



Filtros digitais para separação dos componentes do escoamento total e produção de sedimentos durante eventos chuvosos em bacias hidrográficas florestais embutidas⁽¹⁾.

José Miguel Reichert⁽²⁾; Miriam Fernanda Rodrigues⁽³⁾; Lilian Alessandra Rodrigues⁽⁴⁾; Jean Paolo Gomes Minella⁽⁵⁾; Rosane Barbosa Lopes Cavalcante⁽⁶⁾.

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e da Empresa Celulose Riograndense (CMPC).

⁽²⁾ Professor titular do Departamento de Solos; Universidade Federal de Santa Maria; Santa Maria, RS; E-mail: reichert@ufsm.br; ⁽³⁾ Doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Departamento de Solos; Universidade Federal de Santa Maria; Santa Maria, RS; E-mail: miriamf_rodrigues@yahoo.com.br; ⁽⁴⁾ Extensionista rural da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER/ASCAR); Candelária, RS; E-mail: larodrigues@emater.tche.br; ⁽⁵⁾ Professor do Departamento de Solos; Universidade Federal de Santa Maria; Santa Maria, RS; E-mail: jminella@gmail.com; ⁽⁶⁾ Pesquisadora, Celulose Riograndense (CMPC), Guaíba, RS; E-mail: rbcavalcante@cmpcrs.com.br.

RESUMO: O potencial preditivo dos modelos para a análise de processos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas pode ser aumentado com o uso de filtros digitais para a separação do escoamento total. Objetivou-se separar, digitalmente, o escoamento total em seus subcomponentes escoamento de base e superficial de bacias hidrográficas embutidas. O estudo foi realizado em duas bacias hidrográficas embutidas ocupadas com eucalipto, em Eldorado do Sul-RS. O monitoramento da vazão, da concentração de sedimentos em suspensão e da precipitação foi realizado em duas seções (16/02/11-30/06/13). A vazão foi submetida à separação do escoamento por meio dos filtros digitais propostos por Eckhardt (2005) (EC) e Lyne & Hollick (1979) (LH). Para eventos, além dos filtros, foi utilizado o método gráfico de declividade constante (DC), e também foi determinada a produção de sedimentos. Os filtros EC e LH estimaram que 50% e 91% do escoamento total foram proporcionados pelo escoamento de base, respectivamente. O escoamento de base para eventos foi 100% com o filtro LH; de 47% a 91% com o filtro EC e de 43 a 70% com o método gráfico DC, para a bacia e para a sub-bacia. O uso de distintas técnicas de separação do escoamento pode proporcionar um volume de escoamento superficial distinto para uma mesma produção de sedimentos. Os filtros digitais recursivos são adequados para a separação do escoamento total de séries contínuas, enquanto na escala sub-diária e de eventos o método gráfico é mais representativo.

Termos de indexação: escoamento superficial, escoamento de base, erosão.

INTRODUÇÃO

O aumento expressivo de áreas florestadas com eucalipto no Rio Grande do Sul deve-se

principalmente à demanda por produtos de origem florestal. Contudo, os impactos dessas florestas nos processos erosivos, de degradação da água e do solo, têm sido pouco explorados.

A geração e a propagação do escoamento (superficial e de base) em áreas com eucalipto, devido à complexidade hidrológica, também geram incertezas sobre os processos erosivos dominantes em bacias hidrográficas. Dentre os processos hidrológicos, o escoamento superficial é o principal gerador da erosão hídrica.

A separação e quantificação dos escoamentos superficial e de base são, geralmente, realizadas por meio de métodos gráficos, o que leva à subjetividade dos resultados. Modelos matemáticos que utilizam o volume de escoamento para a predição de processos hidrossedimentológicos, como o Soil & Water Assessment Tool (SWAT), podem ter o seu potencial preditivo reduzido e gerar estimativas menos representativas dos processos que ocorrem na bacia hidrográfica quando a quantificação dos componentes do escoamento é realizada de forma inadequada.

O modelo SWAT tem sido utilizado para a simulação e representação de processos hidrológicos e sedimentológicos na escala de bacia hidrográfica e pode auxiliar na compreensão do padrão do escoamento e de produção de sedimentos em áreas com florestas plantadas. O aprimoramento do modelo incluiu o uso de filtros digitais para a separação dos componentes do escoamento. Esses filtros consistem em algoritmos com parâmetros de ajuste referentes aos dados monitorados, e seu uso reduz a subjetividade na quantificação dos escoamentos e aumenta o potencial de representação dos processos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas.

A técnica dos filtros digitais recursivos consiste em filtrar o hidrograma de uma série de vazões, separando os sinais de alta frequência (escoamento

superficial) dos de baixa frequência (escoamento de base) (Nathan & McMahon, 1990). Eckhardt (2005) verificou elevado potencial para separação do escoamento utilizando filtros digitais que relacionam os escoamentos superficial e de base (**Equação 1**).

$$y_k = f_k + b_k \quad (1)$$

em que: y é a vazão total ($m^3 s^{-1}$); f é o escoamento superficial ($m^3 s^{-1}$); b é a vazão de base ($m^3 s^{-1}$); k é o intervalo de tempo (s).

Diante do exposto, objetivou-se separar os componentes do escoamento total de bacias hidrográficas florestais embutidas por meio do método gráfico e da técnica de filtros digitais.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área em estudo, denominada como Bacia hidrográfica do horto florestal Terra Dura, pertencente à empresa Celulose Riograndense (CMPC), compreende duas bacias hidrográficas: a principal ($0,94 km^2$) e a sub-bacia embutida ($0,39 km^2$), ambas sob cobertura florestal e situadas na Bacia Hidrográfica do Rio Jacuí, em Eldorado do Sul, na região fisiográfica da Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil (**Figura 1**).

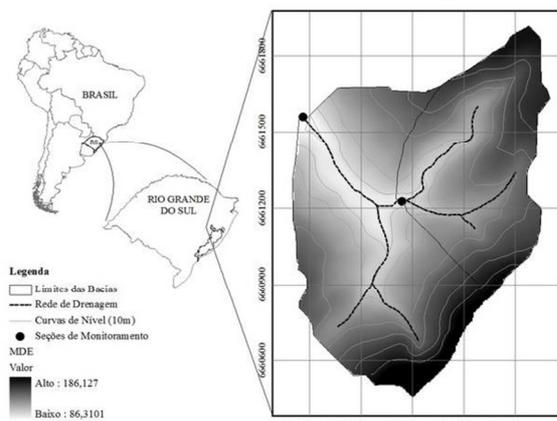


Figura 1 – Localização e caracterização do relevo da bacia e da sub-bacia hidrográfica do horto florestal Terra Dura, Eldorado do Sul-RS.

O clima da região, pela classificação climática de Köppen, é do tipo Cfa - subtropical úmido com verão quente. A precipitação média anual é igual a 1440 mm, com média mensal de 120 mm (Alvares et al., 2013). A erosividade média de longo período das precipitações para a região é de $5813 MJ ha^{-1} mm^{-1}$.

As classes de solos que ocorrem no local são Argissolos, Cambissolos e Planossolos (Costa et al., 2009).

O uso predominante do solo consiste no sistema de produção florestal, com povoamentos de

eucalipto implantados em 1989, 1990, 2001, 2004, 2005, 2007 e 2010, além de áreas de preservação permanente (APP) e estradas.

Monitoramento hidrossedimentométrico

O monitoramento hidrossedimentométrico foi realizado de 16/02/11 a 30/06/13, em seções de monitoramento automatizadas, compostas por sensores de vazão, concentração de sedimentos em suspensão e chuva. Os sensores foram instalados próximo aos vertedores triangulares das seções de monitoramento das bacias e os "dataloggers" foram programados para o registro de dados em intervalos fixos de 10 minutos.

A produção de sedimentos foi determinada por meio do somatório do produto entre a concentração de sedimentos transportados em suspensão e a vazão.

Separação do escoamento

Os filtros digitais recursivos propostos por Eckhardt (2005) (EC) (**Equação 2**) e por Lyne & Hollick (1979) (LH) (**Equação 3**) foram utilizados para a separação do escoamento de base para a série contínua obtida durante o período de estudo (16/02/11 a 30/06/13). Para a escala de eventos, a separação do escoamento foi realizada por meio dos filtros recursivos (Eckhardt, 2005; Lyne & Hollick, 1979) e pelo método gráfico da declividade constante (DC).

O filtro EC utiliza dois parâmetros para a estimativa do escoamento. O primeiro parâmetro é o coeficiente de depleção (a), o qual pode ser estimado utilizando-se curvas de depleção; o segundo parâmetro consiste na fração máxima que o escoamento de base pode ter sobre a vazão máxima em um longo período (BFI_{max}), sendo que os valores geralmente correspondem a 50% do valor total ($BFI_{max} = 0,5$).

$$b_k = \frac{(1 - BFI_{max}) ab_{k-1} + (1 - a) BFI_{max} y_k}{1 - a BFI_{max}} \quad (2)$$

em que: y é a vazão total ($m^3 s^{-1}$); f é o escoamento superficial ($m^3 s^{-1}$); b é a vazão de base ($m^3 s^{-1}$); k é o intervalo de tempo (s); a é o coeficiente de depleção; BFI_{max} é a fração máxima que o escoamento de base pode ter sobre a vazão máxima em um longo período (%).

O filtro LH foi utilizado procedendo-se a sua passagem três vezes e considerou-se o resultado final como a média do primeiro e segundo passo. O filtro pode ser usado em vários passos, cada vez se obtendo uma atenuação maior nas vazões, mas um resultado satisfatório pode ser encontrado entre o primeiro e segundo passos (Dalla Favera et al.,

2006). Esse filtro não possui embasamento físico e possui apenas um parâmetro empírico (a), que consiste no coeficiente de depleção. O coeficiente de depleção de 0,925 pode dar uma boa estimativa da vazão de base (Nathan & McMahon, 1990; Arnold et al., 1995).

$$b_k = a b_{k-1} + \frac{1-a}{2} (y_k + y_{k-1}) \quad (3)$$

em que: y é a vazão total ($m^3 s^{-1}$); f é o escoamento superficial ($m^3 s^{-1}$); b é a vazão de base ($m^3 s^{-1}$); k é o intervalo de tempo (s); a é o coeficiente de depleção.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O filtro LH considera que a maior parte do escoamento total para o período de estudo (16/02/11 a 30/06/13) é escoamento de base (91%), tanto para a bacia como para a sub-bacia, e 9% do escoamento total é proveniente do escoamento superficial; enquanto o filtro EC indicou que 50% do escoamento total consiste em escoamento de base, para a bacia e para a sub-bacia.

Os mesmos filtros foram utilizados por Dalla Favera et al. (2006), em que o uso do filtro EC indicou que 46% do escoamento total foram proporcionados pelo escoamento de base, resultado similar ao observado no presente estudo. Entretanto, os autores verificaram que o filtro LH indicou que 47% do escoamento total foram proporcionados pelo escoamento de base, o que difere do presente estudo, em que a maior parte do escoamento total foi proveniente do escoamento de base. Esses resultados indicam que o número de vezes em que o filtro deve ser passado pode ser diferente para cada bacia hidrográfica.

A separação do escoamento total de eventos para a bacia e para a sub-bacia, ao utilizar o filtro LH (Tabela 1 e Figura 2), indica que apenas uma pequena fração do escoamento total é proporcionada pelo escoamento superficial e a maior parte é proveniente do escoamento de base. O filtro EC indicou que, para o evento de chuva-vazão-sedimentos com ascensão e recessão íngremes (22/04/11), o escoamento de base é de 47% para a bacia e 76% para a sub-bacia; enquanto no evento composto, com ascensão e recessão sutis, o escoamento de base foi de 91% para a bacia e para a sub-bacia (Tabela 1 e Figura 2).

Ao utilizar o método DC, o escoamento de base foi de 70% do escoamento total para a bacia e de 47% para a sub-bacia para o evento de 22/04/11 e de 43 e 55% para a bacia e para a sub-bacia, respectivamente, no evento de 07/08/11. Esses resultados são similares aos observados para a série contínua desse estudo (Tabela 1 e Figura 2).

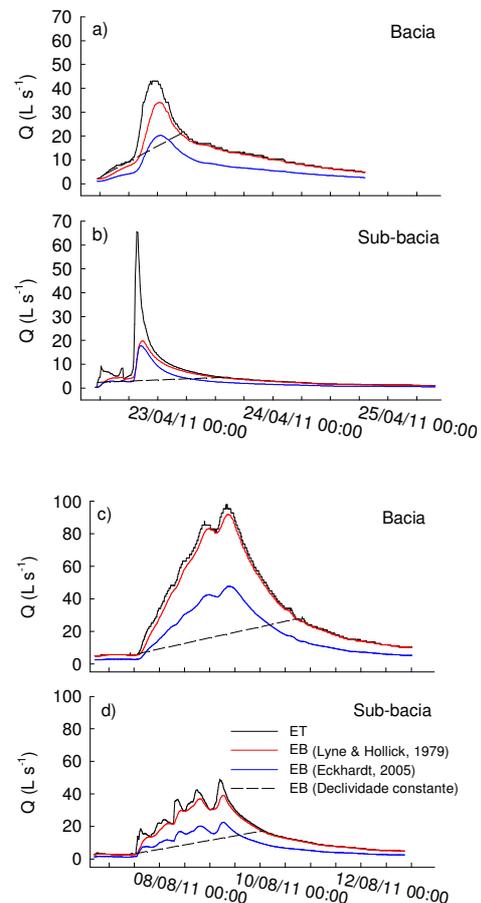


Figura 2 - Separação do escoamento para os eventos ocorridos em 22/04 e 07/08/2011, para a bacia (a e c) e para a sub-bacia (b e d). ¹ET é o escoamento total; EB é o escoamento de base.

Os filtros podem superestimar o escoamento de base durante eventos de chuva-vazão-sedimentos em comparação à separação para a série contínua, o que implica que a estimativa da energia proporcionada pelo escoamento superficial para o transporte e para a produção de sedimentos (Tabela 1) pode ser menor quando se utiliza a técnica de filtros digitais recursivos para a sua determinação, em comparação à separação do escoamento pelo método gráfico DC. Por exemplo, o evento ocorrido em 22/04/11 na bacia teve uma produção de sedimentos de 2,15 Mg km², gerada por um escoamento superficial de 811,2 m³ (método da declividade constante). Contudo, a mesma produção de sedimentos pode ter sido proporcionada por um escoamento de apenas 2,4 m³, ao considerar o filtro LH, ou de 1265,1 m³, com o filtro EC.

A separação do escoamento por meio de filtros digitais recursivos aplicadas em séries contínuas é

recomendada para a modelagem de processos hidrossedimentológicos, especialmente com o uso do modelo SWAT, pois melhora os resultados das simulações (Arnold et al., 1995; Arnold & Allen, 1999). Entretanto, para a escala de eventos e simulações sub-diárias, a separação dos escoamentos superficial e de base deve ser realizada pelo método gráfico.

CONCLUSÕES

A separação do escoamento total e do escoamento de base para séries contínuas de tempo, por meio de filtros digitais, mostra-se adequada e pode ser utilizada para a modelagem de processos hidrossedimentológicos. Contudo, a separação dos subcomponentes do escoamento total para eventos de chuva-vazão-sedimentos fornece uma estimativa de um volume menor de escoamento superficial em comparação à separação do escoamento pelo método gráfico da declividade constante. Isso implica numa estimativa de menor energia de escoamento superficial para uma elevada produção de sedimentos, ao utilizar a técnica dos filtros digitais. Assim, para a escala de eventos e simulações sub-diárias, a separação dos escoamentos superficial e de base deve ser realizada pelo método gráfico.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M. & SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, 22:711-728, 2013.

ARNOLD, J.G. & ALLEN, P.M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records. J. Am. Water Resour. As., 35:411-424, 1999.

ARNOLD, J.G.; ALLEN, P.M.; MUTTIAH, R. & BERNHARDT, G. Automated base flow separation and recession analysis techniques. Ground Water, 33:1010-1018, 1995.

COSTA, A.M.; CURI, N.; MENEZES, M.D.; ARAÚJO, E.F. & MARQUES, J.J. Levantamento detalhado de solos da microbacia hidrográfica do horto florestal Terra Dura (RS) e considerações sobre escalas de mapeamento. Ci. Agrotec., 33:1272-1279, 2009.

DALLA FAVERA, C.H.; PAIVA, R.C.D. & PAIVA, E.M.C.D. Separação do escoamento de base de séries históricas de vazão da bacia hidrográfica Cidade dos Meninos através da utilização de filtros digitais. In: XXI CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA e VI FEIRA DE PROTÓTIPOS, Ijuí, 2006. Anais, 2006.

ECKHARDT, K. How to construct recursive digital filters for base flow separation. Hydrol. Process., 19: 507-515, 2005.

LYNE, V. & HOLLICK, M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. I.E. Aust. Natl. Conf. Publ. 79/10, p.89-92, Inst. of Eng., Aust., Canberra, 1979.

NATHAN, R.J. & McMAHON, T.A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis. Water Resour. Res., 26:1465-1473, 1990.

Tabela 1 - Variáveis hidrossedimentológicas e componentes do escoamento total, determinadas com a utilização de filtros digitais, para os eventos ocorridos em 22/04 e 07/08/11, para a bacia e para a sub-bacia hidrográfica do horto florestal Terra Dura, Eldorado do Sul-RS.

Filtro digital	P ¹	Im _{1h}	ET	EB	ES	PS	ET	EB	ES	PS
			Bacia				Sub-bacia			
22/04/11										
DC			2685,0	1873,8	811,2		1413,1	669,8	743,2	
LH	96,42	39,60	2685,0	2682,6	2,4	2,15	1413,1	1412,5	0,6	3,73
EC			2685,0	1265,1	1419,9		1413,1	1069,9	343,2	
7/8/2011										
DC			19167,5	8260,5	10907,1		8506,9	4637,3	3869,6	
LH	107,78	16,18	19167,5	19164,7	2,9	12,54	8506,9	8505,6	1,3	2,41
EC			19167,5	17448,4	1719,1		8506,9	7706,6	800,3	

¹P é a precipitação total (mm); Im_{1h} é a intensidade máxima em uma hora (mm); ET é o escoamento total (m³); EB é o escoamento de base (m³); ES é o escoamento superficial (m³); PS é a produção de sedimentos (Mg km⁻²); DC é o método da declividade constante para a separação de escoamento; LH é o filtro digital recursivo proposto por Lyne & Hollick (1979); EC é o filtro digital recursivo proposto por Eckhardt (2005).