

AMPLITUDE DOS VALORES DA UMIDADE E SUA INFLUÊNCIA NA MENSURAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO

Gustavo Di Chiacchio Faulin¹, José Paulo Molin²

Resumo

Uma forma de mapeamento de fatores do solo é o monitoramento da condutividade elétrica que permite inferir sobre variáveis como umidade, textura, salinidade, entre outros. No solo, a umidade é fortemente relacionada a várias de suas características físicas, inclusive a condutividade elétrica. O objetivo do trabalho foi monitorar espacialmente a umidade e modelar sua influência na condutividade elétrica do solo em duas áreas experimentais por dois anos consecutivos. Foram realizadas análises estatísticas clássicas, análises exploratórias dos dados e análises geoestatísticas, gerando parâmetros para a obtenção de mapas interpolados das variáveis condutividade elétrica e umidade, estimando, através da krigagem, valores dessas variáveis em locais não amostrados e também possibilitando análises de regressões polinomiais entre as variáveis. Por meio das regressões foi possível observar que em uma das áreas, onde as amplitudes dos valores da umidade são maiores, a variabilidade espacial da condutividade elétrica mostrou ser dependente. Em outra área a umidade não apresentou influência na variabilidade espacial da condutividade elétrica em função da baixa amplitude de seus valores.

Palavras-Chave: física do solo, geoestatística, veris

SOIL MOISTURE RANGE AND ITS INFLUENCE IN THE SOIL ELECTRICAL CONDUCTIVITY

Summary

One way of monitoring soil properties is by using electrical conductivity sensors which allows inferring about variables such as moisture, texture, salinity, etc. Soil moisture is strongly related to several of its physical properties, besides electrical conductivity. The objective of this work was to spatially monitor soil moisture and to model its influence on electrical conductivity in two fields, for two years. Classic statistical analyses, data exploratory analyses and geostatistical analyses were accomplished, generating parameters for map interpolation of electrical conductivity and moisture, estimating by kriging, values of those variables on non sampled places and also making possible polynomial regressions analyses between the variables. With regressions it was possible to observe that in one of the areas, where the range of moisture content was larger, the spatial variability of electrical conductivity showed to be dependent. In another area moisture did not present any influence on spatial variability of soil electrical conductivity, because of the low range of their values.

Keywords: soil physics, geostatistics, veris

¹ Engº Agrônomo, Doutorando, Depto. de Produção Vegetal, ESALQ/USP, gfaulin@yahoo.com.br

² Engº Agrícola, Prof. Livre Docente, Depto. Eng. Rural, ESALQ/USP, jpmolin@esalq.usp.br

Introdução

A agricultura de precisão pode ser definida como o gerenciamento da produção levando em consideração a variabilidade espacial da produtividade e dos fatores a ela relacionados, sendo uma técnica relativamente recente no Brasil e possivelmente, a frente de trabalho que apresenta as perspectivas mais promissoras na geração de novas técnicas agrícolas, visando otimizar os insumos e permitindo a diminuição nos custos de produção.

Na agricultura de precisão, a geração de mapas de produtividade e a amostragem de solo têm elevada importância em fornecer informações sobre a produção. A técnica de se amostrar intensamente o solo para se ter informação da variabilidade espacial dos seus componentes físicos e químicos tem sido alvo de críticas pelo seu elevado custo, tornando-se, por vezes, economicamente inviável em sistemas produtivos.

Um conceito de mapeamento de fatores do solo é o monitoramento da sua condutividade elétrica que permite inferir sobre variáveis como umidade, textura, salinidade, entre outros. Os mapas de condutividade elétrica do solo não excluem a análise de amostras em laboratório, porém fornecem uma orientação na execução de amostragens estratégicas através da identificação de zonas homogêneas.

A condutividade elétrica (CE) é a habilidade que um material tem em transmitir ou conduzir corrente elétrica (Doerge, 2004; Lund et al., 1998; Kitchen et al., 1996). A CE é influenciada por diversos fatores do solo como a umidade, porosidade, concentração de eletrólitos dissolvidos, textura, quantidade e composição dos colóides e matéria orgânica (Rhoades et al., 1976; Nadler & Frenkel, 1980). Uma das utilidades da CE advém do fato de que a areia tem baixa condutividade e a argila tem alta condutividade (Lund et al., 1998).

A textura do solo pode variar significativamente dentro da mesma área de produção, mas, normalmente, é manejada como homogênea (Machado et al., 2003). A amostragem do solo pode ser reduzida através da leitura da CE, quando essa possui alta relação com a textura. A relação entre a CE e a argila é suplantada pela umidade nos horizontes saturados pela água (Domsch & Giebel, 2001).

A umidade e a CE do solo possuem relações, as quais tem sido observadas por diversos pesquisadores (Hendrickx et al., 1992; Rhoades et al., 1976). Pesquisas recentes constataram que a medição da condutividade elétrica aparente ou condutividade elétrica do solo, com o uso de sensores eletromagnéticos, tem o potencial de realizar medições rápidas da umidade no solo (Sheets & Hendrickx, 1995).

O solo pode conduzir corrente elétrica através da água intersticial que contém eletrólitos dissolvidos e através dos cátions trocáveis que residem perto da superfície de partículas de solo carregadas e são eletricamente móveis em vários níveis. Rhoades & Corwin (1990) apresentam um modelo de condutividade elétrica que descreve a condutância através de três vias atuando em paralelo: (i) condutância através de camadas alternantes de partículas do solo e entre os limites de suas soluções, (ii) condutância através de soluções do solo contínuas, e (iii) condutância através ou entre superfícies de partículas do solo em contato direto entre elas. Na ausência de sais dissolvidos na água presente na segunda via, condutividade, textura e umidade se correlacionam muito bem entre si. Fritz et al. (1998) confirmaram que a condutividade

elétrica é influenciada pela umidade, sais, e pelo material de origem na formação do solo.

A característica do solo que muitas vezes é a determinante na variação da produtividade numa mesma lavoura é sua habilidade em armazenar e fornecer água para o crescimento das plantas. Infelizmente, a medição da umidade em grandes áreas é de difícil avaliação. A correlação entre a CE e a produtividade das culturas ainda é um tema recente de pesquisa, mas os resultados iniciais são promissores, especialmente quando a produtividade é influenciada pela capacidade de retenção de água (Lund et al., 1998).

Antecipando-se a problemas de interpretação da condutividade elétrica que possam advir da falta de informação da umidade no solo, o objetivo do trabalho foi monitorar espacialmente a umidade e modelar sua influência na condutividade elétrica do solo.

Material e Métodos

Os dados foram coletados em duas áreas experimentais, localizadas em Tibagi, PR (Área 1), e Campos Novos Paulista, SP (Área 2), com 18,9 e 22,2 hectares, respectivamente. Para a mensuração da CE nas áreas experimentais foi utilizado o equipamento Veris 3100[®] conectado a um receptor de GPS, que mede a CE pelo método do contato direto. Antes do início das atividades de aquisição dos dados, o equipamento passava por testes indicados pelo fabricante para a certificação de isolamento dos eletrodos e do seu correto funcionamento. Os dados de CE foram coletados duas vezes em cada área experimental na profundidade de 0 a 0,3 m e 0 a 0,9 m, porém só foram utilizados nesta pesquisa os dados coletados na profundidade de 0 a 0,3 m.

Na área 1, as mensurações foram realizadas nos dias 24 de outubro de 2003 e 22 de junho 2004, utilizando um trator para tracionar o equipamento, com espaçamento entre passadas paralelas de aproximadamente 10 m. Na área 2 as mensurações ocorreram nos dias 15 de outubro de 2003 e 30 de outubro de 2004, com espaçamento entre passadas paralelas de aproximadamente 4 m na primeira e de aproximadamente 10 m na segunda passada. A diferença nas densidades amostrais da CE nesta área, na primeira (4 m) e na segunda medição (10 m) foi intencional, visando utilizar os dados de CE da primeira medição em outro estudo, sem que com isso, prejudicasse a qualidade deste trabalho.

As amostras de umidade foram retiradas na profundidade de 0 a 0,3 m, na mesma ocasião em que foi monitorada a CE. Na área 1 a densidade amostral foi de 4,2 amostras por hectare, enquanto que na área 2 a densidade foi de 3,0 amostras por hectare no ano de 2003 e 1,5 amostras por hectare no ano de 2004. Essa redução na densidade amostral foi estabelecida com base na análise dos parâmetros do semivariograma das amostras de umidade do ano de 2003.

Todas as amostras coletadas foram colocadas em cápsulas de alumínio, vedadas e levadas ao Laboratório no Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, para pesagem. Após a secagem em estufa a 105°C por 24 horas, realizou-se nova pesagem e determinou-se a umidade no solo pelo método gravimétrico (EMBRAPA, 1999).

Os dados da CE coletados na profundidade de 0 a 0,3 m foram classificados em ordem decrescente, no programa computacional Microsoft[®] Excel 2002, para

verificação e avaliação dos valores negativos. Segundo o manual do equipamento, cada valor negativo indica alguma anormalidade com a coleta dos dados naquele local específico, podendo, numa única leitura, ocorrer combinações dessas anormalidades.

A etapa da estatística descritiva foi realizada utilizando-se o programa computacional STATISTICA 6.0 (Statsoft Inc.®). Para caracterizar o comportamento dos dados calculou-se até os momentos estatísticos de ordem quatro, que também expressam o formato da distribuição, através dos coeficientes de assimetria e curtose. Para os valores de CE e umidade foram estabelecidas classificações de valores candidatos a discrepantes, segundo a metodologia proposta por Tukey (1977). A verificação do ajuste dos dados à distribuição normal foi feita através do teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) a diferentes níveis de probabilidade.

Numa segunda etapa da análise estatística, buscou-se a confirmação ou não da validade dessas medidas de posição ou dispersão, o que foi feito utilizando-se algumas das técnicas da análise exploratória de dados, aliada a uma descrição espacial dos conjuntos de variáveis obtidas (Isaaks & Srivastava, 1989). Apesar da qualidade da informação fornecida pela estatística descritiva, essa ignora a posição espacial de cada valor da variável. A visualização foi realizada utilizando o sistema de informação geográfica (SIG) dedicado à agricultura de precisão SSToolBox 3.4 (SST Development Group, Inc®). Esta etapa consiste na espacialização dos valores candidatos a discrepantes. Se esses valores se localizavam de forma aglomerada ou em regiões conhecidamente diferenciadas, não foram considerados discrepantes, mas, se não apresentavam nenhum indício de que faziam parte de uma região diferenciada, foram considerados discrepantes e removidos.

Utilizando o programa computacional VESPER 1.6 (Minasny et al., 2002) foi realizada a construção dos semivariogramas experimentais para as distribuições da CE e umidade nas duas áreas experimentais. Foi utilizado o estimador clássico do semivariograma, ou método dos momentos, ou estimador de Matheron.

O passo seguinte foi ajustar o modelo ao semivariograma experimental obtido. Para a escolha dos modelos e dos parâmetros mais adequados para cada caso foi utilizado o critério de minimização da soma dos erros quadrados.

Após a análise de dependência espacial de todas as variáveis foram realizadas estimativas em locais não amostrados, com o intuito de gerar mapas de superfície. Para a digitalização e visualização utilizou-se dos recursos da krigagem ordinária por blocos realizada pelo programa computacional VESPER 1.6 (Minasny et al., 2002). O tamanho da célula do mapa gerado foi estabelecido em 100 m². O número de amostras utilizadas na estimativa de cada bloco foi estabelecido no intervalo entre o mínimo de 4 e o máximo de 100. Para a umidade no solo o raio de busca da krigagem foi estabelecido como sendo igual ao alcance da sua continuidade espacial. Já para a CE, o raio de busca foi determinado pelo programa computacional VESPER 1.6 (Minasny et al., 2002), determinado em função da densidade amostral.

Para avaliar a relação de dependência das variáveis foi utilizada a regressão polinomial. Procurou-se descrever por um modelo matemático o quanto da variação da variável dependente pode ser explicada pela variável independente (Doria Filho, 1999).

Resultados e Discussão

Na Tabela 1, são apresentados os resultados da análise estatística descritiva dos dados da CE e umidade, nas duas áreas experimentais, após a análise exploratória dos valores candidatos a discrepantes. A variabilidade dos valores de CE nas duas áreas, evidenciada pelo coeficiente de variação (CV) é classificada como média, segundo Warrick & Nielsen (1980). O CV da umidade na área 1, nos anos de 2003 e 2004, foi maior em relação à área 2.

Tabela 1. Estatística descritiva para os valores de CE (mS.m^{-1}) e umidade no solo (%), após a análise exploratória

Área	Ano	Variável	n ¹	Mín	Máx	Média	Desvio Padrão	C.V. ² (%)	D ³
Área 1									
1	2003	CE	5.003	1,0	12,9	4,1	1,8	43,5	0,12*
		Umidade	83	10,3	27,6	16,2	4,6	28,6	0,13
	2004	CE	8.472	0,6	13,1	3,0	1,7	57,4	0,15*
		Umidade	84	9,2	26,6	15,6	4,8	30,5	0,13**
Área 2									
2	2003	CE	10.388	2,9	16,6	6,2	1,3	21,5	0,05*
		Umidade	63	9,5	14,5	12,4	1,3	10,8	0,10
	2004	CE	8.529	3,9	12,7	8,3	1,7	20,2	0,04*
		Umidade	32	10,1	13,6	12,2	0,9	7,3	0,11

¹ número de amostras coletadas; ² Coeficiente de variação; ³ Teste de Kolmogorov-Smirnov; * distribuição normal a 1% de probabilidade; ** distribuição normal a 10% de probabilidade.

Após a análise de ajuste à distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, as distribuições da CE foram constatadas como sendo normais ao nível de 1% de probabilidade (K-S), descrito por Campos (1976). A estatística descritiva permite verificar que a distribuição dos dados da umidade assume um comportamento muito próximo à distribuição normal teórica. Para essa variável foi necessária uma maior atenção na etapa de interpolação dos dados pelo processo de krigagem. Esse resultado corrobora com aqueles apresentados por Cambardella et al. (1994) e Castro (2004), que para a maioria das variáveis do solo utilizadas em seus estudos, constataram uma não adequação à distribuição normal. Como salientado por Warrick et al. (1986), o ajuste de dados experimentais à distribuição teórica é apenas aproximado. Com base na estatística descritiva, foram assumidas as hipóteses necessárias à aplicação da geoestatística.

Para a análise da dependência espacial os semivariogramas foram calculados para a CE e umidade no solo. Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros do efeito pepita, patamar, alcance e o componente estrutural $[C_1/(C_0+C_1)]$, que indica o quanto da variação total dos dados é explicada pela continuidade espacial.

Tabela 2. Parâmetros dos semivariogramas dos valores de CE ($\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$) e umidade no solo (%) para as duas áreas experimentais

Ano	Variável	Modelo	Efeito Pepita (C_0)	Patamar (C_1)	Alcance (a)	$\frac{C_1}{(C_0+C_1)}$
Área 1						
2003	CE	Esférico	0,1352	2,805	135,9	0,95
	Umidade	Esférico	0,0001	0,063	168,7	0,99
2004	CE	Esférico	0,1358	2,542	140,8	0,95
	Umidade	Esférico	0,0090	19,38	148,9	0,99
Área 2						
2003	CE	Exponencial	0,8284	0,491	24,5	0,37
	Umidade	Esférico	0,0001	0,012	185,4	0,99
2004	CE	Exponencial	0,6555	0,755	21,2	0,54
	Umidade	Esférico	0,0003	0,006	361,1	0,95

Para nenhuma das variáveis foi avaliada a anisotropia, realizando-se todas as análises geoestatísticas utilizando-se os semivariogramas omnidirecionais, nos quais apenas a distância de separação entre as amostras é importante no cálculo da função semivariância e não o vetor de separação entre as mesmas.

Utilizando o critério proposto por Cambardella et al. (1994), na área 1 as duas variáveis apresentaram elevada dependência espacial, com valores do componente estrutural elevados. Na área 2 a umidade apresentou elevada dependência espacial, e a CE uma média dependência.

O valor de alcance (185,4 m) observado para a umidade na área 2, no ano de 2003, indica que a grade amostral empregada foi adequada e que na amostragem do ano de 2004 foi possível a diminuição da grade amostral, conseguindo-se, mesmo assim, captar a dependência espacial. Nessa área todas as variáveis apresentaram uma semivariância menor do que a área 1, indicando uma menor variabilidade dessas variáveis, também confirmadas pelos valores de CV na estatística descritiva.

Os parâmetros dos semivariogramas foram utilizados no processo de krigagem das variáveis CE e umidade na área 1 e área 2 em células de 10 m de lado gerando superfícies, sendo possível adotar a regressão polinomial obtendo o coeficiente de determinação (r^2) que expressa o quanto a CE é dependente da umidade, para cada ano, nas duas áreas experimentais. Os coeficientes de determinação podem ser visualizado na Tabela 3.

Tabela 3. Coeficiente de determinação (r^2) das regressões polinomiais da variável dependente (CE) com a variável independente (umidade) nas duas áreas experimentais

Variável dependente	Área	Ano	Umidade Coeficiente de determinação (r^2)
CE	1	2003	0,78
		2004	0,75
	2	2003	0,05
		2004	0,09

Na Tabela 3 a umidade no solo obteve um bom coeficiente de determinação com a CE somente na área 1. Fatores semelhantes também são citados por Lund et al. (1999) e Nehmdahl & Greve (2001). Já na área 2 os coeficientes de determinação das regressões polinomiais foram próximos de zero nos dois anos amostrados. Isso ocorreu devido à menor amplitude nos valores da umidade nessa área, vistos anteriormente pelo CV.

Na área 1 as relações entre as variáveis estudadas foram evidentes, o gradiente de umidade no solo foi maior em relação a área 2. A CE pode ser empregada na área 1 como uma ferramenta para a demarcação de unidades de gerenciamento em função da umidade no solo. As análises realizadas na área 2 demonstraram que o equipamento utilizado na mensuração da CE não detectou as pequenas variações da umidade, ou seja, em áreas onde a amplitude dos valores de umidade no solo são baixos não é possível, através da resolução desse equipamento, detectar essas variações ou as variações não são suficientes para a delimitação de regiões e tratamentos diferenciados dentro delas.

Conclusões

Na área 1 onde as amplitudes dos valores da umidade são maiores, a variabilidade espacial da condutividade elétrica mensurada pelo equipamento mostrou ser dependente. Já na área 2, a umidade não apresentou influência na variabilidade espacial da condutividade elétrica, em função da sua baixa amplitude.

Referências Bibliográficas

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVARK, 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.

CAMPOS, H. Estatística experimental não-paramétrica. Piracicaba, Esalq, 1976. 343p.

CASTRO, C.N. Definição de unidades de gerenciamento do solo por meio da sua condutividade elétrica e variáveis físico-químicas. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2004. 131p. Dissertação (Mestrado)

DOMSCH, H.; GIEBEL, A. Electrical conductivity of soils typical for the state of Brandenburg in Germany (compact disc). In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., Montpellier, 2001. Proceedings. Montpellier, Ecole Nationale Supérieure Agronomique, 2001.

DORIA FILHO, U. Introdução a bioestatística: para simples mortais. São Paulo, Negócio, 1999. 152p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Embrapa Solos 1999. 412p.

FRITZ, R.M.; MAIO, D.D.; SCHUMACHER, T.E.; CLAY, D.E.; CARLSON, C.G.; ELLSBURY, M.M.; DALSTED, K.J. Field comparison of two soil electrical conductivity measurement systems (compact disc). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., St. Paul, 1998. Proceedings. St. Paul: ASA;CSSA;SSSA, 1998. p.1211-1217.

HENDRICKX, J.M.H.; BAERENDS, B.; RAZA, Z.I.; SADIG, M.; CHAUDHRY, M.A. Soil salinity assesmente by electromagnetic induction of irrigated land. Soil Sci. Soc. Am. J., 56:1933-1941. 1992.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. Applied geostatistic. New York, Oxford University Press, 1989. 561p.

LUND, E.D.; CHRISTY, C.D.; DRUMMOND, P.E. Practical applications of soil electrical conductivity mapping. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 2., Odense, 1999. Proceedings. Odense, Elsevier, 1999. p.771-780.

LUND, E.D.; COLIN, P.E.; CHRISTY, D.; DRUMMOND, P.E. Applying soil electrical conductivity technology to precision agriculture (compact disc). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., St. Paul, 1998, Proceedings. St. Paul, ASA;CSSA;SSSA, 1998. p.1089-1100.

MACHADO, P.L.O.A.; SILVA, C.A.; BERNARDI, A.C.C.; CARMO, C.A.F.S.; VALENCIA, L.I.O.; MEIRELLES, M.S.; MOLIN, J.P.; PAULETTI, V.; GIMENEZ, L.M. Técnicas de agricultura de precisão no diagnóstico de uma cultura de soja sob plantio direto em Carambeí, PR. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2003. 29p. (Embrapa Solos, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento; n. 18). (Disponível em: <http://www.cnps.embrapa.br/solosbr/conhecimentos.html>).

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B.; WHELAN, B.M. Vesper version 1.6. Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney, 2002. <http://www.usyd.edu.au/su/agri/acpa>. (12 out. 2004).

NEHM DAHL, H.; GREVE, M.H. Using soil electrical conductivity measurements for delineating management zones on highly variable soils in Denmark (compact disc). In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., Montpellier, 2001. Proceedings. Montpellier, Ecole Nationale Supérieure Agronomique, 2001.

RHOADES, J.D.; CORWIN, D.L. Soil electrical conductivity: effects of soil properties and application to soil salinity appraisal. Com. Soil Sci. Plant An., 21:837-860, 1990.

RHOADES, J.D.; RAATS, P.A.C.; PRATHER, R.J. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., 40:651-655, 1976.



2º Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão São Pedro, SP – ESALQ/USP

SHEETS, K.R.; HENDRICKX, J.M.H. Noninvasive soil water content measurement using electromagnetic induction. *Water Res. Res.*, 31:2401-2409, 1995.

TUKEY, J.W. *Exploratory data analysis*. Reading, Addison-Wesley, 1977. 1v.

WARRICK, A.W.; MYERS, D.E.; NIELSEN, D.R. Geostatistical methods applied to soil science. In: KLUTE, A. ed. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, Society of Agronomy/Soil Sci. Am. v. 9. 1986. p.53-82.

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. 385p.