

Variabilidade Espacial do Conteúdo de Água no Solo numa Pequena Bacia Rural: 1. Análise dos Fatores Ambientais

Joana Darc F. Medeiros

Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte - EMPARN
joana-emparn@rn.gov.br

Joel A. Goldenfum, Robin T. Clarke

Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS
joel@iph.ufrgs.br, clarke@iph.ufrgs.br

Recebido: 10/10/04 – revisado: 09/06/05 – aceito: 24/01/07

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental realizado na bacia hidrográfica do arroio Donato (1,1 km²), localizada na região central do derrame basáltico sul-riograndense, com o objetivo de avaliar se a variabilidade espaço-temporal do conteúdo de água no solo pode ser explicada a partir de fatores ambientais, tais como topografia e solo. Para isto foi analisado um conjunto de mais de 2000 medições de conteúdo de água no solo, coletadas numa malha regular em toda a bacia, nas profundidades de 0cm (superfície), 30 cm e 60 cm, e em dois perfis com comprimentos de 280 m (Perfil P1) e 320 m (Perfil P3). As medições do conteúdo de água no solo foram realizadas pelo método gravimétrico, na camada superficial, e com TDR, nas camadas inferiores. A análise de correlação mostrou que os atributos topográficos com maior correlação com o conteúdo de água no solo foram: área de contribuição, aspecto e curvatura no perfil, na superfície; e declividade, área de contribuição e aspecto, a 30 cm de profundidade. Os dados dos perfis P1 e P3 mostraram correlação muito fraca com praticamente todos os atributos topográficos testados neste trabalho. Com relação aos índices de conteúdo de água, observou-se que os mesmos apresentam boa correlação com os dados da malha regular, principalmente com os obtidos a 30 cm de profundidade. Nos conjuntos de dados obtidos somente numa vertente (perfis P1 e P3) os índices de conteúdo de água não apresentaram bom desempenho.

Palavras-chave: variabilidade espacial; conteúdo de água no solo; pequenas bacias; análise de correlação; atributos topográficos.

INTRODUÇÃO

O conteúdo de água no solo tem grande influência em diversos processos hidrológicos: afeta a partição da precipitação em infiltração e escoamento superficial; está diretamente relacionado com a disponibilidade de água para as plantas, controlando a evapotranspiração; influi nos processos de erosão e carreamento de solutos, uma vez que determina o padrão de vazões. Portanto, o conhecimento e a análise, no tempo e no espaço, do conteúdo de água no solo torna-se cada vez mais necessário para entender melhor os processos hidrológicos, ecológicos e biogeoquímicos na bacia hidrológica.

Vários fatores influem na variabilidade do conteúdo de água no solo: topografia, propriedades

do solo, tipo e densidade da vegetação, conteúdo de água médio, profundidade do lençol freático, precipitação, radiação solar e outros fatores meteorológicos. Reynolds (1970c) classificou os fatores que afetam o conteúdo de água no solo em estáticos e dinâmicos. Os fatores estáticos incluem o grau de homogeneidade do solo, incorporando a textura, estrutura, conteúdo de matéria orgânica, e os fatores topográficos tais como declividade, elevação e aspecto. Os fatores dinâmicos incluem a quantidade e variabilidade da precipitação e da insolação, tempo desde o último evento, profundidade do lençol freático, e quantidade e tipo da vegetação.

Estudos sobre a variabilidade do conteúdo de água no solo vêm sendo realizados desde os anos 50, quando tensiômetros e sondas de neutrons se tornaram disponíveis para medições rápidas e não destrutivas da tensão e do conteúdo de água no solo.

Nos anos 70, com o fácil acesso às facilidades computacionais e aplicações de técnicas de análise geoestatísticas, houve um significativo acréscimo na pesquisa da variabilidade do conteúdo de água no solo. Nos últimos anos, a utilização de novas técnicas para medição do conteúdo de água no solo, como a reflectometria no domínio do tempo (TDR), associada com novas técnicas de análise tem feito com que os estudos sobre a variabilidade espacial do conteúdo de água no solo sejam mais amplos e detalhados.

A questão da variabilidade espacial do conteúdo de água no solo pode ser abordada de diversas formas. Um das linhas de pensamento se baseia na hipótese que a variabilidade é essencialmente organizada e que somente um ou poucos fatores do ambiente (geralmente topográficos e características do solo) controlam a distribuição da água no solo. Diversos autores (Anderson e Burt, 1978; Burt e Burtcher, 1985; Greminger et al., 1985; Loague, 1992; Barling et al., 1994; Crave e Gascuel-Oudou, 1997; Grayson et al., 1997; Famiglietti et al., 1998; Western et al., 1999; Wendroth et al., 1999; Gómez-Plaza et al., 2000; Gómez-Plaza et al., 2001; Hupert e Vanclooster, 2002) têm trabalhado nesta linha de pensamento. Na maioria dos trabalhos o conteúdo de água no solo apresenta estrutura espacial e os fatores do ambiente (principalmente a topografia e características do solo) são responsáveis por grande parte da variabilidade (Famiglietti et al., 1998; Western et al., 1999; Wendroth et al., 1999). Outros, no entanto, identificaram padrões espaciais aleatórios, com baixos coeficientes de correlação com fatores do ambiente (Loague, 1992 e Hupert e Vanclooster, 2002). Pode-se concluir, à luz da diversidade dos resultados prévios, que o conteúdo de água no solo é influenciado por diferentes fatores em diferentes ambientes. Vale salientar ainda que são raros os trabalhos desenvolvidos no Brasil (Libardi et al., 1986; Libardi et al., 1996; Gonçalves et al., 1999; Melo Filho, 2002 e Souza et al., 2002), nos quais os condicionantes hidrológicos e de pedogênese são diferenciados dos de outras regiões do mundo.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar se a variabilidade espaço-temporal do conteúdo de água no solo pode ser explicada a partir de fatores ambientais, dando ênfase aos fatores topográficos e de solo. Este trabalho é o primeiro de uma seqüência de três trabalhos desenvolvidos com base nesta bacia. Os outros dois trabalhos refere-se a avaliação da variabilidade espacial do conteúdo de água no solo utilizando técnicas geoestatísticas e o terceiro se concentra em avaliar a estabilidade temporal no padrão espacial do conteúdo de água no solo.

MATERIAL E MÉTODO

O estudo foi realizado na bacia do arroio Donato, com área de 1,10 km², localizada no noroeste do estado do Rio Grande do Sul, na região do derrame basáltico. As precipitações médias anuais ficam em torno dos 1.826 mm, bem distribuídas entre os meses, não sendo possível identificar período de estiagem. A temperatura média do ar varia de 14°C, em maio a 24°C em janeiro, não sendo rara a ocorrência de temperaturas extremas inferiores a 0°C, no inverno, e superiores a 35°C, no verão. A evapotranspiração potencial média se situa entre 2,3 mm.dia⁻¹ em junho a 4,2 mm.dia⁻¹ em dezembro, com um total anual em torno dos 1.200mm.

Os solos do tipo *Latossolos* (EMBRAPA, 1999) são predominantes na bacia. Estes solos são bem drenados, profundos, apresentando no perfil uma seqüência de horizontes A-Bw-C, onde o horizonte Bw é do tipo B latossólico. Nesta região os processos pedogenéticos são acelerados em função das características climáticas, fazendo com que os solos sejam bem desenvolvidos com predomínio de óxido de ferro, expressivo conteúdo de argila, o qual supera em média os 60% (Castro, 1996) e baixa capacidade de troca catiônica. Estes solos são de grande importância em nível nacional, devido à intensa exploração agrícola (Streck et al., 2002). As principais culturas exploradas na bacia são o trigo e aveia, no outono/inverno e a soja e milho na primavera/verão.

A bacia do rio Potiribu, na qual a bacia do arroio Donato encontra-se inserida, tem sido objeto de estudo de diversos trabalhos realizados no Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS, entre eles pode-se citar Mediondo (1995), Beltrame et al. (1980 e 1981) e Taylor et al. (1981).

O conteúdo de água no solo foi monitorado na bacia do arroio Donato, numa malha regular de 200 m, com detalhamento em três perfis (P1, P2 e P3) (**Figura 1**). Numa primeira etapa, o monitoramento nos perfis P1 e P2 se deu a cada 70 m e no perfil P3 a cada 50 m. Numa etapa posterior, após análise preliminar dos dados e constatação de variabilidade em escalas inferiores ao espaçamento das amostras, as medições nos perfis P1 e P3 passaram a ser realizadas a cada 10 m (**Figura 2**). Dois fatores contribuíram na escolha dos perfis: (i) a posição topográfica, selecionada de forma a englobar uma vertente, desde a crista até o ponto mais baixo; e (ii) a autorização do proprietário.

Nos pontos de monitoramento da malha regular foram instaladas sondas de TDR a 30 cm de

profundidade. As sondas utilizadas foram do tipo Buriabile modelo 6005L da Soil Moisture Equipment Corp. EUA e foram instaladas na posição horizontal em junho de 2002. Na superfície e nos perfis P1 e P3 o monitoramento do conteúdo de água no solo se deu através do método gravimétrico (Figura 3).

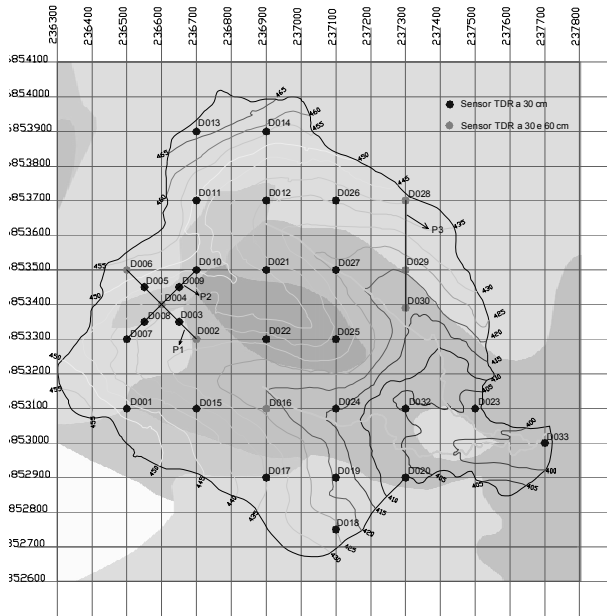


Figura 1 - Localização dos pontos de monitoramento da umidade do solo.

Estas campanhas tiveram duração variada em função do regime de umidade do solo e da disponibilidade dos equipamentos. A Tabela 1 mostra os dias de campanha de medição de conteúdo de água, o número total de amostras em cada campanha e a precipitação acumulada nos 10 dias prévios a coleta.

Nos locais de monitoramento foram retiradas amostras de solo deformadas a 0 e 30 cm de profundidade, para determinação da granulometria (areia, silte e argila) e amostras indeformadas (0 e 30 cm) para determinação da densidade do solo.

As medições do conteúdo de água no solo foram realizadas através de campanhas mensais no período de junho de 2002 a junho de 2003, cobrindo desde o plantio do trigo/aveia de inverno a colheita da soja no verão.

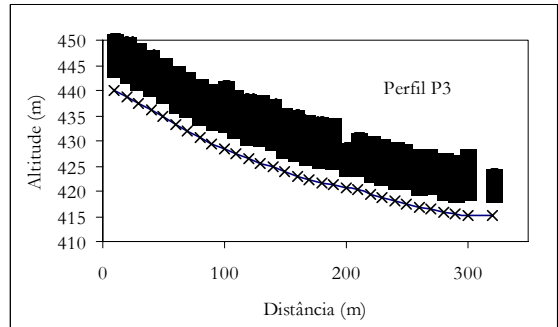
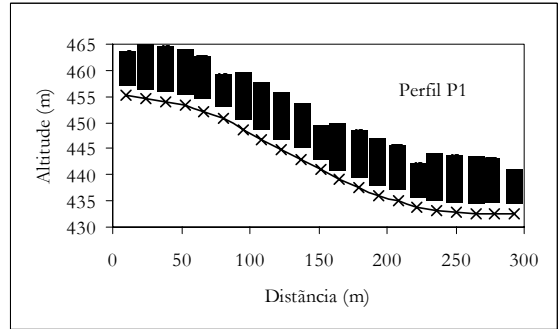


Figura 2 - Seção transversal dos perfis P1 e P3.

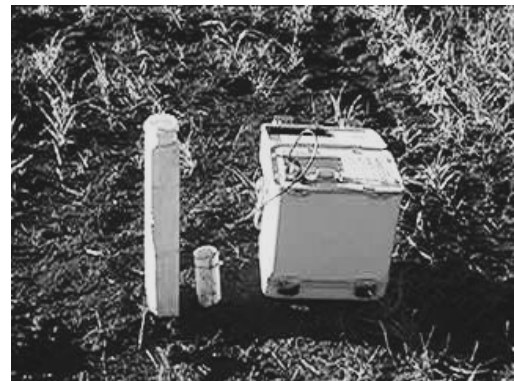


Figura 3 - Medição da umidade com TDR e retirada de amostra superficial.

Tabela 1 - Épocas de medição do conteúdo de água no solo, nº de amostra e precipitação nos dez dias antecedentes.

Data das Medições	Nº Amostras				Precipitação antecedente * (mm)
	Sup	30	P1	P3	
21/06/2002	32	30			32,3
09, 10 e 11/07/2002	32	30			45,8
13, 14 e 15/08/2002	37	30			32,3
20/09/2002	38	30			186,4
16 /10/2002		30			85,9
29/10/2002	37	30			92,1
12/11/2002	29	30			68,3
14, 15 e 16/12/2002	31	30			76,4
03 e 05/02/2003	37	30		32	2,3
19 e 20/02/2003	36	30	21	32	66,3
01, 04 e 07/04/2003	37	30	21	32	2,4
13/05/2003	32	30	21	32	0
09/06/2003	32	30	21	32	-

* precipitação nos dez dias antecedentes a data de medição.

Tabela 2 - Fatores topográficos e características do solo.

Fator	Descrição	
Fatores Topográficos	ALT	Altitude (m)
	DECLI	Declividade (cm/m)
	AREA	Área de contribuição (número de células)
	C_ASP	Classificação do aspecto
	CPER	Curvatura do perfil (m ⁻¹)
	CPLA	Curvatura do plano (m ⁻¹)
	CLAS	Classificação do terreno em função da curvatura no plano e no perfil
Conteúdo de água	IND1	Índice de conteúdo de água proposto por Beven e Kirkby (1979)
	IND2	Índice de conteúdo de água Gómez-Plaza et al (2001) para áreas com vegetação
	IND3	Índice de conteúdo de água Gómez-Plaza et al (2001) para áreas sem vegetação
Solo	ARG	Percentagem de argila no solo (%)
	AREIA	Percentagem de areia no solo (%)

Os fatores topográficos e índices de conteúdo de água mais comumente usados em hidrologia (Tabela 2), foram obtidos a partir do modelo numérico do terreno, com resolução de 5 m, utilizando-se um conjunto de algoritmos adaptados de Collichonn et al (1998). Para simplificar a aplicação do aspecto, cada célula foi classificada segundo uma modificação do código numérico de Gómez-Plaza et al. (2001), apresentada na Figura 4. Do ponto de vista da curvatura no perfil e no plano, as células da bacia foram classificadas em nove categorias, conforme a Figura 5.

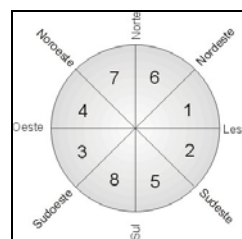


Figura 4 - Código numérico de classificação do aspecto.

A influência dos atributos topográficos e das características do solo no padrão espacial do conteúdo de água no solo foi investigada através de análise de correlação. Foram considerados os fatores listados na Tabela 2 e os quatro conjuntos de dados de conteúdo de água no solo – malha regular na superfície, malha regular a 30 cm de profundidade, perfil P1 e perfil P3.

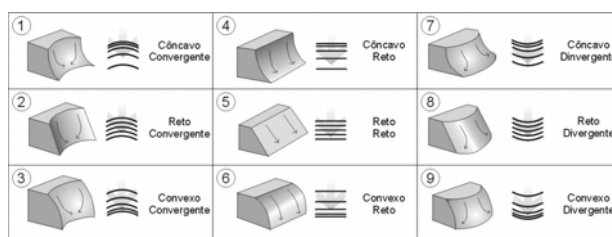


Figura 5 - Classificação do terreno de acordo com a curvatura no perfil e no plano.

RESULTADOS

Os valores médios do conteúdo de água no solo nas três profundidades estudadas e nos perfis P1 e P3, em cada uma das diferentes campanhas de medição são mostrados na Figura 6. A média e a

variância foram obtidas com base no número total de amostras por profundidade em cada campanha (Tabela 1). Observa-se que, na superfície, o conteúdo de água no solo sofre variações em função das estações do ano, com altos valores no período de inverno (jul/ago) e valores inferiores no período de verão (dez/jan). Esta tendência, no entanto, não é acompanhada pelo conteúdo de água médio das camadas inferiores (30 e 60 cm), que permanecem com valores próximos a $0,39 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ durante todo o período de amostragem.

É interessante observar que a variação do conteúdo de água na superfície do solo não se deve às precipitações, que de maneira geral não apresentam flutuações em função das estações do ano. As variações no conteúdo de água podem ser atribuídas principalmente às variações de temperatura e, conseqüentemente, de evapotranspiração das culturas, que no verão é bem maior, fazendo com que o conteúdo de água na camada superficial do solo seja menor.

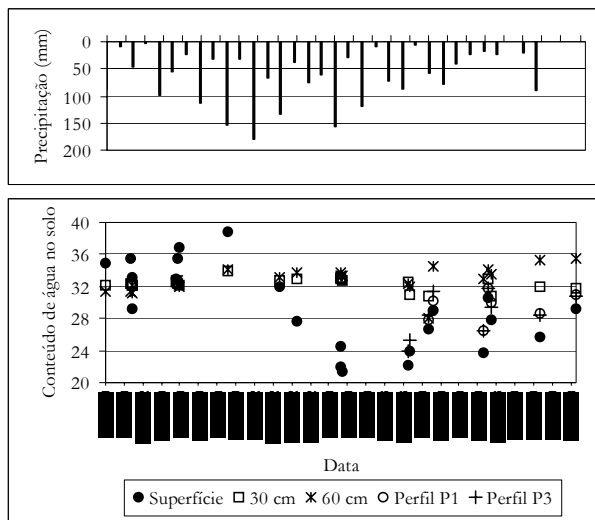


Figura 6 - Conteúdo de água no solo médio (% peso) nas três profundidades estudadas e precipitação.

A variância do conteúdo de água na superfície do solo mostra uma clara transição entre as campanhas de 2002 e as campanhas de 2003 (Figura 7), com valores superiores nas campanhas anteriores ao dia 16/12/02 e inferiores nas campanhas posteriores. Isto ocorreu devido à mudança na espessura da camada de solo amostrada, que passou de 5 para 15 cm. Não foi possível identificar uma relação clara entre a variância e o conteúdo médio de água no solo na superfície. Na profundidade de 30 cm, existe uma leve tendência de aumento da variância com o

aumento do conteúdo médio de água no solo. Comportamento semelhante foi observado por Hawley et al. (1983), Hendrickx et al. (1990), Henninger et al (1976), Famiglietti et al (1998), Robinson e Dean (1993) e Wendroth et al. (1999).

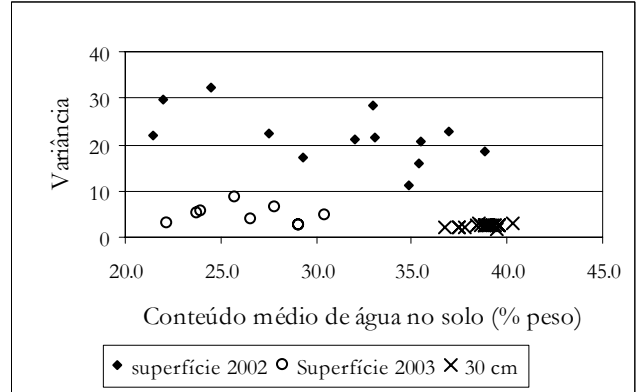


Figura 7 - Variância em função do conteúdo médio de água no solo na superfície (nos dois anos estudados) e a 30 cm de profundidade.

Correlação com os fatores topográficos

As séries temporais dos coeficientes de correlação entre o conteúdo de água no solo e os atributos topográficos nos quatro conjuntos de dados analisados (malha regular na superfície, malha regular a 30 cm de profundidade, perfil P1 e perfil P3) são mostrados na Figura 8.

De modo geral pode-se dizer que os coeficientes de correlação na superfície (malha regular e perfil P1 e P3) apresentam grande variação de valores, mostrando inclusive flutuação entre correlações positivas e negativas para alguns fatores ambientais. Na profundidade de 30 cm, os coeficientes de correlação passam a apresentar uma maior constância no tempo. Isto pode estar associado à pouca flutuação do conteúdo de água no solo durante todo o período de desenvolvimento do trabalho. A altitude apresenta correlação positiva com o conteúdo de água no solo na superfície, indicando que as regiões mais altas da bacia são mais úmidas que as regiões baixas. Estes resultados são contrários ao observado por grande número de pesquisadores (Hawley et al., 1983; Robinson e Dean, 1993; Nyberg, 1996; Famiglietti et al., 1998; Beldring et al., 1999 e Gómez-Plaza et al., 2000). Nestes trabalhos a posição topográfica ou altitude determinam claramente o padrão espacial da distribuição de água no solo, com pontos altos sendo geralmente os mais

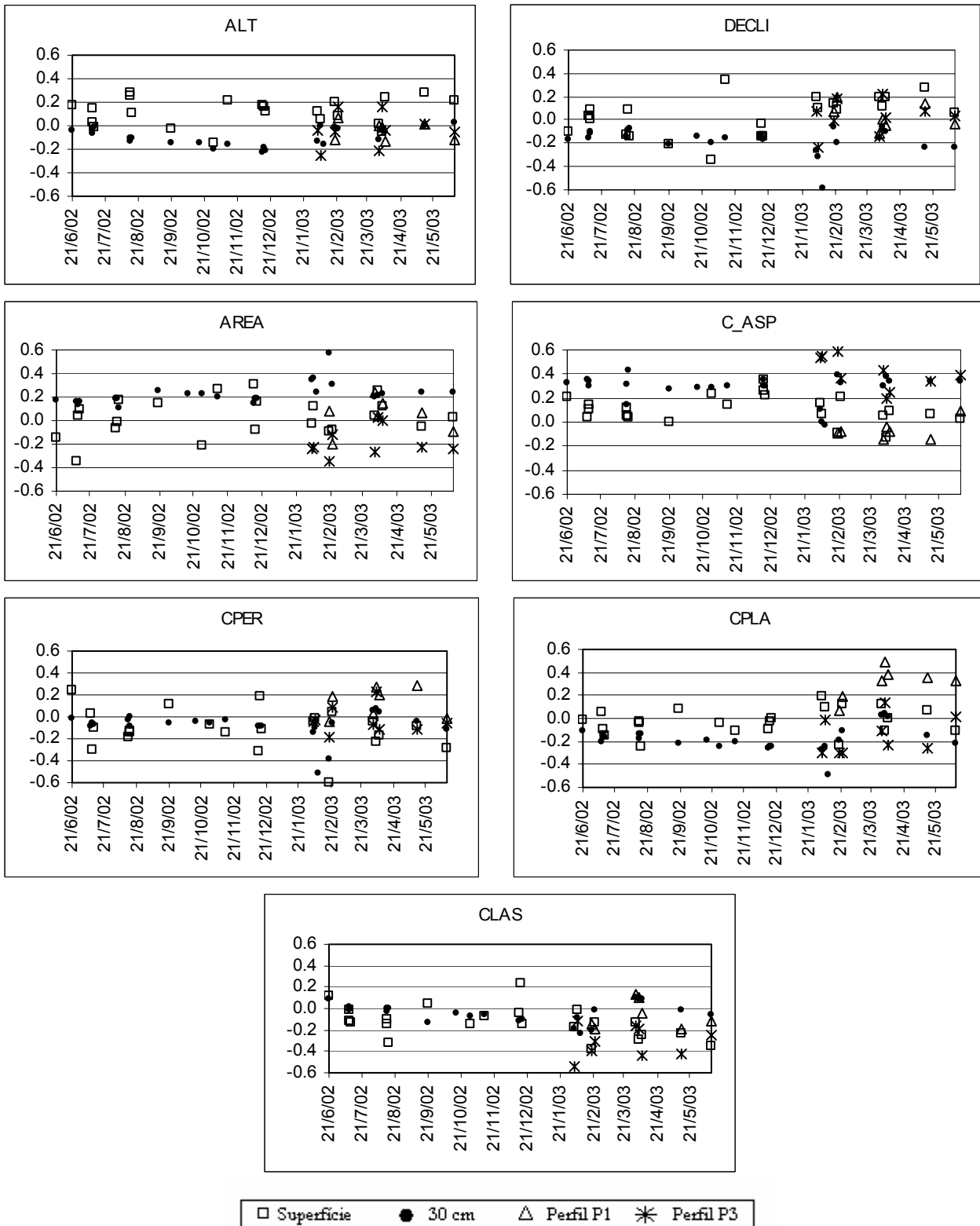


Figura 8 - Variação temporal do coeficiente de correlação entre o conteúdo de água no solo e os fatores topográficos.

secos, enquanto que os pontos situados nas zonas de vale tendem a ter maior conteúdo de água no solo.

Os valores positivos de correlação entre a altitude e o conteúdo de água no solo observados com os dados da malha regular na superfície podem estar relacionados com o maior percentual de areia nas regiões mais elevadas. Diferentemente do observado nos dados superficiais, a 30cm de profundidade a altitude ou posição topográfica mostra uma correlação negativa com o conteúdo de água no solo, em todas as campanhas de medição, de acordo com o observado na literatura. No entanto, os coeficientes de correlação são baixos, não diferindo significativamente de zero ao nível de 95% de significância.

No caso dos perfis P1 e P3, a altitude mostra valores de correlação inferiores ao observado com os dados da malha regular, havendo, no entanto, uma predominância de valores negativos, sinalizando que pontos mais baixos na vertente têm tendência de serem mais úmidos que pontos mais altos.

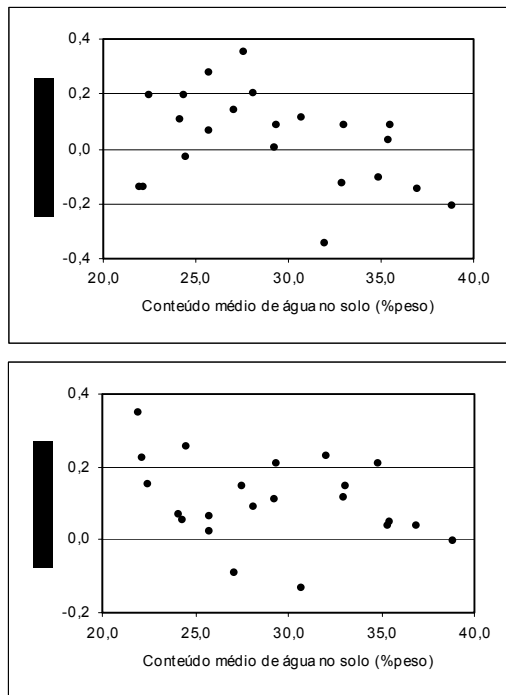


Figura 9 - Influência do conteúdo médio de água no solo no coeficiente de correlação entre o conteúdo de água no solo e a declividade e com o aspecto – superfície.

Para a declividade, os coeficientes de correlação com os dados de conteúdo de água no solo na superfície, mostram uma maior variabilidade tem-

poral, tendo sido observados valores positivos e negativos. A maior correlação positiva (+0,35) foi observada em 12/11/02 e a maior correlação negativa (-0,34) foi observada no dia 29/10/02. A 30 cm de profundidade os coeficientes de correlação são negativos e mais significativos – chegando a 0,6 em 08/02/03 - indicando que área com maiores declividades apresentam menores conteúdos de água no solo.

Coefficientes de correlação negativa foram observados por Nyberg (1996) e Famiglietti et al. (1998). No perfil P1 e P3, a declividade apresenta oscilação entre valores de correlação positiva e negativa.

Analisando a influência do conteúdo médio de água no solo com o coeficiente de correlação da declividade (**Figura 9**), verifica-se uma tendência de valores positivos de coeficiente de correlação estarem associados com menores conteúdos médios de água no solo e valores negativos com maiores conteúdos médios de água no solo. Estes resultados mostram que, quando o conteúdo de água no solo é elevado, o movimento lateral de água no solo se torna mais importante e a declividade passa a ter um papel importante na distribuição espacial de água no solo. Nesta situação, pontos com maior declividade tendem a serem mais secos que áreas planas e o coeficiente de correlação passa a ser negativo.

Queda na correlação entre a declividade e o conteúdo de água no solo com as condições médias de conteúdo de água na bacia foi observada por Famiglietti et al. (1998), numa região sub-tropical úmida no Texas-EUA, com 21 amostra e por Gómez-Plaza et al. (2001), numa região semi-árida do sudeste da Espanha, com 50 amostras em seção. No entanto, nos trabalhos desenvolvidos por estes autores, o coeficiente de correlação entre o conteúdo de água no solo e a declividade esteve sempre negativo. Oscilação entre correlação positiva e negativa foi observada por Western et al. (1999) em 500 amostras obtidas numa malha regular em região de clima temperado na Austrália.

A área de contribuição mostra correlação positiva com o conteúdo de água no solo na grande maioria das campanhas de medição, quando se trabalha com os dados da malha regular, sendo em algumas datas significativamente diferentes de zero. Correlação positiva com a área de contribuição indica que vertentes com maiores áreas de contribuição tendem a ser mais úmidas que aquelas com pequenas áreas de contribuição. Os valores de coeficiente de correlação positiva são inferiores aos citados por Nyberg (1996), mas ficaram da ordem de grandeza dos apresentados por Moore et al. (1988), Famiglietti

ti et al. (1998) e Gómez-Plaza et al. (2001). No caso dos perfis P1 a área de contribuição apresenta oscilação entre valores de correlação positiva e negativa e no perfil P3 os coeficientes de correlação para a área de contribuição são todos negativos. Correlação negativa para a área de contribuição são contrárias aos resultados observados por outros pesquisadores (Nyberg, 1996 e Famiglietti et al., 1998)

A influência da evapotranspiração no padrão espacial do conteúdo de água no solo fica evidenciada nos coeficientes de correlação com o aspecto nos quatro conjuntos de dados estudados. Com exceção do perfil P1, onde se obteve correlação negativa com o aspecto, em praticamente todas as campanhas de medição o aspecto apresenta uma correlação positiva com o conteúdo de água no solo, indicando que maiores aspectos correspondem a maiores conteúdos de água no solo. Pela classificação proposta neste trabalho (**Figura 4**), valores altos de aspectos são relacionados a vertentes com direção norte-sul, que recebem menor incidência de radiação solar e, portanto, têm menor evapotranspiração e maiores conteúdos de água no solo. No caso dos perfis P1 e P3, o aspecto não representa um bom indicativo da variabilidade espacial do conteúdo de água no solo, uma vez que todos os pontos estão localizados numa mesma vertente e orientação, conseqüentemente com valores de aspecto muito semelhantes.

A relação entre o coeficiente de correlação do aspecto e o conteúdo médio de água no solo (**Figura 9**) mostra que a influência do aspecto no padrão espacial do conteúdo de água no solo diminui com o aumento do conteúdo de água na área. Reid (1973) e Famiglietti et al. (1998) encontraram relação semelhante, com valores maiores no final do período seco. Resultados contrários foram observados por Gómez-Plaza et al. (2001) em regiões semi-áridas. Estes resultados mostram que, quando o solo encontra-se muito úmido, próximo à saturação, a influência da variação de evapotranspiração no conteúdo de água no solo é pouco significativa; à medida que o solo seca, as diferenças de retirada de água pelas culturas passam a exercer maior influência no padrão espacial do conteúdo de água no solo; quando o solo encontra-se muito seco esta influência volta a cair e o aspecto passa a apresentar baixa correlação com o conteúdo de água no solo.

No que se refere à curvatura no perfil, verifica-se que terrenos côncavos (curvatura negativa) são freqüentemente mais úmidos que terrenos convexos, com coeficientes de correlação chegando a aproximadamente $-0,60$, superiores aos apresentados por Gómez-Plaza et al. (2001). Esta tendência

foi observada em praticamente todas campanhas de medição em todos conjuntos de dados analisados, com exceção do perfil P1 que apresentou correlação positiva, contrária ao observado na maioria dos trabalhos citados na literatura (Moore et al., 1988; Famiglietti et al., 1998). Vale salientar ainda que nos dados obtidos a 30 cm de profundidade a curvatura no perfil praticamente não teve efeito sobre o conteúdo de água no solo, com baixos coeficientes de correlação.

A curvatura no plano, que está diretamente relacionada com a convergência e divergência do fluxo, apresenta uma clara correlação negativa com o conteúdo de água no solo a 30 cm de profundidade, sinalizando que pontos convergentes têm maior conteúdo de água no solo quando comparados com pontos divergentes, resultado semelhante ao encontrado na literatura (Moore et al., 1988; Famiglietti et al., 1998). Na superfície, a correlação é mais fraca, oscilando entre valores positivos e negativos, com exceção dos dados obtidos no perfil P3, que apresentam valores de correlação negativa da ordem de $-0,30$.

A classificação do terreno segundo a curvatura no plano e no perfil permite identificar a influência conjunta destes fatores mostrando claramente que terrenos côncavos e convergentes são freqüentemente mais úmidos que terrenos convexos e divergentes.

Correlação com os índices de conteúdo de água

Com respeito aos índices de conteúdo de água, verifica-se que os três índices testados neste trabalho apresentam correlação positiva com o conteúdo de água no solo em praticamente todas as campanhas de medição nos dados da malha regular (**Figura 10**), chegando a apresentar coeficiente de correlação superiores a 50% para 30 cm de profundidade. Coeficientes de correlação desta ordem de grandeza foram também observados por Moore et al. (1988) e Burt e Butcher (1985), enquanto que Landson e Moore (1992) obtiveram coeficientes de correlação inferiores a 10%. Nos perfis P1 e P3, os índices de conteúdo de água não apresentam boa correlação com o conteúdo de água no solo, tendo-se observado, inclusive, correlações negativas no perfil P3. O baixo desempenho dos índices de conteúdo de água, nestes conjuntos de dados, está associado à baixa correlação observada com os atributos topográficos e/ou a correlação negativa observada entre a área de contribuição e o conteúdo de água no solo, em algumas campanhas de medição.

É interessante ressaltar que o desempenho dos índices de conteúdo de água propostos por Gómez-Plaza et al. (2001) nos dados da malha regular na superfície do solo é superior ao proposto por Beven e Kirkby (1979). Os índices IND2 e IND3 apresentam coeficientes de correlação superiores em todas as campanhas de medição. Isto indica que o aspecto, que está diretamente relacionado com a incidência de radiação solar e, portanto, com a evapotranspiração, tem papel importante nesta bacia.

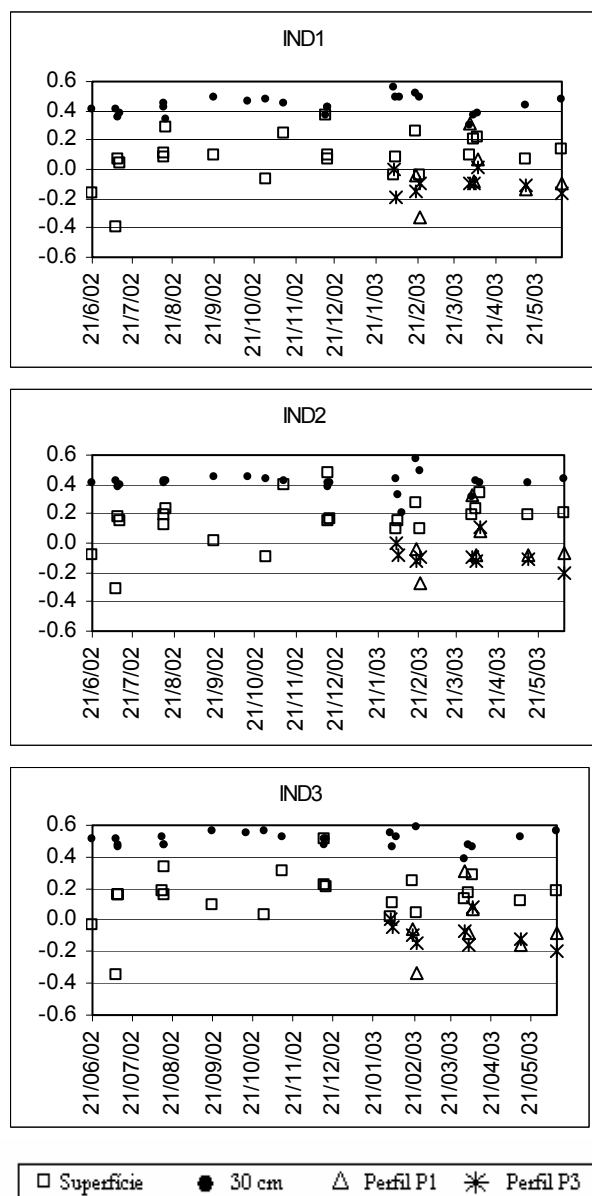


Figura 10 - Variação temporal do coeficiente de correlação entre o conteúdo de água no solo e o percentual de argila e areia.

Correlação com as características do solo.

O conteúdo de água no solo, na superfície, tanto da malha regular como dos perfis P1 e P3, apresentam uma clara correlação positiva com o percentual de argila na maioria das campanhas de medições (Figura 11), enquanto que a areia apresenta uma correlação negativa – solos mais arenosos tem menores conteúdos de água no solo. Correlação entre a textura do solo e o conteúdo de água no solo tem sido observado por diversos pesquisadores (Reynolds, 1970a,b; Henninger et al., 1976; Greminger et al., 1985; e Crave e Gascuel-Oudou, 1997). Alguns autores (Hawley et al., 1983 e Gómez-Plaza et al., 2001) notaram que a textura do solo explica melhor a variabilidade espacial do conteúdo de água no solo em condições úmidas, mas esta relação não foi observada neste trabalho.

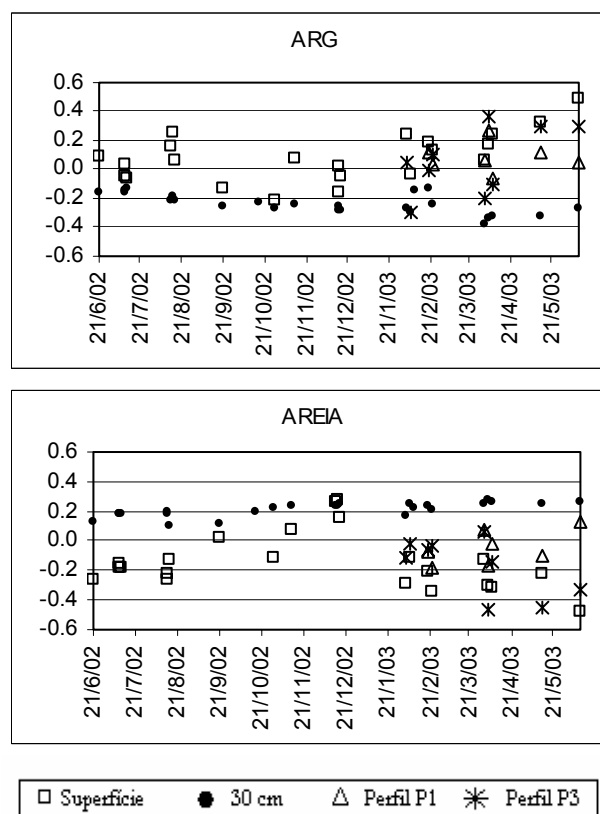


Figura 11 - Variação temporal do coeficiente de correlação entre o conteúdo de água no solo e o percentual de argila e areia.

O conteúdo de água no solo a 30 cm de profundidade mostra uma correlação negativa com o percentual de argila e positiva com o percentual

de areia. Estes valores de correlação parecem estranhos numa primeira análise. Mas, considerando a elevada correlação positiva encontrada entre a altitude e o percentual de argila, verifica-se que estes valores de correlação são muito mais um reflexo da influência da elevação do que um sinal de que solos mais argilosos têm menor conteúdo de água no solo que solos mais arenosos e vice e versa.

Todos os dados utilizados neste artigo encontram-se disponíveis para consulta no site: www.iph.ufrgs/potiribu.

CONCLUSÕES

Neste trabalho se analisou a hipótese defendida por diversos pesquisadores (Famiglietti et al., 1998; Western et al., 1999; Gómez-Plaza et al., 2001 e Hupert e Vanclooster, 2002) de que a variabilidade espacial do conteúdo de água no solo pode ser explicada através fatores do ambiente, principalmente topográficos e do solo. Para isto, procedeu-se uma análise de correlação na qual a série temporal dos coeficientes de correlação entre o conteúdo de água no solo e diversos atributos topográficos (altitude, declividade, área de contribuição, aspecto, curvatura no perfil e no plano), índices de conteúdo de água (Beven e Kirkby, 1979 e Gómez-Plaza et al, 2001) e características do solo (percentual de argila e areia) foram interpretadas no contexto dos processos de redistribuição de água no perfil do solo. Nesta análise foram considerados quatro conjuntos de dados (malha regular na superfície, malha regular a 30 cm de profundidade, perfil P1 e perfil P3).

A análise de correlação mostrou que, entre os atributos topográficos testados, a curvatura no perfil, área de contribuição e o aspecto mostraram forte influência na variabilidade espacial do conteúdo de água no solo ao se trabalhar com os dados da malha regular na superfície, com coeficientes de correlação de 60%, 47% e 35%, respectivamente. Observou-se ainda que a influência do aspecto é função do conteúdo médio de água no solo, diminuindo com o aumento do conteúdo de água na área. Os demais atributos topográficos (altitude, declividade e curvatura no plano) apresentam correlações muito fracas e/ou contrárias ao preconizado pela teoria. No caso dos dados da malha regular a 30 cm de profundidade, os coeficientes de correlação são mais permanentes no tempo, devido, provavelmente, à menor variação do conteúdo de água no solo durante o desenvolvimento do trabalho. Os atributos topográficos mais determinantes foram: a decli-

vidade, que nesta profundidade apresenta coeficiente de correlação de até 58%, área de contribuição (57%) e o aspecto (48%).

No que se refere aos dados dos perfis P1 e P3, verifica-se uma correlação muito fraca com praticamente todos os atributos topográficos testados neste artigo. A exceção fica no aspecto no perfil P3, com coeficientes de correlação de até -0,74.

Com relação aos índices de conteúdo de água, a análise de correlação mostrou que os três índices testados (Beven e Kirkby, 1979 e Gómez-Plaza et al, 2001) descrevem boa parte da variabilidade espacial do conteúdo de água no solo quando se trabalhou com amostras obtidas em toda a bacia hidrográfica (dados da malha regular), principalmente no que se refere aos dados obtidos a 30 cm de profundidade. Nos conjuntos de dados obtidos somente numa vertente (perfil P1 e P3) os índices de conteúdo de água não apresentam bom desempenho.

A influência da textura na variabilidade espacial do conteúdo de água no solo pode ser identificada nos dados obtidos da malha regular na superfície e nos dados do perfil P3, onde o percentual de areia apresenta coeficientes de correlação de 48% (09/06/03) e 47% (04/04/03).

As diferenças entre os atributos topográficos de maior influência no padrão espacial do conteúdo de água no solo observadas nos diferentes conjuntos de dados analisados podem estar associadas às características da bacia. Como foi descrito anteriormente, a bacia do arroio Donato, apresenta uma camada de solo superficial bastante porosa e estruturada, favorecendo a infiltração e a drenagem. Concomitantemente, esta bacia, mostra uma camada mais compactada a aproximadamente 30 cm de profundidade, fazendo com que ocorra um significativo movimento subsuperficial de água. Esta característica hidrológica da bacia faz com que, na superfície, o conteúdo de água no solo seja mais resultante dos movimentos verticais de água (precipitação e evapotranspiração) e o aspecto assumam papel de grande relevância na variabilidade espacial do conteúdo de água no solo. Na profundidade de 30 cm, o movimento lateral de água é mais significativo e a topografia passa a exercer um papel de maior destaque, fazendo com que os índices de conteúdo de água representem bem a variabilidade espacial do conteúdo de água no solo. Finalizando, pode-se dizer que três fatores limitaram a capacidade de predição dos fatores testados: existência de aleatoriedade na variabilidade espacial do conteúdo de água no solo; os fatores testados não representam todos os fenômenos inter-

venientes; e o padrão espacial do conteúdo de água no solo varia temporalmente.

AGRADECIMENTOS

As atividades experimentais e o trabalho de doutoramento que permitiram a confecção do presente artigo contaram com o suporte e financiamento do CNPq e do Convênio FAURGS/FINEP 23.01.0529.00/CTHIDRO. Joel Avruch Goldenfum está atualmente efetuando pesquisa pós-doutoral no INSA-LYON, França, com bolsa CNPq.

REFERÊNCIAS

- Anderson, M.G. and Burt, T.P. 1978. Experimental investigations concerning the topographic control of soil water movement on hillslopes. *Z. Geomorph.* v. 29, p. 52-63.
- Barling, R.D.; Moore, I.D. e Grayson, R.B. 1994 A quasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content. *Water Resources Research*, v.30, n.4, p. 1029-1044, 1994.
- Beldring, S. Gottschalk, L.; Seibert, J. E Tallaksen, L.M. 1999 Distribution of soil moisture and groundwater levels at patch and catchment scales. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.98-99, p. 305-324.
- Beltrame, L.F. de S., Gondim, L.A.P., Taylor, J.C. 1981. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. In: *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.5, p. 145-149.
- Beltrame, L.F. de S., Gondim, L.A.P., Taylor, J.C. 1981. Influência da desestruturação e compactação na permeabilidade do solo. Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservação do Solo, Recife, Universidade Federal de Pernambuco, *Anais*, p.236-237.
- Beven, K.J. e Kirkby, M.J. 1979 A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, v.24, p.43-69.
- Burt, T.P. e Burtcher, D.P. 1985 Topographic controls of soil moisture distributions. *Journal of Soil Science*, v.36, p. 469-486.
- Castro, N. 1996. *Ruissellement et erosion sur des bassins versants de grandes cultures du plateau Basaltique du sud du Bresil (Rio Grande do Sul)*. Strasbourg. Univ. Luis Pasteur, Tese de Doutorado, 179p.
- Collischonn, W.; Mendiondo, E.M.; Mendes, C.A B. 1998 Modelos numéricos do terreno e suas aplicações a bacias hidrográficas 1: Princípios Gerais. Congresso Nacional Del Água. Santa Fé: Faculdade de Engenharia Del Litoral, *Anais*, v.2, p. 82-90.
- Crave, A. e Gascuel-Odoux, C. 1997 The influence of topography on time and space distribution of soil surface water content. *Hydrological Processes*, v.11, p. 203-210.
- EMBRAPA, 1999. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília: EMBRAPA, 412p.
- Famiglietti, J.S.; Rudnicki, J.W. e Rodell, M. 1998. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of Hydrology*, v.210, p.259-281.
- Gómez-Plaza, A., Martínez-Mena, M.; Albaladejo, J. e Castillo, V.M. 2001 Factors regulating spatial distribution of soil water in small semiarid catchments. *Journal of Hydrology*, v. 253, pg. 211-226.
- Gómez-Plaza, A., Alvarez-Rogel, J.; Albaladejo, J. e Castillo, V.M. 2000 Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi-arid environment. *Hydrological Processes*, v.14, p. 1261-1277.
- Gonçalves, A.C.A.; Folegatti, M.V. e Silva, A.P. 1999 Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. *R. Bras. Ci. Solo*, v.23, p. 155-164.
- Grayson, R.B., Western, A.W. e Chiew, F.H.S e Blöschl, G. 1997 Preferred states in spatial soil moisture patterns: Local and nonlocal controls. *Water Resources Research*, v.33, n.12, p. 2897-2908.
- Greminger, P.J.; Sud, K. Y. e Nielsen, D.R. 1985 Spatial variability of field-measured soil-water characteristic. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.49, n.5, p.1075-1082.
- Hawley, M.E.; Jackson, T.J. e McCuen, R.H. 1983 Surface soil moisture variation on small agricultural watersheds. *Journal of Hydrology*, v.62, p. 179-200.
- Hendrickx, J.M.H., Wierenga, P.J. e Nash, M.S. 1990 Variability of soil water tension and soil water content. *Agricultural Water Management*, v.18, n.2, p. 135-148.
- Henninger, D.L.; Petersen, G.W. e Engman, E.T. 1976 Surface soil moisture within a watershed – variation, factors influencing and relationship of surface runoff. *Soil Science Society of America Journal*, v.40, p. 773-776.
- Hupert, F. e Vanclooster, M. 2002 Interseasonal dynamics of soil moisture variability within a small agricultural maize cropped field. *Journal of Hydrology*, v. 261, p. 86-101.
- Ladson, A R. e Moore, I.D. 1992 Soil water prediction on the Konza Prairie by microwave remote sensing and topographic attributes. *Journal of Hydrology*, v.138, p.385-407.

- Libardi, P.L., 1996 Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Rev. Bras. Ci. Solo**. v.20, p. 1-12.
- Libardi, P.L., Prevedello, C.L.; Pauletto, E.A. e Moraes, S.O. 1986 S.O. Variabilidade espacial da umidade, textura e densidade de partículas ao longo de uma transeção. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 10, p.85-90.
- Loague, K. 1992 Soil water content at R-5. Part 1. Spatial and temporal variability. **Journal of Hydrology**, v. 139, p. 233-251.
- Melo Filho, J.F. de 2002 **Variabilidade dos parâmetros da equação da condutividade hidráulica em função da umidade de um latossolo sob condições de campo**, Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Tese de Doutorado, 145p.
- Mendonça, E. M. 1995. **Integração das escalas hidrológicas nas sub-bacias embutidas do rio Potiribu, RS**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, RS, Dissertação de mestrado, 248p.
- Moore, I.D.; Burchfiel, G.L. e Mackenzie, D.H. 1988 Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. **Transactions of the American Society of Agriculture Engineering**, v.31, n.4, p.1098-1107.
- Nyberg, L. 1996 Spatial variability of soil water content in the covered catchment at Gardsjön, Sweden. **Hydrological Processes**, v.10, p.89-103.
- Reid, I. 1973 The influence of slope orientation upon the soil moisture regime, and its hydrogeomorphological significance. **Journal of Hydrology**, v.19, p. 309-321.
- Reynolds, S.G. 1970a The gravimetric method of soil moisture determination. Parte I: A study of equipment, and methodological problems. **Journal of Hydrology**, v. 11, p. 258-273.
- Reynolds, S.G. 1970b The gravimetric method of soil moisture determination. Parte II: Typical required sample sizes and methods of reducing variability. **Journal of Hydrology**, v.11, p. 274-287.
- Reynolds, S.G. 1970c The gravimetric method of soil moisture determination. Parte III: An examination of factors influencing soil moisture variability. **Journal of Hydrology**, v.11, p. 288-300.
- Robinson, M. e Dean, T.J. 1993 Measurement of near surface soil water content using a capacitance probe. **Hydrological Processes**, v.7, p.77-86.
- Souza, L.S. Paiva, A. Q.; Souza, L.D. e Cogo, N.P. 2002 Água no solo influenciada pela posição na paisagem, em uma toposseqüência de solos de tabuleiro do estado da Bahia. **R. Bras. Ci. Solo**, v.26, p. 843-855.
- Streck, E.V., Kämpf, N.; Dalmolin, R.S.D.; Klamt, E.; Nascimento, P.C. 2002 **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre. EMATER/RS; UFRGS. 107p.
- Taylor, J.C., Mattos, C.C.L.V., Beltrame, L.F.S. 1981. Efeito da drenagem do solo no número de dias disponíveis para implantação de culturas de verão. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v.5, n.3, p. 139-144.
- Western, A W., Grayson, R. B.; Blöschl, G.; Willgoose, G.R. e McMahon, A. 1999 Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices. **Water Resources Research**, v.35, n.3, p.797-810.
- Wendroth, O., Pohl, W.; Kosinzki, S.; Rogasik, H.; Ritsema, C.J. e Nielsen, D.R. 1999 Spatio-temporal patterns and covariance of soil water status in two Northeast-German field sites. **Journal of Hydrology**, v.215, p.38-58.

Spatial Variability of Soil Water Content in a Small Rural Basin: 1. Analysis of Environmental Factors

ABSTRACT

This paper presents an experimental study, performed in the Donato stream basin (1.1 km²), for the main purpose of evaluating whether the space and time variability of soil water content can be explained by environmental factors, such as topography and soil. A data set of over 2000 measurements of soil water content, collected from a regular grid all over the catchment, at 0 cm (soil surface), 30 cm and 60 cm depth, and from two profiles, 280 m (Profile P1) and 320 m (Profile P3) long was analysed. The soil water content measurements were performed by gravimetric procedure at the soil surface and using the TDR technique at deeper levels. The correlation analysis showed a higher correlation with soil water content for the following topographic attributes: at soil surface, contribution area, aspect and profile curvature; and, at 30 cm depth, declivity, contribution area and aspect. The data from profiles P1 and P3 showed very low correlation with nearly all topographic attributes studied. The water content indexes presented good correlation for the regular grid data, mainly at 30 cm depth, but did not show good performance for data from the slopes (profiles P1 and P3).

Key-words: spatial variability; soil water content; small basins; correlation analysis; topographic attributes

ANEXO

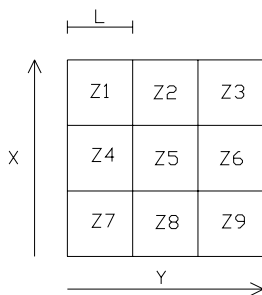
CÁLCULO DOS FATORES AMBIENTAIS

Para obter os fatores ambientais e índices do terreno utilizou-se um conjunto de algoritmos adap-

tados de Collishom et al (1998). Inicialmente foi efetuada a retirada das depressões do Modelo Numérico do terreno (MNT) da bacia do arroio Donato e determinada a direção do fluxo, ou seja, aquela que apresenta a maior declividade.

A partir da matriz de direção de fluxo se determinou a área acumulada ou de contribuição (AREA), atribuindo a cada célula o valor igual ao número de células que drenam para ela.

A declividade e o aspecto ou orientação da declividade foram calculados a partir do vetor gradiente da função $Z(x,y)$ que representa a altitude do terreno, segundo a metodologia apresentada por Zevenbergen e Thorne (1987)., considerando uma submatriz 3 x 3 do MNT.



$$ASP = \arctan(-H/-G)$$

$$DECLI = 100 * [G^2 + H^2]^{1/2}$$

Sendo:

$$G = \partial Z / \partial y = (-Z_4 + Z_6) / 2L$$

$$H = \partial Z / \partial x = (Z_2 - Z_8) / 2L$$

A curvatura no plano e no perfil foram calculadas pelas seguintes expressões:

$$CPER = -2(DG^2 + EH^2 + FGH) / (G^2 + H^2)$$

$$CPLA = 2(DH^2 + EG^2 - FGH) / (G^2 + H^2)$$

Sendo:

$$D = \delta^2 Z / \delta x^2 = [(Z_4 + Z_6) / 2 - Z_5] / L^2$$

$$E = \delta^2 Z / \delta y^2 = [(Z_2 + Z_8) / 2 - Z_5] / L^2$$

$$F = \delta^2 Z / \delta x \delta y = (-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9) / 4L^2$$

Os índices de índices de umidade foram obtidos pelas equações:

$$IND1 = LN(AREA / DECLI)$$

$$IND2 = LN(C_ASP * AREA)$$

$$IND3 = LN\left(\frac{C_ASP * AREA}{DECLI}\right)$$

Sendo C_ASP a classe do aspecto segundo a codificação da Figura 4.