



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbccs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Brasil

Peixoto de Barros, Cláudia Alessandra; Gomes Minella, Jean Paolo; Tassi, Rutinéia; Dalbianco, Leandro; Sangiovo Ottonelli, Anaí

ESTIMATIVA DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO NA ESCALA DE BACIA HIDROGRÁFICA

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 38, núm. 2, 2014, pp. 557-564

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Viçosa, Brasil

Available in: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180231134020>

- ▶ How to cite
- ▶ Complete issue
- ▶ More information about this article
- ▶ Journal's homepage in redalyc.org

Comissão 3.3 - Manejo e conservação do solo e da água

ESTIMATIVA DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO NA ESCALA DE BACIA HIDROGRÁFICA⁽¹⁾

**Cláudia Alessandra Peixoto de Barros⁽²⁾, Jean Paolo Gomes Minella⁽³⁾, Rutinéia Tassi⁽⁴⁾,
Leandro Dalbianco⁽⁵⁾ & Anaí Sangiovo Ottonelli⁽⁶⁾**

RESUMO

A variabilidade espacial das características do solo torna a estimativa da infiltração de água altamente dependente da escala de análise. Muitos trabalhos necessitam de informações da dinâmica da infiltração para descrever o mecanismo de outros processos associados à água, aos sedimentos ou aos solutos. O objetivo deste trabalho foi utilizar duas estratégias metodológicas para a estimativa da infiltração na escala de bacia. Os parâmetros de dois modelos de infiltração foram ajustados a um conjunto de dados coletados durante dois anos de monitoramento, em 77 eventos de chuva-vazão ocorridos sob diferentes condições de uso e manejo do solo numa bacia hidrográfica rural de 1,2 km². Os resultados dos ajustes para os dois modelos de infiltração na escala de bacia foram comparados com aqueles obtidos para dois métodos pontuais de estimativa da infiltração. Com o conjunto de dados do monitoramento, foi possível definir um modelo de infiltração para a bacia monitorada. Além disso, os resultados indicaram que a comparação realizada entre os valores dos modelos com os pontuais são fortemente dependentes da escala de análise; isto é, as medidas pontuais revelaram valores médios de taxa de infiltração alta para a bacia em estudo. Todavia, observações no campo indicaram baixa infiltração, principalmente nas áreas saturadas onde condicionam o escoamento superficial nessa bacia, ao contrário dos resultados pelos modelos de estimativa, que apresentaram menor ordem de magnitude dos valores estimados de infiltração, em razão, entre outros, da maior incorporação dos fatores controladores do processo em seu método.

Termos de indexação: monitoramento ambiental, conservação do solo, escoamento superficial.

⁽¹⁾ Parte da Dissertação de mestrado do primeiro autor apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Recebido para publicação em 26 de fevereiro de 2013 e aprovado em 1º de novembro de 2013. Pesquisa desenvolvida com apoio financeiro do CNPq e FAPERGS.

⁽²⁾ Doutoranda, PPGCS, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Solos, UFSM. Av. Roraima, 1000. CEP 97105-900 Santa Maria (RS). E-mail: dinhaufsm@gmail.com

⁽³⁾ Professor Adjunto, Departamento de Solos, UFSM. E-mail: jminella@gmail.com

⁽⁴⁾ Professora Adjunta, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSM. E-mail: rutineia@gmail.com

⁽⁵⁾ Pós-Doutorando, PPGCS, Centro de Ciências Rurais. E-mail: agro.dalbianco@gmail.com

⁽⁶⁾ Graduanda, Curso de Agronomia, UFSM. E-mail: ottonelliottonelli@hotmail.com

SUMMARY: ESTIMATION OF SOIL WATER INFILTRATION AT THE CATCHMENT SCALE

The spatial variability of soil characteristics makes the estimation of water infiltration highly dependent on the scale of analysis. Many studies require information on the dynamics of infiltration to describe the dynamics of other processes associated with water, sediment and solutes. This study aims to use two methodological strategies to estimate water infiltration at the catchment scale. The parameters of two infiltration models were fitted to a data set collected over two years of monitoring (77 rainfall-runoff events) occurring under different land use and management conditions in a rural catchment of 1.2 km². The results of fitting to the two infiltration models at the catchment scale were compared with those obtained from two site-specific methods for estimating infiltration. With the set of monitoring data, it was possible to establish an infiltration model for the monitored catchment area. Furthermore, the results indicate that the comparison between values from the models and site-specific values are strongly dependent on the scale of analysis. That is, the site-specific measures showed mean values of high infiltration rates for this catchment, but field observations indicate low infiltration, especially in saturated areas, which affect runoff in this catchment area. This is in contrast with the results obtained by the estimation models, which present a lower order of magnitude for the estimated values of infiltration, due to the greater incorporation of factors controlling the process in their methodology, among other aspects.

Index terms: environmental monitoring, hydrological modeling, hydrological processes.

INTRODUÇÃO

O desencadeamento de processos hidrológicos como o escoamento superficial, a erosão e o transporte de solutos são controlados pela variabilidade da infiltração de água no solo, que é influenciada pela heterogeneidade espacial do relevo e do solo e pelas alterações espacial e temporal do uso do solo e da variação climática. Segundo Langhans et al. (2010), a dinâmica espacial e a temporal dos fatores controladores da infiltração incorpora, na sua representatividade espaço-temporal, alto grau de incertezas.

Aliado a isso, tem-se, nos últimos anos, um cenário de aumento na frequência de eventos climáticos extremos, como cheias e estiagens mais severas, destacando-se a Região Sul do Brasil (Marengo et al., 2007). Esse quadro tem exigido da comunidade científica e gestores medidas preventivas para diminuir impactos em níveis de meio ambiente e econômico (Theisen et al., 2009). O controle dos impactos advindos desses eventos extremos passa necessariamente pela escolha correta de práticas de conservação e manejo do solo e da água (Azooy & Arshad, 1996; Caviglione et al., 2010), que promovem o aumento da capacidade de infiltração, com consequente redução do escoamento superficial e aumento do armazenamento de água no solo (Letey, 1985; Gao & Shao, 2012).

Há grande demanda de informações sobre a dinâmica da infiltração de água no solo para trabalhos que envolvam, por exemplo, a estimativa da erosão do solo (Borselli et al., 2001), produção de sedimentos (Holden & Burt, 2002; Nadal-Romero & Regués, 2009), transferência de solutos na paisagem (Chaplot & Poesen, 2012), disponibilidade de água para as plantas (Anderson et al., 2009), evapotranspiração (Lima et

al., 2001) e recarga de aquíferos (Cunha & Wendland, 2005; Munz et al., 2011).

Em ambientes heterogêneos, como na escala de bacia hidrográfica, aumentam as dificuldades operacionais e incertezas quanto à representatividade dos métodos de estimativa da infiltração. A medição da infiltração pode ser realizada pelo emprego de diferentes métodos, sendo comum a utilização do infiltrômetro ou anéis concêntricos (Fiorin, 2008), o uso de simuladores de chuva em parcelas experimentais (Alves Sobrinho et al., 2002) e o método do perfil instantâneo (Hillel et al., 1972). Cada método apresenta aplicações específicas, com vantagens e desvantagens, dependendo dos objetivos do trabalho e das características do sistema, ficando restritos à aplicação em parcelas experimentais, em que as condições de contorno e técnicas empregadas são bem controladas.

Cada um desses métodos é altamente dependente da escala de medição (Rose, 2004), e os resultados de tais método representam situações homogêneas de uso, manejo, relevo e solo, indicando que a extração para diferentes escalas pode incorrer em erros significativos. Isso é especialmente importante quando o sistema de interesse é a bacia hidrográfica, onde o escoamento não é controlado apenas pelo processo Hortoniano, quando a intensidade da chuva excede a taxa de infiltração, mas também pela dinâmica das áreas de afluência variável, quando áreas saturadas pela ascensão do nível do lençol freático impedem a infiltração de água no solo (Beven & Kirkby, 1979). Para muitos ambientes, a dinâmica das áreas saturadas controla importante proporção da infiltração e formação do escoamento superficial (Mendiondo & Tucci, 1997). Desse modo, são necessárias metodologias condizentes com a variabilidade da infiltração de água no solo, aliadas, ainda, às questões operacionais como o tempo e os custos.

Outra técnica utilizada tem sido a análise de dados de escoamento de rios, em que a partir da vazão monitorada estima-se o escoamento superficial e a infiltração de água no solo, como, por exemplo, em Rose (2004). Além da análise de dados hidrológicos, é comum a calibração de modelos hidrológicos para a estimativa da parcela de água infiltrada durante um evento chuvoso. Um dos modelos mais utilizado nesse caso é o modelo da Curva Número do Serviço de Conservação do Solo dos EUA (USDA-NRSC, 2007).

O objetivo deste trabalho foi estimar a infiltração na escala de bacia, utilizando diferentes estratégias metodológicas e comparando com os resultados de medidas de infiltração pontual. A partir disso, fez-se uma análise da aplicabilidade de ambas os métodos na interpretação dos processos hidrológicos, que por ventura possam ser utilizados em estudos de modelagem hidrológica, erosão e qualidade da água, ou até mesmo para o planejamento e manejo do solo e da água.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi desenvolvido numa bacia hidrográfica rural de 1,2 km², localizada no município de Arvorezinha, na encosta do planalto Riograndense, na região centro-norte do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil (28° 49' 31" S, 52° 12' 30" O). O relevo local é ondulado na porção superior da bacia e fortemente ondulado na porção intermediária. As principais classes de solos encontradas no local são os Argissolos, Cambissolos e Neossolos, em geral os solos são caracterizados pela presença de cascalhos na porção superior e pelos impedimentos ao fluxo de água na porção inferior (20 a 40 cm), seja pelo B textural, saprolito ou rocha. O clima na região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo Cfb, ocorrendo chuvas distribuídas ao longo do ano, com precipitação pluvial média anual variando de 1.250 a 2.000 mm. O uso e o manejo do solo são caracterizados pela cultura do tabaco no sistema cultivo mínimo (23,19 %), pela cultura do tabaco no sistema convencional (17,33 %), pela mata nativa (19,82 %), pelo florestamento com eucaliptos (22,8 %), pelas pastagens (6,57 %), pela sede (2,92 %), pelos açudes (0,96 %) e pelas capoeiras (6,31 %).

As características de relevo, solo e uso determinam um complexo padrão espacial de formação do escoamento superficial. Os processos erosivos desencadeados são severos, com intensa desagregação do solo pelo escoamento concentrado e pela elevada produção de sedimentos, atingindo a magnitude de 100 t km⁻² ano⁻¹ (Minella et al., 2009).

Análise hidrológica

As análises hidrológicas foram conduzidas utilizando os dados de escoamento no exutório da bacia

e os dados de precipitação pluvial, que ocorreram no período de monitoramento, enfatizando os eventos chuvosos. O monitoramento foi realizado com dois pluviógrafos e um linígrafo de pressão, com discretização temporal de 10 min, permitindo representar adequadamente o intervalo do tempo de concentração da bacia, que é de 40 a 60 min. Para identificar e corrigir possíveis erros nos dados de chuva e vazão, obtidos automaticamente, foi realizado a análise de consistência com valores diários medidos por um observador local. Os registros dos pluviógrafos foram corrigidos com os dados de quatro pluviômetros distribuídos na bacia, e os registros do linígrafo foram comparados às anotações em régua linimétrica, ambos instalados em uma calha Parshall.

O estudo utilizou 77 eventos que ocorreram entre os meses de setembro de 2009 a agosto de 2011. Os eventos selecionados englobam vazões máximas de 50 L s⁻¹, que correspondem a precipitações de, aproximadamente, 15 mm até vazões de 3.000 L s⁻¹, que equivalem aos eventos de precipitação pluvial acima de 80 mm. Sendo assim, a série de dados incorpora diferentes volumes e intensidades de precipitação pluvial, que refletem as variações climáticas inter e intra-anuais.

Os eventos contemplaram diferentes condições de uso e manejo do solo. A variabilidade intra-anual do calendário agrícola cria duas condições distintas que podem influenciar a infiltração e a formação do escoamento superficial: época 1, compreendida entre os meses de julho e novembro, apresenta menor cobertura vegetal, em razão do preparo do solo e das fases iniciais do tabaco, caracterizada, também, pelas chuvas de maior erosividade; e época 2, percebida entre os meses de dezembro e junho, com maior cobertura vegetal, por causa das fases finais do tabaco e do período de pousio ou das culturas de cobertura de inverno, caracterizada também pelas precipitações de menor erosividade.

Salienta-se que durante os 24 meses de monitoramento ocorreram três eventos de elevada magnitude com vazão máxima maior de 3.000 L s⁻¹. Esses dados permitiram testar e calibrar os modelos em condições extremas de precipitação pluvial e vazão com dados monitorados. Com isso, as incertezas do ajuste dos modelos de infiltração são reduzidas já que os dados utilizados envolvem condições extremas do fenômeno hidrológico em curso na bacia.

Os eventos foram caracterizados pelo volume total de chuva (P), pela intensidade máxima da chuva em 30 min (I₃₀), pelo volume total do escoamento (Q), pelo escoamento superficial (Q_s), pelo escoamento de base (Q_b) e pelo coeficiente de escoamento superficial (C). Para a estimativa das variáveis Q_s e Q_b, procedeu-se com a separação dos escoamentos superficial de base, a partir da análise gráfica dos hidrogramas, com base no método da declividade constante (Chow, 1964).

Com as informações do escoamento superficial e da precipitação pluvial total, a infiltração na escala de bacia foi estimada, utilizando dois modelos distintos,

para fins de comparação dos resultados. O primeiro método empregado é denominado modelo da infiltração aparente total (Rose, 2004) e, o segundo, Método da Curva Número (USDA-NRCS, 2007). Os resultados dos dois modelos de infiltração na escala de bacia foram comparados com dados pontuais de infiltração e de condutividade hidráulica saturada. Esses resultados foram obtidos com medidas de 47 ensaios de infiltração com anéis concêntricos (Dalbianco et al., 2010) e 480 amostras de solo para a determinação da condutividade hidráulica saturada (Dalbianco, 2009), ambos distribuídos na bacia em diferentes tipos de solo e condições de uso e manejo desse nas diferentes regiões fisiográficas da bacia. Os resultados das medições pontuais foram utilizados para a comparação com a magnitude da infiltração obtida na escala de bacia por meio dos modelos matemáticos.

Modelo da infiltração total aparente

Nesse método, o volume da precipitação pluvial e o do escoamento superficial monitorado são utilizados para inferir sobre a parcela da infiltração que ocorre para cada tipo de precipitação pluvial. Essa abordagem é com base de que a variabilidade da infiltração na escala de bacia é fortemente influenciada pelas características da precipitação pluvial (volume e intensidade), umidade inicial dos solos e expansão e contração das áreas de afluência variável; e o volume total infiltrado na bacia num determinado evento pode ser aproximado pela diferença entre o que precipitou e o que gerou o escoamento superficial. Sendo assim, a infiltração total aparente (I_{ap}) para cada evento é estimada a partir da subtração entre a precipitação pluvial (P) e o escoamento superficial (Q_s) (Rose, 2004).

O valor de I_{ap} é obtido para o maior número possível de eventos, devendo abranger diferentes magnitudes e características climáticas e fisiográficas, e os resultados graficados num sistema cartesiano, em função da precipitação pluvial do evento (P). A distribuição dos pontos no gráfico permite a obtenção de uma curva de formato exponencial com três regiões distintas: região inferior com uma linha de declividade próxima a 1:1, indicando que praticamente todo o volume precipitado é infiltrado; região intermediária, com maior dispersão de valores, indicando forte controle da umidade antecedente e da dinâmica das áreas de afluência variável; e região posterior com a formação de um patamar, que fisicamente representa a infiltração máxima da bacia (I_m), a partir da qual precipitações de maior volume não geram aumento na infiltração aparente medida.

A partir da distribuição dos pontos graficados, um modelo matemático, na forma da equação 1, descreve a variação da taxa de infiltração média da bacia em função da precipitação pluvial do evento e da infiltração máxima na bacia.

$$I_{ap} = I_m \left[1 - \exp\left(-\frac{P}{I_m}\right) \right] \quad (1)$$

em que I_{ap} é o volume total infiltrado (mm); I_m , a infiltração máxima (mm); e P, o volume precipitado referente à geração da onda de cheia (mm).

Modelo da Curva Número (CN)

O modelo da Curva Número (USDA-NRCS, 2007; Mishra & Singh, 2003) foi utilizado para estimar a infiltração na escala de bacia. Esse modelo foi amplamente utilizado nos estudos que envolvem a estimativa do escoamento superficial (Pruski et al., 2001; Beskow et al., 2009) e nos de manejo e conservação do solo (Endale et al., 2011). Esse método é amplamente utilizado dado à sua parcimonia, pois utiliza um único parâmetro para representar a abstração de água no ambiente que não gera escoamento superficial. Nesse caso, o escoamento superficial (Equação 2) é estimado pela subtração entre a precipitação pluvial e a variável que representa a infiltração, a interceptação e o armazenamento em depressões, em que é calculado por meio do parâmetro CN que incorpora a influência do tipo de solo, do uso e da umidade antecedente.

$$Q_s = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (2)$$

em que Q_s é o escoamento superficial (mm); P, a precipitação pluvial total do evento (mm); I_a , as perdas iniciais (interceptação e armazenamento em depressões), sendo 20 % do valor de S; e S, a capacidade máxima de armazenamento de água no solo (Equação 3), sendo CN um parâmetro adimensional (Curva Número).

$$S = \left(\frac{25400}{CN} \right) - 254 \quad (3)$$

Neste trabalho, o valor de CN foi calibrado evento a evento, de forma a ajustar o valor de escoamento superficial calculado com o valor monitorado. A partir dos valores de CN calibrados, o valor de S foi obtido conforme equação 3, que foi utilizado para estimar a magnitude da infiltração ocorrida em cada evento. Esse valor foi comparado à estimativa da infiltração total aparente do método anterior.

Comparação entre os modelos, os períodos e as escalas

A primeira comparação foi entre os dois modelos de infiltração para a escala de bacias hidrográficas (infiltração total aparente e Curva Número). O pressuposto por trás desses dois modelos é que a infiltração na bacia pode ser estimada pela diferença entre a precipitação pluvial e o escoamento superficial durante um evento, embora utilizem formulações matemáticas distintas. Os conjuntos de resultados dos dois modelos foram comparados entre si estatisticamente para verificar sua dissimilaridade. Isso foi realizado pela determinação da diferença encontrada na infiltração para cada um dos eventos

entre os dois métodos, utilizando o Teste “t” de comparação entre médias para amostras pareadas (dependentes) (Davis, 1986). Esse teste foi escolhido porque é possível comparar os valores de infiltração em cada evento, e não apenas a média geral do período.

Com esse conjunto de valores que representa a diferença entre os dois métodos é calculada a média (μ_0) e para essa é testada a hipótese nula de que o valor é igual a zero ($H_0: \mu_0=0$), ou seja, que não existe diferença significativa entre os métodos. O nível de significância foi de 95 %.

A segunda comparação foi entre diferentes condições de cobertura do solo. Para isso, foi realizado um teste considerando as variações intrassazonais dos valores de CN. A hipótese, nesse caso, é de que os valores de infiltração apresentem comportamento distinto em razão do uso do solo. Os valores de CN foram separados em dois grupos: Época 1 (julho e novembro) e Época 2 (dezembro a junho), que distinguem as épocas de menor e maior cobertura vegetal, respectivamente.

A terceira comparação realizada foi entre a magnitude dos valores de infiltração obtidos nos modelos de escala de bacia e os resultados dos ensaios de infiltração no campo e da condutividade hidráulica do solo saturado. Isso é particularmente importante para quantificar o efeito escala no processo de infiltração e compreender as relações entre os processos na escala do poro, do perfil e da bacia. A partir desse conjunto de comparações, fez-se uma análise do processo de infiltração, considerando os modelos testados, a sua capacidade de descrever a variabilidade temporal e as relações com os valores pontuais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dados hidrológicos

No período de dois anos de monitoramento, ocorreram 77 eventos de chuva-vazão. O conjunto de eventos representa todas as estações do ano, apresentando magnitudes variadas e caracterizando os diferentes momentos do uso e manejo do solo na bacia hidrográfica. Isso permitiu ampla caracterização da umidade do solo, da formação do escoamento superficial e, consequentemente, da infiltração.

Os volumes precipitados para os eventos selecionados variaram de 6 a 187 mm; e as durações dos eventos de precipitação pluvial variaram de 1 a 4 h, com intensidades máximas de 30 min variando de 3 a 57 mm h^{-1} .

Modelo da infiltração total aparente

Na figura 1, estão resumidos os resultados pelo modelo da infiltração total aparente, apresentando o gráfico de correlação entre a precipitação pluvial e a infiltração, medidas nos eventos monitorados.

Percebem-se claramente as três regiões distintas na distribuição dos pontos no gráfico. A parte inferior apresenta precipitações variando de 5 a 40 mm, em que os pontos seguem tendência linear com declividade 1:1; nesse caso, as precipitações são baixas e praticamente ocorre a infiltração de todo o volume precipitado. A segunda região é intermediária e de transição, com precipitações variando de 40 a 100 mm, quando há maior dispersão dos pontos e inflexão na tendência da reta. Nessa região, o escoamento superficial é significativo, mas, possivelmente, com influência das condições de umidade antecedente. Segundo Rose (2004), a dispersão dos valores está relacionada à oscilação das áreas de afluência variável. Na terceira região, com precipitações além de 100 mm, ocorre a formação de um patamar em que, mesmo com o aumento da precipitação pluvial, não ocorre aumento significativo na infiltração da bacia. No intervalo de precipitação pluvial entre 130 e 150 mm, não há registro de precipitação pluvial e, em razão disso, a estimativa da infiltração nesse intervalo apresenta incerteza. Entretanto, a presença de dois eventos de grande magnitude (acima de 170 mm) indica tendência nesse trecho de grandes magnitudes.

O patamar é caracterizado por uma taxa de acréscimo muito pequena, em que foi definido como a capacidade máxima de infiltração (I_m) para a bacia. Nesse caso, o valor obtido para I_m foi de 120 mm. Teoricamente, esse valor máximo ocorre quando todas as áreas formadoras de escoamento estão saturadas. Na equação 4, está a representação do modelo de infiltração ajustada aos pontos observados na figura 1, que permite estimar a infiltração aparente total a partir de uma precipitação pluvial (P) desejada.

$$I = 120 \left[1 - \exp\left(\frac{-P}{120}\right) \right] \quad R^2 = 0,95 \quad (4)$$

Salienta-se que o método é complementar aos métodos tradicionais de estimativa de infiltração, já

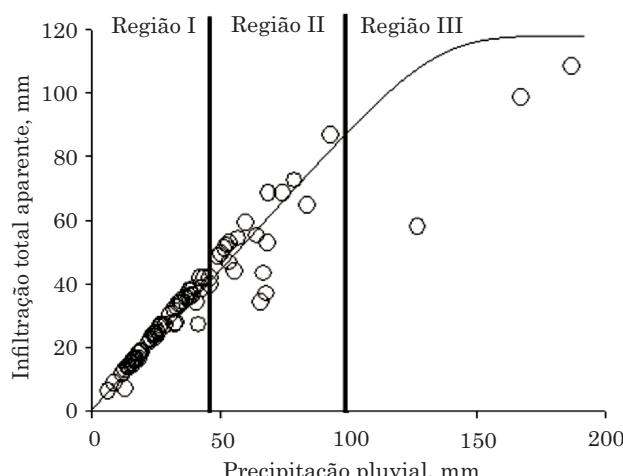


Figura 1. Relação entre a infiltração total aparente e a precipitação pluvial dos eventos monitorados.

que incorpora outros processos além daqueles que se observa num perfil do solo e, por isso, apesar de apresentar certo grau de simplificação, contribui para descrever e quantificar a infiltração na paisagem.

Método da Curva Número (CN)

Na figura 2, estão apresentados os resultados dos valores calculados de S para os 77 eventos de chuva monitorados. O valor de S foi ajustado manualmente pela comparação entre o escoamento superficial calculado e o medido, alterando o valor de CN até o melhor ajuste para cada evento. Nota-se claramente que não há correlação entre o valor de precipitação pluvial e o valor de S, que reflete a capacidade máxima de armazenamento de água no solo.

Fontes de incertezas contribuem para a alta dispersão dos dados, principalmente o uso da constante $I_a = 0,2^*S$, que quantifica as abstrações iniciais (I_a), que na realidade varia em razão da cobertura vegetal e do manejo do solo; entretanto, nesse caso, é considerada constante no ano. Tassi et al. (2006), em um estudo de obtenção de CN em bacias urbanas, também retratam a incerteza da utilização de 20 % da máxima infiltração de água no solo, uma vez que a utilização desse valor pode gerar subestimativas em áreas arborizadas, ou superestimativas em áreas com maior urbanização.

A comparação entre os dois conjuntos de estimativas de infiltração apresentam grande distinção entre si. Os resultados da análise estatística do Teste t pareado indicam que a média das diferenças ($I_{ap}-S$) é significativamente diferente de zero. Na figura 3, estão graficados os valores de I_{ap} e de S, indicando claramente a superestimativa de S em relação ao I_{ap} .

Análise da variabilidade temporal

Os resultados do método da Curva Número foram utilizados para avaliar a variabilidade temporal do

processo de infiltração por meio da variabilidade dos valores de CN calibrados para cada evento. No quadro 1, estão resumidos os valores de CN ajustados, em que é possível observar a variabilidade nos períodos com menor e maior cobertura do solo que se referem às Épocas 1 e 2, respectivamente. No total, foram monitorados 35 eventos na Época 1 e 42, na Época 2.

Observa-se que no período de maior cobertura vegetal o valor de CN foi em média relativamente mais baixo; entretanto, o CV foi maior, com a amplitude maior entre os valores mínimos e máximos (Quadro 1). O valor médio do CN em cada período corresponde ao valor esperado em relação à influência da cobertura sobre os processos de infiltração e do escoamento superficial, ou seja, quanto maior for o valor de CN maior a probabilidade de ocorrer escoamento superficial.

Um importante resultado extraído do método da Curva Número foi a variabilidade dos valores de S, que representa a máxima capacidade de infiltração nos eventos de precipitação pluvial (Quadro 1). Considerando o valor de S uma estimativa da infiltração de cada evento e comparando com os valores obtidos pelo método da infiltração total aparente (I_{ap}), os resultados do método da Curva Número superestimaram os valores de infiltração em, aproximadamente, 1,8 vez o valor estimado pelo método da infiltração total aparente.

Influência da escala de amostragem

Um dos grandes desafios da hidrologia e da física do solo está na representatividade da escala de trabalho, pois os parâmetros obtidos em ensaios conduzidos em áreas de poucos cm^2 não representam os mesmos processos para áreas de m^2 ou km^2 . Nesse sentido, os resultados de medições pontuais foram apresentados para distinguir a magnitude da infiltração quando estimada na escala de bacia e a magnitude do processo medido pontualmente.

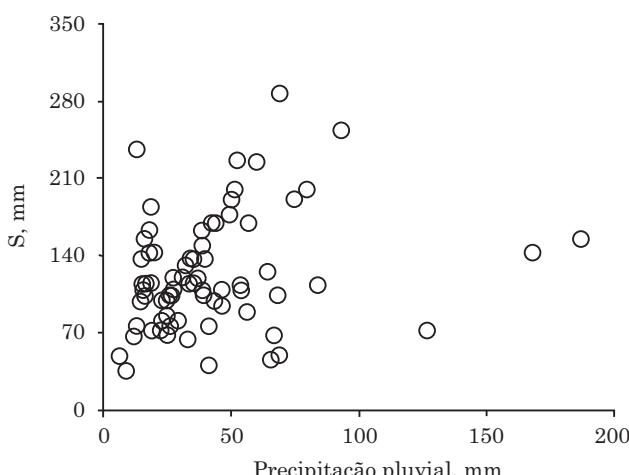


Figura 2. Relação entre o valor de S (Método da Curva Número) e a precipitação pluvial dos eventos monitorados.

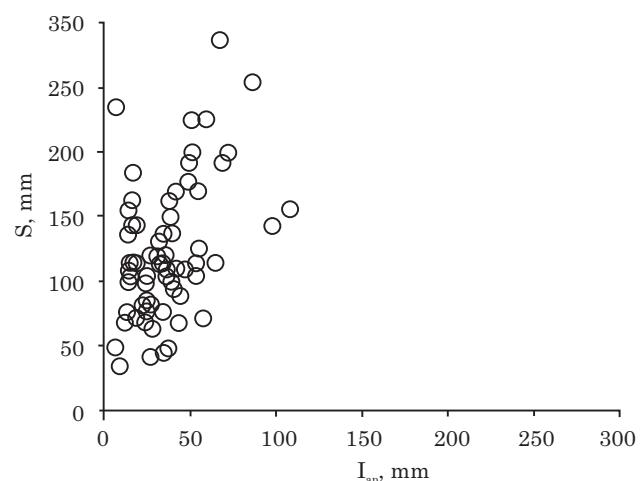


Figura 3. Relação entre as estimativas de infiltração evento a evento pelo método da Curva Número (S) e da infiltração total aparente (I_{ap}).

Quadro 1. Resumo dos parâmetros CN e S encontrados para os eventos ocorridos nas duas épocas (Época 1 e 2) analisadas

Época	Variável	Mínimo	Média	Máximo	Mediana	Desvio-padrão	CV
							%
1	S (mm)	44,82	105,57	199,57	103,74	40,84	38,69
1	CN	56,00	70,67	85,00	70,00	7,56	10,69
2	S (mm)	34,66	134,82	286,42	116,82	54,74	40,60
2	CN	47,00	66,82	88,00	68,00	9,90	14,82

CV: coeficiente de variação.

O primeiro conjunto de dados foi o resultado de 47 pontos de ensaios de infiltração realizados com anéis concêntricos, que cobriram a variabilidade espacial dessa bacia (relevo, solo, uso e manejo). A quantidade de pontos em cada unidade foi proporcional à sua área relativa dentro da bacia (Dalbianco et al., 2010). As taxas de infiltração básica tiveram grande variabilidade entre os pontos. Foram encontrados valores na ordem de 500 mm h⁻¹ e os extremamente baixos na ordem de 1 mm h⁻¹. O valor médio de taxa de infiltração básica foi de 95 mm h⁻¹.

O segundo conjunto de dados foi o resultado das análises de amostras de condutividade hidráulica saturada de 480 pontos na camada superficial do solo, abrangendo, da mesma forma, as várias regiões da bacia (Dalbianco, 2009). O valor médio encontrado foi de 289 mm h⁻¹, com grande variabilidade entre os dados. Mesmo utilizando uma densa malha de amostragem, os resultados não apresentam um padrão espacial associado aos fatores fisiográficos como uso, solo ou relevo.

Considerando esses resultados, é importante salientar as diferenças entre as estimativas nas duas escalas de análise do processo de infiltração, confirmando que esse é influenciado pela escala de análise, sendo uma importante condição que interfere diretamente os trabalhos de modelagem dos processos hidrológicos, erosivos e de qualidade da água na escala de bacia. Foi visto nos resultados deste trabalho que os valores de escoamento superficial nessa bacia são altos, mesmo que os métodos convencionais de condutividade hidráulica e ensaio de infiltração indiquem altas taxas de infiltração. Isso ocorre por causa do controle das camadas menos permeáveis presentes em subsuperfície como horizontes argilosos (Bt) ou rochas. A infiltração é restringida após a saturação do perfil do solo pela reduzida taxa de percolação no horizonte B. Um processo também importante na escala de bacia são as áreas de afluência variável que ocorre nas regiões de relevo convergente e nas regiões próximas à rede de drenagem, onde se observa baixa infiltração de água no solo em razão da saturação do perfil do solo pela elevação do nível do lençol freático, processo esse conhecido como escoamento Dunniano, que oscila durante e entre os eventos de chuva em extensão e magnitude.

CONCLUSÕES

1. A partir de um período significativo de dados hidrológicos monitorados na escala de bacia hidrográfica, foi possível estabelecer os principais intervalos de precipitação pluvial que geram comportamentos distintos na infiltração de água no solo na bacia de Arvorezinha, utilizando o método da infiltração total aparente.

2. A estimativa da infiltração de água no solo utilizando o modelo da Curva Número não apresentou correlação com as precipitações monitoradas, indicando superestimativa dos valores de infiltração, em média, 1,8 vez, quando comparada aos valores estimados pelo método da infiltração total aparente.

3. Ao analisar a influência da escala de amostragem para a estimativa da infiltração na escala de bacia hidrográfica, observou-se que utilizando apenas valores pontuais (condutividade hidráulica saturada e ensaios de infiltração) ocorreu superestimativa dos valores em relação ao observado pelo monitoramento hidrológico.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) e ao Sindicato Interestadual da Indústria do Tabaco (Sinditabaco) pelo apoio financeiro.

LITERATURA CITADA

- ALVES SOBRINHO, T.; FERREIRA, P.A. & PRUSKI, F.F. Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 6:337-344, 2002.
- ANDERSON, S.H.; UDAWATTA, R.P.; SEOBI, T. & GARRETT, H.E. Soil water content and infiltration in agroforestry buffer strips. Agrofor. Syst., 75:5-16, 2009.
- AZOOZ, R.H. & ARSHAD, M.A. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. Can. J. Soil Sci., 76:143-152, 1996.

- BESKOW, S.; MELLO, C.R.; COELHO, G.; SILVA, A.M. & VIOLA, M.R. Estimativa do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica com base em modelagem dinâmica e distribuída. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:169-178, 2009.
- BEVEN, K.J. & KIRKBY, M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24:43-69, 1979.
- BORSELLI, L.; TORRI, D.; POESEN, J. & SANCHIS, P.S. Effects of water quality on infiltration, runoff and interrill erosion processes during simulated rainfall. *Earth Surf. Proc. Land.*, 26:329-342, 2001.
- CAVIGLIONE, J.H.; FIDALSKI, J.; ARAÚJO, A.G.; BARBOSA, G.M.C.; LLANILLO, R.F. & SOUTO, A.R. Espaçamento entre terraços em plantio direto. Londrina, Instituto Agronômico do Paraná, 2010. 64p. (Boletim Técnico, 71)
- CHAPLOT, V. & POESEN, J. Sediment, soil organic carbon and runoff delivery at various spatial scales. *Catena*, 88:46-56, 2012.
- CHOW, V.T. *Handbook of applied hydrology*. New York, McGraw-Hill, 1964. 1418p.
- CUNHA, A.T. & WENDLAND, E. Uso de lisímetro para avaliação da infiltração em zona de afloramento da Formação Botucatu, na região de São Carlos - SP. *Águas Subter.*, 19:77-90, 2005.
- DALBIANCO, L. Variabilidade espacial e estimativa da condutividade hidráulica e caracterização físico-hídrica de uma microbacia hidrográfica rural. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2009. 115p. (Dissertação de Mestrado)
- DALBIANCO, L.; MINELLA, J.P.G.; REICHERT, J.M.; BARROS, C.A.P.; FONTANELA, E. & SOARES, J.C.W. Relações lineares entre a velocidade de infiltração básica e outras propriedades físico-hídricas do solo em uma bacia hidrográfica rural. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33., Uberlândia, 2010. Anais... Uberlândia, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. CD-ROM
- DAVIS, J. *Statistics and data analysis in geology*. New York, John Wiley & Sons, 1986. 646p.
- ENDALE, D.M.; SCHOMBERG, H.S.; FISHER, D.S. & JENKINS, M.B. No-till and curve numbers - a closer look. In: GEORGIA WATER RESOURCES CONFERENCE, 2011, Georgia. Proceedings... Georgia, University of Georgia, 2011. CD-ROM
- FIORIN, T.T. Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2008. 116p. (Tese de Doutorado)
- GAO, L. & SHAO, M. Temporal stability of soil water storage in diverse soil layers. *Catena*, 95:24-32, 2012.
- HILLEL, D.; KRENTOS, V.D. & STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. *Soil Sci.*, 114:395-400, 1972.
- HOLDEN, J. & BURT, T.P. Infiltration, runoff and sediment production in blanket peat catchments: Implications of field rainfall simulation experiments. *Hydrol. Process.*, 16:2537-2557, 2002.
- LANGHANS, C.; GOVERS, G.; DIELS, J.; CLYMANS, W. & van den PUTTE, A. Dependence of effective hydraulic conductivity on rainfall intensity: Loamy agricultural soils. *Hydrol. Process.*, 24:2257-2268, 2010.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294, 1985.
- LIMA, J.E.F.W.; SILVA, C.L. & OLIVEIRA, C.A.S. Comparação da evapotranspiração real simulada e observada em uma bacia hidrográfica em condições naturais de cerrado. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 5:33-41, 2001.
- MARENKO, J.A.; ALVES, L.M.; VALVERDE, M.C.; ROCHA, R.P. & LABORDE, R. Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais. Brasília, Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas, Diretoria de Conservação da Biodiversidade, 2007. 77p. (Relatório, 5)
- MENDIONDO, E.M. & TUCCI, C.E.M. Escalas hidrológicas. II: diversidades de procesos na bacia vertente. *R. Bras. Rec. Híd.*, 2:81-100, 1997.
- MINELLA, J.P.G.; MERTEN, G.H.; WALLING, D.E. & REICHERT, J.M. Changing sediment yield as an indicator of improved soil management practices in southern Brazil. *Catena*, 79:228-236, 2009.
- MISHRA, S.K. & SINGH, V.P. *Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology*. Dordrecht, Kluwer Academic, 2003. 536p.
- MUNZ, M.; KRAUSE, S.; TECKLENBURG, C. & BINLEY, A. Reducing monitoring gaps at the aquifer-river interface by modelling groundwater-surface water exchange flow patterns. *Hydrol. Process.*, 25:3547-3562, 2011.
- NADAL-ROMERO, E. & REGÜÉS, D. Detachment and infiltration variations as consequence of regolith development in a Pyrenean badland system. *Earth Surf. Proc. Land.*, 34:824-838, 2009.
- PRUSKI, F.F.; GRIEBELER, N.P. & SILVA, D.D. Comparação entre dois métodos para a determinação do volume de escoamento superficial, *R. Bras. Ci. Solo*, 25:403-410, 2001.
- ROSE, C. *An introduction to the environmental physics of soil, water and watersheds*. Cambridge, Cambridge University Press, 2004. 442p.
- TASSI, R.; ALLASIA, D.G.; MELLER, A.; MIRANDA, T.C.; HOLZ, J. & SILVEIRA, A.L.L. Determinação do parâmetro CN para sub-bacias urbanas do arroio Dilúvio - Porto Alegre/RS. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL-SUDESTE, 1., Curitiba, 2006. Anais... Curitiba, Associação Brasileira dos Recursos Hídricos, 2006. CD-ROM
- THEISEN, G.; VERNETTI JR., F. & SILVA, J.J.C. Cultivo de soja em terras baixas em ano de El-niño. Disponível em: <<http://www.grupocultivar.com.br/site/content/artigos/artigos.php?id=865>>. Acesso em: 07 mar. 2012.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE - USDA-NRCS. Hydrologic soil groups. In: USDA-NRCS. National engineering handbook: Part 630. Washington, USDA-NRCS, USA, 2007.