



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbcs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Brasil

Martins Silva Salvador, Monica; Libardi, Paulo Leonel; Brito, Alexsandro dos Santos; Moreira, Neilo  
Bergamin

Estabilidade temporal e variabilidade espacial da distribuição da armazenagem de água no solo numa  
sucessão feijão/aveia-preta

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 36, núm. 5, outubro-noviembre, 2012, pp. 1434-1447

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180224890007>

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

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal

Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

## Comissão 2.2 - Física do solo

# ESTABILIDADE TEMPORAL E VARIABILIDADE ESPACIAL DA DISTRIBUIÇÃO DA ARMAZENAGEM DE ÁGUA NO SOLO NUMA SUCESSÃO FEIJÃO/AVEIA-PRETA<sup>(1)</sup>

Monica Martins Silva Salvador<sup>(2)</sup>, Paulo Leonel Libardi<sup>(3)</sup>, Alexsandro dos Santos Brito<sup>(4)</sup>  
& Neilo Bergamin Moreira<sup>(5)</sup>

### RESUMO

A armazenagem de água no solo é muito variável no tempo e no espaço devido à influência de vários fatores ambientais e topográficos. Objetivou-se neste estudo: quantificar a armazenagem de água no solo; avaliar sua estabilidade temporal e sua variabilidade espacial em um local próximo e outro distante do sistema radicular numa sucessão feijão/aveia-preta; e constatar sua variabilidade espacial em função do relevo. Em área experimental de 1.500 m<sup>2</sup>, situada em Piracicaba-SP (latitude de 22° 42' 30" S, longitude de 47° 38' 00" W e 546 m de altitude), estabeleceram-se 60 pontos de amostragem, distanciados entre si de 5 m, numa grade de 10 por 6 pontos (50 x 30 m). Os valores da armazenagem de água no solo apresentaram comportamento-padrão para o solo estudado, com valores maiores em profundidade do que na camada mais superficial. Houve maior estabilidade temporal da armazenagem de água no solo durante o período chuvoso, porém na fase de secagem do solo a estabilidade temporal também foi constatada, mas com valores de coeficiente de correlação mais elevados na camada de 0,0-0,80 m, mostrando que essa estabilidade foi claramente devida à posição topográfica desses pontos, os quais estão localizados na porção mais baixa do relevo. Assim, o ponto 52 foi escolhido como representativo da média na fase de recarga de água no solo em ambas as camadas estudadas, e o ponto 46, na camada superior durante a fase de secagem do solo. A dependência espacial da variabilidade da armazenagem de água no solo foi detectada em ambas as camadas de solo, porém com maior alcance na camada de 0,0-0,40 m, quando houve ocorrência de precipitação. Quando as chuvas cessaram, o alcance foi maior na camada de 0,0-0,80 m. Durante o período chuvoso, o padrão de variabilidade espacial foi muito semelhante em ambas as camadas de solo, com armazenagens maiores na faixa de maior inclinação e depressões do terreno.

**Termos de indexação:** relevo, umidade do solo, diferença relativa.

---

<sup>(1)</sup> Projeto financiado pelo CNPq. Recebido para publicação em 10 de janeiro de 2012 e aprovado em 26 de julho de 2012.

<sup>(2)</sup> Pós-doutoranda do Departamento de Engenharia de Biossistemas, ESALQ/USP, Av. Pádua Dias, 11. Caixa Postal 9. CEP 13418-900 Piracicaba (SP), Brasil. E-mail: monica\_mars@hotmail.com

<sup>(3)</sup> Professor Titular do Departamento de Engenharia de Biossistemas, ESALQ/USP. E-mail: pllibard@esalq.usp.br

<sup>(4)</sup> Professor Efetivo do IFBaiano/Campus Guanambi. E-mail: alexsandro.brito@guanambi.ifbaiano.edu.br

<sup>(5)</sup> Doutor em Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP. E-mail: nbergamin@hotmail.com

**SUMMARY: TEMPORAL STABILITY AND SPATIAL VARIABILITY OF DISTRIBUTION OF SOIL WATER STORAGE IN A BEAN-BLACK OAT SUCCESSION**

*Soil water storage is very variable in time and space due to the influence of various environmental factors and topography. The objective was to: i) quantify the soil water storage, ii) assess the temporal stability and spatial variability of a point near to and one distant from the root system in a common bean – black oat succession iii) verify the spatial variability as a function of the soil relief. In the experimental area (1500 m<sup>2</sup>), in Piracicaba-SP (latitude 22° 42'30" S, longitude 47° 38'00" W; 546 m asl) 60 sampling points 5 m apart from each other were established in a 6 x 10 grid (50 m x 30 m). Water storage of the studied soil had a standard behavior pattern, with greater values in the deeper than in the surface layer. A greater temporal stability of soil water storage was observed during the rainy season, but temporal stability was also observed during soil drying, but with higher correlation coefficients in the 0.0-0.80 m layer, showing that this stability was clearly due to the topographical position of these points, in the lower part of the landscape. Point 52 was chosen as representative of the average in the phase of soil water recharge in both layers studied and point 46 as average in the surface layer during the soil drying phase. The spatial dependence of the variability of soil water storage was detected in both soil layers, but with a greater range in the 0.0 - 0.40 m layer in the case of rainfall. When the rains stopped, the range was higher in the 0.0-0.80 m layer. During the rainy season, the pattern of spatial variability was very similar in both soil layers; water storage was highest at the points of highest slope and of depressions in the ground.*

*Index terms: relief, soil moisture, relative difference.*

## INTRODUÇÃO

Devido à heterogeneidade dos solos, suas propriedades e, conseqüentemente, a armazenagem de água, que está relacionada com a maior ou menor disponibilidade e absorção de água pelas culturas, variam consideravelmente no espaço. Além disso, a profundidade escolhida para o estudo da armazenagem de água certamente deve interferir na magnitude da variabilidade.

Informações sobre o conteúdo de água no solo em várias profundidades são importantes para compreender e modelar a dinâmica do fluxo da água de superfície e subsuperfície (Martinez-Fernandez & Ceballos, 2005; Pachepsky et al., 2005). Por outro lado, essas informações em diversos pontos de uma área experimental, obtidas em diversos momentos ao longo dos ciclos de secagem e umedecimento, podem servir como base para a compreensão dos processos dinâmicos da água no sistema solo-planta (Gonçalves et al., 1999).

Além das propriedades do solo, o conteúdo de água está também intimamente relacionado com a topografia do terreno; por exemplo, solos argilosos geralmente têm maior conteúdo de água do que solos arenosos e solos localizados na parte mais alta do terreno são geralmente mais secos do que os de áreas mais baixas (Zhou et al., 2007).

Segundo Sanchez et al. (2009), as formas do relevo podem ser indicadores da variabilidade do conteúdo de água no solo, porque pequenas alterações do declive alteram os processos pedogenéticos, bem como o

transporte e a armazenagem de água no perfil do solo. De acordo com Souza (2001), as diferentes trajetórias do fluxo da água, em distintas formas da paisagem, são agente causador de variabilidade. Portanto, estudos que levem ao melhor entendimento de como a água se comporta na zona radicular são convenientes (Cruz et al., 2005) e de importância indiscutível.

A análise da dinâmica temporal da armazenagem de água no solo pelo método proposto por Vachaud et al. (1985) pode ser considerada uma referência para os estudos da estabilidade temporal. Em sua pesquisa, esses autores propuseram um método capaz de reduzir o número de amostragem para caracterizar uma dada medida no solo. Primeiramente, propuseram a técnica conhecida como diferença relativa, que é a análise dos desvios entre os valores observados individualmente e a média de todos eles medidos espacialmente. Como resultado, pequenas variações na diferença relativa entre as posições no espaço (como uma função do tempo) indicam estabilidade temporal. Em segundo lugar, utilizaram o teste não paramétrico de Spearman para avaliar o grau de concordância da variabilidade espacial obtida em diferentes tempos.

Segundo Melo Filho & Libardi (2005), verificar a estabilidade temporal pode gerar informações científicas mais claras e precisas, que podem ser usadas com reduzida incerteza; nesse sentido, uma série de estudos tem sido desenvolvida para compreender melhor a variabilidade espaço-temporal do conteúdo de água no solo, como os de Gonçalves et al. (1999), Melo Filho & Libardi (2005), Rocha et al. (2005), Ávila et al. (2011), Coppola et al. (2011), Souza

et al. (2011), Ibrahim & Huggins (2011), Gao & Shao (2012), entre outros.

Dada assim a importância do estudo tanto da variabilidade espacial quanto temporal da armazenagem de água no solo, objetivou-se neste estudo: quantificar a armazenagem da água no solo; avaliar sua estabilidade temporal e sua variabilidade espacial em um local próximo e outro distante do sistema radicular numa sucessão feijão/aveia-preta; e constatar sua variabilidade espacial em função do relevo.

## MATERIAL E MÉTODOS

Em área experimental de 1.500 m<sup>2</sup>, situada em Piracicaba-SP (latitude de 22° 42' 30" S, longitude de 47° 38' 00" W e 546 m de altitude), estabeleceram-se 60 pontos de amostragem, distanciados entre si de 5 m, numa grade de 10 por 6 pontos (50 x 30 m). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, denominado "tropical de altitude", clima mesotérmico de inverno seco, com temperatura média do mês mais frio inferior a 18 °C e a do mês mais quente superior a 22 °C. As médias anuais de temperatura, precipitação pluvial e umidade relativa são de 21,1°C, 1.257 mm e 74 %, respectivamente. A estação seca ocorre entre os meses de abril e setembro, sendo julho o mês mais seco. O mês mais chuvoso oscila entre dezembro e fevereiro, e as chuvas mensais do período de outubro a dezembro variam de 110 mm no mês de outubro a 199 mm no mês de dezembro.

O solo do local é um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, com textura média a arenosa em todo o perfil (0,0-1,20 m); quanto ao relevo, segundo mapa planialtimétrico elaborado por Brito (2010), utilizando uma cota relativa à maior cota do terreno (591,72 m), obteve-se diferença de 0,765 m entre a maior e a menor cota, apresentando ondulações, as quais formam depressões em algumas partes da área (Figura 1).

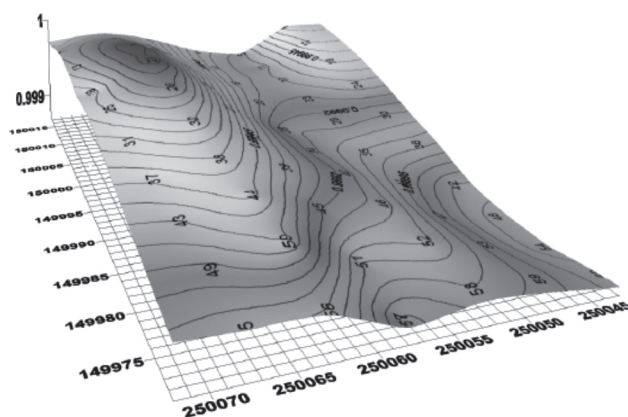


Figura 1. Mapa planialtimétrico da área experimental, representado por cotas altimétricas relativas à maior cota. Fonte: Brito (2010).

O experimento foi desenvolvido durante um verão (12/2010 a 04/2011) e um inverno (05/2011 a 08/2011). No verão, cultivou-se o feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) variedade Pérola (grupo comercial carioca) e, durante o inverno, aveia-preta (*Avena strigosa* Scheid). As culturas foram adubadas de acordo com as recomendações para o Estado de São Paulo (Raij et al., 1997). De acordo com as recomendações de Raij et al. (1997) para o cultivo do feijoeiro, aplicaram-se 50 kg ha<sup>-1</sup> de ureia (45 % de N), 50 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato simples (16 % de CaO, 18 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 8 % de S), 30 kg ha<sup>-1</sup> de KCl (60 % de K<sub>2</sub>O) e 6 kg ha<sup>-1</sup> de ácido bórico; no cultivo da aveia-preta foram aplicados 30 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 08-28-16. O preparo do solo no verão consistiu de uma aração com arado de discos na profundidade de 0,20 m e duas gradagens e, no inverno, uma aração com arado escarificador a 0,30 m de profundidade e enxada rotativa.

Para o plantio do feijão-comum, não irrigado, utilizou-se espaçamento de 0,50 m entre linhas, colocando-se cinco sementes por metro linear, totalizando 15.000 plantas ha<sup>-1</sup>. A aveia-preta foi semeada no espaçamento de 0,25 m entre linhas, empregando-se cerca de 60 kg ha<sup>-1</sup> de sementes.

Leituras num intervalo de 7 a 10 dias com uma sonda de nêutrons modelo 503 Hydroprobe da CPN Corporation com fonte de amerício-berílio de atividade 50 mCi, devidamente calibrada para o solo em estudo, foram realizadas para obter-se o conteúdo de água ( $\theta$ ) no solo nas profundidades de 0,20, 0,40, 0,60 e 0,80 m e, assim, calcular a armazenagem de água ( $h_z$ ) no perfil do solo em função do tempo. Durante o cultivo do feijoeiro, a avaliação foi realizada no período de 7 de janeiro a 9 de abril de 2011, totalizando 14 datas de leituras; durante o cultivo da aveia-preta, fez-se a avaliação no período de 24 de maio a 17 de agosto de 2011, totalizando 10 datas de leituras.

A armazenagem de água ( $h_z$ ) no perfil de solo 0-Z m de profundidade (em que Z = 0,40 e 0,80 m e, portanto, camadas de 0,0-0,40 e 0,0-0,80 m) foi calculada por:

$$h_L = \int_0^L \theta(Z) dZ \quad (1)$$

em que  $\theta$  = conteúdo de água volumétrico, função de Z; e L = profundidade de solo igual a 0,40 e 0,80 m. Assim,  $h_z$  representa a armazenagem de água na camada 0-L m. A avaliação dessa integral para L = 0,40 m e L = 0,80 m foi feita pela regra do trapézio, ou seja, no caso presente:

$$h_{0,4m} = 0,2\theta_{0,2m} + 0,2\left(\frac{\theta_{0,2m} + \theta_{0,4m}}{2}\right) \quad \text{e}$$

$$h_{0,8m} = h_{0,4m} + 0,2\left(\frac{\theta_{0,4m} + \theta_{0,6m}}{2}\right) + 0,2\left(\frac{\theta_{0,6m} + \theta_{0,8m}}{2}\right) \quad (2)$$

em que  $\theta_{0,2m}$ ,  $\theta_{0,4m}$ ,  $\theta_{0,6m}$  e  $\theta_{0,8m}$  representam o conteúdo de água volumétrico nas profundidades de 0,2, 0,4, 0,6 e 0,8 m; e 0,2 é o incremento de profundidade  $\Delta Z$ .

Para avaliar a estabilidade temporal, utilizaram-se o método da diferença relativa e o teste de correlação de Spearman ( $r_s$ ), propostos por Vachaud et al. (1985). O primeiro é usado para comparar os valores pontuais e seus desvios-padrão com a média de todos os pontos, e o segundo, o grau de concordância da variabilidade espacial obtida em diferentes tempos. Um valor de  $r_s = 1$  corresponde a uma perfeita estabilidade temporal entre as datas avaliadas. Quanto mais próximo  $r_s$  for de 1, mais estável será o processo. A técnica das diferenças relativas diz respeito à diferença relativa de uma determinação individual da armazenagem de água no solo  $\bar{h}_{Lij}$  no local  $i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ), no tempo  $j$  ( $j=1, 2, 3, \dots, m$ ) e na armazenagem de água média  $\bar{h}_{Lj}$  no mesmo tempo  $j$ :

$$\delta h_{Lij} = \frac{h_{Lij} - \bar{h}_{Lj}}{\bar{h}_{Lj}} \quad (3)$$

com

$$\bar{h}_{Lj} = \frac{\sum_{i=1}^n h_{Lij}}{n} \quad (4)$$

No teste de correlação de Spearman, a variável  $h_{ij}$  observada no local  $i$  no tempo  $j$  é observada na mesma posição, no mesmo local  $i$ , mas no tempo  $j'$ , sendo calculada por:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (h_{ij} - h_{ij'})^2}{n(n^2 - 1)} \quad (5)$$

sendo  $n$  o número de observações.

Os dados foram analisados de acordo com a estatística descritiva, verificando se os dados seguem uma distribuição normal, utilizando o teste de Shapiro-Wilk; para caracterizar o grau da variabilidade, os valores de coeficiente de variação (CV) foram analisados segundo Warrick & Nielsen (1980), os quais consideram três níveis de variabilidade: baixa, quando  $CV < 12\%$ ; média, quando  $CV$  estiver entre 12 e 60 %; e alta, quando  $CV > 60\%$ .

Para descrição da variabilidade espacial dos dados, foram gerados semivariogramas, usando-se o programa GS+ (Gamma Design Software, 2004). A escolha do modelo teórico que melhor se ajustou à distribuição dos dados baseou-se na menor soma de quadrados de resíduos (RSS) e no maior coeficiente de determinação ( $r^2$ ). Os modelos ajustados apresentam os seguintes parâmetros: patamar, o qual representa o valor do semivariograma correspondente ao seu

alcance, ou seja, desse ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras; alcance, que é o raio de dependência espacial entre os elementos amostrais; e efeito pepita ( $C_0$ ), o qual revela a descontinuidade do semivariograma perto da origem, para distâncias menores que aquela amostrada. Adaptando-se a classificação proposta por Cambardella et al. (1994), o grau de dependência espacial (GD) é classificado como:  $GD < 0,25$ , a variável georreferenciada tem fraca dependência espacial;  $0,25 < GD < 0,75$ , a variável georreferenciada tem moderada dependência espacial; e  $0,75 < GD < 1,00$ , a variável georreferenciada tem forte dependência espacial.

A escolha final do modelo que representou o ajuste foi feita pela validação cruzada - teste realizado para se verificar a confiabilidade do semivariograma, bem como dos valores estimados pela krigagem. Na sua análise, cada ponto contido dentro do domínio espacial é removido individualmente, sendo seu valor estimado como se ele não existisse. Dessa forma, pode-se construir um gráfico de valores estimados *versus* observados, para todos os pontos. O coeficiente de correlação ( $r$ ) entre esses valores reflete a eficiência do ajuste, dado pela técnica da soma dos quadrados dos desvios, representando a equação de regressão linear em questão. Um ajuste perfeito teria coeficiente de regressão igual a 1, e a linha do melhor ajuste coincidiria com o modelo perfeito, isto é, com o coeficiente linear igual a zero e o angular igual a 1 (Gamma Design Software, 2004).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resumo estatístico da análise exploratória dos valores de armazenagem de água no solo ao longo do tempo (feijão/aveia-preta) para as camadas de 0,0-0,40 e 0,0-0,80 m encontra-se no quadro 1, onde se pode observar que a média e a mediana tiveram valores bastante próximos, indicando simetria na distribuição dos dados em todos os pontos na data de medida. Os valores de assimetria ficaram próximos de zero, indicando que os dados tiveram distribuição normal, assim como a maioria dos dados do coeficiente de curtose, que, com algumas exceções, alcançaram valores altos. Ainda, verifica-se que a armazenagem seguiu uma distribuição normal na maioria dos períodos de avaliação quando se utilizou o teste de Shapiro-Wilk.

Para caracterizar o grau de variabilidade da armazenagem de água, os valores do coeficiente de variação (CV) foram analisados de acordo com Warrick & Nielsen (1980). Assim, os valores de CV para a armazenagem de água no solo (Quadro 1) foram caracterizados como de baixa e média variabilidade, oscilando de 6,37 a 19,02 % na camada de 0,0-0,40 m e de 4,06 a 10,82 % na camada de 0,0-0,80 m, durante o cultivo do feijoeiro. Durante o cultivo da aveia-preta,



o CV variou de 8,20 a 13,64 % na camada de 0,0-0,40 m e de 8,80 a 11,55 % na camada de 0,0-0,80 m.

A figura 2a mostra a média geral da armazenagem de água no solo nas duas camadas estudadas, bem como da precipitação pluvial durante o ciclo de desenvolvimento do feijoeiro. Observa-se que a armazenagem da água, em ambas as camadas, reage rapidamente à precipitação pluvial, ou seja, quando chove, essa armazenagem aumenta. Verificam-se ainda dois períodos de recarga (7 a 21 de janeiro e 18 de fevereiro a 12 de março) e dois períodos de secagem (22 de janeiro a 17 de fevereiro e a partir de 13 de março) do perfil do solo, com relativo aumento e queda da média da armazenagem de água, a qual variou de 47 a 79,10 mm e de 111,83 a 164,68 mm, respectivamente nas camadas de 0,0-0,40 e 0,0-0,80 m. Ao se considerar uma camada de solo maior (0,0-0,80 m) e outra menor

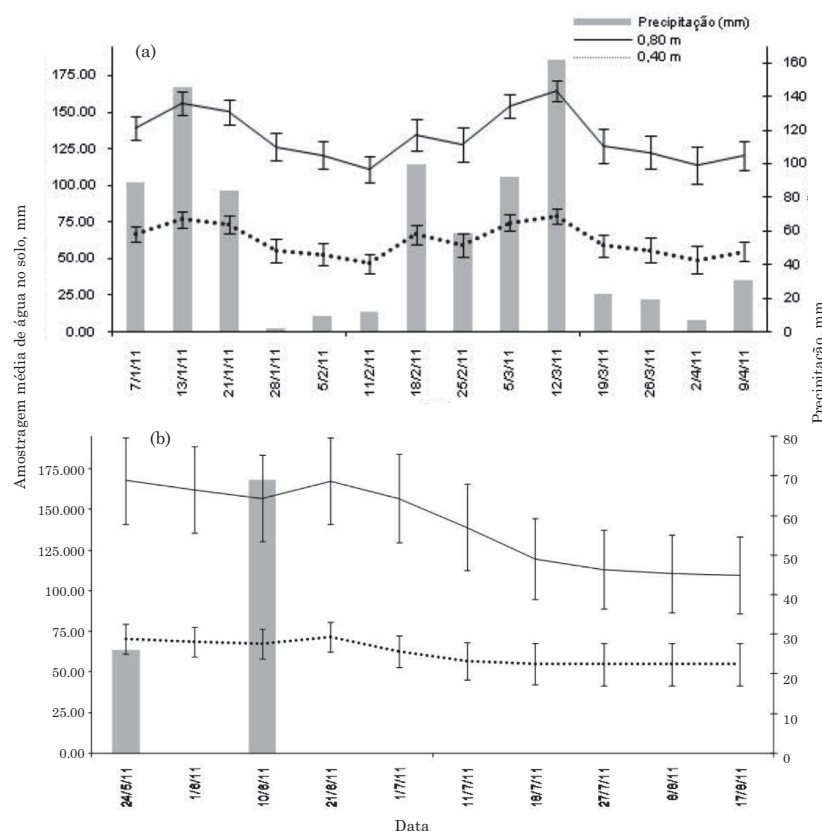
(0,0-0,40 m), espera-se que os maiores valores de armazenagem de água sejam encontrados em profundidade, já que na camada mais superficial há maior interferência do sistema radicular.

Durante o ciclo de desenvolvimento da aveia-preta (Figura 2b) a armazenagem variou de 57,82 a 71,71 mm e de 106,72 a 159,86 mm, respectivamente nas camadas de 0,0-0,40 e 0,0-0,80 m. Observa-se que a armazenagem de água no solo (Figura 2b) não aumentou imediatamente após cada evento de precipitação pluvial, mas somente após 11 dias, até ficar estável. Esse comportamento ocorre porque na época de secagem do solo, ou conteúdo de água abaixo da capacidade de campo, o movimento de água é governado pelo potencial mátrico, valendo para essa condição a clássica teoria baseada na equação de Richards. Algumas pesquisas também mostram que

**Quadro 1. Resumo estatístico da armazenagem de água no solo (mm) em todos os períodos nas camadas de 0,0-0,40 e 0,0-0,80 m, durante o ciclo de feijoeiro e aveia-preta**

| Período     | Camada de solo |                     |                         |         |                       |        |            |        |          |         |        |        |
|-------------|----------------|---------------------|-------------------------|---------|-----------------------|--------|------------|--------|----------|---------|--------|--------|
|             | 0,0-0,40 m     |                     |                         |         |                       |        | 0,0-0,80 m |        |          |         |        |        |
|             | Média          | Med. <sup>(1)</sup> | Assimet. <sup>(2)</sup> | Curtose | CV <sup>(3)</sup> (%) | p      | Média      | Med.   | Assimet. | Curtose | CV (%) | p      |
| Feijão      |                |                     |                         |         |                       |        |            |        |          |         |        |        |
| 7/jan       | 66,84          | 68,16               | -0,35                   | -0,69   | 8,15                  | 0,073* | 138,80     | 139,73 | -0,26    | -0,08   | 5,78   | 0,659* |
| 13/jan      | 76,78          | 77,39               | -0,19                   | -0,96   | 7,39                  | 0,128* | 156,30     | 155,24 | -0,01    | -0,12   | 5,13   | 0,699* |
| 21/jan      | 73,22          | 73,18               | -0,24                   | -1,00   | 8,23                  | 0,062* | 150,09     | 149,17 | -0,27    | -0,31   | 5,56   | 0,492* |
| 28/jan      | 55,42          | 55,96               | -0,45                   | -0,65   | 13,94                 | 0,034  | 126,43     | 127,81 | -0,60    | -0,29   | 7,26   | 0,019  |
| 5/fev       | 53,19          | 53,92               | -0,27                   | -0,81   | 14,88                 | 0,192* | 120,81     | 122,02 | -0,46    | -0,41   | 8,01   | 0,080* |
| 11/fev      | 47,00          | 47,67               | -0,21                   | -1,07   | 13,90                 | 0,033  | 110,88     | 111,83 | -0,36    | -0,31   | 7,85   | 0,657* |
| 18/fev      | 66,63          | 66,39               | -0,04                   | -1,13   | 9,98                  | 0,061* | 134,79     | 134,70 | -0,06    | -0,48   | 7,98   | 0,522* |
| 25/fev      | 59,59          | 60,74               | -0,22                   | -0,89   | 13,36                 | 0,041  | 127,79     | 128,65 | -0,24    | -0,41   | 9,07   | 0,401* |
| 5/mar       | 74,66          | 74,33               | -0,13                   | -1,08   | 7,72                  | 0,036  | 154,11     | 154,43 | -0,28    | -0,13   | 4,99   | 0,781* |
| 12/mar      | 79,10          | 78,89               | -0,42                   | -0,14   | 6,37                  | 0,205* | 164,54     | 164,68 | -0,58    | 0,46    | 4,06   | 0,143* |
| 19/mar      | 59,03          | 59,87               | -0,29                   | -0,73   | 13,17                 | 0,181* | 126,84     | 125,96 | 0,90     | 3,26    | 9,12   | 0,012  |
| 26/mar      | 55,77          | 56,44               | -0,39                   | -0,62   | 15,46                 | 0,077* | 122,40     | 122,06 | -0,23    | -0,21   | 9,22   | 0,783* |
| 2/abr       | 49,18          | 49,47               | -0,21                   | -0,74   | 19,02                 | 0,177* | 113,80     | 113,64 | -0,06    | -0,23   | 10,82  | 0,903* |
| 9/abr       | 54,98          | 54,98               | -0,11                   | -0,67   | 12,50                 | 0,478* | 120,32     | 119,57 | -0,06    | 0,52    | 8,28   | 0,807* |
| Aveia-preta |                |                     |                         |         |                       |        |            |        |          |         |        |        |
| 24/mai      | 71,71          | 71,54               | -0,35                   | 0,13    | 8,86                  | 0,778* | 165,12     | 159,86 | 0,56     | -0,04   | 10,43  | 0,132* |
| 1/jun       | 70,31          | 70,30               | -0,25                   | 0,25    | 8,91                  | 0,690* | 159,43     | 154,60 | 0,62     | 0,03    | 10,63  | 0,091* |
| 10/jun      | 68,97          | 69,15               | -0,23                   | -0,01   | 9,30                  | 0,884* | 154,15     | 149,04 | 0,62     | -0,12   | 10,89  | 0,045  |
| 21/jun      | 72,96          | 73,40               | -0,40                   | 0,07    | 8,20                  | 0,736* | 164,81     | 159,97 | 0,68     | 0,15    | 9,94   | 0,035  |
| 1/jul       | 64,29          | 64,88               | -0,54                   | 0,47    | 10,79                 | 0,536* | 154,09     | 150,93 | 0,75     | 0,09    | 10,55  | 0,019  |
| 11/jul      | 59,41          | 60,33               | -0,18                   | -0,29   | 12,14                 | 0,911* | 136,34     | 134,12 | 0,65     | -0,18   | 11,55  | 0,025  |
| 18/jul      | 58,24          | 58,37               | -0,14                   | -0,35   | 13,12                 | 0,833* | 116,68     | 115,89 | 0,50     | -0,26   | 10,52  | 0,177* |
| 27/jul      | 57,85          | 58,16               | -0,22                   | -0,15   | 13,60                 | 0,926* | 110,35     | 110,29 | 0,41     | -0,44   | 9,23   | 0,146* |
| 8/ago       | 57,82          | 58,16               | -0,24                   | -0,11   | 13,64                 | 0,920* | 107,84     | 107,17 | 0,45     | -0,12   | 8,90   | 0,246* |
| 17/ago      | 57,82          | 58,16               | -0,24                   | -0,11   | 13,64                 | 0,920* | 106,72     | 105,94 | 0,43     | -0,10   | 8,80   | 0,327* |

<sup>(1)</sup>Med. = Mediana; <sup>(2)</sup>Assimet. = Assimetria; <sup>(3)</sup>CV: Coeficiente de variação; \*: distribuição normal de acordo com o Teste de normalidade de Shapiro-Wilk (p > 0,05).



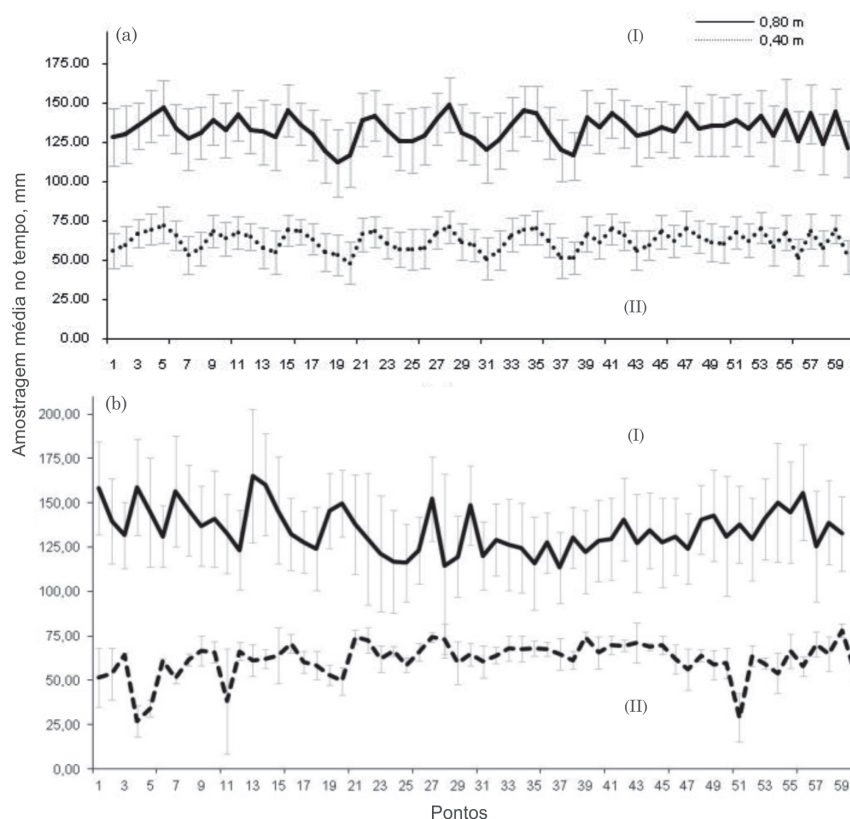
**Figura 2. Média geral da armazenagem de água no solo para as camadas de 0-0,40 e 0-0,80 m, precipitação pluvial (mm) e respectivos desvios-padrão durante o ciclo de desenvolvimento de feijoeiro (a) e aveia-preta (b).**

os fatores que influenciam os fluxos de água no solo nesse período são a declividade, textura, estrutura do solo, teor de matéria orgânica, além do tipo de vegetação (Qiu et al., 2001; Souza, 2001; Sanchez et al., 2009). Ademais, na última chuva do período (69 mm em 10 de junho), escoamento superficial devido às ondulações do terreno (Figura 1) e evaporação do solo são eventos consideráveis, bem como o fato de a aveia-preta estar no início do florescimento, fase de maior consumo hídrico, o que pode ser marcado por maior ascensão capilar (média de 4,5 mm dia<sup>-1</sup> durante o período) do que drenagem interna, levando a atraso no aumento da armazenagem de água.

Para análise do comportamento de todos os pontos amostrados ao longo do tempo, numa escala espacial, estão apresentados na figura 3a,b os valores médios de armazenagem ao longo do ciclo das culturas para as duas camadas estudadas. Quando se comparam as figuras 2 e 3, pode-se assumir que, embora a armazenagem varie no espaço, ela mantém um padrão de comportamento ao longo do tempo, conforme secagem ou recarga do solo. Ainda, ao analisar os desvios-padrão, observa-se que este é menor quando associado com a posição (Figura 2) do que quando comparado espacialmente (Figura 3), o que indica estabilidade temporal (Gonçalves et al., 1999; Rocha et al., 2005).

Comparando os desvios-padrão entre o período de recarga do solo (cultivado com feijão) e o período de secagem (cultivado com aveia-preta), nas figuras 2a,b e 3a,b, nota-se que durante a fase úmida os desvios são menores do que na fase seca, especialmente na camada de 0,0-0,40 m; isso provavelmente deve-se à maior homogeneidade do solo nesta camada em decorrência da aração e gradagem, pois estas promovem maior uniformidade do solo, fazendo com que a maior causa de variação da armazenagem de água seja a distribuição das chuvas associada com a topografia do terreno (Schaffrath et al., 2008).

Nos quadros 2 a 4 encontram-se os coeficientes de correlação de Spearman entre os diferentes dias de avaliação da armazenagem para as duas camadas estudadas, em ambas as culturas. Todos os valores foram altamente significativos (para  $n = 60$ , o valor crítico de  $r_s = 0,331$  a  $p < 0,01$ ), variando de 0,599 a 0,978 para a camada de 0,0-0,40 m e de 0,512 a 0,964 para a de 0,0-0,80 m, o que indica forte estabilidade temporal das posições dos pontos de observação durante o ciclo do feijoeiro. Para a aveia-preta, os valores de  $r_s$  variaram de 0,632 a 1,000 na camada de 0,00-0,40 m e de 0,842 a 0,999 na de 0,0-0,80 m, indicando forte estabilidade temporal das posições dos pontos de observação. Resultados similares foram encontrados por Vachaud et al. (1985), Melo Filho &



**Figura 3. Média da armazenagem de água no solo de todos os pontos amostrados ao longo do tempo durante o ciclo de feijoeiro (a) e aveia-preta (b) para as camadas de 0-0,40 m (I) e 0-0,80 m (II) e respectivos desvios-padrão.**

Libardi (2005), Rocha et al. (2005), Brocca et al. (2009), Souza et al. (2011), Coppola et al. (2011) e Gao & Shao (2012), ao estudarem propriedades hídricas do solo.

Apesar disso, pode-se observar também que os menores valores de correlação ocorrem durante os períodos de secagem do solo, verificando-se o contrário para os períodos de recarga (Figura 2 e Quadros 2 e 3). Esses resultados sugerem que, durante o período em que a armazenagem de água no solo é maior, há forte estabilidade temporal, sendo o oposto para os períodos de secagem durante o cultivo do feijoeiro. Ávila et al. (2011), estudando o padrão espaço-temporal da umidade do solo em diferentes estações do ano, também verificaram maior estabilidade temporal na fase em que há maior teor de água no solo, comparável à da estação seca.

Essa redução da estabilidade temporal durante os períodos de secagem é decorrente da perda de água pela superfície, ou seja, “*runnoff*”, nas ondulações do relevo (Figura 1), da evapotranspiração da cultura e também da drenagem interna durante o período de maior acúmulo pluviométrico. Vale a pena ressaltar que os resultados abrangem um conjunto de dados significativos, ou seja, 14 medidas durante todo o ciclo da cultura do feijoeiro, em 60 pontos, fornecendo um total de 1.680 observações.

Durante o cultivo da aveia-preta, observa-se que, conforme o solo seca devido à falta de precipitação pluvial, a armazenagem de água no solo permanece constante (Figura 3b) em ambas as camadas. A estabilidade temporal da armazenagem de água no solo durante essa fase de cultivo também é alta (Quadros 2 e 3), porém com valores de coeficiente de correlação mais elevados na camada de 0,0-0,80 m, o que é justificado pela maior armazenagem de água nesta camada e pelas condições atmosféricas, que influenciam a diminuição da correlação da armazenagem da água no solo na escala temporal.

Ao caracterizar a estabilidade temporal da armazenagem da água no solo, de acordo com Vachaud et al. (1985), podem-se identificar, no campo, os locais que estimam com segurança seu valor médio em qualquer período. Além disso, os pontos de monitoramento poderão ser feitos com reduzido esforço amostral. Assim, foram obtidos, por meio das diferenças relativas da armazenagem da água no solo

média no tempo,  $\overline{\delta h_{Li}} = \frac{\sum_{j=1}^m \delta h_{Lij}}{m}$  os locais que a superestimam ( $\overline{\delta h_{Li}} > 0$ ) e subestimam ( $\overline{\delta h_{Li}} < 0$ ), independentemente do período de amostragem. Por exemplo, na figura 4a observa-se que o ponto 20 foi



**Quadro 2. Coeficiente de correlação da armazenagem de água no solo para as duas camadas estudadas entre as datas de amostragem durante o ciclo do feijoeiro**

|            |       | Período |        |        |       |        |        |        |       |        |        |        |       |       |  |
|------------|-------|---------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|--|
|            | 7/jan | 13/jan  | 21/jan | 28/jan | 5/fev | 11/fev | 18/fev | 25/fev | 5/mar | 12/mar | 19/mar | 26/mar | 2/abr | 9/abr |  |
| 0,0-0,40 m |       |         |        |        |       |        |        |        |       |        |        |        |       |       |  |
| 7/jan      | 1     |         |        |        |       |        |        |        |       |        |        |        |       |       |  |
| 13/jan     | 0,919 | 1       |        |        |       |        |        |        |       |        |        |        |       |       |  |
| 21/jan     | 0,920 | 0,978   | 1      |        |       |        |        |        |       |        |        |        |       |       |  |
| 28/jan     | 0,792 | 0,821   | 0,832  | 1      |       |        |        |        |       |        |        |        |       |       |  |
| 5/fev      | 0,731 | 0,709   | 0,750  | 0,786  | 1     |        |        |        |       |        |        |        |       |       |  |
| 11/fev     | 0,809 | 0,789   | 0,832  | 0,859  | 0,842 | 1      |        |        |       |        |        |        |       |       |  |
| 18/fev     | 0,917 | 0,923   | 0,922  | 0,793  | 0,707 | 0,792  | 1      |        |       |        |        |        |       |       |  |
| 25/fev     | 0,860 | 0,849   | 0,853  | 0,755  | 0,731 | 0,778  | 0,927  | 1      |       |        |        |        |       |       |  |
| 5/mar      | 0,894 | 0,957   | 0,962  | 0,817  | 0,724 | 0,842  | 0,931  | 0,861  | 1     |        |        |        |       |       |  |
| 12/mar     | 0,798 | 0,866   | 0,869  | 0,722  | 0,599 | 0,745  | 0,847  | 0,772  | 0,874 | 1      |        |        |       |       |  |
| 19/mar     | 0,852 | 0,877   | 0,836  | 0,692  | 0,656 | 0,746  | 0,853  | 0,837  | 0,858 | 0,802  | 1      |        |       |       |  |
| 26/mar     | 0,891 | 0,917   | 0,902  | 0,777  | 0,722 | 0,809  | 0,918  | 0,877  | 0,921 | 0,840  | 0,915  | 1      |       |       |  |
| 2/abr      | 0,883 | 0,893   | 0,868  | 0,728  | 0,701 | 0,759  | 0,882  | 0,864  | 0,871 | 0,780  | 0,925  | 0,939  | 1     |       |  |
| 9/abr      | 0,847 | 0,863   | 0,833  | 0,691  | 0,618 | 0,729  | 0,802  | 0,784  | 0,823 | 0,742  | 0,810  | 0,829  | 0,818 | 1     |  |
| 0,0-0,80 m |       |         |        |        |       |        |        |        |       |        |        |        |       |       |  |
| 07/jan     | 1     |         |        |        |       |        |        |        |       |        |        |        |       |       |  |
| 13/jan     | 0,781 | 1       |        |        |       |        |        |        |       |        |        |        |       |       |  |
| 21/jan     | 0,795 | 0,964   | 1      |        |       |        |        |        |       |        |        |        |       |       |  |
| 28/jan     | 0,754 | 0,816   | 0,862  | 1      |       |        |        |        |       |        |        |        |       |       |  |
| 05/fev     | 0,701 | 0,656   | 0,733  | 0,801  | 1     |        |        |        |       |        |        |        |       |       |  |
| 11/fev     | 0,633 | 0,632   | 0,737  | 0,798  | 0,841 |        |        |        |       |        |        |        |       |       |  |
| 18/fev     | 0,759 | 0,775   | 0,799  | 0,713  | 0,718 | 0,693  | 1      |        |       |        |        |        |       |       |  |
| 25/fev     | 0,787 | 0,785   | 0,811  | 0,715  | 0,742 | 0,683  | 0,939  | 1      |       |        |        |        |       |       |  |
| 05/mar     | 0,726 | 0,909   | 0,920  | 0,821  | 0,714 | 0,776  | 0,778  | 0,766  | 1     |        |        |        |       |       |  |
| 12/mar     | 0,646 | 0,807   | 0,805  | 0,698  | 0,512 | 0,604  | 0,678  | 0,655  | 0,827 | 1      |        |        |       |       |  |
| 19/mar     | 0,794 | 0,861   | 0,881  | 0,763  | 0,695 | 0,687  | 0,694  | 0,759  | 0,838 | 0,752  | 1      |        |       |       |  |
| 26/mar     | 0,782 | 0,862   | 0,880  | 0,787  | 0,706 | 0,721  | 0,757  | 0,788  | 0,880 | 0,792  | 0,903  | 1      |       |       |  |
| 02/abr     | 0,814 | 0,844   | 0,840  | 0,764  | 0,679 | 0,633  | 0,739  | 0,795  | 0,779 | 0,681  | 0,919  | 0,884  | 1     |       |  |
| 09/abr     | 0,735 | 0,778   | 0,739  | 0,648  | 0,530 | 0,538  | 0,589  | 0,658  | 0,667 | 0,586  | 0,754  | 0,731  | 0,811 | 1     |  |

Comparações acima de 0,331 foram significativas ( $p < 0,01$ ).

o que mais subestimou e o ponto 5 que mais superestimou a armazenagem, com valores de 23,6 e 16,6 %, respectivamente. Na figura 4b, isso ocorre para os pontos 19 e 28, com valores de 16,7 e 11,7 %, respectivamente. Na figura 5a, os pontos 4 e 59 foram, respectivamente, os que mais superestimaram e mais subestimaram a armazenagem, com valores de 57,3 e 27,2 %; e na figura 5b, os pontos 19 e 38 foram os que mais superestimaram e mais subestimaram a armazenagem, com valores de 119,6 e 17,3 %, respectivamente. Esses últimos dados, com valores ultrapassando 100 %, obtidos durante o cultivo da aveia-preta, demonstram a grande heterogeneidade espacial da armazenagem de água no solo durante

a época de secagem, concordando com resultados obtidos por Gómez-Plaza et al. (2000).

De acordo com Vachaud et al. (1985), Gonçalves et al. (1999), Rocha et al. (2005) e Souza et al. (2011), o ponto a ser escolhido para futuras observações deve apresentar diferença relativa igual ou muito próxima a zero, associada a um reduzido desvio-padrão. Assim, o ponto 52 pode ser considerado o melhor local de monitoramento da armazenagem de água no solo da área estudada, para ambas as camadas de solo durante a época das chuvas (cultivo do feijoeiro) (= 0,35 e 0,12, respectivamente nas camadas de 0,40 e 0,80 m, e DP = 2,98 e 3,03, respectivamente nas camadas de 0,40 e 0,80 m). Vachaud et al. (1985), Melo Filho & Libardi (2005), Rocha et al. (2005) e

**Quadro 3. Coeficiente de correlação da armazenagem de água no solo para as duas camadas estudadas entre as datas de amostragem durante o ciclo da aveia-preta**

|            | Período |       |        |        |       |        |        |        |       |        |
|------------|---------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|
|            | 24/mai  | 1/jun | 10/jun | 21/jun | 1/jul | 11/jul | 18/jul | 27/jul | 8/ago | 17/ago |
| 0,0-0,40 m |         |       |        |        |       |        |        |        |       |        |
| 24/mai     | 1       |       |        |        |       |        |        |        |       |        |
| 1/jun      | 0,995   | 1     |        |        |       |        |        |        |       |        |
| 10/jun     | 0,950   | 0,972 | 1      |        |       |        |        |        |       |        |
| 21/jun     | 0,991   | 0,988 | 0,955  | 1      |       |        |        |        |       |        |
| 1/jul      | 0,878   | 0,912 | 0,961  | 0,888  | 1     |        |        |        |       |        |
| 11/jul     | 0,708   | 0,752 | 0,846  | 0,715  | 0,917 | 1      |        |        |       |        |
| 18/jul     | 0,646   | 0,690 | 0,792  | 0,650  | 0,857 | 0,986  | 1      |        |       |        |
| 27/jul     | 0,633   | 0,676 | 0,778  | 0,636  | 0,842 | 0,981  | 0,999  | 1      |       |        |
| 8/ago      | 0,632   | 0,674 | 0,777  | 0,635  | 0,840 | 0,980  | 0,999  | 1,000  | 1     |        |
| 17/ago     | 0,632   | 0,674 | 0,777  | 0,635  | 0,840 | 0,980  | 0,999  | 1,000  | 1,000 | 1      |
| 0,0-0,80 m |         |       |        |        |       |        |        |        |       |        |
| 24/mai     | 1       |       |        |        |       |        |        |        |       |        |
| 1/jun      | 0,990   | 1     |        |        |       |        |        |        |       |        |
| 10/jun     | 0,984   | 0,996 | 1      |        |       |        |        |        |       |        |
| 21/jun     | 0,969   | 0,966 | 0,968  | 1      |       |        |        |        |       |        |
| 1/jul      | 0,972   | 0,980 | 0,981  | 0,980  | 1     |        |        |        |       |        |
| 11/jul     | 0,951   | 0,959 | 0,962  | 0,956  | 0,988 | 1      |        |        |       |        |
| 18/jul     | 0,895   | 0,907 | 0,916  | 0,908  | 0,940 | 0,970  | 1      |        |       |        |
| 27/jul     | 0,861   | 0,875 | 0,886  | 0,879  | 0,912 | 0,941  | 0,988  | 1      |       |        |
| 8/ago      | 0,851   | 0,863 | 0,875  | 0,870  | 0,902 | 0,929  | 0,978  | 0,996  | 1     |        |
| 17/ago     | 0,842   | 0,857 | 0,869  | 0,864  | 0,895 | 0,922  | 0,973  | 0,994  | 0,999 | 1      |

Comparações acima de 0,331 foram significativas ( $p < 0,01$ ).

Souza et al. (2011), ao estudarem a estabilidade temporal da umidade do solo, encontraram valores similares de desvios-padrão.

Os resultados obtidos na avaliação realizada durante o cultivo da aveia-preta confirmam o ponto 52 ( $\delta h_{Lif} = 0,22$  e  $DP = 1,53$ ) como o melhor local de monitoramento da área na camada de 0,0-0,80 m (Figura 5b). Na camada de 0,0-0,40 m, o ponto selecionado como o mais representativo da armazenagem de água no solo local foi o 46 (Figura 5a), com  $\delta h_{Lif} = 0,34$  e  $DP = 2,17$ .

Cabe mencionar que esses pontos, 46 e 52, estão localizados a 5 m um do outro dentro da malha experimental e situados na porção de menor cota do relevo, mostrando que essa estabilidade foi claramente devido à posição topográfica desses pontos, com os mais secos localizados na parte mais alta e os mais úmidos, na parte mais baixa.

Isso mostra que a estabilidade temporal tende a se manter ao longo do tempo, ou seja, cada ponto preservou sua diferença relativa com relação à média de armazenagem de água no solo, com os pontos de maior armazenagem sendo sempre os mesmos e os de

menor armazenagem também, o que concorda com Zhou et al. (2007). Gómez-Plaza et al. (2000) também verificaram que a posição topográfica foi o fator principal no controle da estabilidade temporal.

A dependência espacial da variabilidade da armazenagem de água no solo durante o cultivo do feijão e da aveia-preta foi estabelecida usando semivariogramas. No quadro 4 são apresentados os modelos selecionados com os respectivos parâmetros de ajuste, o grau de dependência espacial (GD) e os parâmetros da validação cruzada.

Observa-se que o GD variou de 0,68 a 0,99 na camada de 0,0-0,40 m e de 0,61 a 0,99 na de 0,0-0,80 m durante o cultivo do feijão. Para a época de cultivo da aveia-preta, os menores valores foram de 0,83 e 0,84, respectivamente nas camadas de 0,0-0,40 e 0,0-0,80 m. Assim, segundo Cambardella et al. (1994), foram classificados como forte e moderada dependência espacial. Gonçalves et al. (1999) também encontraram estrutura de dependência espacial para a armazenagem de água no solo.

Os valores do alcance teórico dos modelos obtidos para a época de cultivo do feijão (Quadro 4) estão entre

**Quadro 4. Semivariogramas ajustados para cada leitura de armazenagem de água no solo com os respectivos parâmetros de ajuste**

| Período/<br>Data | Camada de solo |                |      |      |       |       |       |            |                |      |      |        |       |       |
|------------------|----------------|----------------|------|------|-------|-------|-------|------------|----------------|------|------|--------|-------|-------|
|                  | 0,0-0,40 m     |                |      |      |       |       |       | 0,0-0,80 m |                |      |      |        |       |       |
|                  | Modelo         | C <sub>0</sub> | A    | GD   | a     | b     | r     | Modelo     | C <sub>0</sub> | A    | GD   | a      | b     | r     |
| Feijão           |                |                |      |      |       |       |       |            |                |      |      |        |       |       |
| 1-07/01/11       | Esférico       | 4,4            | 17,4 | 0,85 | 1,28  | 0,980 | 0,673 | Esférico   | 7,4            | 24,2 | 0,84 | 11,54  | 0,917 | 0,631 |
| 2-13/01/11       | Esférico       | 7,5            | 16,4 | 0,76 | 4,61  | 0,939 | 0,532 | Exp        | 9,6            | 18,1 | 0,81 | -17,92 | 1,113 | 0,500 |
| 3-21/01/11       | Esférico       | 1,6            | 11,7 | 0,99 | 3,71  | 0,947 | 0,662 | Exp        | 7,3            | 13,3 | 0,86 | 6,73   | 0,953 | 0,372 |
| 4-28/01/11       | Exp            | 21             | 24,3 | 0,68 | 12,8  | 0,766 | 0,361 | Exp        | 12,2           | 18,3 | 0,83 | 41,92  | 0,668 | 0,342 |
| 5-05/02/11       | Esférico       | 24,8           | 21,0 | 0,60 | 1,46  | 0,972 | 0,605 | Exp        | 9,3            | 13,2 | 0,88 | 21,21  | 0,823 | 0,417 |
| 6-11/02/11       | Exp            | 9,1            | 27,0 | 0,81 | -0,09 | 1,00  | 0,609 | Exp        | 9,0            | 13,2 | 0,85 | 14,06  | 0,872 | 0,460 |
| 7-18/02/11       | Esférico       | 13,1           | 16,9 | 0,68 | 9,47  | 0,856 | 0,512 | Esférico   | 38,1           | 21,4 | 0,61 | 13,29  | 0,901 | 0,494 |
| 8-25/02/11       | Esférico       | 1,2            | 13,8 | 0,97 | 9,34  | 0,840 | 0,638 | Exp        | 7,0            | 11,1 | 0,93 | 5,33   | 0,955 | 0,452 |
| 9-05/03/11       | Gauss          | 4,9            | 10,0 | 0,86 | 16,8  | 0,773 | 0,551 | Esférico   | 0,1            | 9,0  | 0,99 | 12,77  | 0,915 | 0,476 |
| 10-12/03/11      | Linear*        | -              | -    | -    | -     | -     | -     | Linear*    | -              | -    | -    | -      | -     | -     |
| 11-19/03/11      | Esférico       | 4,0            | 15,8 | 0,93 | 6,68  | 0,886 | 0,652 | Esférico   | 9,1            | 13,9 | 0,92 | 43,10  | 0,658 | 0,451 |
| 12-26/03/11      | Gauss          | 8,9            | 10,0 | 0,86 | 23,3  | 0,579 | 0,431 | Exp        | 8,3            | 10,2 | 0,92 | 10,55  | 0,910 | 0,350 |
| 13-02/04/11      | Esférico       | 2,1            | 16,4 | 0,73 | 2,91  | 0,939 | 0,612 | Esférico   | 0,1            | 11,3 | 0,99 | 11,58  | 0,896 | 0,517 |
| 14-09/04/11      | Esférico       | 3,1            | 15,7 | 0,93 | 5,13  | 0,904 | 0,651 | Esférico   | 2,6            | 14,7 | 0,95 | 7,65   | 0,935 | 0,657 |
| Aveia-preta      |                |                |      |      |       |       |       |            |                |      |      |        |       |       |
| 1-24/05/11       | Exp            | 4,7            | 17,7 | 0,85 | 3,74  | 0,944 | 0,467 | Esférico   | 10,2           | 16,3 | 0,95 | 23,20  | 0,860 | 0,590 |
| 2-01/06/11       | Exp            | 6,3            | 18   | 0,83 | 5,18  | 0,911 | 0,411 | Esférico   | 19,6           | 16,8 | 0,92 | 29,48  | 0,815 | 0,560 |
| 3-10/06/11       | Exp            | 4,3            | 13,6 | 0,90 | 8,08  | 0,879 | 0,383 | Esférico   | 39,1           | 19,1 | 0,84 | 20,84  | 0,865 | 0,569 |
| 4-21/06/11       | Exp            | 6,7            | 18,9 | 0,83 | 16,75 | 0,767 | 0,383 | Esférico   | 60,5           | 26,6 | 0,77 | 10,18  | 0,938 | 0,584 |
| 5-01/07/11       | Exp            | 6,8            | 12,9 | 0,85 | 27,19 | 0,573 | 0,225 | Esférico   | 78,0           | 25,9 | 0,74 | 2,52   | 0,984 | 0,607 |
| 6-11/07/11       | Linear*        | -              | -    | -    | -     | -     | -     | Esférico   | 11,7           | 16,2 | 0,94 | 27,14  | 0,802 | 0,566 |
| 7-18/07/11       | Linear*        | -              | -    | -    | -     | -     | -     | Esférico   | 6,6            | 20,6 | 0,95 | 35,10  | 0,699 | 0,548 |
| 8-27/07/11       | Linear*        | -              | -    | -    | -     | -     | -     | Esférico   | 3,6            | 20,0 | 0,96 | 27,68  | 0,749 | 0,588 |
| 9-08/08/11       | Linear*        | -              | -    | -    | -     | -     | -     | Esférico   | 2,6            | 19,0 | 0,97 | 25,57  | 0,763 | 0,601 |
| 10-17/08/11      | Linear*        | -              | -    | -    | -     | -     | -     | Esférico   | 0,1            | 20,6 | 0,99 | 11,42  | 0,894 | 0,744 |

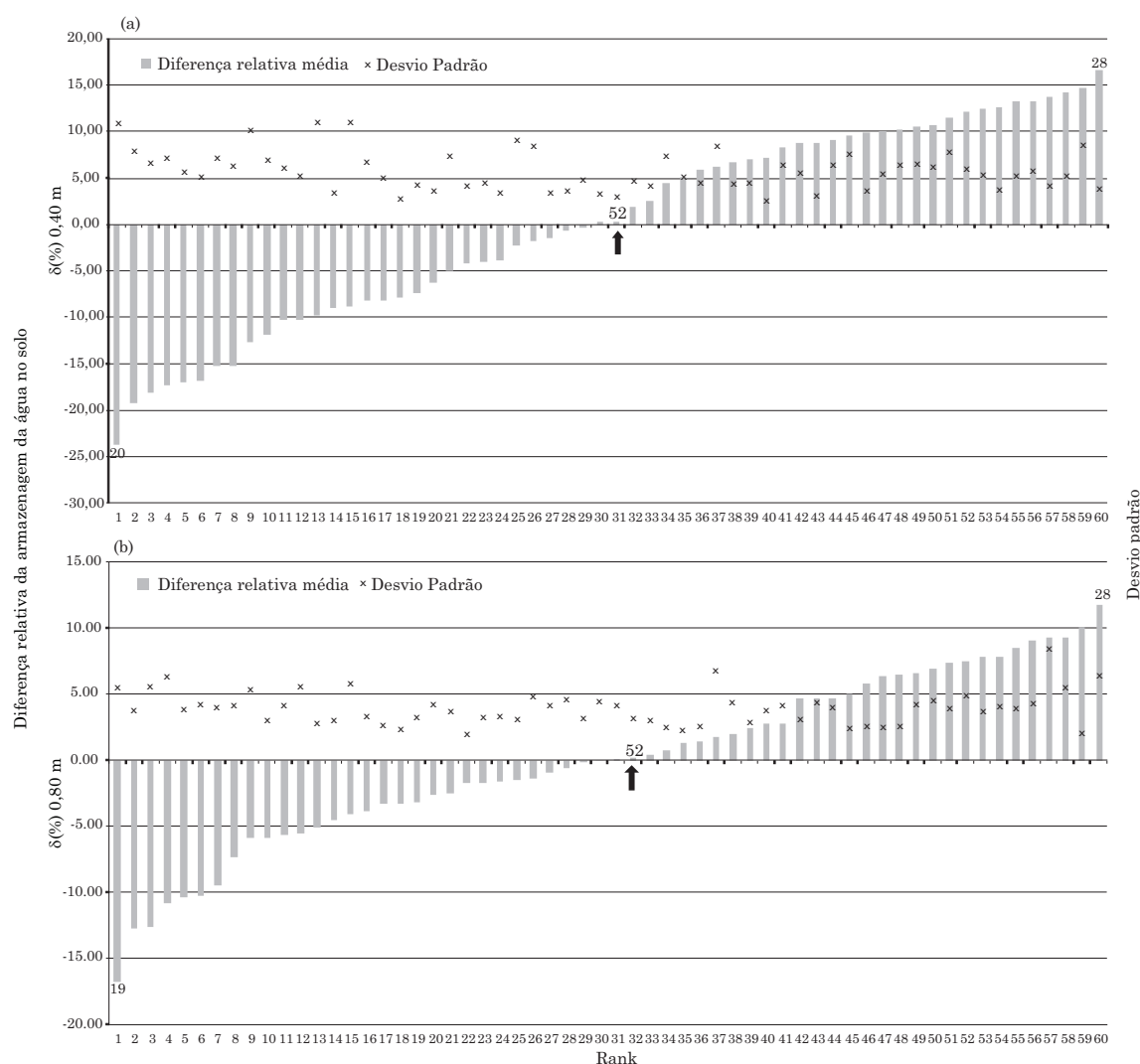
C<sub>0</sub>: efeito pepita; A: alcance; GD: grau de dependência espacial; Parâmetros da validação cruzada: a = coeficiente linear, b = coeficiente angular e r = coeficiente de correlação. Exp: Exponencial. \* Efeito pepita puro.

10,0 e 27,0 m e 9,0 e 24,2 m, respectivamente para as profundidades de 0,40 e 0,80 m. Para a época de cultivo da aveia-preta, os valores do alcance teórico ficaram entre 12,9 e 18,9 m e 16,3 e 26,6 m para as camadas de 0,0-0,40 e 0,0-0,80 m, respectivamente. Percebe-se que para a época de cultivo do feijão, época de recarga de água no solo, houve tendência de maiores valores do alcance na camada de 0,0-0,40 m.

Quanto à época de cultivo da aveia-preta, época de secagem de água no solo, ocorreu o contrário, ou seja, na camada de 0,0-0,80 m o alcance teórico foi maior. Essa situação confirma que durante os períodos em que há maior teor de água no solo o monitoramento é mais adequado. A armazenagem de água no solo na camada de 0,0-0,40 m foi menor especialmente no período 5, devido ao déficit

pluviométrico e à evapotranspiração da cultura que iniciava a fase de florescimento (Figura 2b). Nos períodos 6 a 10, na camada de 0,0-0,40 m não foi possível identificar a estrutura da variância. Nesse caso, diz-se que os semivariogramas apresentaram efeito pepita puro, o que significa que a distribuição é completamente ao acaso e há independência entre amostras. Possivelmente, nesses períodos, a dependência espacial ocorre em uma distância menor do que a distância entre os pontos de amostragem utilizada (Vieira, 2000).

Com respeito à validação cruzada, teste realizado para verificar a confiabilidade do semivariograma, observa-se que os valores do coeficiente de correlação (r) variaram de 0,361 a 0,673 na camada de 0,0-0,40 m e de 0,342 a 0,657 na camada de 0,0-0,80 m durante o cultivo do feijão. Durante o cultivo da aveia-preta,



**Figura 4.** Diferença relativa média no tempo para a armazenagem de água no solo a 0,40 m (a) e 0,80 m (b) e respectivo desvio-padrão no tempo obtido durante o ciclo do feijoeiro. Números referem-se aos pontos de medida.

os valores variaram de 0,225 a 0,467 e de 0,548 a 0,744, respectivamente nas camadas de 0,0-0,40 e 0,0-0,80 m. De forma geral, os coeficientes lineares foram altos (diferentes de zero) e os angulares satisfatórios (próximos de 1). Assim, buscou-se uma melhor combinação de valores dos parâmetros da validação cruzada para se proceder à escolha do melhor semivariograma para cada camada de solo e cultura.

Os mapas de krigagem da armazenagem de água no solo durante o ciclo de desenvolvimento do feijoeiro, para ambas as camadas, estão na figura 6a,b. Pode-se observar padrão de variabilidade espacial muito semelhante em ambas as camadas, com armazenagens maiores do lado esquerdo para o direito, faixa de maior inclinação e depressões do terreno, cabendo ressaltar que os valores de armazenagem foram menores na camada de 0,0-0,40 m, como era de se esperar, devido à maior

concentração radicular do feijoeiro nesta camada, bem como devido ao escoamento superficial.

A demanda sazonal de água pelas plantas, bem como a evaporação do solo na época de sua secagem, alterou o modelo de distribuição da armazenagem nas camadas estudadas (Figura 7a,b). Observa-se que os valores da armazenagem de água continuam maiores na camada de 0,0-0,80 m durante o cultivo da aveia-preta, como no período de cultivo do feijão, porém a faixa com valores mínimos distribui-se por grande parte do terreno; na parte mais alta do relevo, os valores de armazenagem foram maiores na camada de 0,0-0,80 m e, na de 0,0-0,40 m, a maior armazenagem de água ficou concentrada na região central, caracterizada por depressões. Esse comportamento deve-se ao fato de o período ser caracterizado por ausência de precipitações; assim, a tendência do movimento da água é ascendente, como já mencionado, em razão de o solo secar primeiro nas camadas de solo superiores.

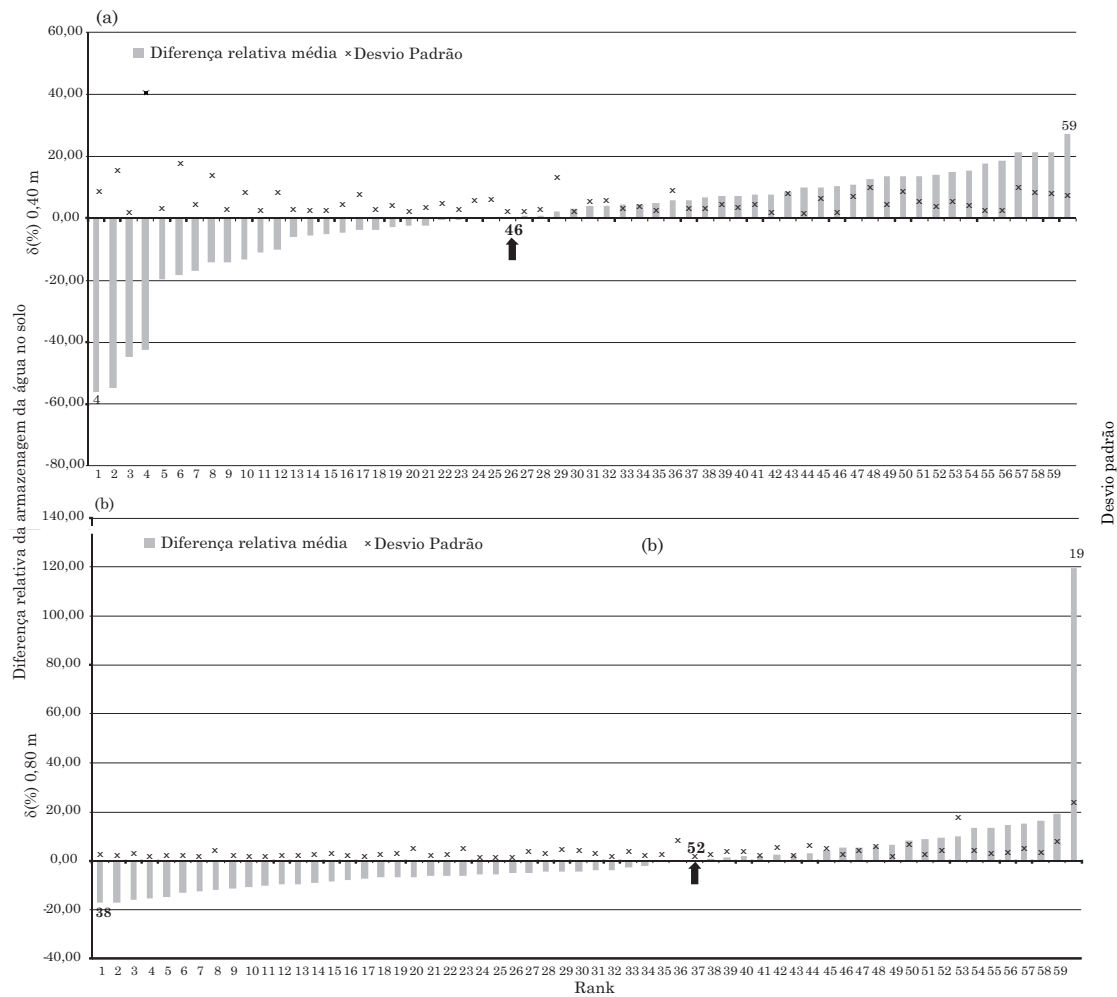


Figura 5. Diferença relativa média no tempo para a armazenagem de água no solo a 0,40 (a) e 0,80 m (b) e respectivo desvio-padrão no tempo obtido durante o ciclo da aveia-preta. Números referem-se aos pontos de medida.

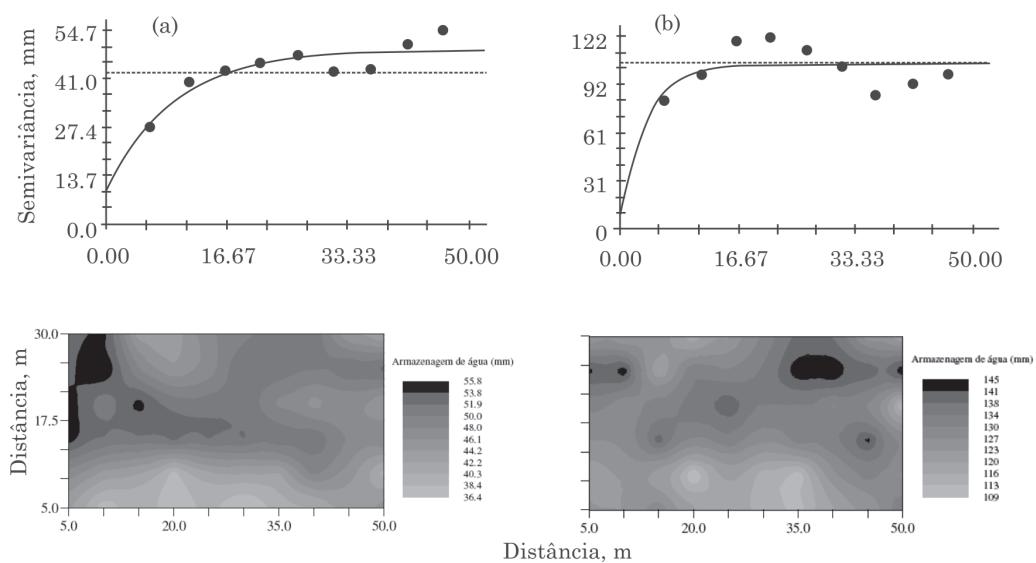
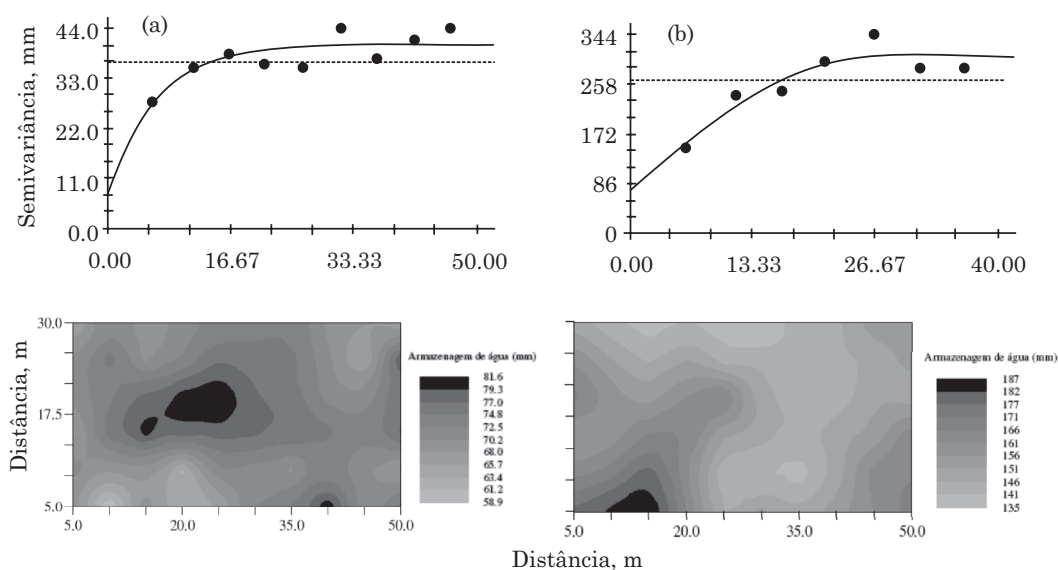


Figura 6. Semivariograma e mapa da armazenagem de água no solo nas camadas de 0,0-0,40 m (a) e 0,0-0,80 m (b) durante o ciclo do feijoeiro. Semivariogramas escolhidos de acordo com os parâmetros da validação cruzada. Períodos 6 e 8 para as camadas de 0,0-0,40 e 0,0-0,80 m, respectivamente.





**Figura 7. Semivariograma e mapa da armazenagem de água no solo nas camadas de 0-0,40 m (a) e 0-0,80 m (b) durante o ciclo da aveia-preta. Semivariogramas escolhidos de acordo com os parâmetros da validação cruzada. Períodos 4 e 5 para as camadas de 0,0-0,40 e 0,0-0,80 m, respectivamente.**

## CONCLUSÕES

1. Os valores da armazenagem de água no solo na época de recarga (cultivo do feijão) variou de 47 a 79,10 mm e de 111,83 a 164,68 mm, respectivamente nas camadas de 0,0-0,40 m e 0,0-0,80 m. Na época de secagem do solo (cultivo da aveia-preta), variou de 57,82 a 71,71 mm e de 106,72 a 159,86 mm, respectivamente nas camadas de 0,0-0,40 e 0,0-0,80 m.

2. Houve maior estabilidade temporal na fase de maior armazenagem de água no solo. O ponto 52 foi identificado como representativo da média da armazenagem de água no solo local em ambas as camadas de avaliação, tanto na época de recarga de água no solo como na de secagem, com exceção da camada de 0,40 m, que indicou o ponto 46 na fase de secagem do solo.

3. A dependência espacial da variabilidade da armazenagem de água no solo foi detectada em ambas as camadas de solo, porém com maior alcance na camada de 0,40 m quando houve ocorrência de precipitação pluvial. Quando as chuvas cessaram, o alcance foi maior na camada de 0,80 m.

4. Durante o período chuvoso, o padrão de variabilidade espacial foi muito semelhante em ambas as camadas de solo, com armazenagens maiores na faixa de maior inclinação e depressões do terreno.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de Pós-

doutorado Júnior à primeira autora (Processo 510597/2010-6). Agradecimentos especiais ao mestrando do Depto de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP, Ismael Meurer, e ao Prof. Dr. Morel de Passos e Carvalho, do Depto. de Fitotecnia, Eng. Rural e Solos, da FEIS/UNESP, pelas preciosas dicas na utilização do Programa GS+.

## LITERATURA CITADA

- ÁVILLA, L.F.; MELLO, C.R.; MELLO, J.M. & SILVA, A.M. Padrão espaço-temporal da umidade volumétrica do solo em uma bacia hidrográfica com predominância de Latossolos. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:1801-1810, 2011.
- BRITO, A.S. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da permeabilidade ao ar em função dos conteúdos de água e ar no solo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010. 143p. (Tese de Doutorado)
- BROCCA, L.; MELONE, F.; MORAMARCO, T. & MORBIDELLI, R. Soil moisture temporal stability over experimental areas in Central Italy. *Geoderma*, 148:364-374, 2009.
- CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F. & KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1501-1511, 1994.
- COPPOLA, A.; COMEGNA, A.; DRAGONETTI, G.; LAMADDALENA, N.; KADER, A.M. & COMEGNA, V. Average moisture saturation effects on temporal stability of soil water spatial distribution at field scale. *Soil Tillage Res.*, 114:155-164, 2011.

- CRUZ, A.C.R.; LIBARDI, P.L.; CARVALHO, L.A. & ROCHA, G.C. Balanço de água no volume de solo explorado pelo sistema radicular de uma planta de citros. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:1-10, 2005.
- GAMMA DESIGN SOFTWARE. *Geostatistics for environmental sciences*. 7.ed. Michigan, Plainwell, Gamma Desing Software, 2004. 159p.
- GAO, L. & SHAO, M. Temporal stability of soil water storage in diverse soil layers. *Catena*, 95:24-32, 2012.
- GÓMEZ-PLAZA, A.; ALVAREZ-ROGEL, J.; ALBALADEJO, J. & CASTILLO, V.M. Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi-arid environment. *Hidrol. Process*, 14:1261-1277, 2000.
- GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V. & SILVA, A.P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô-central. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:155-164, 1999.
- IBRAHIM, H.M. & HUGGINS, D.R. Spatio-temporal patterns of soil water storage under dryland agriculture at the watershed scale. *J. Hydrol.*, 404:186-197, 2011.
- MARTINEZ-FERNANDEZ, J. & CEBALLOS, A. Mean soil moisture estimation using temporal stability analysis. *J. Hydrol.*, 312:28-38, 2005.
- MELO FILHO, J.F. & LIBARDI, P.L. Estabilidade temporal de medidas do teor e do potencial mátrico da água no solo em uma transecção. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:497-506, 2005.
- PACHEPSKY, Y.A.; GUBER, A.K. & JACQUES, D. Temporal persistence in vertical distributions of soil moisture contents. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69:347-352, 2005.
- QIU, Y.; FU, B.; WANG, J. & CHEN, L. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China. *J. Hydrol.*, 240:243-263, 2001.
- RAIJ, B.van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).
- ROCHA, G.C.; LIBARDI, P.L.; CARVALHO, L.A. & CRUZ, A.C.R. Estabilidade temporal da distribuição espacial da armazenagem de água em um solo cultivado com citros. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:41-50, 2005.
- SCHAFFRATH, V.H.; TORMENA, C.A.; FIDALSHI, J. & GONÇALVES, A.C.A. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas do solo sob plantio direto e preparo convencional. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1369-1377, 2008.
- SANCHEZ, R.B.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, G.T. & MARTINS FILHO, M.V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. *Bragantia*, 68:1095-1103, 2009.
- SOUZA, C.K. *Relação solo-paisagem-erosão e variabilidade espacial de Latossolos em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar no município de Jaboticabal (SP)*. Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista, 2001. 186p. (Tese de Mestrado)
- SOUZA, E.R.; MONTENEGRO, A.A.A.; MONTENEGRO, S.M.G. & MATOS, J.A. Temporal stability of soil moisture in irrigated carrot crops in Northeast Brazil. *Agric. Water Manag.*, 99:26-32, 2011.
- VACHAUD, G.; PASSERAT DE SILANS, A.; BALABANIS, P. & VAUCLIN, M. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:822-827, 1985.
- VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG; Sociedade Brasileira da Ciência do Solo, 2000. v.1. p.1-54.
- 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. p.319-344.
- ZHOU, X.; LIN, H. & ZHU, Q. Temporal stability of soil moisture spatial variability at two scales and its implication for optimal field monitoring. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Disc.*, 4:1185-1214, 2007.