

Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades químicas de um Argissolo Vermelho

Rafaelly S. da S. Santos¹

¹Eng. Agrônomo – Doutoranda do Programa de Engenharia em Sistemas Agrícolas na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo. Email para correspondência rafa_agronoma@hotmail.com

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. Para se avaliar estas propriedades, algumas amostras de solo são retiradas, aleatoriamente, de forma a que os valores medidos permitam inferir sobre seus valores médios em toda a área. No entanto, este procedimento não considera uma possível estrutura de variabilidade espacial, o que pode levar a erros. Assim, com o objetivo de descrever a distribuição e a dependência espacial de atributos químicos do solo, avaliando a importância da análise exploratória dos dados, foi conduzido este trabalho, no campus da ESALQ/USP. Ao longo de um raio de uma área irrigada por pivô-central, foi demarcada uma transeção com 115 pontos, nos quais amostras de solo foram retiradas na profundidade de 0,20 m. Os valores obtidos para variáveis químicas, após a remoção de tendências, permitiram construir semivariogramas e, por meio da análise destes, constatar que uma cuidadosa análise exploratória preliminar é fundamental antes de se construir e interpretar semivariogramas.

Palavras-chave: propriedades físicas do solo, variabilidade espacial, geoestatística, semivariograma.

1 Introdução

A formação e a estabilização dos agregados do solo ocorrem simultaneamente na atuação de processos físicos, químicos e biológicos. Esses processos atuam por mecanismos próprios, em que são envolvidos por substâncias que agem na agregação e na estabilização. Entre essas, as principais são: argila, sílica coloidal, compostos orgânicos, metais polivalentes, carbonato de cálcio, óxido e hidróxidos de ferro e alumínio (Silva & Mielniczuk, 1997).

O estudo dos atributos físicos e químicos do solo sempre foi importante instrumento no processo de análise de produtividade e da conseqüente escolha sobre técnicas de manejo a serem adotadas em uma determinada área (Pierce & Nowak, 1999).

O entendimento da variabilidade exige uma maior quantidade de informações, as quais podem ser obtidas a partir de operações de amostragem de solo no campo. Quanto maior o número de amostras, mais alto é o ônus financeiro para o agricultor, e, portanto, o método da geoestatística é uma alternativa na otimização deste processo (Mulla et al., 1992). O conhecimento das relações entre solo e a posição da paisagem definida no espaço e no tempo pode subsidiar levantamentos de solos (Marques Júnior & Lepsch, 2000). A paisagem pode ser utilizada na definição de zonas de manejo, permitindo definição de práticas regionalizadas do solo, e, juntamente com a definição da variabilidade espacial, possibilita melhor controle dos fatores de produção das culturas e proteção ambiental (Fraisse et al., 1999).

Para se inferir sobre as características dessa população, ou seja, para descrever a propriedade na área, torna-se necessária uma abordagem estatística, onde se procura inferir, a partir de valores amostrais, sobre os parâmetros que caracterizam a sua distribuição de freqüência. A estatística assume que um valor medido é em parte explicado por um modelo e parte pela variação devida ao acaso. Como apresentado por Trangmar *et al.* (1985), o valor de uma propriedade z , medido em uma posição s da área, pode ser representado por: $z(s) = \mu + e(s)$, em que μ é a média populacional, ou a esperança de Z e $e(s)$ são os desvios dos valores em torno da média, assumidos como sendo independentes e com distribuição normal de média zero.

De acordo com Warrick e Nielsen (1980), conforme a propriedade do solo considerada, o coeficiente de variação pode variar de valores menores que 10 a maiores que 1000%. Segundo estes autores, dados de densidade do solo e porosidade tendem a apresentar C_v de até 10% (baixa variação).

Para verificar o ajuste de um conjunto de dados à distribuição normal, pode-se fazer uso de gráficos em papel de probabilidade normal (Nielsen et al., 1973) ou, pode-se também fazer uso de um teste não paramétrico, como o de Kolmogorov-Smirnov, apresentado por Kreyszig (1970) e Rao et al. (1979).

A conveniência dos métodos clássicos da estatística fez com que os estudos da variabilidade das propriedades dos solos não despertassem maiores interesses durante a maior parte do século XX. Beckett e Webster (1971) ressaltaram a necessidade de se dar uma maior atenção ao assunto. A motivação para estudos mais minuciosos da

variabilidade de propriedades do solo revelou limitações das ferramentas estatísticas utilizadas até então para a análise dos dados. Comumente as hipóteses de normalidade e independência dos dados não são testadas e, além disto, a independência tem que ser assumida *a priori*, antes de se amostrar. Toda a variabilidade apresentada pelos valores é atribuída ao resíduo, ou seja, a fatores não controlados. No entanto, a variação das propriedades do solo no espaço comumente apresenta dois componentes, o sistemático e o aleatório. Wilding e Drees (1983) descrevem a variabilidade sistemática como sendo as mudanças graduais nos valores da propriedade que ocorrem em função dos fatores de formação ou de processos que atuam dentro da escala de observação. Além disto, parte da variabilidade que se credita ao acaso pode ser devida à dependência espacial.

Segundo Hamlett et al. (1986), as análises estatísticas “tradicionais”, baseadas na independência das observações, têm sido substituídas por análises espaciais, as quais consideram as correlações entre observações vizinhas. Essas análises são baseadas na teoria das variáveis regionalizadas, formalizada por Matheron (1963), base da geoestatística, a qual considera as características estruturais e aleatórias de uma variável espacialmente distribuída, de forma a descrevê-la adequadamente (Moolman e Van Huyssteen, 1989).

Quando se faz um levantamento de solo, procura-se conhecer a escala de variação das suas propriedades. As informações necessárias para tanto são usualmente obtidas a partir de transeções, nas quais as propriedades de interesse são medidas em pontos dispostos com espaçamento constante (Nash et al., 1988). A geoestatística aplicada aos dados que foram coletados em pontos cujas coordenadas são conhecidas, dentro da área, possibilita a obtenção da sua estrutura da variância.

Uma vez quantificada, a dependência espacial das propriedades do solo pode ser utilizada para a classificação e para o levantamento de solos em uma área, assim como pode ser usada na interpolação entre observações, permitindo o mapeamento da propriedade do solo dentro da área, por meio da krigagem. Esta técnica permite a estimativa de valores de forma não tendenciosa e com variância mínima.

A análise e modelagem da estrutura espacial de uma variável têm como base a teoria das variáveis regionalizadas e como ferramenta primária o semivariograma (Hamlett et al., 1986). O estimador usual do semivariograma é apresentado por Journel (1989), como sendo:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_1^{N(h)} [Z(s) - Z(s+h)]^2$$

Sendo, $Z(s)$ o valor da propriedade Z na localização s , no espaço, e $N(h)$ o número de pares de dados separados pela distância h . Segundo Journel e Huijbregts (1978), para o emprego deste estimador, é desejável que o número de pares seja maior que 50. Esta informação, no entanto, é altamente subjetiva e deve ser tomada como apenas uma referência genérica.

Hamlett et al. (1986) afirmam que os dados devem preencher certas condições de estacionaridade para que o semivariograma possa ser construído e interpretado. De acordo com estes autores, no entanto, estacionaridade é uma condição que freqüentemente não é encontrada, quando fenômenos naturais são estudados. Assim, técnicas exploratórias devem ser usadas para se avaliar previamente os dados, com vistas ao atendimento destas hipóteses. Segundo Journel e Huijbregts (1978), a estacionaridade de segunda ordem existe quando:

1. $E[Z(s)] = E[Z(s + h)] = m$, ou seja, a média dos valores de $Z(s)$ existe e não depende da localização s ; e
2. para cada par de valores de Z , separados de h , a função de covariância existe e depende apenas de h . Isto implica na estacionaridade da variância e do semivariograma (Vieira et al., 1983). Uma hipótese menos restritiva é a hipótese intrínseca, segundo a qual a primeira condição acima é atendida e que a função do semivariograma existe e a variância das diferenças depende apenas de h , segundo Vieira et al. (1983) e Hamlett et al. (1986), os quais apresentam discussão mais detalhada sobre o assunto.

Quando se deseja comparar os semivariogramas de propriedades diferentes para verificar se essas apresentam o mesmo padrão de variabilidade espacial, pode-se fazer uso do semivariograma escalonado. Gonçalves et al. (1999a) utilizaram esta ferramenta no estudo da estabilidade temporal do padrão espacial da umidade do solo da área em estudo. Quando se deseja comparar o padrão de variabilidade espacial de uma mesma propriedade em diferentes regiões, pode-se também usar o escalonamento do semivariograma, como apresentado por Isaaks e Srivastava (1989), uma vez que esse procedimento padroniza a escala dos semivariogramas.

De acordo com Journel e Huijbregts (1978), se $E[Z(s)] = m(s)$, ou seja, o valor de m é função da posição s , então a estacionaridade não se confirma, podendo o semivariograma experimental assumir forma totalmente diferente da verdadeira para a propriedade em estudo. Hamlett et al. (1986) afirmam que estacionaridade é mais exceção do que regra nos problemas reais. Destacam, em vista disto, a importância de uma cuidadosa análise inicial, antes de se construir e interpretar semivariogramas.

O efeito da tendência em semivariograma experimental é abordado em alguns trabalhos. Starks e Fang (1982) mostram que a presença de tendência afeta fortemente o semivariograma, podendo conduzir a conclusões totalmente falsas. Ressaltam que esse efeito depende, no entanto, da extensão e da intensidade de amostragem.

A geoestatística apresenta, segundo Hamlett et al. (1986), um potencial de aplicação em muitas áreas de pesquisas em solos. É importante, no entanto, proceder a uma cuidadosa análise prévia dos dados, antes de se obter conclusões a partir de ferramentas sofisticadas como o semivariograma, de forma a garantir as condições necessárias à sua aplicação.

Este trabalho teve como objetivos investigar um conjunto de dados espacialmente referenciados, buscando avaliar o atendimento ou não das hipóteses de estacionaridade e a conseqüente influência sobre a análise variográfica de um conjunto de dados, obtidos ao longo de uma transeção, posicionada de forma radial, em uma área irrigada por pivô-central.

2 Material e métodos

O trabalho foi conduzido no campo experimental de irrigação do Departamento de Engenharia Rural, situado na Fazenda Areão, Campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ESALQ/USP, em Piracicaba, Estado de São Paulo. As coordenadas geográficas do município são 22°42’ de latitude sul, longitude oeste de 47°38’ e altitude média de 546 m acima do nível do mar.

Foi usado um quadrante de uma área irrigada por um sistema pivô-central, com declividade média de aproximadamente 2% na sua direção bissetriz. Esse quadrante corresponde ao topo da encosta onde está instalado o pivô, sendo de baixa declividade média em quase toda a sua extensão. O solo da área foi classificado como Argissolo vermelho (Embrapa, 1999).

O clima da região, segundo a classificação de Koppen, é do tipo mesotérmico CWa, com uma precipitação média anual de 1247 mm, umidade relativa média de 69% e temperatura média de 20,8°C. No inverno, tem-se estiagem, a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e do mês mais quente superior a 22°C. O clima é caracterizado como tropical de altitude. As chuvas estão concentradas no período de novembro a fevereiro, sendo comumente de alta intensidade e de curta duração.

A superfície do solo foi submetida a uma gradagem e, em seguida, foi demarcada uma transeção, segundo um raio da área, com 230 metros, em solo nu, na direção da menor declividade do terreno. Os pontos foram marcados a cada 2,0 m e as amostras foram retiradas, em cada um destes pontos, para a análise granulométrica, a 0,20 m de profundidade. O material retirado foi levado ao Laboratório do Departamento de Engenharia Rural, onde as análises foram realizadas.

Os dados obtidos foram analisados segundo os procedimentos clássicos da estatística descritiva (Beiguelman, 1994), bem como à luz da teoria das variáveis regionalizadas. Para cada uma das propriedades estudadas, procedeu-se à estatística descritiva dos dados, para uma primeira descrição das suas distribuições de frequência.

3 Resultados e discussões

Os valores de teores correspondentes à matéria orgânica obtidos nos cento e quinze pontos amostrais, presentes na transeção radial à área irrigada pelo pivô central, foram analisados por meio da estatística descritiva. Na Tabela 1, são apresentados os valores dos parâmetros estatísticos utilizados para descrever as distribuições dos dados medidos.

Tabela 1 – Estatística descritiva para os dados químicos do solo.

Estatística	mo	p	k	ca	mg	H+Al	SB	T	V%	dg	dp	Ptotal
Número	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00
Média	1,98	10,99	0,14	2,62	1,01	7,36	3,77	11,13	35,04	1,61	2,65	39,26
Mediana	2,00	8,00	0,14	2,60	1,00	6,40	3,70	10,90	25,00	1,62	2,68	39,60
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,38	2,34	29,62
Máximo	3,30	6,70	0,39	50,00	17,00	20,50	67,00	22,40	62,00	1,75	2,87	49,19
Quartil inferior	1,70	60,00	0,09	20,00	0,80	58,00	29,00	95,25	25,00	1,56	2,57	37,41
Quartil superior	22,00	1,40	0,16	31,75	12,00	88,00	45,00	12,50	44,00	1,66	2,71	41,87
CV	20,47	76,71	43,68	35,15	29,33	38,74	31,28	23,13	35,52	4,48	3,76	9,91
Desvio-padrão	0,41	8,43	0,06	0,92	0,30	2,85	1,18	2,58	12,45	0,07	0,10	3,89

Os valores de conteúdo de matéria orgânica nos 134 pontos amostrais compõem uma distribuição cuja média é 0,19% menor que a mediana, revelando uma distribuição ligeiramente assimétrica. Comportamento semelhante pode ser observado nas distribuições dos demais elementos químicos (fósforo, potássio, cálcio, magnésio, hidrogênio + alumínio, soma de bases, capacidade de troca catiônica, relação entre soma de bases e CTC, densidade global, densidade de partículas e porosidade total).

Se existe correlação e tendência no teor de matéria orgânica é importante caracterizar a dependência espacial, e assim, fundamentando-se nos resultados das análises

exploratórias foram estudados modelos que representaram a dependência espacial para esta variável resposta. Foram considerados os modelos com todas as covariáveis na estrutura de covariância esférica.

Verificou-se também se algum possível valor discrepante influenciou a resposta da matéria orgânica e, métodos exploratórios como variogramas foram realizados. O variograma robusto, proposto por Cressie (1993) (Figura 1).

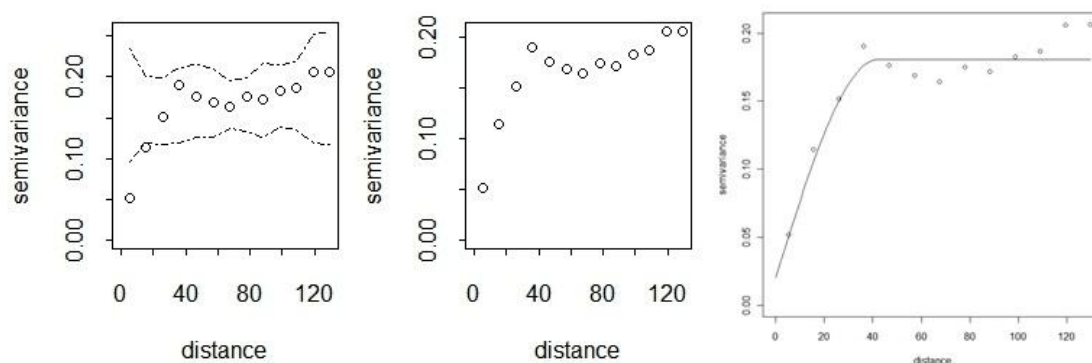


Figura 1 – Gráfico de envelope dos dados, variograma sem ajuste e variograma após ajuste de máxima verossimilhança, dos dados de matéria orgânica do solo.

Embora existam valores que distanciam da massa de dados, não devem ser considerados outliers, pois são valores repetidos e muito pequenos, oriundos da região em que a adubação não foi recente. Mesmo com variogramas empíricos erráticos em função dos diferentes números de pares que geram cada ponto do variograma, verificou-se a existência de dependência espacial para a matéria orgânica, mas foi necessário obter variogramas baseados em modelos e seus parâmetros obtidos por máxima verossimilhança. Os valores iniciais dos parâmetros do modelo esférico para o efeito pepita, patamar e alcance foram respectivamente $\sigma^2 = 0,16$, $\tau^2 = 0,021$ e $\Phi = 42,08$.

4 Referências Bibliográficas

BECKETT, P.H.T.; WEBSTER, R. Soil variability: a review. **Soil Fertil.**, v. 31, p. 1-15, 1971.

BEIGUELMAN, B. **Curso prático de bioestatística**. 3 ed. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1994.

FRAISSE, C.W.; SUDDUTH, K.A.; KITCHEN, N.R.; FRIDGEN, J.J. **Use of unsupervised clustering algorithms of delineating within-field management zones.** St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1999. 121p. (ASAE Paper, 15).

GONÇALVES, A.C.A. et al. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 1, p. 155-164, 1999a.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied Geostatistics.** New York: Oxford University Press, 1989.

JOURNEL, A. G. **Fundamentals of Geostatistics in five lessons.** Washington: American Geophysical Union, 1989.

JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining Geostatistics.** London: Academic Press, 1978.

HAMLETT, J. M. et al. Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analyses. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 50, p. 868-875, 1986.

KREYSZIG, E. **Introductory mathematical statistics: principles and methods.** New York: John Wiley, 1970.

MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I.F. Depósitos superficiais neocenozóicos, superfícies geomórficas e solos em Monte Alto, SP. **Geociências**, v.19, p.265-281, 2000.

MATHERON, G. Principles of Geoestatics. **Economic Geology**, v. 58, p. 1246-1266, 1963.

MOOLMAN, J.H.; VAN HUYSSSTEEN, L. A geostatistical analysis of the penetrometer soil strength of a deep ploughed soil. **Soil Tillage Res.**, Amsterdam, v. 15, p. 11-24, 1989.

MULLA, D.J.; BATÍ, A.U.; HAMMOND, M.W.; BENSON, J.A. A comparison of winter wheat yield and quality under uniform versus spatially variable fertilizer management. **Agriculture Environment**, v.38, p.301-311, 1992.

NASH, M.H. et al. Horizontal and vertical kriging of soil properties along a transect in southern New Mexico. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 52, p. 1086-1090, 1988.

NIELSEN, D.R. et al. Spatial variability of field-measured soil-water properties. **Hilgardia**, Oakland, v. 42, n. 7, p. 215-259, 1973.

PIERCE, F.J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Advances in Agronomy**, v.67, p.1-85, 1999.

RAO, P.V. et al. Use of goodness-of-fit tests for characterizing the spatial variability of soil properties. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 43, p. 274-278, 1979.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.113-117, 1997.

STARKS, T.H.; FANG, J.H. The effect of drift on the experimental semivariogram. **Mathematical Geology**, v. 14, n. 4, p. 309-319, 1982.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; WADE, M.K.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v.38, p.45-94, 1985.

VIEIRA, S.R. et al. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Oakland, v. 51, n. 3, p. 1-75. 1983.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. p.319-344.

WILDING, L.P.; DREES, L.R. **Pedogenesis and soil taxonomy. I concepts and interactions**. Amsterdam: Elsevier, 1983. p.83-116.

Professor Paulo,

Conforme combinado fiz o que consegui com os dados, sei que teria como explorar e trabalhar mais com eles, só que ainda não tenho esta capacidade. Como estou viajando não tive como adicionar resultados e fazer uma boa discussão dos dados, estou enviando-te o que consegui fazer.

Como conversado em sala, ajudei o Jefferson com o artigo dele, poderemos depois melhorar as discussões, mais tendo em vista o término da disciplina e necessidade de entrega dos resultados, fizemos o que nos coube dentro do prazo.

Desde já agradeço todo o empenho e dedicação a disciplina. Muito obrigada.