

# FÍSICA DE SOLO

## VARIABILIDADE ESPACIAL DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO SOLO MEDIDA COM RUGOSÍMETROS DE AGULHAS E LASER<sup>(1)</sup>

FERNANDO CESAR BERTOLANI<sup>(2)</sup>; ANTONIO PAZ GONZÁLEZ<sup>(3)</sup>;  
MARCOS LADO LIÑARES<sup>(3)</sup>; EVA VIDAL VÁZQUEZ<sup>(3)</sup>; JOSÉ GARCÍA  
VIVAS MIRANDA<sup>(3)</sup>

### RESUMO

A variabilidade espacial da rugosidade superficial do solo foi estudada a partir de uma grade de dados pontuais medidos com instrumentos de diferentes graus de precisão. Para a medição da rugosidade utilizou-se um rugosímetro laser, em condições de laboratório, sendo as leituras realizadas antes e após a aplicação de diferentes quantidades de chuva (0 mm, 10 mm, 55 mm, 85 mm). Nas condições de campo (pastagem e superfície arada) utilizou-se um rugosímetro de agulhas, e as leituras foram realizadas em quatro datas distintas. Verificou-se alta dependência espacial para a rugosidade superficial, com os dados obtidos em ambos os métodos e em todos os tratamentos. Os parâmetros dos semivariogramas obtidos com os dados do rugosímetro de agulhas apresentaram grandes variações nas diferentes datas, devido à forma de distribuição e ao tamanho dos agregados. Isso indica a dificuldade de encontrar um modelo tridimensional, representativo do microrrelevo, em condições de campo. Verificou-se grande semelhança em todos os semivariogramas obtidos a partir dos dados do rugosímetro laser (superfície simulada) indicando que, apesar das alterações na rugosidade superficial, não foram observadas modificações no comportamento da dependência espacial com a aplicação de diferentes quantidades de chuva.

**Palavras-chave:** microrrelevo, semivariograma escalonado, geoestatística, agregados do solo.

### ABSTRACT

#### SPATIAL VARIABILITY OF SOIL SURFACE ROUGHNESS MEASURED BY PIN AND LASER RELIEFMETERS

The spatial variability of the soil surface roughness was analysed by instruments of different precision degrees in a grid of data points. For measuring the roughness it was used a laser reliefmeter before and after application of different amounts of rain (0 mm, 10 mm, 55 mm, 85 mm) in the laboratory. At field conditions (pasture and ploughed surface) a pin reliefmeter was used at four different dates. The results showed a great spatial dependence of soil surface roughness in both methods and for all treatments. The great variation of semivariogram parameters obtained with pin reliefmeter data for all different dates was due to the distribution and size of soil aggregates. This indicates how difficult it is to obtain a representative tridimensional microrelief model at field conditions. All other semivariograms obtained with laser reliefmeter data (simulated surface) were similar among themselves, indicating that despite the alterations in the soil surface roughness, the spatial dependence pattern did not change with different amounts of rain.

**Key words:** microrelief, scaled semivariogram, geostatistics, soil aggregates.

---

<sup>(1)</sup> Trabalho vinculado ao projeto da Comunidade Européia, contrato FAIR 1 - CT95 - 0458. Recebido para publicação em 28 de fevereiro e aceito em 21 de agosto de 2000.

<sup>(2)</sup> Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP, Caixa Postal 1.170, 13083-970 Campinas (SP). E-mail: fcbert@agr.unicamp.br

<sup>(3)</sup> Facultad de Ciencias. Universidad de La Coruña. La Zapatera. 15.071. La Coruña.

## 1. INTRODUÇÃO

A degradação da estrutura do horizonte superficial do solo pode propiciar a redução das taxas de infiltração de água e, conseqüentemente, aumentar o escoamento superficial. Por outro lado, a água acumulada temporariamente nas depressões do solo pode favorecer a infiltração, reduzindo a perda de solo pela diminuição do escoamento superficial (HELMING et al., 1993).

A mecanização do solo, mais especificamente a utilização de implementos agrícolas, confere aos mesmos boa permeabilidade inicial. No entanto, o aumento da taxa de infiltração da água, promovida pelo rompimento da camada superficial, não se mantém ao longo do tempo, devido à ação da chuva (BRESSON e BOYFFIN, 1990). Nessas superfícies de cultivo é relevante avaliar a importância do volume de água retida nas microdepressões do solo, dado seu efeito sobre os processos erosivos.

O método mais freqüentemente utilizado para avaliar o acúmulo de água sobre a superfície do solo é a caracterização indireta, a partir de parâmetros como a cobertura vegetal e a rugosidade superficial (ONSTAD, 1984; HUANG, 1998). Portanto, o conhecimento da rugosidade superficial permite avaliar indiretamente a retenção de água nas microdepressões do solo, bem como caracterizar as alterações ocorridas no microrrelevo, em função do impacto das gotas de chuva.

Com os avanços na pesquisa de processos erosivos o interesse pela medida e modelagem do microrrelevo, na superfície do solo (HELMING et al., 1998; PAZ et al., 1998; VIDAL e VÁZQUEZ, 1998) tem aumentado, principalmente em modelos matemáticos de perda de solo, que utilizam a evolução da retenção de água em superfície, durante os episódios de chuva (DE ROO et al., 1995). Dentro desse contexto, conhecer a variabilidade espacial da rugosidade superficial torna-se imprescindível para o desenvolvimento de tais modelos, pois, a maioria das propriedades do solo não variam aleatoriamente, mas apresentam correlação ou dependência espacial (VAUCLIN et al., 1982; MILLER et al., 1988). Nesse sentido, torna-se necessária a utilização de procedimentos complementares como a geostatística.

O semivariograma é uma das ferramentas da geostatística, utilizada para determinar a variabilidade espacial de atributos do solo, expressando o grau de dependência espacial entre amostras, por meio de seus parâmetros, em um campo específico. CAMBARDELLA et al. (1994), estudando o comportamento de inúmeros semivariogramas, determinaram faixas de dependência espacial, considerando:

alta, quando o efeito pepita (Co) é menor que 25% do patamar; moderada, quando esse valor está entre 25% e 75%; e baixa, quando o Co é maior que 75%. Esse estudo permite verificar o grau de dependência espacial de uma determinada variável, em função da relação existente entre o efeito pepita e o patamar.

Os parâmetros do semivariograma também são utilizados na krigagem (ISAACS e SRIVASTAVA, 1989) que constitui uma técnica de interpolação para a estimativa dos valores de determinada propriedade em locais não amostrados, a partir de valores amostrais vizinhos. Alguns modelos matemáticos que calculam a perda de solo utilizam o resultado da interpolação por krigagem, realizada a partir de dados obtidos com rugosímetros. Essa técnica possibilita gerar um modelo tridimensional do microrrelevo e, conseqüentemente, determinar o volume de água retido nas microdepressões (DE ROO et al., 1995).

O presente trabalho objetivou aplicar análises geostatísticas em dados de rugosidade superficial do solo, obtidos em condições de campo e laboratório, utilizando rugosímetros de agulhas e laser respectivamente.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Dispositivo experimental de campo (rugosímetro de agulhas)

As determinações de rugosidade superficial em campo foram realizadas sob pastagem e em superfície arada para plantio de milho, localizadas na província de La Coruña (Espanha). A superfície arada havia sido cultivada anteriormente com milho, e a pastagem formada há aproximadamente cinco anos, possuindo boa cobertura vegetal. Os agregados encontrados nessas áreas atingiam valores de até 30 cm na superfície arada e 40 cm em pastagem. Na superfície destinada ao cultivo de milho utilizou-se, após a passagem do arado, uma grade niveladora para romper os torrões maiores provenientes da aração.

Para a determinação da rugosidade superficial em campo utilizou-se um rugosímetro de agulhas, disposto ao longo da vertente, e as leituras foram realizadas em quatro datas diferentes e a cada uso do solo. A forma de amostragem está representada pelo esquema a seguir: quadrante de 1,30 m x 1,30 m com malha de pontos de 0,10 m x 0,02 m (pastagem), totalizando 924 pontos; e 0,05 m x 0,02 m (superfície arada), num total de 1.782 pontos. A operação de leitura do rugosímetro de agulhas, assim como sua manipulação, modificam a superfície lida devido ao contato mecânico existente entre as agulhas e a super-

fície do solo. Portanto, esse instrumento não permite que as leituras sejam realizadas no mesmo local, mas somente próximas umas das outras.

Segundo critérios estabelecidos pela Embrapa (1999) o solo utilizado em ambos os cultivos (pastagem e superfície arada) é classificado como Cambissolo Húmico, apresentando textura média e elevado conteúdo de matéria orgânica em superfície. O clima, segundo Köppen, é classificado como Cs, e a precipitação pluvial média anual oscila entre 1.000 mm e 1.400 mm.

## 2.2. Dispositivo experimental de laboratório (rugosímetro laser)

Simulou-se uma camada de 5 cm de espessura, utilizando-se uma mescla de agregados de diferentes diâmetros, em proporções que representam a superfície do Cambissolo Húmico, durante a semeadura de um cultivo de cereais. Empregaram-se as seguintes classes de agregados: 15% de agregados com diâmetros de 1 mm a 2 mm; 35% com 3 mm a 5 mm; 25% com 6 mm a 10 mm; 15% com 10 mm a 20 mm; e 10% de agregados com 20 mm a 30 mm de diâmetro (PAZ e TABOADA, 1996). A preparação das camadas foi realizada em recipientes quadrados de 0,58 m x 0,58 m, sobre um leito de areia fina.

Previamente à preparação da camada superficial, os agregados foram umedecidos lentamente até a saturação por ascensão capilar, evitando-se processos de expansão-contracção. Nessas condições, a água expulsa gradativamente o ar do espaço poroso ocupando-o lentamente, de forma a não promover microfaturas dos agregados, bem como evitar sua ruptura por ação do movimento brusco de bolhas de ar. O principal mecanismo que contribuiu para a desagregação, sob chuva simulada, foi o impacto das gotas, em trabalho realizado por PAZ et al. (1998).

A rugosidade foi medida utilizando-se um rugosímetro laser, na superfície antes e após a aplicação de quantidades crescentes de chuva (0 mm, 10 mm, 55 mm e 85 mm), com intensidade de 30 mm.h<sup>-1</sup>, produzida mediante simulador de chuvas (PAZ e TABOADA, 1996). O simulador de chuva possui uma superfície de 1,30 m x 1,30 m, com 380 capilares situados a 4,6 m acima da superfície experimental. O rugosímetro laser consta de uma fonte e um receptor de hélio-neônio (He-Ne) de baixa potência e um sistema ótico acoplado, o qual permite projetar verticalmente os raios de luz à superfície do solo, como também tratar as imagens desfocalizadas que são refletidas (BERTUZZI et al., 1990).

Em cada superfície simulada foram obtidas 270 linhas de 2 mm, separadas entre si, tendo, cada uma, 270 pontos medidos a uma distância constante de

2 mm. O erro absoluto máximo das medidas com o equipamento utilizado é 0,25 mm (BERTUZZI et al., 1990; PAZ e TABOADA, 1996). Para reduzir os efeitos de borda analisou-se uma área de 0,50 m x 0,50 m, o que equivale a considerar 250 linhas de 270 pontos cada uma, totalizando 67.500 pontos individuais.

O rugosímetro laser não foi utilizado em campo, devido à interferência que sofre na presença da luz solar durante a leitura da rugosidade, o que provoca alterações significativas nos resultados.

## 2.3. Determinação da variabilidade espacial

A geoestatística foi empregada com o propósito de avaliar a dependência espacial da rugosidade superficial, dispondo de várias ferramentas para a análise da variabilidade espacial. O semivariograma é uma dessas ferramentas, e a seguinte expressão pode ser utilizada para o seu cálculo (JOURNEL e HUIJBREGTS, 1978; VIEIRA et al., 1983):

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

em que  $\gamma(h)$  é a semivariância,  $N(h)$  é o número de pares de medidas de altura da rugosidade superficial,  $Z(x_i)$ ,  $Z(x_i + h)$ , separadas por uma distância  $h$ . O gráfico com os valores de semivariância ( $\gamma$ ) vs. distância ( $h$ ) representa o semivariograma.

Os semivariogramas foram escalonados para possibilitar a interpretação da rugosidade superficial nas leituras realizadas após episódios de chuva, sendo obtidos através da divisão dos valores de semivariância pela variância dos valores medidos (VIEIRA et al., 1997).

Para o ajuste dos modelos matemáticos aos semivariogramas utilizou-se o método de validação *Jackknifing*, no qual são analisados os valores de média e a variância dos erros reduzidos (SOUZA et al., 1997). Foram considerados os modelos esférico, exponencial e gaussiano (MCBRATNEY e WEBSTER, 1986), apresentados a seguir:

a) esférico (Sph),  $\gamma(h) = C_0 + C_1[1,5(h/a) - 0,5(h/a)^3]$  para  $0 < h \leq a$  e  $\gamma(h) = C_0 + C_1$  para  $h > a$ ;

b) exponencial (Exp),  $\gamma(h) = C_0 + C_1[1 - \exp(-3h/a)]$  para  $0 < h < d$ , em que  $d$  é a distância máxima, na qual o semivariograma é definido;

c) gaussiano (Gau),  $\gamma(h) = C_0 + C_1[1 - \exp(-3h^2/a^2)]$ .

O ajuste matemático dos dados a partir do semivariograma, possibilitou definir os seguintes parâmetros, a saber: **efeito pepita (Co)** - valor de  $\gamma$  quando  $h = 0$ ; **alcance da dependência espacial (a)** - valor de  $h$  quando a semivariância ( $\gamma$ ) se estabiliza próximo a um valor constante; **patamar (C)** - valor da

semivariância ( $\gamma$ ) quando se obtém um valor constante próximo à variância dos dados.

Quando há dependência espacial o semi-variograma inicia-se com baixo valor (efeito-pepita), crescendo à medida que  $h$  cresce, até uma distância "a" (alcance). Assim, pode-se afirmar que amostras separadas por distâncias menores que o alcance são correlacionadas espacialmente, e aquelas separadas por distâncias maiores não o são.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de variância observados nos dados obtidos com rugosímetro de agulhas - campo (Quadro 1) foram significativamente superiores em relação aos obtidos com rugosímetro laser - laboratório (Quadro 2), evidenciando a maior variação da rugosidade em condições de campo. Tal fato ocorreu devido à diferença existente no tamanho e na dis-

tribuição dos agregados, os quais nas condições de campo chegam a atingir até 40 cm, ao passo que na superfície simulada atingem, no máximo, 3 cm.

Em relação à variância observou-se, ainda, ao se utilizarem os dados obtidos com rugosímetro laser, ter havido um decréscimo desses valores conforme o aumento das quantidades de chuva aplicada (Quadro 2). A diminuição da variância permitiu caracterizar a evolução da rugosidade superficial em razão da aplicação de diferentes quantidades de chuva, evidenciando a redução da rugosidade e, conseqüentemente, a diminuição da capacidade de retenção de água nas microdepressões, ao longo dos episódios de chuva. O rugosímetro laser permite, portanto, analisar o efeito acumulativo da chuva, uma vez que durante a leitura dos pontos amostrais não há contato mecânico com a superfície do solo, possibilitando novas leituras na mesma área amostrada.

**Quadro 1.** Parâmetros dos semivariogramas escalonados para a rugosidade superficial calculados a partir de dados obtidos com rugosímetro de agulhas (campo)

Data	$C_0^1$	$C_1^2$	$(C_0+C_1)^3$	$a^4$	FE <sup>5</sup>	MR <sup>6</sup>	VR <sup>7</sup>	%C <sub>0</sub> <sup>8</sup>	Mod. <sup>9</sup>
cm									
Superfície arada									
18/03/98	0,16	0,92	1,08	23	71	0,001	1,00	15	Gau
01/04/98	0,04	0,86	0,90	31	62	0,002	1,10	4	Exp
17/04/98	0,11	1,00	1,11	25	144	0,001	0,90	9	Sph
28/04/98	0,07	0,96	1,03	24	39	0,001	1,10	7	Exp
Pastagem									
02/04/97	0,13	0,86	0,99	29	1.787	0,06	0,73	13	Exp
24/04/97	0,12	0,96	1,08	43	913	0,004	0,60	11	Exp
15/05/97	0,07	0,97	1,05	19	1.938	0,003	0,71	7	Sph
28/07/97	0,28	0,75	1,03	22	729	0,002	0,62	27	Gau

<sup>1</sup>efeito pepita; <sup>2</sup>C - C<sub>0</sub> (componente estrutural - "Sill"); <sup>3</sup>patamar; <sup>4</sup>alcance; <sup>5</sup>fator de escalonamento (variância); <sup>6</sup>média dos erros reduzidos; <sup>7</sup>variância dos erros reduzidos; <sup>8</sup>% do efeito pepita em relação ao patamar; <sup>9</sup>modelo matemático ajustado ao semi-variograma.

**Quadro 2.** Parâmetros dos semivariogramas escalonados para a rugosidade superficial, calculados a partir de dados obtidos com rugosímetro laser (superfície simulada)

Precip.	$C_0^1$	$C_1^2$	$(C_0+C_1)^3$	$a^4$	FE <sup>5</sup>	MR <sup>6</sup>	VR <sup>7</sup>	%C <sub>0</sub> <sup>8</sup>	Mod. <sup>9</sup>
mm	mm								
0	0,06	0,92	0,98	18	4,2	0,002	0,98	5	Sph
10	0,08	0,91	0,99	18	4,1	0,005	0,99	7	Sph
55	0,07	0,91	0,98	18	3,9	0,002	1,00	7	Sph
85	0,07	0,92	0,99	19	3,7	0,004	0,97	6	Sph

<sup>1</sup>efeito pepita; <sup>2</sup>C - C<sub>0</sub> (componente estrutural - "Sill"); <sup>3</sup>patamar; <sup>4</sup>alcance; <sup>5</sup>fator de escalonamento (variância); <sup>6</sup>média dos erros reduzidos; <sup>7</sup>variância dos erros reduzidos; <sup>8</sup>% do efeito pepita em relação ao patamar; <sup>9</sup>modelo matemático ajustado ao semi-variograma.

Não se verificou o mesmo comportamento para os valores de variância obtidos através dos dados do rugosímetro de agulhas, nas diferentes datas, tendo apresentado uma variação significativamente maior em relação aos valores encontrados a partir dos dados obtidos com rugosímetro laser (Quadro 1). Esse fato se deve às condições existentes no campo, nas quais observa-se maior variação no tamanho dos agregados, bem como uma distribuição mais irregular em relação à superfície simulada.

Empregando-se a escala de dependência espacial determinada por CAMBARDELLA et al. (1994), verificou-se que, para a maioria dos semivariogramas analisados, a rugosidade superficial apresentou alta dependência espacial constatada pelos valores do efeito pepita ( $C_0$ ), inferiores a 25% do valor do patamar (Quadros 1 e 2). Esses valores são apresentados como porcentagem do patamar para facilitar a comparação do grau de dependência espacial (TRANGMAR et al., 1987).

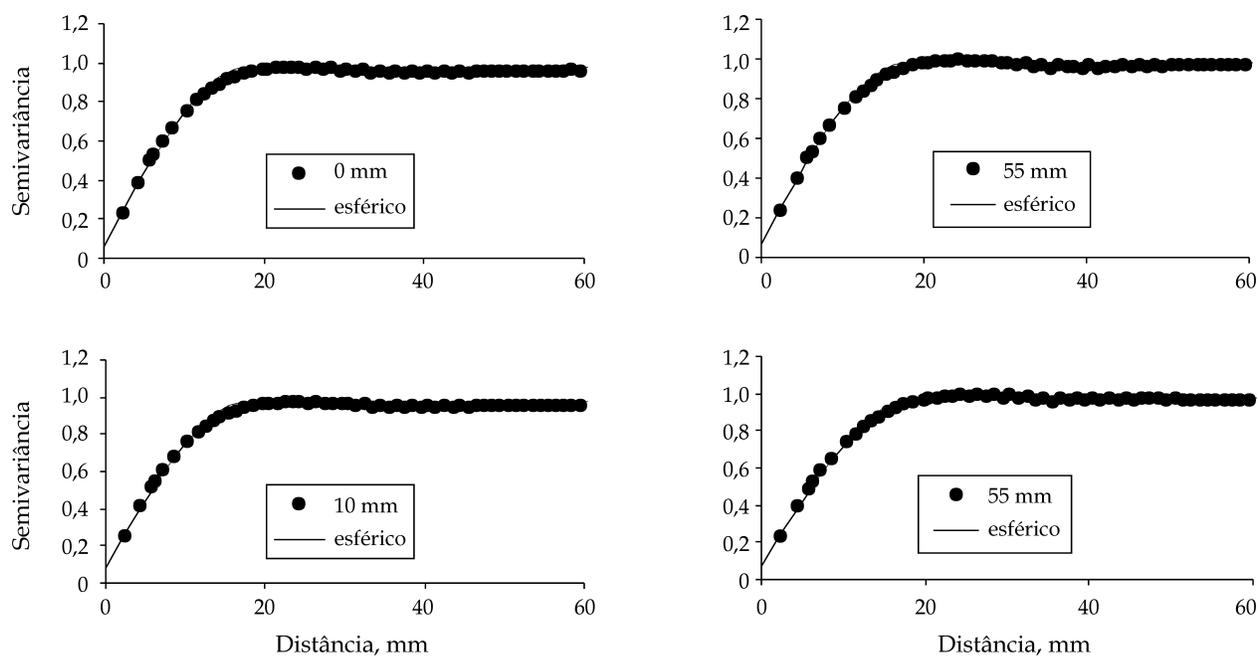
O efeito pepita ( $C_0$ ), um dos parâmetros do semivariograma, pode referir-se a um erro analítico (variabilidade não explicada), ou ser devido a microvariações não detectadas, em face da distância de amostragem utilizada (CAMBARDELLA et al., 1994). Com base no exposto observou-se que os semivariogramas referentes aos dados obtidos com rugosímetro laser (Figura 1) apresentaram pequenos valores de efeito pepita por terem espaçamento reduzido entre os pontos de leitura. GONÇALVES (1997),

avaliando a variabilidade espacial de propriedades físicas para fins de manejo de irrigação, encontrou esse mesmo comportamento quando utilizou menor espaçamento entre amostragens.

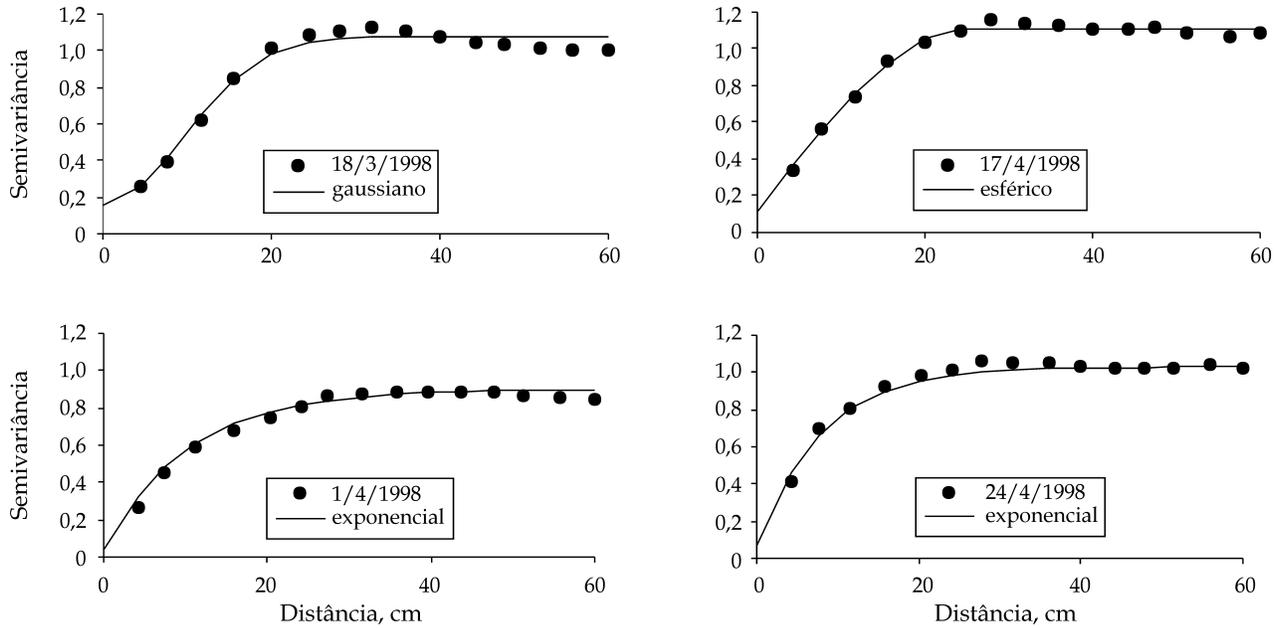
Os valores de efeito pepita obtidos a partir dos dados do rugosímetro laser mostraram, também, variações muito pequenas, nas diferentes quantidades de chuva aplicada. O mesmo foi observado com os parâmetros alcance e patamar. Nota-se que o comportamento dos parâmetros dos semivariogramas obtidos a partir dos dados do rugosímetro laser são bastante semelhantes, indicando que, embora haja variações na rugosidade superficial com a aplicação de diferentes quantidades de chuva, não ocorrem alterações significativas na sua dependência espacial.

Para os parâmetros dos semivariogramas obtidos a partir dos dados do rugosímetro de agulhas (Figuras 2 e 3) foi verificada grande variação, principalmente com relação ao efeito pepita e ao alcance. Esse comportamento pode ser atribuído às variações do microrrelevo existentes na mesma parcela, indicando elevada desuniformidade da rugosidade ao longo da superfície, dado que as leituras não foram realizadas exatamente na mesma posição e sim próximas umas das outras, uma vez que o rugosímetro de agulhas modifica a superfície do solo durante a leitura da rugosidade.

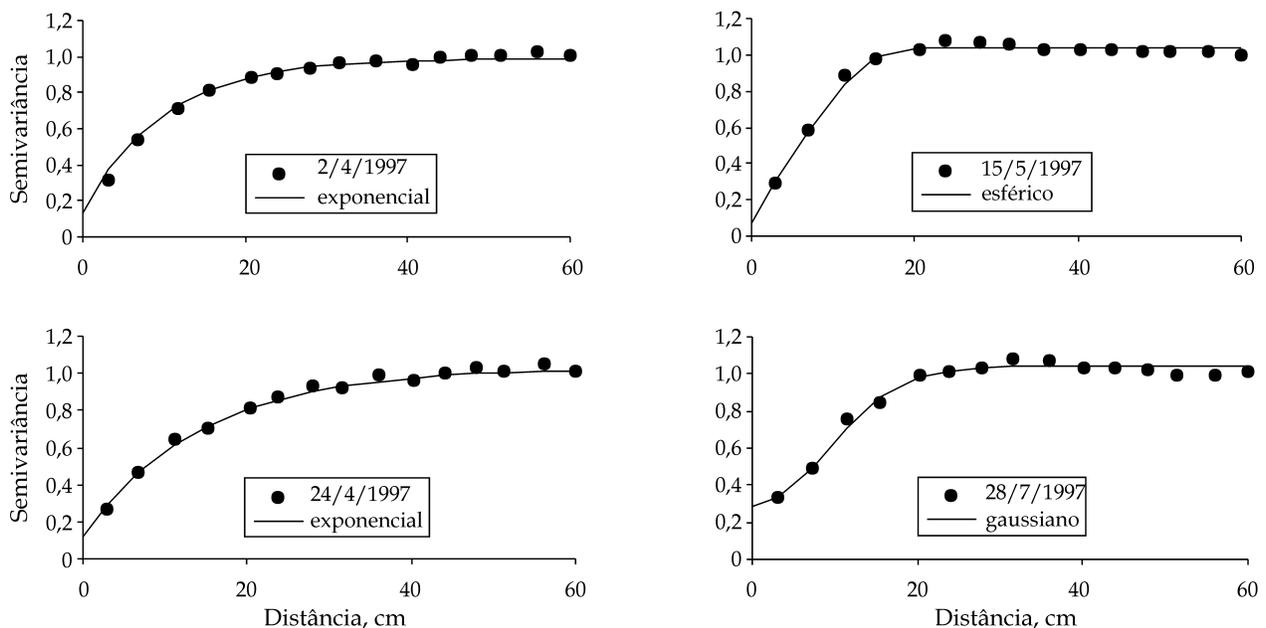
Os valores do alcance obtidos com dados provenientes do rugosímetro laser foram bastante inferior-



**Figura 1.** Semivariogramas escalonados da rugosidade superficial obtidos a partir de dados do rugosímetro laser (superfície simulada) antes e após aplicação de diferentes quantidades de chuva.



**Figura 2.** Semivariogramas escalonados da rugosidade superficial obtidos a partir de dados do rugosímetro de agulhas em superfície arada e em diferentes datas.



**Figura 3.** Semivariogramas escalonados da rugosidade superficial obtidos a partir de dados do rugosímetro de agulhas em pastagem e em diferentes datas.

res (aproximadamente 2 cm) em relação aos encontrados nos semivariogramas com a utilização do outro instrumento (19 cm a 43 cm). Esse fato pode estar relacionado à forma com que o rugosímetro laser processa a leitura da rugosidade. O referido instrumento fornece uma quantidade de pontos amostrados muito maior para a análise de geoestatística, em relação ao observado com rugosímetro de agulhas, o

que permite detectar a dependência espacial em outra escala. No entanto, a maior amplitude dos valores de alcance encontrados com os dados obtidos do rugosímetro de agulhas não está relacionada à menor quantidade de pontos amostrados, mas sim, à distribuição e ao tamanho dos agregados (PAZ et al., 1998). Na condição de campo (pastagem e superfície arada) os agregados encontram-se extremamente

variáveis e bem maiores em relação aos verificados na superfície simulada (VIDAL VÁZQUEZ, 1998).

Para o ajuste dos semivariogramas realizados com base nos valores obtidos pelo rugosímetro laser utilizou-se apenas o modelo esférico, que se apresentou de maneira muito similar nas quatro leituras realizadas com esse instrumento. O procedimento confirma que, embora tenha havido mudanças na rugosidade superficial do solo, por efeito das diferentes quantidades de chuva aplicadas (PAZ et al., 1998), não foram detectadas alterações na dependência espacial.

Os modelos utilizados para o ajuste dos semivariogramas obtidos com os dados do rugosímetro de agulhas, foram, o exponencial, esférico e gaussiano. No entanto, o primeiro apareceu com maior frequência, confirmando a predominância desse modelo, juntamente com o esférico, nos trabalhos científicos relacionados a propriedades físicas do solo. A utilização de diferentes modelos para o ajuste dos semivariogramas obtidos a partir dos dados do rugosímetro de agulhas pode ser atribuída à distribuição e tamanho dos agregados, bem como à maneira pela qual as leituras foram realizadas (nunca na mesma posição). Esses foram os mesmos fatores que contribuíram para a elevada variação dos valores de alcance, observada nos referidos semivariogramas.

#### 4. CONCLUSÕES

1. A rugosidade superficial do solo apresentou alta dependência espacial, tanto em superfície simulada quanto em condições de campo.
2. Os valores de alcance do efeito pepita apresentaram grande variação em condições de campo, indicando que esses parâmetros dependem da forma de distribuição e do tamanho dos agregados do solo.
3. O rugosímetro laser foi o mais indicado para descrever o efeito acumulativo da chuva, nas microvariações superficiais, por permitir repetidas leituras em um mesmo local de amostragem.
4. Os diferentes modelos ajustados e a elevada variação dos parâmetros observados nos semivariogramas obtidos com dados de pastagem e superfície arada, evidenciaram a dificuldade na obtenção de um modelo tridimensional, representativo do micro-relevo, em condições de campo.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Yves Duval pelas medições de rugosidade realizadas com laser, na Unité d'Agronomie de Laon-Peronne - INRA (França).

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERTUZZI, P.; CAUSSIGNAC, J. M.; STENGEL, P.; MOREL, G.; LORENDEAU, J. Y.; PELLOUX, G. An automated, noncontact laser profile meter for measuring soil roughness in situ. *Soil Science*, Baltimore, v.149, p.169-178, 1990.
- BRESSON, L.M.; BOYFFIN, J. Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma*, Amsterdam, v.7, p.301-325, 1990.
- 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 Soil. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.58, p.1501-1508, 1994.
- DE ROO, A.P.J., WESSELING, C.G., OFFERMANS, R.J.E.; RITSEMA, C.J. LISEM: a user guide. Netherlands: Utrecht University, 1995. 49p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília: Embrapa Produção de Informação ; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.
- GONÇALVES, A.C.A. *Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo da irrigação*. Piracicaba, 1997. 118p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- HELMING, K.; RÖMKEMS, M.J.M.; PRASAD, S.N. Surface roughness related processes of runoff and soil loss: a flume study. *Soil Science Society America Journal*, Madison, v.62, p.243-250, 1998.
- HELMING, K.; ROTH, C.H.; WOLF, R; DIESTEL, H. Characterization of rainfall: microrelief interactions with runoff using parameters derived from digital elevation models (DEMs). *Soil Technology*, Cremlingen, v.6, p.273-286, 1993.
- HUANG, C. Quantification of soil microtopography and surface roughness. In: BAVEYE, P; PARLANGE, J.Y; STEWART, B.A. (Eds.) *Fractals In Soil Science*. New York: CRC Press, 1998. p.153-168,
- ISAACS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.
- JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, C.J. *Mining geostatistics*. London: Academic Press, 1978. 600p.
- MCBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Science*, London, v.37, p.617-639, 1986.
- MILLER, M.P.; SINGER, M.J.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex

- hills. *Soil Science Society America Journal*, Madison, v.52, p.1133-1141, 1988.
- ONSTAD, C. A. Depressional storage on tilled soil surfaces. *Transactions of the ASAE*, St Joseph, v. 27, p.729-732, 1984.
- PAZ, A.G.; MIRANDA, J.G.V.; BERTOLANI, F.C. Caracterización geoestadística del microrrelieve del suelo apartir de datos obtenidos con rugosímetro láser. In: COLEGIO OFICIAL DE FÍSICOS (Ed.). *Agua*. Madrid: Espacios Naturales y Biodiversidad, 1998. p.143-158.
- PAZ, A.G.; TABOADA, M.T. Medida del microrrelieve del suelo y estimación de la retención hídrica en depresiones de la superficie. *Jornal de la Sociedad Española de Geomorfología*, La Coruña, v.34, p.829-841, 1996.
- SOUZA, L.S.; COGO, N.P.; VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.21, p.367-372, 1997.
- TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; WADE, M.K.; UEHARA, G.; SUDJADI, M. Spatial variation of soil properties and rice yield on recently clared land. *Soil Science Society America Journal*, Madison, v.51, p.668-674, 1987.
- VAUCLIN, M.; VIEIRA, S.R.; BERNARDI, R., HATFIELD, J.L. Spatial variability of surface temperature along two transects of bare soil. *Water Resources Research*, Washington, v.18, p.1677-1686, 1982.
- VIDAL VÁZQUEZ, E. *Análisis del microrrelieve y la retención temporal de agua en suelos de pradera*. La Coruña, 1998. 94p. Tese (Licenciatura)- Facultad de Ciencias, Universidad de La Coruña.
- VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L. NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, Oakland, v.51, p.1-75, 1983.
- VIEIRA, S.R.; TILLOTSON, P.M.; BIGGAR, J.W.; NIELSEN, D.R. Scaling of semivariograms and the kriging estimation of field-measured properties, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.21, 525-533, 1997.