., 1996; Souza et al., 1998; Oliveira et al., 1999; Bertolani & Vieira, 2001).

O semivariograma é um gráfico que relaciona a semivariância de uma variável qualquer com uma distância (h). Os semivariogramas apresentam três

importantes parâmetros: (1) o efeito pepita (C_0), que se refere ao valor da semivariância para a distância zero e representa o componente da variação ao acaso; (2) o patamar ($C_0 + C_1$), que é o valor da semivariância em que a curva estabiliza sobre um valor constante (é o máximo da semivariância). O patamar é atingido quando a variância dos dados se torna constante com as distâncias entre as amostras e esse parâmetro permite a determinação da distância limite entre a dependência e a independência entre as amostras; (3) o alcance (a), que é a distância da origem até onde o patamar atinge valores estáveis, é considerado o limite da dependência espacial da grandeza medida. Após a seleção do semivariograma da variável em estudo e havendo dependência espacial, podem-se interpolar valores em qualquer posição na área estudada, sem tendência e com variância mínima.

Com o desenvolvimento da agricultura de precisão, o conhecimento da distribuição espacial de variáveis de solo e planta tornou-se indispensável para o planejamento e otimização de adubações, tratos culturais e colheita. Portanto, o estudo da variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas dos solos é importante em áreas com diferentes manejos, pois pode indicar alternativas de manejo de solo para reduzir os efeitos da variabilidade horizontal e vertical do solo. Essa variabilidade, em muitos casos, pode influenciar a interpretação de efeitos de tratamentos em experimentos.

Diversos estudos de características químicas e físicas do solo e de planta demonstram que a variabilidade não ocorre ao acaso, mas apresenta correlação ou dependência espacial (Oliveira et al., 1999; Souza et al., 1998; Albuquerque et al., 1996).

Analisando amostras de solo coletadas em lavouras cultivadas em Latossolo Vermelho distrófico típico, Latossolo Vermelho distróférico típico e Chernossolo Argilúvico férreo típico-escuro, Schlindwein & Anghinoni (2000) encontraram maior variabilidade horizontal para fósforo e potássio do que para pH em água, índice SMP e matéria orgânica. Os autores atribuíram esse comportamento ao sistema de distribuição de fósforo e potássio, realizado em linha, enquanto o de calcário e dos resíduos vegetais foi realizado a lanço, de maneira uniforme sobre o solo, diminuindo a sua variabilidade.

Considerando a variabilidade espacial dos atributos de solo e de planta, é importante conhecer o comportamento dessa variabilidade para localizar áreas e unidades experimentais, de modo que as variáveis sejam independentes, e aplicar testes estatísticos de maneira correta.

O objetivo deste estudo foi avaliar a variabilidade espacial de atributos químicos do solo e da produtividade de milho em parcelas experimentais num Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Campus da Universidade Federal de Santa Maria, em Santa Maria (RS), em área pertencente ao Departamento de Fitotecnia. O solo, classificado como um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (EMBRAPA, 1999) e localizado em uma área plana, foi dividido em três blocos de, respectivamente, 17 x 58, 17 x 48 e 17 x 18 m (Figura 1). A coleta de solo foi realizada em intervalos de 6 x 2 m, totalizando 192 amostras, com seis subamostras na profundidade de 0-0,20 m, antes da semeadura do milho (safra 1998/1999).

No ano agrícola de 1997/1998, foi semeado milho em sistema de preparo convencional e adubação na linha de plantio; no inverno de 1998, foi cultivada aveia preta sem adubo. No florescimento da aveia preta, (setembro/1998), foram aplicados 5 t ha⁻¹ de calcário e 300 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo incorporados com uma lavração e uma gradagem junto com a aveia preta. A instalação do experimento com o milho, safra 1998/1999, foi realizada em novembro, utilizando semeadora para incorporar o adubo em linha e abrir o sulco para a colocação manual das sementes de milho.

As amostras de solo, após serem secas ao ar, peneiradas com malha de 2 mm de abertura, foram analisadas quimicamente. Determinaram-se o pH em água na relação 1:1 (solo-água); o índice SMP, utilizando a mesma amostra onde foi determinado o pH em água, somente acrescentando a solução SMP; o fósforo disponível, por fotocolorimetria; o potássio disponível, por fotometria de chama; cálcio, magnésio e alumínio trocável, por espectrofotometria de absorção atômica, e matéria orgânica, por fotocolorimetria (Tedesco et al., 1995). Com base nessas análises, calcularam-se a CTC efetiva do solo,

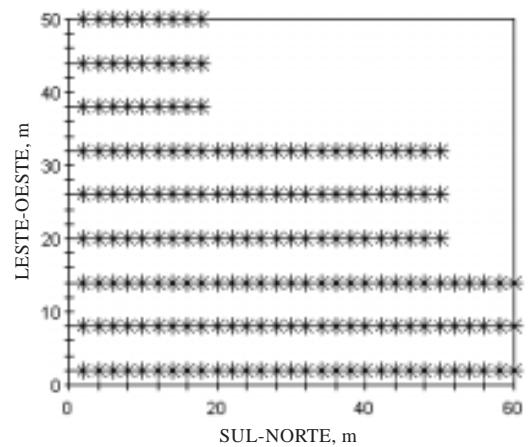


Figura 1. Área do experimento com o local de coleta das amostras de solo. (Asteriscos indicam os pontos amostrados).

a saturação por bases e a saturação por alumínio. A produtividade de grãos de milho foi avaliada colhendo-se as espigas de uma área útil de 8 m² em intervalos de 6 x 2 m.

Os dados foram inicialmente avaliados por meio da estatística descritiva, tomando por base as seguintes medidas: média aritmética, mediana, moda, coeficiente de variação, desvio-padrão, variância, coeficientes de assimetria e de curtose. O teste W de Shapiro-Wilk foi utilizado para verificar se os dados apresentavam distribuição normal. Nas avaliações, utilizou-se o pacote estatístico SAS (1985).

A dependência espacial foi avaliada com base nas pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca, pela análise de semivariogramas ajustados pelo software Gs⁺ (Gamma Design Software, 1998). O semivariograma foi estimado pela seguinte expressão:

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

em que N(h) é o número de pares experimentais de dados separados por uma distância h; Z(x_i) é o valor determinado em cada ponto amostrado; Z(x_i + h) é o valor medido num ponto mais uma distância h.

Testaram-se semivariogramas do tipo esférico, exponencial, linear, linear com patamar e gaussiano. A escolha dos modelos matemáticos foi realizada observando-se o coeficiente de correlação obtido pela técnica chamada de validação cruzada. Essa técnica consiste em retirar, individualmente, cada ponto medido da área estudada e o seu valor é estimado via krigagem como se ele nunca existisse.

As propriedades fósforo disponível, cálcio e magnésio trocável e saturação por alumínio apresentaram falta de estacionaridade, resultante de tendências submetidas a refinamento pela mediana, conforme método a seguir: (a) dispor os dados de acordo com sua posição na malha amostral; (b) calcular a mediana de cada linha e coluna, e (c) subtrair de cada valor amostrado o valor da mediana da linha e da coluna em que se encontra e adicionar, a cada valor amostrado, o valor da mediana de todo o conjunto de dados. Calculava-se novamente o semivariograma com os resíduos obtidos deste procedimento.

O efeito pepita refere-se ao valor do semivariograma na interceptação do eixo Y e representa o comportamento da variação ao acaso. Dividindo o efeito pepita pelo valor do patamar, o grau de dependência espacial das variáveis em estudo pode ser avaliado. Neste estudo, foi realizada uma modificação da classificação de Cambardella et al. (1994), subtraindo de uma unidade o resultado da divisão entre C₀ e C₀ + C₁. Nesse caso, foram considerados de dependência espacial forte os

semivariogramas que têm um efeito pepita $\geq 0,75$ do patamar; de dependência espacial moderada, quando o efeito pepita está entre 0,74 e 0,26, e de dependência fraca, quando o efeito pepita é $\leq 0,25$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O maior valor de coeficiente de variação (CV) foi para fósforo disponível, de 111 %, mostrando grande variação na área amostrada (Quadro 1). Com base no critério de Warrick & Nielsen (1980), as variáveis produtividade de grãos de milho, saturação por alumínio, alumínio trocável e potássio trocável apresentaram CV médios (22,6 a 47,9 %), enquanto pH em água, índice SMP, matéria orgânica, cálcio, magnésio, H + Al, CTC efetiva e saturação por bases apresentaram CV considerados baixos (2,6 a 14,7 %). Esse comportamento deveu-se, provavelmente, à forma de aplicação desses nutrientes no solo.

Mesmo as aplicações a lanço, seguidas de revolvimento do solo para incorporação dos restos culturais da aveia, da adubação fosfatada e do calcário, geram variabilidade no solo. Aliado a isto, efeitos residuais de adubações anteriores poderiam aumentar a variabilidade de fósforo, haja vista que este elemento, geralmente, é adicionado na linha, enquanto a correção da acidez do solo, bem como a deposição dos restos culturais, é realizada a lanço, de forma homogênea sobre a área. Schlindwein & Anghinoni (2000) verificaram CV altos para as variáveis P e K e baixos para pH em água, índice SMP e matéria orgânica do solo.

Somente as variáveis produtividade de grãos de milho, pH em água, fósforo disponível e potássio trocável apresentaram grandes diferenças entre os valores de média aritmética, mediana e moda. A maioria das variáveis apresentou simetria positiva, sendo os maiores valores para saturação por alumínio (3,140) e fósforo disponível (1,905). Simetria negativa foi verificada para produtividade de milho, matéria orgânica e alumínio, porém com valores próximos de zero, e saturação por bases, com simetria mais negativa, de -1,635.

O teste W (Shapiro-Wilk) também avalia o ajuste dos dados à distribuição normal. Baseado nesse teste, além da CTC efetiva, as variáveis cálcio, magnésio e saturação por bases apresentaram distribuição normal. Para Oliveira et al. (1999), somente a CTC efetiva do solo apresentou distribuição normal. No entanto, Dobermann & George (1994) verificaram que as variáveis pH em KCl, sódio trocável e produtividade de grãos de arroz apresentaram distribuição normal.

A análise geoestatística mostrou que todas as variáveis apresentaram dependência espacial (Figuras 2 e 3). Os semivariogramas foram definidos conforme melhor coeficiente de correlação entre os

Quadro 1. Valores de média, mediana (Md), moda (Mo), coeficiente de variação (CV), valor máximo (Mx), valor mínimo (Mn), desvio-padrão (σ), variância (s^2), coeficiente de assimetria (Ass), curtose e teste de normalidade dos dados (W) de variáveis de solos e produtividade de grãos de milho (safra 1998/99)

Variável	Média	Md	Mo	CV	Mx	Mn	σ	σ^2	Ass	Curtose	W
Produtividade de milho ($Mg\ ha^{-1}$)	4,80	4,94	4,76	22,6	7,38	2,19	1,08	1,17	-0,144	-0,485	0,971
pH em água 1:1	4,89	4,90	4,90	2,6	5,3	4,6	0,13	0,017	0,001	-0,155	0,932
Índice SMP	5,34	5,30	5,30	2,8	5,7	5,0	0,15	0,022	0,251	-0,314	0,928
Fósforo disponível ($mg\ kg^{-1}$)	13,2	7,20	1,00	111	69,5	1,0	14,7	215,6	1,905	3,450	0,748
Potássio trocável ($mg\ kg^{-1}$)	111,0	109	80,0	28,8	200	52	31,9	1020	0,593	-0,067	0,949
Matéria orgânica ($g\ kg^{-1}$)	27,1	27,0	29,0	8,1	35	21	2,20	4,85	-0,079	0,150	0,966
Al trocável ($cmol_c\ kg^{-1}$)	0,84	0,80	0,70	34,9	1,4	0,0	0,29	0,09	-0,089	-0,522	0,960
Ca trocável ($cmol_c\ kg^{-1}$)	4,29	4,20	4,10	11,6	5,5	2,8	0,49	0,25	0,082	0,162	0,975 ⁽¹⁾
Mg trocável ($cmol_c\ kg^{-1}$)	1,82	1,80	1,70	14,7	2,6	1,2	0,27	0,072	0,328	-0,021	0,965 ⁽¹⁾
H + Al ($cmol_c\ kg^{-1}$)	6,51	6,70	6,70	13,4	8,8	4,7	0,87	0,76	0,135	-0,109	0,930
CTC efetiva ($cmol_c\ kg^{-1}$)	7,24	7,20	7,00	7,92	8,9	5,4	0,57	0,33	0,007	0,470	0,987 ⁽¹⁾
Saturação por bases (%)	49,4	49,0	45,0	10,9	61	36	5,42	29,4	-1,635	9,703	0,976 ⁽¹⁾
Saturação de Al (%)	12,2	12,0	11,0	47,9	23	3,0	5,87	34,5	3,140	19,50	0,792

⁽¹⁾ Variável segue distribuição normal ($p = 0,05$).

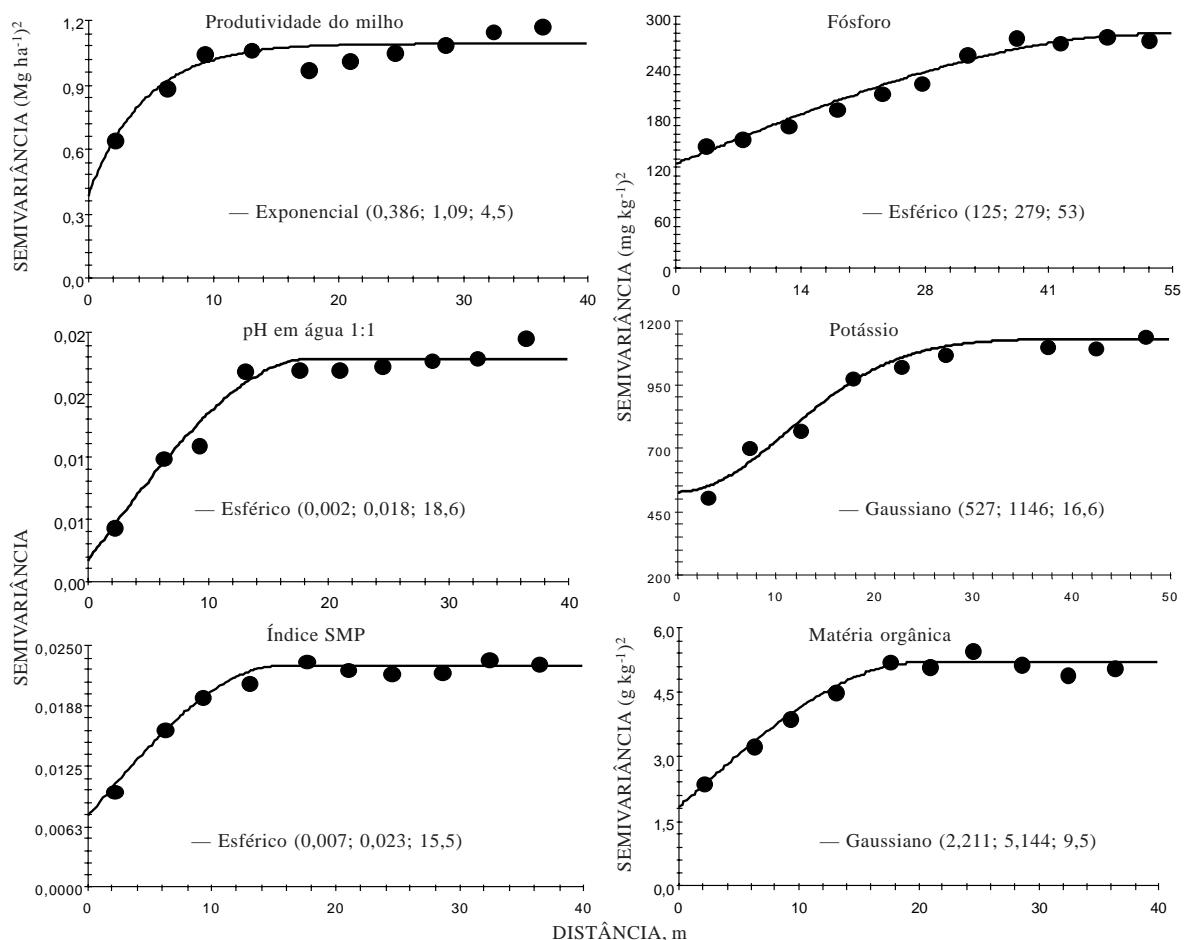


Figura 2. Semivariogramas das variáveis produtividade de milho, pH em água, índice SMP, fósforo disponível, potássio trocável e matéria orgânica do solo. (Valores entre parênteses são, respectivamente, efeito pepita, patamar e alcance).

dados originais e os dados estimados pelo semivariograma escolhido, técnica chamada de validação cruzada.

Ajustou-se o modelo exponencial para a produtividade do milho, alumínio trocável, cálcio trocável, magnésio trocável e H + Al. Para as variáveis pH em água, índice SMP, fósforo disponível e saturação por bases, foram ajustados semivariogramas do tipo esférico. Semelhantemente, Oliveira et al. (1999) ajustaram modelo esférico para condutividade elétrica do solo, potássio, cálcio, percentagem de sódio trocável, CTC e sódio. No entanto, esses autores utilizaram o modelo linear com patamar para magnésio trocável e modelo gaussiano para pH do solo. O modelo gaussiano foi ajustado para as variáveis potássio trocável e matéria orgânica do solo.

De acordo com o critério de Cambardella et al. (1994), somente as variáveis: índice SMP, fósforo

disponível, potássio trocável e matéria orgânica do solo apresentaram moderada dependência espacial, enquanto as demais apresentaram forte dependência espacial (Quadro 2). Isso demonstra que os semivariogramas explicam a maior parte da variância dos dados experimentais.

O alcance indica o limite da dependência espacial da variável, ou seja, determinações realizadas a distâncias maiores que o alcance têm distribuição espacial aleatória e, por isso, são independentes entre si, podendo ser aplicada a estatística clássica. Por outro lado, determinações realizadas em distâncias menores que o alcance são correlacionadas umas às outras, o que permite que se façam interpolações para espaçamentos menores que os amostrados. O menor valor de alcance foi de 4,5 m, para a produtividade de milho, e o maior foi de 53,2 m, para fósforo disponível.

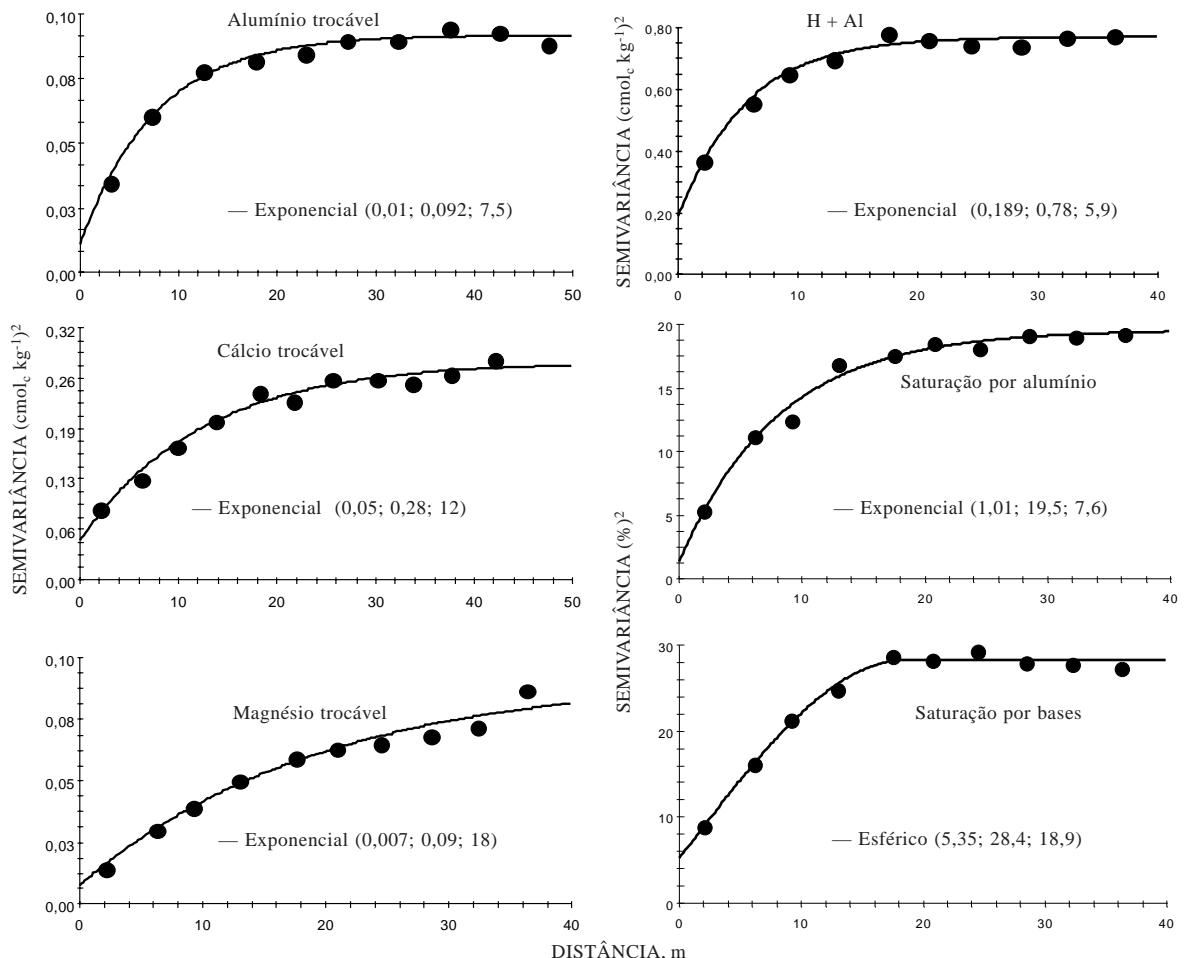


Figura 3. Semivariogramas das variáveis alumínio trocável, cálcio trocável, magnésio trocável, H + Al, saturação por alumínio e saturação por bases. (Valores entre parênteses são, respectivamente, efeito pepita, patamar e alcance).

Quadro 2. Valores do efeito pepita (C_o), patamar ($C_o + C_1$), alcance (a), relação efeito pepita/patamar e coeficiente de determinação (R^2), dos modelos ajustados, para todas as variáveis estudadas

Variável	C_o	$C_o + C_1$	a (m)	$1 - [C_o/C_o + C_1]^{(1)}$	R^2	VC ⁽²⁾	Classificação
Produtividade de milho ($Mg\ ha^{-1}$)	0,386	1,094	4,54	0,65	0,85	0,896	Moderada
pH em água 1:1	0,002	0,0179	18,66	0,91	0,96	0,970	Forte
Índice SMP	0,007	0,023	15,56	0,68	0,98	0,974	Moderada
Fósforo disponível ($mg\ kg^{-1}$)	124,7	279,5	53,20	0,55	0,97	0,756	Moderada
Potássio trocável ($mg\ kg^{-1}$)	527,0	1146,0	16,6	0,54	0,95	0,959	Moderada
Matéria orgânica ($g\ kg^{-1}$)	2,211	5,144	9,5	0,57	0,96	0,990	Moderada
Al trocável ($cmol_c\ kg^{-1}$)	0,010	0,092	7,5	0,88	0,98	0,928	Forte
Ca trocável ($cmol_c\ kg^{-1}$)	0,049	0,277	12,37	0,82	0,98	0,962	Forte
Mg trocável ($cmol_c\ kg^{-1}$)	0,007	0,089	18,12	0,92	0,97	0,999	Forte
H + Al ($cmol_c\ kg^{-1}$)	0,189	0,778	5,95	0,76	0,97	0,896	Forte
CTC efetiva ($cmol_c\ kg^{-1}$)	0,052	0,434	20,18	0,88	0,98	0,997	Forte
Saturação por bases (%)	5,35	28,42	18,9	0,81	0,99	0,999	Forte
Saturação por alumínio (%)	1,01	19,47	7,63	0,95	0,99	0,958	Forte

⁽¹⁾ Adaptado de Cambardella et al. (1994). ⁽²⁾ VC = Coeficiente de correlação do teste de validação cruzada.

As demais variáveis podem ser divididas em dois conjuntos com alcance próximos. As variáveis pH em água, índice SMP, potássio trocável, CTC efetiva e saturação por bases apresentaram alcance em torno de 18 m (Quadro 2). Para matéria orgânica do solo, alumínio trocável, cálcio trocável, H + Al e saturação por alumínio, o alcance foi próximo de 10 m. Apesar de ajustar semivariogramas para fósforo disponível, cálcio, magnésio e saturação por alumínio, essas variáveis apresentaram tendência à estabilização em determinada distância, por essa razão os valores do alcance podem estar subestimados.

A produtividade de milho, saturação por alumínio, alumínio trocável e H + Al apresentaram semivariogramas muito parecidos, com valores de alcance muito próximos, indicando que a produtividade do milho pode estar associada a uma toxidez de alumínio na área.

Os pequenos valores de alcance da dependência espacial para alumínio trocável, saturação por alumínio, matéria orgânica do solo e H + Al podem ser atribuídos à forma de distribuição desses elementos no solo. O calcário e os restos culturais são, geralmente, distribuídos uniformemente sobre o solo; entretanto, o fósforo e o potássio são, geralmente, distribuídos em linhas, provocando variabilidade espacial (Kleper & Anghinoni, 1995; Schlindwein & Anghinoni, 2000).

CONCLUSÕES

1. O efeito aditivo da variabilidade natural de características químicas do solo e da incorporação da massa verde de aveia, da aplicação e incorporação de 300 kg ha^{-1} de superfosfato simples e 5.000 kg ha^{-1}

de calcário provocou variabilidade espacial de nutrientes no solo.

2. As variáveis cálcio trocável, magnésio trocável, saturação por bases e capacidade de troca de cátions apresentaram distribuição normal. A variável fósforo disponível do solo apresentou o maior coeficiente de variação, de 111 %.

3. A produtividade de grãos de milho e todas as características químicas do solo avaliadas (pH em água, índice SMP, fósforo disponível, potássio trocável, matéria orgânica do solo, alumínio trocável, cálcio trocável, magnésio trocável, H + Al, CTC efetiva, saturação por bases e saturação por alumínio) apresentaram dependência espacial forte a moderada.

LITERATURA CITADA

- ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J. & FIORIN, J.E. Variabilidade de solo e planta em Podzólico Vermelho-Amarelo. R. Bras. Ci. Solo, 20:151-157, 1996.
- BERG, M.V.D. & KLAMT, E. Variabilidade espacial de características de solos na região do planalto médio, RS: I. Análise da variância por amostragem aninhada. R. Bras. Ci. Solo, 21:393-399, 1997.
- BERTOLANI, F.C. & VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. R. Bras. Ci. Solo, 25:987-995, 2001.
- 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 Sci. Soc. Am. J., 58:1501-1511, 1994.

- COUTO, E.G.; KLAMT, E. & STEIN, A. Estimativa do teor de argila e do potássio trocável em solos esparsamente amostrados no sul do estado de Mato Grosso. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:129-140, 2000.
- DOBERMANN, A. & GEORGE, T. Field-scale soil fertility variability in acid tropical soils. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 15., Acapulco, 1994. Transactions. Acapulco, 1994. v.5. p.610-627.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- GAMMA DESIGN SOFTWARE. Geoestatistics for the environmental sciences (version 5.1 for windows). Michigan, 2000.
- JENNY, H. Factors of soil formation. New York, McGraw-Hill, 1941. 281p.
- KLEPER, D. & ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. *R. Bras. Ci. Solo*, 19:395-401, 1995.
- LITTLE, T.M. & HILLS, F.J. Agricultural experimentation. New York, John Wiley & Sons, 1978. 350p.
- OLIVEIRA, J.J.; CHAVES, L.H.G.; QUEIROZ, J.E. & LUNA, J.G. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:783-789, 1999.
- SANTOS, J.W.; MOREIRA, J.A.N. & BELTRÃO, N.E.M. Avaliação do emprego dos testes de comparação de médias na revista Pesquisa Agropecuária Brasileira (PAB) de 1980 a 1994. *Pesq. Agropec. Bras.*, 33:225-230, 1998.
- SAS INSTITUTE. SAS User's guide; statistics. 5.ed. Cary, 1985. 956p.
- SCHLINDWEIN, J.A. & ANGHINONI, I. Variabilidade espacial de atributos de fertilidade e amostragem de solo no sistema plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:85-91, 2000.
- SNEDECOR, G.W. & COCHRAN, W.G. Statistical methods. 7.ed. Ames, Iowa State University, 1974. 507p.
- SOUZA, L.S.; COGO, N.P. & VIEIRA, S.R. Variabilidade de fósforo, potássio e matéria orgânica no solo em relação a sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:77-86, 1998.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 147p. (Boletim Técnico, 5)
- WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. Application of soil physics. New York, Academic Press, 1980. p.319-344.