XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
Segurança Hídrica e Desenvolvimento Sustentável: desafios do conhecimento e da gestão
De 22 a 27 de novembro de 2015, Brasília – DF

UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL DE ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE VAZÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

Tomas Carlotto [1] & Pedro Luiz Borges Chaffe[2] & Roberto Valmir da Silva[3] & José Mario Vicensi Grzybowski[4]*

Resumo – Este trabalho apresenta uma ferramenta computacional de extração de coeficientes característicos de bacias hidrográficas a partir de análises de séries temporais de vazão. O objetivo é caracterizar bacias hidrográficas e a dinâmica das águas superficiais e subterrâneas durante períodos de estiagem ou diante de eventos de precipitação, com base em curvas de recessão. Os recursos desenvolvidos permitem determinar o início e fim de períodos de aumento e diminuição do escoamento total (Q) através da aplicação de diferenciação numérica e permite obter o coeficiente de recessão característico da bacia (α) pela criação de curva mestra de recessão (MRC) baseada na sobreposição das curvas de eventos individuais. O coeficiente de recessão característico da MRC possibilita a caracterização da bacia hidrográfica em função da dinâmica do escoamento subterrâneo e também é utilizado para a aplicação de filtros de separação de hidrogramas e cálculo da constante de recessão (k), que é empregado como parâmetro para quantificar as contribuições superficiais e subterrâneas que compõe o escoamento total.

Palavras-Chave – Separação de hidrograma, curva de recessão, coeficiente de recessão, séries temporais

A COMPUTATIONAL TOOL FOR TIME SERIES ANALYSIS OF RIVER DISCHARGE AND CHARACTERIZATION OF WATERSHEDS

Abstract – This paper presents a computational tool for extracting characteristic coefficients of watersheds from the analysis of time series of river discharge. The goal is to characterize watersheds and the dynamics of runoff and groundwater during periods of drought or before precipitation events, based on recession curves. It features resources for identifying periods of increased and decreased in the total flow (Q) through the application of numerical differentiation, thereby creating the master recession curve (MRC) by means of overlapped recession curves from the individual events and giving the characteristic recession coefficient of the basin (α). The characteristic recession coefficient of the MRC enables the characterization of the basin as a function of the dynamics of the groundwater flow and is also used for the application of flow separation filters and the calculation of the recession constant (k), which is used as a parameter to quantifying surface and groundwater contributions to the total flow.

Keywords – Hydrograph separation, recession curve, recession coefficient, time series

[1] Engenharia Ambiental. Universidade Federal da Fronteira Sul. Erechim - RS . Brasil. E-mail: thomas.carl@hotmail.com
[2] Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC, Florianópolis-SC. E-mail: pedro.chaffe@ufsc.br
[3] Engenharia Ambiental. Universidade Federal da Fronteira Sul. Erechim – RS. Brasil. E-mail: roberto.silva@uffs.edu.br
[4] Engenharia Ambiental. Universidade Federal da Fronteira Sul. Erechim – RS. Brasil. E-mail: jose.grzybowski@uffs.edu.br
* Autor correspondente. Email: thomas.carl@hotmail.com

INTRODUÇÃO

A maior parte dos estudos de caracterização de bacias hidrográficas requerem conhecimentos detalhados de séries temporais de vazões o que geralmente exige a identificação dos períodos de ascensão ocasionados pela ocorrência de precipitações e dos períodos de recessão que ocorrem durante a estiagem, tendo em vista que estas duas fases do escoamento exibem o comportamento característico da bacia hidrográfica frente a diferentes condições naturais.

Para caracterizar uma bacia, os períodos de recessão são bastante estudados, pois é nesta fase do escoamento que ocorrem as situações mais críticas no que se refere à gestão dos recursos hídricos e também por estar associado à capacidade de infiltração do solo. Para entender como a bacia se comporta em períodos de recessão são realizados diversos estudos que visam à determinação da constante de recessão (k) e do coeficiente de recessão (α). Neste sentido vários trabalhos exploram diferentes métodos de determinação do coeficiente de recessão (α) (Tallaksen (1995), Merkel (2014), Fenicia et al. (2005)), em que conhecimentos detalhados das séries temporais de vazões são fundamentais.

Quando as séries temporais de vazões são muito extensas, os procedimentos manuais com base em observações dos dados tornam-se processos cansativos e muitas vezes inviáveis, obrigando que os estudos sejam feitos de forma simplificada com adoção de poucos eventos para representar a série completa. Isso reduz a representatividade do estudo, podendo gerar interpretações equivocadas. Diante desta problemática, a utilização de métodos automatizados de identificação de eventos torna-se de grande utilidade, pois possibilita a realização de estudos detalhados de séries extensas de vazões de forma otimizada. Neste contexto, desenvolveu-se um método automatizado de identificação de eventos baseado na aplicação dos conceitos de aproximação diferencial com a finalidade de obter os períodos de recessão para toda a série de dados.

A identificação dos períodos de recessão permite explorar métodos de elevada representatividade para a realização de análises das recessões e das recargas das águas subterrâneas como forma de caracterizar bacias hidrográficas (Tallaksen (1995)). Para a realização destas análises desenvolveu-se uma técnica de montagem de curva mestra de recessão (MRC) utilizando-se da ideia de sobreposição das curvas de recessão de cada evento para criar uma única curva que possa representar o comportamento geral das recessões para toda a série de dados. Na literatura trabalhos como os de Beven (1997) e Merkel et al. (2014) também utilizam métodos baseados em sobreposição de curvas de recessões para a criação da MRC com posterior determinação do coeficiente de recessão (α). Este procedimento justifica-se, pois quando o coeficiente de recessão é obtido pela MRC tem-se um coeficiente característico da bacia que pode ser usado para estimar a capacidade do escoamento subterrâneo em manter os cursos de água durante períodos de estiagem.

O coeficiente de recessão (α) é útil para caracterizar bacias hidrográficas e também para estabelecer parâmetros de entrada para filtros numéricos de separação de escoamentos que são elaborados com base em formulações matemáticas que consideram o comportamento físico do sistema, e se destacam por permitirem a obtenção de respostas rápidas e aceitáveis. A separação dos escoamentos permite fazer comparações entre os quantitativos dos escoamentos superficiais e subterrâneos e extrair o índice de fluxo de base (BFI) importante para estimar a recarga das águas subterrâneas. Separação de escoamentos usando filtros numéricos (Lyne e Hollick (1979), Eckhardt (2005), Chapman (1991), Arnold (1999), Furey (2003)) pode ser utilizada para substituir os métodos empíricos de testes com o uso de traçadores, (McGuire; McDonnell (2006) e Weiler (2003)) em situações onde a realização de testes físicos é inviável. Para aplicação dos filtros numéricos de separação de escoamentos utiliza-se o coeficiente de recessão (α) extraída da MRC

para o cálculo dos parâmetros de entrada. Este procedimento mostra-se aplicável para determinar as componentes superficiais e subterrâneas da vazão total em rios com base nas características da bacia hidrográfica estudada.

Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma ferramenta computacional de caracterização de bacias hidrográfica, para estudar séries extensas de vazões de forma automatizada. Os recursos da ferramenta podem ser aplicados por meio de interfaces gráficas de usuário produzidas em software MATLAB versão R2013a.

METODOLOGIA

Com o objetivo garantir a agilidade na aplicação dos recursos computacionais, criou-se um conjunto de funções inter-relacionadas por meio de uma base de dados que faz o armazenamento dos dados numéricos que serão utilizados durante os processos desempenhados pelas funções de processamento e análise. A base de dados também recebe os resultados das simulações, favorecendo o compartilhamento simultâneo de informações entre as funções, conferindo maior agilidade ao processo reduzindo significativamente a necessidade de intervenções manuais. As funções computacionais foram agrupadas de acordo com as tarefas que realizam em: módulo 1 (aplicação de método de aproximação diferencial para a seleção de eventos, ascensões e recessões), módulo 2 (faz a aplicação de técnica de montagem de curva mestra de recessões (MRC)) e módulo 3 (aplicação de filtros numéricos de separação de escoamentos). O processo metodológico consiste na aplicação sequencial dos três módulos, que são apresentados a seguir. Para aplicação da metodologia proposta utilizou-se o software MATLAB versão R2013a.

Módulo 1: método de aproximação diferencial para identificação de eventos (ascensões/recessões)

O método de identificação de eventos por aproximação diferencial consiste na aplicação de derivação na série temporal de vazões com o objetivo de identificar os momentos de início e fim das ascensões e de inicio e fim das recessões, assumindo que o período entre o início da ascensão e o final da recessão corresponde a um evento completo. Geralmente, quando se pretende aplicar um método de derivação com a finalidade de determinar o instante em que as taxas de variação dos valores de vazão são positivas ou negativas, o principal problema enfrentado é a ocorrência de flutuações (ruídos) nos dados coletados. Por isso, sugere-se a utilização de um filtro de ruídos (ou equivalente) para suavizar os dados da série temporal de vazões. Neste trabalho, utilizou-se uma média móvel de 3ª ordem, que pode ser aplicada mais de uma vez na série de dados, até que a curva torne-se satisfatoriamente suave para permitir a aplicação da derivação, com o intuito de encontrar os intervalos que delimitam os períodos de crescimento (ascensão) e decrescimento (recessão) das vazões ao longo do tempo e permitindo que após a delimitação dos eventos seja possível trabalhar tanto com os dados suavizados quanto com os dados originais (brutos) sem nenhuma perda de informação.

Para iniciar o processo de seleção e montagem dos eventos, assume-se um parâmetro para indicar qual a variação mínima entre os valores iniciais e finais das ascensões para classificá-las como ascensões pertencentes a eventos válidos. O mesmo é aplicado para as recessões. Na sequência, é iniciado o processo de junção das curvas, em que unem-se as curvas cujos valores máximos estejam com uma diferença mínima tanto entre as vazões quanto entre as posições no eixo do tempo, o que indica que elas pertencem a um único evento. Este processo é aplicado a toda a série temporal de dados resultando na identificação dos eventos e dos períodos de ascensão e de recessão que a compõe.

Módulo 2: método de criação da curva mestra de recessões (MRC)

Para o desenvolvimento do método de criação de curva mestra de recessão, utilizou-se a ideia de sobreposição das curvas de recessão de cada evento para criar uma curva única que possa representar o comportamento geral das recessões de toda a série de dados. Na literatura, trabalhos como os de Beven (1997) e Merkel *et al.* (2014) também utilizam métodos baseados em sobreposição de recessões para a criação da curva mestra de recessão com posterior determinação do coeficiente de recessão. Neste trabalho desenvolveu-se um método automatizado para executar o processo de sobreposição de curvas, em que o resultado final é a curva mestra de recessão (MRC). Após a finalização do processo automático há a possibilidade de edição manual para corrigir possíveis imperfeições da MRC. As etapas de execução do método são: seleção das curvas de recessão identificadas no módulo 1; ordenamento das recessões pela ordem crescente de seus valores mínimos; união das curvas de recessão em que cada curva é deslocada horizontalmente até unir-se ao ponto mínimo da curva vizinha e para finalizar a MRC formada entra em modo de edição possibilitando que pequenos problemas possam ser corrigidos.

Módulo 3: filtros numéricos de separação de escoamentos

Este módulo permite avaliar três formulações de filtros numéricos de separação de escoamentos, sendo estas definidas como: Filtro de Lyne e Hollick (1979) (Equação 1), filtro de Chapman (1991) (Equação 2) e filtro de Eckhardt (2005) (Equação 3).

$$b_i = a.b_{i-1} + \frac{(1-a)}{2}.(Q_i + Q_{i-1}) \quad (1)$$

$$b_i = \frac{a}{2-a}.b_{i-1} + \frac{1-a}{2-a}.Q_i \quad (2)$$

$$b_i = \frac{(1-BFI_{max}).a.b_{i-1}+(1-a).BFI_{max}.Q_i}{1-a.BFI_{max}} \quad (3)$$

Onde: a é o parâmetro que representa o decrescimento exponencial das vazões nos períodos de recessão (Equação 4).

$$a = e^{\frac{-\Delta t}{k}} \quad (4)$$

Em que k é a constante de recessão que pode ser extraída da MRC usando a seguinte equação:

$$k = \frac{-\Delta t}{\ln\left(\frac{Q_{(t+\Delta t)}}{Q_t}\right)} \quad (5)$$

Para representar a série completa de dados de vazão a constante de recessão k é obtida considerando o intervalo entre o início e o fim do período (Δt) determinado pela curva mestra de recessão (MRC) característica da bacia hidrográfica; b_i é o escoamento de base ou subterrâneo no tempo i; Q_i é o escoamento total no tempo i; Q_{i-1} é o escoamento total no tempo i-1 e BFI_{max} (índice de fluxo de base máximo) é um parâmetro limitante do fluxo de base que pode estar relacionado a características geológicas e de cobertura do solo. Para aplicar estes filtros considera-se que $b_i \leq Q_i$,

quando esta condição não for satisfeita assume-se $b_i = Q_i$. O índice de fluxo de base (BFI) é obtido pela relação entre o escoamento de base (b_i) e o escoamento total (Q_i), (Equação 6).

$$BFI = \frac{\sum_{i=1}^{N} b_i}{\sum_{i=1}^{N} Q_i} \quad (6)$$

Onde N é a quantidade de dados monitorados.

A metodologia proposta originou uma ferramenta computacional de fácil operacionalização que conta com interfaces gráficas de usuário (Figura 1) para cada módulo desenvolvido. A ferramenta possibilita o acesso direto aos diferentes módulos e permite a visualização, análise e o salvamento dos resultados.

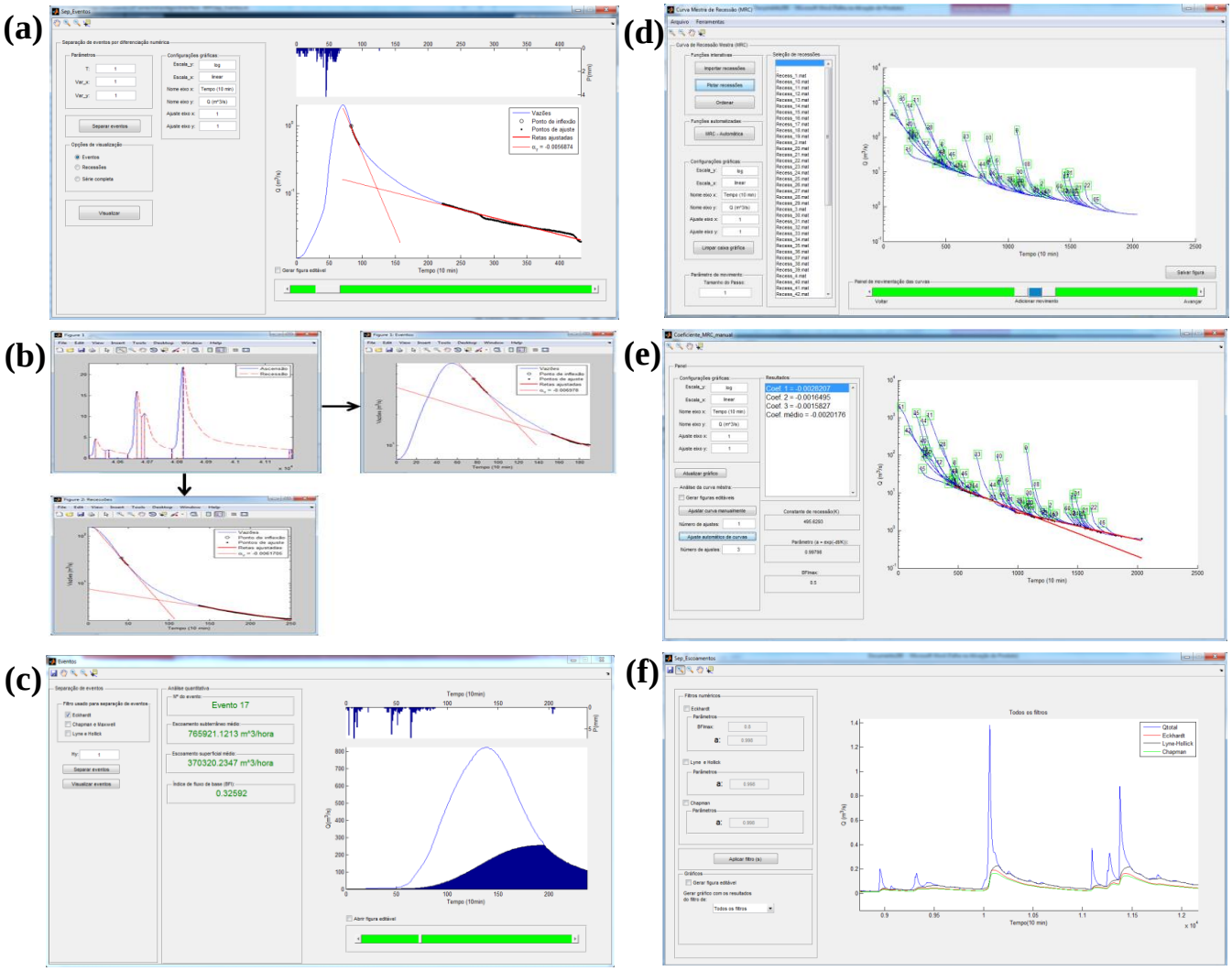

Figura 1 – Interfaces que compõe a ferramenta de análise de séries temporais de vazão. (a) Interface de aplicação do método de aproximação diferencial para identificação de eventos. (b) Saídas gráficas do método de aproximação diferencial. (c) Interface de análise de eventos por filtros numéricos. (d) Interface de montagem de MRC. (e) Interface de análise de MRC. (f) Interface de aplicação de filtros numéricos de separação de escoamentos.

As interfaces foram produzidas com objetivo de reunir o conjunto de algoritmos desenvolvidos durante o estudo em um recurso acessível e prático que permita uma aplicação rápida e com poucas intervenções manuais. Logo a entrada principal é a série temporal de vazões e precipitações e após o início do processo, todo o fluxo de dados é realizado automaticamente, exigindo poucas entradas de parâmetros.

ESTUDO DE CASO

A metodologia proposta foi aplicada para estudar as vazões em dois pontos de monitoramento distribuídos ao longo da bacia hidrográfica do Rio dos Bugres localizada no município de Rio Negrinho – SC (Figura 2 - (a)). Os dois pontos foram escolhidos entre outros 11 pontos monitorados por Grison (2013). A seguir são apresentadas as curvas mestras de recessão obtidas a partir das séries temporais de vazão monitoradas nos pontos RB1 e RB11 (Figura 2, (b) e (c)).

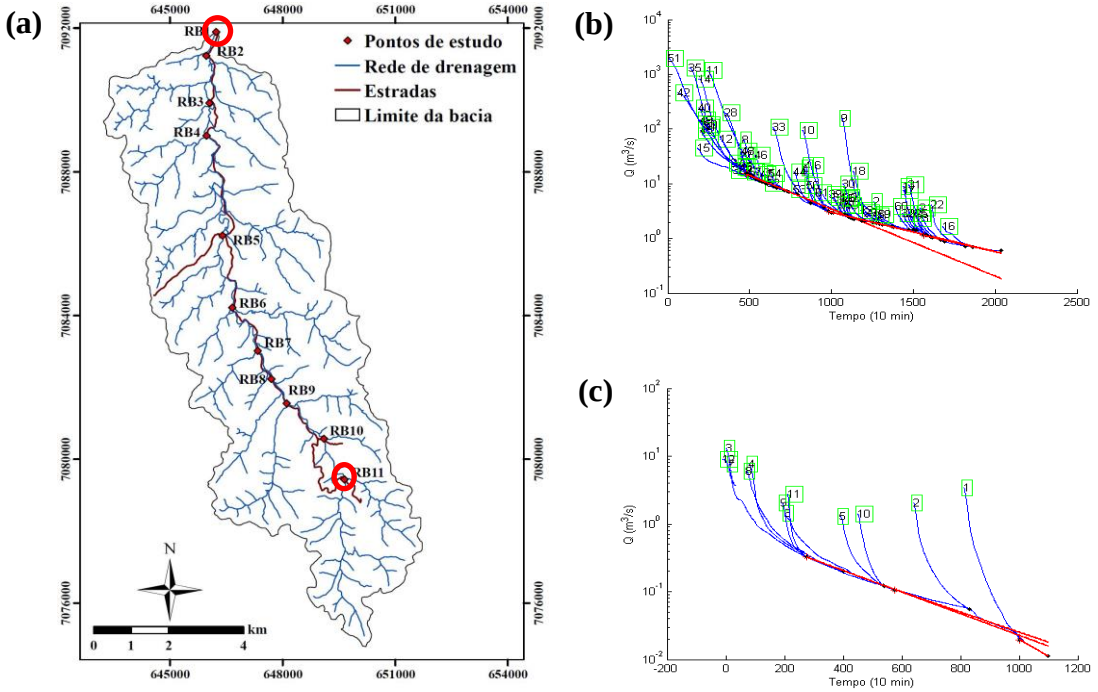

Figura 2 – MRC determinadas em dois pontos da Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres. (a) Localização dos pontos RB1 e RB11 de monitoramento das vazões (GRISON, 2013), (b) curva mestra de recessão para o ponto RB1 e (c) curva mestra de recessão para o ponto RB11. O coeficiente angular obtido das retas ajustadas (em vermelho) fornecem os coeficientes de recessão α.

Ajustou-se três retas que tangenciam cada MRC, nos trechos em que podem-se verificar padrões de recessão. Este procedimento foi realizado buscando determinar a melhor aproximação do comportamento das recessões ao longo de todo o período de domínio da MRC. Com base nos valores numéricos que caracterizam o comportamento das recessões nos pontos RB1 e RB11 (Tabela 1) e considerando os índices de fluxo de base (BFI) (Tabela 2) obtidos pela aplicação dos filtros numéricos de separação de escoamentos, pode-se verificar que os escoamentos nos trechos RB1 e RB11 são predominantemente superficiais visto que os BFI's indicam que os escoamentos de base apresentam taxas de contribuição inferiores à metade da vazão total na maioria dos casos.

Tabela 1 – Coeficientes característicos para os pontos RB1 e RB11 extraídos da MRC.

Pontos monitorados	α (dia^{-1})	α médio (dia$^{-1)}$	a
RB1	-0,406	-0,290	0,998
	-0,238		
	-0,228		
RB11	-0,529	-0,614	0,995
	-0,492		
	-0,822		

Tabela 2 – Índices de fluxo de base (BFI) calculados utilizando filtros numéricos

Pontos monitorados	Filtro numérico	BFI
RB1	Lyne e Hollick	0,449
	Chapman	0,347
	Eckhardt	0,348
RB11	Lyne e Hollick	0,599
	Chapman	0,463
	Eckhardt	0,464

De acordo com Collischonn e Tassi (2008), índices de fluxo de base inferiores a 0,5 indicam que as características de escoamento aproximam-se as de Rios perenes e aquíferos impermeáveis. Estas informações aliadas as das tabelas 1 e 2, permite-nos ter uma leitura aproximada das características da bacia frente à ocorrência de precipitações podendo indicar que aproximadamente 40% da água que escoa na bacia pode ser atribuída ao escoamento de base.

CONCLUSÕES

A ferramenta computacional de análise de séries temporais de vazão permite determinar os períodos de ascensão e de recessão necessários para estudar a intensidade com que fenômenos superficiais e subterrâneos se desenvolvem na bacia hidrográfica. Recursos de análise de escoamentos permitem a criação de curvas mestras de recessão (MRC) que evidenciam o comportamento das vazões durante períodos de estiagem e permitem a estimação do coeficiente de recessão característico da bacia hidrográfica. A ferramenta também proporciona a realização de estudos sem as simplificações comumente realizadas no tratamento de séries de dados extensas, e.g., a adoção de poucos eventos e o tratamento da série toda como um único evento. Desta forma, a ferramenta permite maior precisão na aplicação de filtros numéricos de separação de escoamentos e na determinação das componentes superficiais e subterrâneas da vazão total.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e à Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) por proporcionarem as condições necessárias para realização deste trabalho. Também agradecemos o Prof. Dr. Masato Kobiyama e o Prof. Dr. Fernando Grison pelo monitoramento e disponibilização dos dados de vazão utilizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

CHAPMAN, T. G. (1991). Comment on "Evaluation of Automated Techniques for Base Flow and Recession Analyses" by R. J. Nathan and T. A. McMahon. *Water Resources Research*, v. 27, n. 7, pp. 1783–1784.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. (2008). *Introduzindo hidrologia.* 6. ed. Porto Alegre, RS: IPH UFRGS, 2008. 274 p.

ECKHARDT, K. (2005). How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, v. 19, n. 1, pp. 507–515.

FENICIA, F.; SAVENIJE, H. H. G.; MATGEN, P.; PFISTER, L. (2005) Is the groundwater reservoir linear? Learning from data in hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, v. 2, pp. 1717–1755.

FUREY, P. R. (2003). Tests of two physically based filters for base flow separation. *Water Resources Research*, v. 39, n. 10.

GRISON, F. (2013). *Estudo da geometria hidráulica do Rio dos Bugres, no município de Rio Negrinho – SC.* Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), UFSC, Florianópolis - SC, 236 p.

JASSAS, H.; MERKEL, B. (2014). Estimating Groundwater Recharge in the Semiarid Al-Khazir Gomal Basin, North Iraq. *Water*, v. 6, pp. 2467–2481.

LAMB, R.; BEVEN, K. J. (1997). Using interactive recession curve analysis to specify a general catchment storage model. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 1, pp. 101–113.

MCGUIRE, K. J.; MCDONNELL, J. J. (2006). A review and evaluation of catchment transit time modeling. *Journal of Hydrology*, v. 330, pp. 543–563.

TALLAKSEN, L. M. (1995). A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*, v. 165, pp. 349–370.

WEILER, M. (2003). How does rainfall become runoff? A combined tracer and runoff transfer function approach. *Water Resources Research*, v. 39, n. 11, pp. 1–13.