

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

Antônio Carlos Andrade Gonçalves^{1*}, Marcos Vinícius Folegatti² e José de Deus Viana da Mata¹

¹Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil.

²Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Av. Pádua Dias, 11, Piracicaba, São Paulo, Brasil. *Author for correspondence. e-mail: acagoncalves@uem.br

RESUMO. O manejo da água para a agricultura irrigada exige o conhecimento de propriedades físicas e hídricas do solo. A textura é de particular importância, uma vez que a interação água - solo depende da composição granulométrica, particularmente da fração argila. 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 espacial dos valores das frações granulométricas, 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 frações granulométricas, 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.

ABSTRACT. Exploratory and geostatistical analysis of physical properties on a tropical soil. Design and management of irrigation systems depends on adequate measurements of soil physical properties. Soil water relationships are affected by soil texture, particularly by its clay content. Some soil samples are randomly obtained from the irrigated field, while an average is obtained to describe the soil texture variables in all fields. However, if a spatial dependence exists, the spatial distribution of these variables is not adequately described. Research has been conducted at experimental irrigated field of ESALQ/USP - Brazil, to evaluate the spatial dependence and the influence of the exploratory analysis on geostatistical study of sand and clay contents of soil. Results showed that a careful exploratory analysis could be previously undertaken for semivariograms and their interpretation.

Key words: physical properties, spatial variability, geostatistics, semivariogram.

O manejo da água no solo requer estimativas seguras das suas propriedades hidráulicas. Babalola (1978) salienta que alta variabilidade de propriedades físicas do solo, tais como o conteúdo de areia, argila e silte, bem como da densidade global, resultam em alta variabilidade nas características de retenção de água pelo solo. Desse forma, torna-se importante o conhecimento de como se comportam estas propriedades, onde se pretende ter conhecimento e controle da dinâmica da água no solo, como em uma área irrigada.

Mesmo em uma área de solo homogêneo, a medida de uma propriedade em alguns pontos pode revelar grandes variações de valores, pois o solo é produto da ação de diversos fatores de formação e varia continuamente na superfície. Uma propriedade do solo é uma variável com continuidade espacial (Burgess e Webster, 1980) e, como tal, constitui em uma população infinita em uma determinada área. 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 frequência. 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). Condutividade hidráulica saturada (Queiroz, 1995) tem gerado C_v com valores da ordem de 100 a 200% (alta variação). Frações granulométricas têm apresentado C_v entre 10 a 100%, enquanto valores de umidade, a uma dada tensão, tendem a fornecer valores de C_v da ordem de 10 a 50%, o que pode ser caracterizado como de média variação (Gonçalves, 1997).

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, com a difusão dos recursos computacionais, fazer uso de algum software que permita a “plotagem” dos valores medidos segundo uma linha que expressa a distribuição normal. Uma apresentação gráfica desta forma permite uma avaliação visual da aderência. 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. Gonçalves (1997) apresenta um estudo geoestatístico detalhado de várias propriedades físicas dentro da área do presente estudo, no qual foram realizadas interpolações por krigagem para descrever a sua distribuição espacial.

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:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(s) - Z(s+h)]^2 \quad (01)$$

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 Journal 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.

Uma vez que as propriedades do solo variam continuamente no espaço, os seus semivariogramas são funções contínuas. O semivariograma experimental consiste em alguns pontos estimados ao longo dessa função e, portanto, sujeitos a erros. De acordo com Webster (1985), é possível ajustar funções simples a esses pontos.

Alguns modelos matemáticos podem ser ajustados a um semivariograma, desde que algumas condições sejam atendidas, como descrito por McBratney e Webster (1986). Dentre os modelos usados, os autores apresentam o exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left\{ 1 - e^{\left(\frac{-3h}{a} \right)} \right\} \text{ para } h \geq 0 \quad (02)$$

em que h é a distância de separação entre pontos, a é o alcance, C é o componente estrutural e C_0 o efeito pepita ou variação não estruturada no espaço.

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 Journal 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.

Segundo Vieira (1995), se a tendência é verificada, deve-se então removê-la dos dados e ajustar o semivariograma para os resíduos. Para tanto, cita o procedimento descrito por Davis (1986), segundo o qual se pode ajustar um polinômio de primeiro ou segundo grau, para os valores da propriedade, em função das coordenadas, e fazer com que o resíduo seja obtido pela diferença entre valor medido e valor do polinômio em cada ponto. Buchter *et al.* (1991) usam o procedimento de ajuste polinomial para a remoção da tendência não linear.

Hamlett *et al.* (1986) apresentam a técnica do refinamento pela mediana, onde os resíduos são obtidos pela remoção das medianas das linhas e das colunas. Os autores mostram que o uso dos resíduos conduz à distribuição mais simétrica, melhor para as análises espaciais. Os autores descrevem técnicas para análise exploratória dos dados, como gráfico caule-e-folhas, dispersão média-variância e transformação de dados para adaptá-los às exigências do estudo espacial. Isaaks e Srivastava (1989) apresentam a técnica de janelas móveis, as quais permitem a identificação visual de possíveis tendências na região em estudo, embora este seja um procedimento com elevado grau de subjetividade.

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.

Russo e Jury (1987) descrevem uma propriedade não-estacionária como um processo composto por

dois componentes, um estocástico, ou variação de alta frequência e um determinístico, ou variação de baixa frequência. Nesse caso, o semivariograma, que deveria descrever o primeiro, pode ser influenciado pelo segundo. No caso particular de uma tendência linear, o semivariograma cresce quadraticamente com h . Geralmente, a forma do semivariograma é afetada pela forma do componente determinístico, pela escala do componente estocástico e pela relação entre variâncias associadas a ambos.

Myers (1989) afirma que o conceito de estacionaridade não é bem entendido, uma vez que essa diz respeito à função aleatória e não aos dados. O procedimento de remover a tendência ajustando polinômios pelo método dos mínimos quadrados é razoável, porém, não infalível. Infelizmente, não existe ainda uma maneira conclusiva de se abordar o problema.

Journal e Rossi (1989) concluem que, usando apenas os vizinhos mais próximos para a estimativa por krigagem, mesmo a presença de uma clara tendência direcional não afetou a estimativa, uma vez que dentro da vizinhança adotada, foi possível, neste caso, considerar a função aleatória como sendo estacionária. Além disto, para cada estimativa realizada, uma nova média era estimada, o que contribuiu para a melhor qualidade da estimativa. É importante destacar, no entanto, que, embora estes autores tenham chegado a esta conclusão, em outras situações, pode ocorrer o oposto, ou seja, independente da vizinhança adotada, a negativa da estacionaridade pode comprometer a qualidade da estimativa.

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. Uma aplicação do estudo geoestatístico, para a definição de estratégias de amostragem em solos, é apresentada por Gonçalves *et al.* (1999b).

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. Foram considerados os conteúdos de areia, silte e argila e, para cada conjunto de dados, foi feita uma análise descritiva e exploratória, buscando verificar o

atendimento das hipóteses usualmente estabelecidas nos estudos envolvendo estatística e geoestatística.

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. Esta análise foi complementada pela análise exploratória, dentro da qual se buscou avaliar o atendimento da hipótese de estacionaridade assumida, bem como o efeito desta análise e dos procedimentos decorrentes da mesma, sobre o semivariograma experimental para os dados e, conseqüentemente, sobre o modelo ajustado a este

e as conclusões obtidas sobre a estrutura de variação de cada propriedade no espaço.

Resultados e discussão

Os valores de teores correspondentes às frações granulométricas 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 originais das frações granulométricas e para os dados, após a remoção dos valores externos aos limites inferior e superior. (*)

Estatística	Argila	Silte	Areia	Argila*	Silte*	Areia*
Número	115	115	115	109	115	114
Média	39,9	26,3	33,8	40,4	26,3	33,7
Mediana	40,9	25,8	33,2	41,0	25,8	33,1
Mínimo	26,8	18,2	26,1	28,9	18,2	26,1
Máximo	52,8	36,1	44,5	50,7	36,1	41,6
Quartil inferior	37,5	23,1	31,4	38,5	23,1	31,4
Quartil superior	43,3	29,4	36,0	43,3	29,4	36,0
Variância	29,3	16,8	13,4	22,2	16,8	12,5
Assimetria	-0,549	0,259	0,443	-0,524	0,259	0,327
Curtose	0,033	-0,741	-0,079	-0,030	-0,741	-0,353
Cv	13,6	15,6	10,8	11,7	15,6	10,5
Linferior	28,9	13,6	24,4	-	-	-
Lsuperior	51,9	38,9	43,0	-	-	-
d	0,123	0,099	0,088	0,105	0,099	0,086

Os valores de conteúdo de argila nos 115 pontos amostrais compõem uma distribuição cuja média é 1% menor que a mediana, revelando uma distribuição ligeiramente assimétrica, como pode ser observado pelo coeficiente de assimetria com valor negativo. Comportamento semelhante pode ser observado nas distribuições de silte e de areia, embora a distribuição de argila não possa ser considerada como normal, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (Campos, 1983), ao contrário das outras duas. O coeficiente de variação obtido permite caracterizar estas propriedades como de média variação, de acordo com o critério de Warrick e Nielsen (1980).

Os valores obtidos para os limites inferior e superior da faixa, fora da qual se pode caracterizar os dados como candidatos a “outliers”, conforme Libardi *et al.* (1996), permitem identificar seis valores externos na distribuição de argila, um na distribuição de areia e nenhum na distribuição de silte. Para avaliar o efeito destes dados possivelmente discrepantes sobre a forma de cada distribuição, foram calculadas as estatísticas descritivas após a remoção dos mesmos. A Tabela 1 permite verificar que o Cv, os coeficientes de assimetria e de curtose e a proximidade entre os valores de média e mediana

pouco se alteram com esta remoção, evidenciando que, embora apresentem alguns valores elevados, estas distribuições não apresentam caudas excessivamente alongadas que possam comprometer a análise geoestatística.

Complementando a análise das distribuições dos dados, foram construídos os gráficos tipo “box-plot” e o gráfico de probabilidade normal, apresentados na Figura 1a e b. Os box-plot permitem comprovar a simetria das distribuições dos dados, em relação à mediana e o gráfico de probabilidade normal permite verificar que as distribuições de silte e de areia assumem um comportamento próximo da linha reta, que caracteriza a distribuição normal. A distribuição de argila se afasta mais da reta, evidenciando um afastamento da normalidade, conforme demonstrado pelo coeficiente d do teste de Kolmogorov-Smirnov. Como salientado por Warrick e Nielsen (1980), no entanto, em se tratando de dados obtidos na natureza, o ajuste a uma distribuição teórica é apenas aproximado. De acordo com Cressie (1991), a normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, é conveniente apenas que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer as análises. Assim, a análise exploratória dos dados torna possível admitir, em princípio, estas distribuições como suficientemente simétricas para o estudo geoestatístico.

Mais importante que a normalidade dos dados é a ocorrência ou não do chamado efeito proporcional, segundo Isaaks e Srivastava (1989). Se a variação dos dados em torno da média é proporcional à magnitude desta, a estacionaridade mínima necessária ao uso da geoestatística pode estar comprometida. Empregando-se a técnica de janelas móveis (Mallants *et al.*, 1996), com conjuntos de cinco pontos, ao longo da transeção, avaliou-se a relação entre média e variância dos dados, como mostrado na Figura 2a. A análise de regressão linear mostrou que, para os três conjuntos de dados, os modelos ajustados não foram significativos ao nível de 5% de probabilidade, evidenciando a independência entre as variáveis.

Com base nesta análise exploratória preliminar, assumiu-se que as distribuições podem ser consideradas suficientemente simétricas e com caudas não alongadas. Assumiu-se ainda a não ocorrência do efeito proporcional, tornando possível a construção de semivariogramas, com base nestas hipóteses. Na Figura 2b, são mostrados os semivariogramas experimentais obtidos com o uso do software Variowin (Pannatier, 1996), para os três conjuntos de dados. Para maior confiabilidade da

análise geoestatística, usou-se também o software GeoEAS (Englund e Sparks, 1991), na construção dos semivariogramas, avaliando-se de forma comparativa os resultados obtidos a partir dos dois programas. Pode-se verificar que os dados de areia e de silte apresentam semivariograma com crescimento até distâncias da ordem de 20 a 40 m, com tendência à estabilização dos valores da função de semivariância em seguida. Os valores do semivariograma para argila, no entanto, apresentam um crescimento bem definido com a distância de separação entre os pontos, levando a supor que um modelo linear seria adequado para se ajustar ao mesmo.

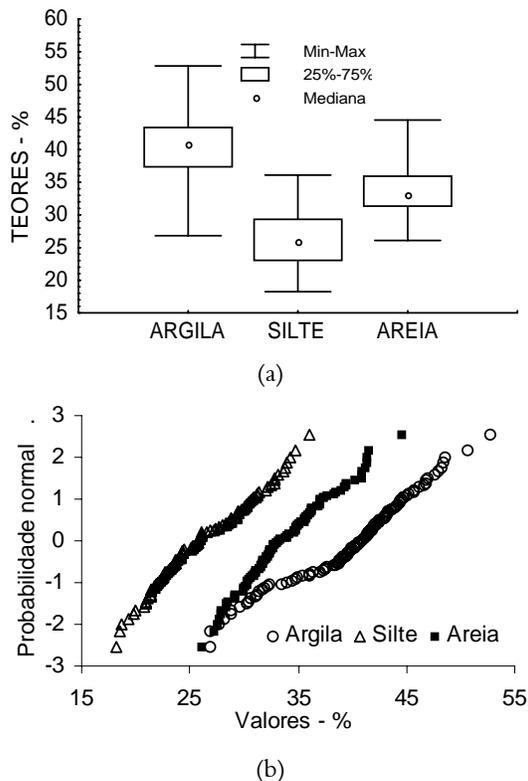


Figura 1. Gráficos "box-plot" para as distribuições de dados de argila, areia e silte na transeção (a) e gráficos de probabilidade normal para as distribuições (b)

Na Figura 3a, são mostradas as distribuições dos valores de conteúdo de argila, areia e de silte ao longo da transeção. Pode-se verificar a tendência de concentração de maiores valores de argila na porção intermediária da mesma, seguida de um decréscimo marcante em direção ao final da transeção. Naturalmente, a tendência de concentração de valores das outras frações granulométricas se inverte. Com o propósito de modelar esta porção determinística da variação dos dados medidos, foram

ajustados modelos quadráticos a estes conjuntos de dados, conforme mostrados por linhas na Figura 3a.

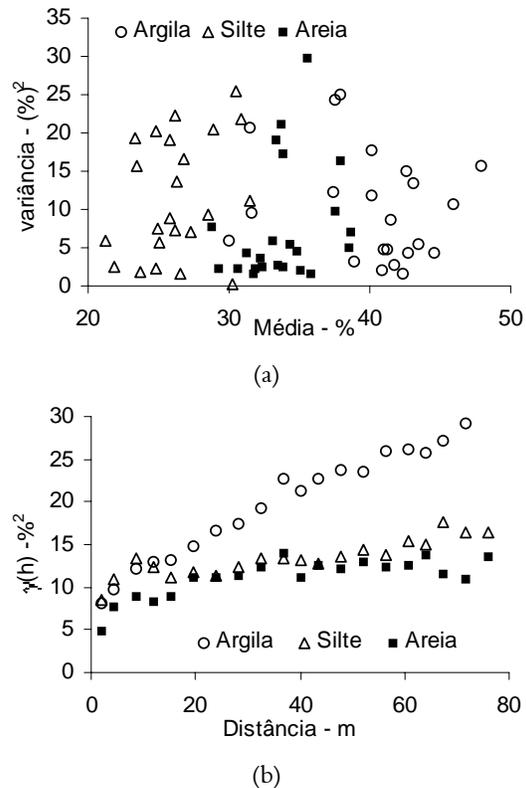


Figura 2. Relação entre valores médios e respectivas variâncias para os dados tomados em janelas móveis na transeção (a) e semivariogramas experimentais para os dados originais (b)

A análise de regressão (r^2) evidencia a significância destes modelos, embora os valores do coeficiente de determinação para os mesmos tenham sido de 0,57; 0,31 e 0,29, respectivamente, para argila, silte e areia. Esta porção sistemática da variação total dos dados pode levar à não confirmação da estacionaridade ao menos intrínseca das distribuições dos mesmos, uma vez que o valor da média da variável é função da posição no espaço. Uma forma de se analisar os dados neste contexto é separar de cada conjunto de dados este componente sistemático e se proceder à análise geoestatística dos resíduos. Na Figura 3b, são mostrados os resíduos obtidos após a remoção dos valores determinados pelos modelos quadráticos ajustados. Constatou-se visualmente que a tendência descrita anteriormente não mais se faz presente, tornando mais evidente a estacionaridade de primeira ordem das distribuições.

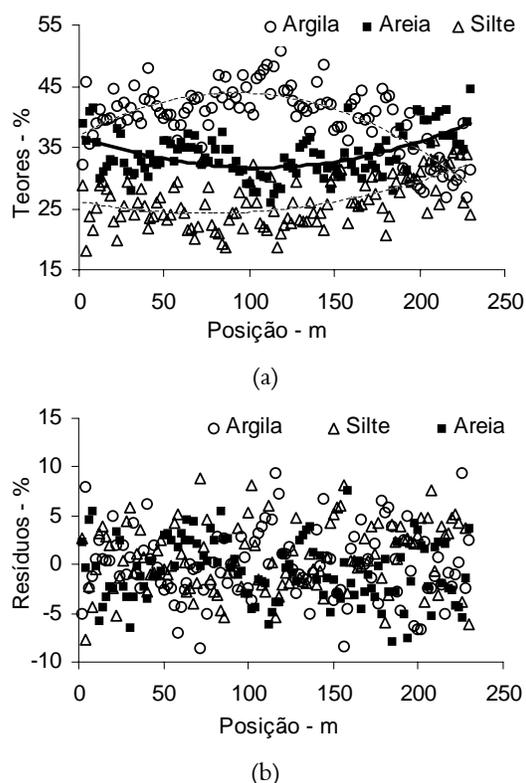


Figura 3. Distribuição dos valores de argila, areia e silte ao longo da transeção (a) e valores dos resíduos obtidos após a remoção da tendência descrita pelo modelo quadrático (b)

Foram construídos os semivariogramas experimentais para os valores de resíduos obtidos, os quais são mostrados na Figura 4a. Pode-se verificar nesta figura que o comportamento dos semivariogramas experimentais para os dados de areia e de silte pouco se alteram em relação àqueles obtidos para os dados originais, mostrados na Figura 3b. O semivariograma para os dados de argila, no entanto, sofre uma mudança expressiva. A tendência de crescimento constante foi alterada para uma bem definida tendência de estabilização dos valores do semivariograma para distâncias superiores a algo em torno de 30 a 40 m. Pode-se verificar que a remoção da tendência presente nos dados originais promoveu substancial modificação no semivariograma para argila, pouco alterando os semivariogramas referentes às outras duas frações granulométricas.

Para melhor descrever a estrutura de variação dos dados no espaço, ao longo da transeção estudada, foram construídos os semivariogramas escalonados pelas variâncias dos resíduos, mostrados na Figura 4b. Pode-se verificar que o escalonamento dos semivariogramas, apresentados na Figura 4a, permitiu constatar que a estrutura de dependência

espacial das frações granulométricas argila e areia pode ser descrita por um único modelo de semivariograma escalonado, conforme mostrado na Figura 4b. Foi ajustado um modelo exponencial, com efeito pepita de 0,45; patamar em 1,06 e alcance de 25 m. Os dados de silte deram origem a um semivariograma experimental cujos pontos se situam em torno deste modelo, embora com uma dispersão maior. A modelagem desta estrutura de dependência espacial não tem interesse prático. No entanto, o conteúdo de silte pode ser obtido por meio da combinação linear dos valores das outras duas frações granulométricas.

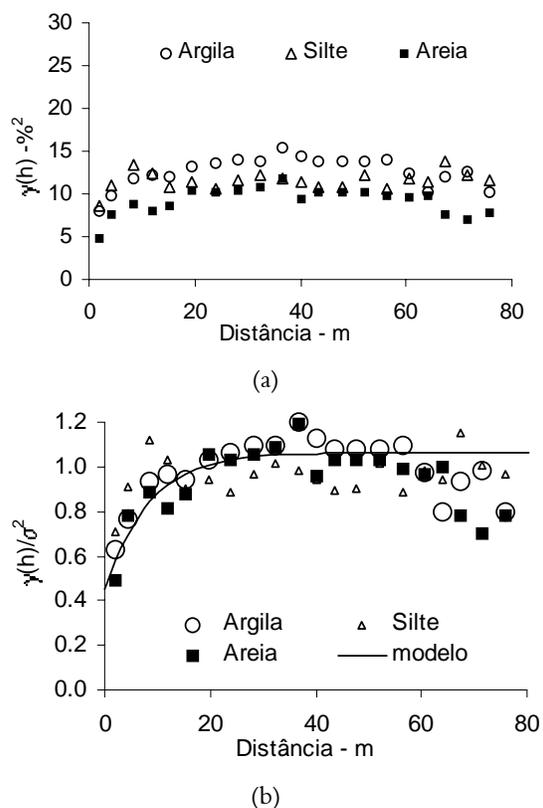


Figura 4. Semivariogramas experimentais para os valores de resíduo das distribuições de argila, areia e silte (a) e semivariogramas escalonados pelas variâncias dos resíduos (b)

A importância de uma cuidadosa análise exploratória dos dados de variáveis regionalizadas, antes de se proceder à análise geoestatística, tem sido salientada por alguns autores e negligenciada por um grande número de outros. Fazendo uso de técnicas de análise exploratória e de tratamento dos dados, este trabalho permitiu verificar que os conteúdos de argila, silte e areia do solo são variáveis que apresentam uma estrutura de dependência espacial na área estudada com alcance da ordem de 25 m.

Mais ainda, foi mostrado que embora as três frações granulométricas apresentassem uma tendência de variação ao longo da transeção, a remoção da mesma não alterou significativamente os semivariogramas para silte e para areia, mas alterou expressivamente o semivariograma para argila. O escalonamento dos semivariogramas dos resíduos permitiu constatar, também que as frações argila e areia apresentam estruturas de variação no espaço que podem ser descritas por um único modelo de semivariograma.

Referências

- BABALOLA, O. Spatial variability of soil water properties in tropical soils of Nigeria. *Soil Sci.*, Baltimore, v. 126, n. 5, p. 269-279, 1978.
- 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.
- BOURGAULT, G. et al. Geostatistical analysis of a soil salinity data set. *Adv. Agron.*, San Diego, v. 58, p. 241-292, 1997.
- BUCHTER, B. et al. Soil spatial variability along transects. *Soil Technol.*, Amsterdam, v. 4, p. 297-314, 1991.
- BURGESS, T.M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. *J. Soil Sci.*, Oxford, v. 31, p. 315-331, 1980.
- CAMPOS, H. *Estatística experimental não-paramétrica*. 4 ed. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Matemática e Estatística, 1983.
- CRESSIE, N. *Statistics for spatial data*. New York: John Wiley, 1991.
- DAVIS, J.C. *Statistics and data analysis in geology*. 2.ed. New York: John Wiley, 1986.
- EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*, 1999.
- ENGLUND, E.; SPARKS, A. *GeoEAS (Geostatistical Environmental Assessment Software)* Las Vegas: U.S. Environmental Protection Agency, 1991. (EPA/600/4-88/033a).
- GONÇALVES, A. C. A. *Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo de irrigação*. 1997. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.
- 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.
- GONÇALVES, A.C.A. et al. Padrões de amostragem e intensidade de krigagem na caracterização do armazenamento de água no solo, em área irrigada por pivô central. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 485-495, 1999b.
- 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.
- 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.
- JOURNEL, A.G.; ROSSI, M.E. When do you need a trend model in kriging? *Mathematical Geology*, v. 21, n. 7, p. 715-739, 1989.
- KREYSZIG, E. *Introductory mathematical statistics: principles and methods*. New York: John Wiley, 1970.
- LIBARDI, P.L. et al. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 20, p. 1-12, 1996.
- MALLANTS, D. et al. Spatial variability of hydraulic properties in a multi-layered soil profile. *Soil Sci.*, Baltimore, v. 161, n. 3, p. 167-180, 1996.
- MATHERON, G. Principles of Geostatistics. *Economic Geology*, v. 58, p. 1246-1266, 1963.
- MCBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *J. Soil Sci.*, Oxford, v. 37, p. 617-639, 1986.
- 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.
- MYERS, D.E. To be or not to be...stationary? That is the question. *Mathematical Geology*, v. 21, n. 3, p. 347-362, 1989.
- 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.
- PANNATIER, Y. *Variowin: software for spatial data analysis in 2D*. New York: Springer-Verlag, 1996. 90 p.
- QUEIROZ, J.E. *Parâmetros hidrodinâmicos de um solo de várzea para fins de drenagem subterrânea*. 1995. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.
- 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.
- RUSSO, D.; JURY, W.A. A theoretical study of the estimation of the correlation scale in spatially variable fields. 2. Non-stationary fields. *Water Resour. Res.*, Washington D.C., v. 23, n. 7, p. 1269-1279, 1987.
- 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. *et al.* Application of Geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.*, San Diego, v. 38, p. 45-94, 1985.
- VIEIRA, S.R. Uso da geoestatística em estudos de variabilidade espacial. In: *Curso de atualização em conservação do solo*. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1995.
- 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 Press, 1980.
- WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Adv. Soil Sci.*, New York, v. 3, p. 1-70, 1985.
- WILDING, L.P.; DREES, L.R. *Pedogenesis and soil taxonomy. I concepts and interactions*. Amsterdam: Elsevier, 1983. p.83-116.

Received on June 29, 2001.

Accepted on August 23, 2001.