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

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE BALANÇO HÍDRICO SAZONAL NA BACIA DO ALTO RIO NEGRO

Ana Clara Lazzari Franco[1] & Patrícia Kazue Uda[2] & Gabriella Queen[3] & Nadia Bernardi Bonumá[4]*

Resumo: O presente trabalho estudou o comportamento do balanço hídrico da bacia do alto rio Negro, por meio do método do balanço hídrico sazonal, desenvolvido por Kan (2005). A bacia localiza-se entre os estados de Santa Catarina e Paraná e possui clima subtropical úmido. Foi analisado o comportamento do balanço hídrico médio em escalas anual e mensal, bem como o balanço hídrico de anos secos e chuvosos. O balanço hídrico médio apresentou valores de 1522 mm.ano^{-1} para a precipitação, 696 mm.ano^{-1} para a vazão e a evapotranspiração estimada pelo método sazonal apresentou o valor médio de 812 mm.ano^{-1}. Para o ano mais seco da série de dados, a precipitação anual média na bacia foi de 934 mm.ano^{-1}, a vazão foi de 247 mm.ano^{-1} e a evapotranspiração estimada pelo método sazonal foi de 788 mm.ano^{-1}. Os elevados índices de evapotranspiração estimados evidenciam sua importância na gestão ambiental de recursos hídricos, especialmente em eventos extremos.
Palavras-chave: Balanço hídrico sazonal. Evapotranspiração. Bacia do alto rio Negro.

SEASONAL WATER BUDGET METHOD IN ALTO RIO NEGRO WATERSHED

Abstract: This paper aims to study the upper Negro river basin with the seasonal water budget method, developed by Kan (2005). The basin is situated between Santa Catarina and Paraná states with subtropical humid climate. The water budget average behavior was analyzed in annual and monthly scales, as also the water budget for typical rainy and dry years. The average water budget resulted values of 1522 mm.year^{-1} for precipitation, 696 mm.year^{-1} for runoff and 812 mm.year^{-1} for the evapotranspiration estimated by the seasonal water budget method. The analyzed dry year presented values of 934 mm.year^{-1} for precipitation, 247 mm.year^{-1} for runoff and 788 mm.year^{-1} for evapotranspiration. The high values of annual evapotranspiration express its importance for environmental resources management, especially in extreme events.
Keywords: Seasonal water budget method. Evapotranspiration. Upper Negro river basin.

[1] Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis/SC, e-mail: ana.franco@posgrad.ufsc.br
[2] Doutoranda do PPGEA, UFSC, e-mail: patricia.kazue@posgrad.ufsc.br
[3] Acadêmica do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC, e-mail: gdsqueen@gmail.com
[4] Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC, e-mail: nadia.bonuma@ufsc.br

INTRODUÇÃO

O gerenciamento dos recursos hídricos procura direcionar o uso racional e sustentável destes importantes recursos naturais, mantendo o controle dos seus usos e protegendo-os. A compreensão da disponibilidade hídrica constitui um importante subsídio para o gerenciamento dos recursos hídricos de uma região. A disponibilidade hídrica de uma bacia é claramente afetada pelo clima em situações de eventos extremos como, por exemplo, períodos de seca, onde a quantia de água disponível sofre razoável declínio, levando muitas vezes à necessidade de se desenvolver planos de emergência para suprir uma possível falta de água.

A quantificação dos componentes do ciclo hidrológico em uma determinada área pode ser realizada através do balanço hídrico, que corresponde à aplicação do princípio de conservação de massa em um determinado volume de controle, que pode ser uma bacia hidrográfica, um reservatório ou outro sistema delimitado artificialmente. Dentre as diversas variáveis do balanço hídrico, a precipitação e a vazão são as mais frequentemente medidas, com medições relativamente fáceis, em contrapartida, a evapotranspiração é de mais onerosa e difícil medição. Tucci, (1997); Brutsaert, (1982); Pereira, (2012).

Nesse contexto, Kan (2005) desenvolveu o método do Balanço Hídrico Sazonal, que permite a estimativa de valores de evapotranspiração e armazenamento em escala mensal. O método desenvolvido pela autora baseia-se na estimativa do armazenamento de água na bacia em períodos de recessão da vazão do rio, quando a precipitação é nula ou desprezível. Para aplicação do método, porém, é necessário que não exista nenhuma falha geológica no aquífero da bacia que permita fluxo significativo de água subterrânea.

Admitindo que a vazão de um rio em períodos de recessão é mantida exclusivamente pela água armazenada na bacia, a vazão (Q) é uma função não-linear do armazenamento de água na bacia (S):

$$Q = aS^b \quad (1)$$

Para um longo período de recessão, em que a precipitação é nula (P = 0), a autora menciona que o balanço hídrico é:

$$\frac{dS}{dt} = -(Q + E_t) \leq -Q \quad (2)$$

Em um longo período de recessão, em que a vazão diminui até atingir seu mínimo no último dia, pode-se supor que a evapotranspiração no último dia é insignificante, e a vazão é função do armazenamento, ou que o armazenamento é uma função inversa da vazão:

$$Q = f(S) \quad (3)$$

$$S = f^{-1}(Q) \quad (4)$$

Considerando que para longos períodos de recessão o aquífero comporta-se linearmente, e portanto b=1:

$$S = \frac{1}{a}Q \quad (5)$$

Para o caso linear, a constante a é equivalente ao inverso do tempo de recessão Tr:

$$\frac{dQ}{dt} \leq \frac{1}{Tr}Q \quad (6)$$

A equação integrada para Δt resulta em:

$$Q(t+\Delta t) \leq Q(t)e^{-\frac{\Delta t}{Tr}} \quad (7)$$

Substituindo $k = e^{-\Delta t/Tr}$ tem-se:

$$Q(t+\Delta t) \leq k.Q(t) \quad (8)$$

A constante k é determinada pela envoltória superior do gráfico de $Q(t)$ x $Q(t+\Delta t)$, que, por sua vez, é determinada pelo método da correlação. Após determinada a constante k e seu correspondente Tr, o armazenamento no final do período de recessão pode ser calculado através da equação (5). Em seguida, pode-se calcular a evapotranspiração média do período compreendido entre dois finais consecutivos de períodos de recessão através da equação (9), a seguir.

$$\frac{S_f - S_i}{\Delta t} = \overline{P_s} - \overline{Q_s} - \overline{ET_s} \quad (9)$$

Onde $\overline{P_s}$ é a precipitação média sazonal em mm dia^{-1}, $\overline{Q_s}$ é a vazão média sazonal em mm dia^{-1} e $\overline{ET_s}$ é a evapotranspiração média sazonal em mm dia^{-1}. S_i e S_f correspondem ao armazenamento (mm dia^{-1}) do primeiro e do último dia do período de recessão no intervalo de tempo (Δt) irregular.

A bacia hidrográfica do alto Rio Negro (3453 km^2) localiza-se no Planalto Norte Catarinense e no Primeiro Planalto Paranaense. Esta bacia possui intenso desenvolvimento de atividades agrícolas e florestais, sendo de fundamental importância o conhecimento da evapotranspiração real, indispensável no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, uma vez que, juntamente com outros fatores, determina as disponibilidades e os déficits hídricos. Assim, o presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento do balanço hídrico da bacia do alto rio negro, por meio do método do balanço hídrico sazonal.

ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do alto Rio Negro encontra-se distribuída nos estados de Santa Catarina, no Planalto Norte Catarinense, e Paraná, no Primeiro Planalto Paranaense, entre as longitudes 49°55'15"W e 48°56'55"W e latitudes 25°55'06"S e 26°42'16"S possuindo uma área de drenagem aproximada de 3453 km². A economia da região encontra-se fortemente estabelecida nos setores moveleiro e madeireiro, além da participação da agricultura.

Diversos estudos já foram realizados na região, de modo a compreender melhor sua dinâmica hidrológica, dentre os quais Souza *et al.* (2009) estudaram a aplicação do modelo SWAT como ferramenta de gestão de recursos hídricos, mais precisamente na concessão de outorgas na bacia do altíssimo rio Negro; Lino *et al.* (2007) estudaram a relação dos sólidos em suspensão com a

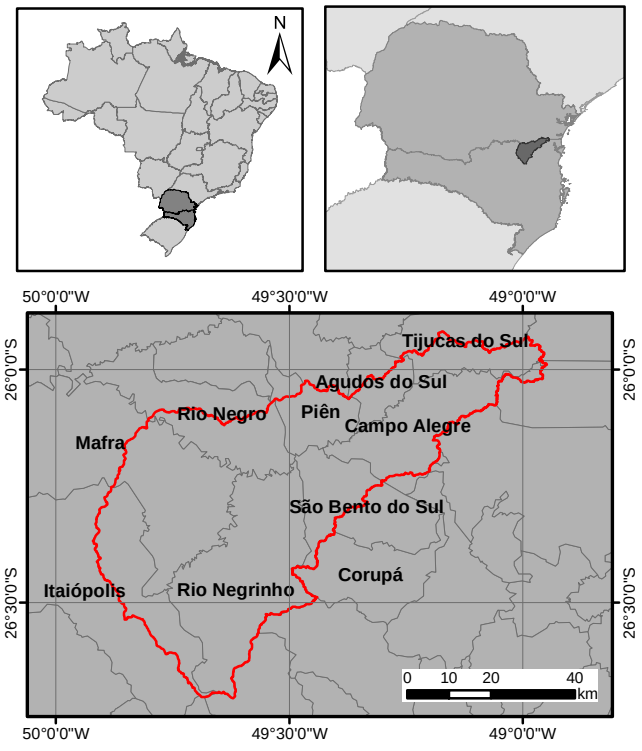

Figura 1: Localização da área de estudo.

vazão e precipitação na região da bacia do alto rio Negro; Uda (2012) avaliou a evapotranspiração real da bacia por meio da aplicação do modelo SEBAL, e Giglio (2010) e Goerl (2010) estudaram as inundações no município de Rio Negrinho.

Segundo a classificação climática de Köppen, a região é de clima Cfb, clima temperado com a temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C, constantemente úmido, sem estação seca definida, com verão fresco com temperatura média do mês mais quente inferior a 22°C EMBRAPA, (2012).

A altitude na bacia varia de 780 m, no ponto do exutório, até 1.519 m, no ponto onde se encontra a nascente do rio principal, na área mais acidentada da bacia. A altitude média da bacia é 885 m e 80% da área da bacia se encontra em altitudes de 780 a 1.215 m.

MATERIAIS

Para análise e compreensão da dinâmica da precipitação da bacia, foram utilizadas as séries históricas de chuva, obtidas no site d a Agência Nacional de Águas (ANA) por meio da plataforma online Hidroweb, disponível para acesso em <http://hidroweb.ana.gov.br>. As localizações das estações escolhidas, bem como o período de dados disponível, podem ser verificadas na Figura 2, e suas descrições se encontram na Tabela 1. No total foram selecionadas 10 estações, sendo 5 dentro da bacia, uma no seu exutório e as demais em suas proximidades. A estação fluviométrica utilizada no estudo encontra-se junto ao exutório da bacia e possui dados disponíveis desde o ano de 1930.

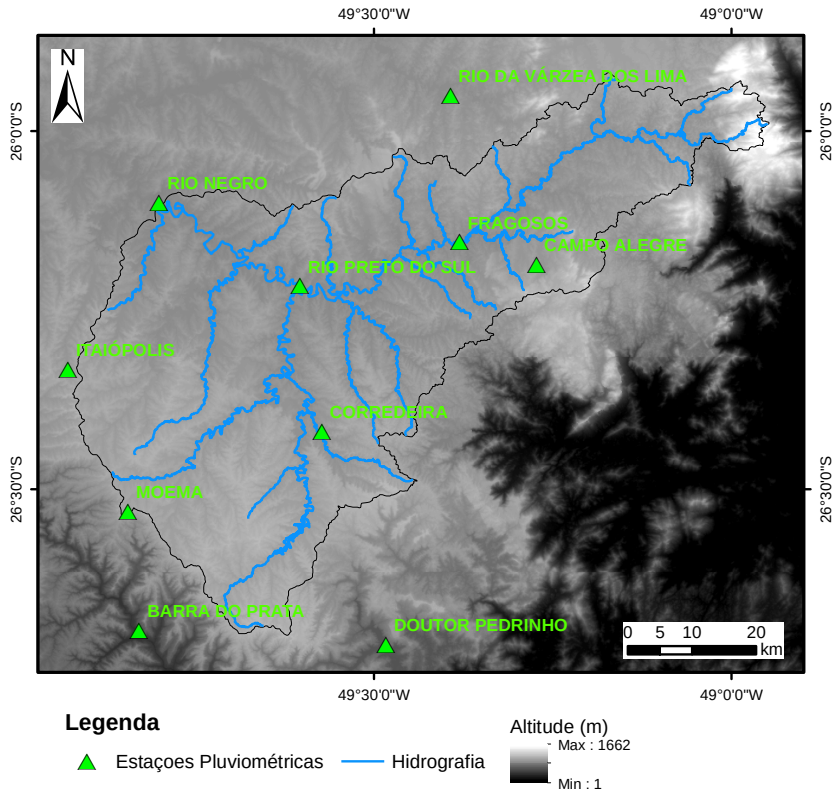

Figura 2: Localização das estações pluviométricas utilizadas no estudo e hipsometria da região.

Tabela 1: Características das estações utilizadas no estudo.

Código	Nome	Dados disponíveis desde	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Operador	Tipo
2549003	Rio da Várzea dos Lima	1/9/1940	-26,0	-49,4	810	ANA	P
2649006	Rio Negro	1/12/1922	-26,1	-49,8	770	COPEL	P
2649016	Rio Preto do Sul	1/1/1951	-26,2	-49,6	780	ANA	P
2649017	Doutor Pedrinho	1/12/1953	-26,7	-49,5	250	ANA	P
2649018	Fragosos	1/5/1967	-26,2	-49,4	790	COPEL	P
2649054	Moema	1/7/1976	-26,5	-49,8	950	ANA	P
2649055	Corredeira	1/7/1976	-26,4	-49,6	750	ANA	P
2649056	Itaiópolis	1/7/1976	-26,3	-49,9	990	ANA	P
2649057	Campo Alegre	1/7/1976	-26,2	-49,3	870	ANA	P
2649058	Barra do Prata	1/11/1977	-26,7	-49,8	450	ANA	P
65100000	Rio Negro	1/5/1930	-26,1	-49,8	766	COPEL	F

MÉTODOS

O período de dados estudado compreende os anos de 1967 a 2007, período escolhido de acordo com a disponibilidade de dados de chuva e vazão. Para cálculo do balanço hídrico pelo método do Balanço Hídrico Sazonal, proposto por Kan (2005), a precipitação média diária para a bacia foi estimada através do método dos polígonos de Thiessen, utilizando as estações pluviométricas listadas na Tabela 1, com auxilio de um sistema de informações geográficas.

A aplicação do método resulta em valores de evapotranspiração para intervalos de tempo irregulares, os quais devem ser transformados em valores para intervalos de tempo regulares. A autora não recomenda o uso do método para intervalos menores que um mês. Para transformação dos valores de intervalos irregulares para intervalos mensais utiliza-se a média ponderada dos valores de evapotranspiração pelo número de dias de cada período Δt.

$$\overline{ET_i} = \frac{n_e\overline{ET_{se}}+n_c\overline{ET_{sc}}+n_d\overline{ET_{sd}}}{n_e+n_c+n_d} \quad (10)$$

Onde $\overline{ET_i}$ é a evapotranspiração média do mês i; $\overline{ET_{se}}$, $\overline{ET_{sc}}$ e $\overline{ET_{sd}}$, são as estimativas sazonais situadas à esquerda, centro e direita dos limites do mês i, cujos comprimentos totais em dias são m_e, m_c e m_d. Os termos n_e, n_c e n_d são os comprimentos em dias dentro do mês de ocorrência de $\overline{ET_{se}}$, $\overline{ET_{sc}}$ e $\overline{ET_{sd}}$, respectivamente.

Neste estudo, a autora considera que o período de recessão compreende o número de dias consecutivos em que a precipitação é praticamente nula e a vazão do rio é decrescente. Para determinação do período de recessão a autora estabeleceu alguns critérios empíricos, que foram aplicados também na presente análise:

- Aceita-se Δt entre 15 e 60 dias, se $Q_f \leq 1{,}0$ mm.dia^{-1};
- Somente nos casos em que Δt é > 60 dias, admite-se $Q_f \leq 2{,}0$ mm.dia^{-1}.

Para obtenção de um número razoável de períodos de recessão no período compreendido pelos dados disponíveis, optou-se por utilizar períodos de recessão com pelo menos 12 dias, e vazão do último dia de recessão menor ou igual a 1,0 mm.dia^{-1}, visto que não foram identificados períodos de recessão com 60 dias ou mais.

Após identificação de todos os períodos de recessão, o coeficiente k foi encontrado através do método de regressão linear, proposto pela mesma autora, com auxílio da equação (8). Com o coeficiente k determinado, calcula-se o armazenamento para cada final de período de recessão através da equação (5). Na sequência, o balanço hídrico foi calculado através da equação (9), onde o termo referente a evapotranspiração foi estimado através das demais componentes da equação. Desse modo, ao final do processo, tem-se uma estimativa do balanço hídrico para períodos referentes àqueles compreendidos entre dois finais de períodos de recessão determinados. A transformação destes valores em valores correspondentes a intervalos mensais foi realizada com auxílio da Equação (10).

Por fim, foram analisados os dados anuais de dois anos atípicos: um chuvoso (1990) e um seco (2006), para verificação do comportamento anual das componentes do ciclo hidrológico.

RESULTADOS

Neste estudo a inclinação da envoltória superior (*k*), para períodos de recessão com mais de 11 dias, foi igual a 0,974. Através da relação entre *k* e *Tr*, obteve-se *Tr* = 38,1 anos, sendo a constante *a* por sua vez o inverso de *Tr*, ou seja, *a* = 0,026.

Os valores encontrados correspondem inicialmente a períodos sazonais, sendo interpolados para intervalos mensais com auxílio da equação (10). Para os valores mensais encontrados foram calculadas as médias mensais e anual, da série histórica, apresentadas na Tabela 2.

O método do balanço hídrico sazonal apresenta um comportamento sazonal da evapotranspiração ao longo do ano, tendo os meses de abril a agosto uma evapotranspiração entre 59 e 67 mm.mês^{-1}, e os meses entre setembro e março 65 a 74 mm.mês^{-1}, estando a máxima em 74 mm.mês^{-1} para o mês de janeiro, e a mínima em 59 mm.mês^{-1} para o mês de julho. Como é possível observar pela Figura 4, apesar de os valores de evapotranspiração para os meses de verão serem mais elevados que nos meses de inverno, a amplitude máxima é de apenas 25 mm (ET de janeiro – ET de julho). Isto, em adição aos valores de precipitação média mensal e ao fato de a ET ser superior a 50% na maioria dos meses do ano, evidencia o clima da região, caracterizado com Cfb, constantemente úmido, sem estação seca definida.

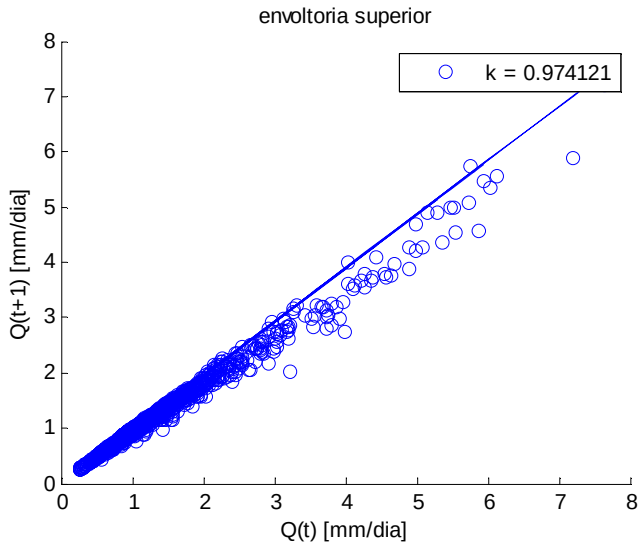

Figura 3: Determinação do coeficiente k pela envoltória superior.

Tabela 2: Balanço hídrico sazonal para a bacia do alto rio Negro.

Mês	Precip.	Vazão (mm.mês^{-1})	ET	Vazão %	ET %
Janeiro	178	71	74	40	42
Fevereiro	159	61	68	38	43
Março	122	56	73	46	60
Abril	86	44	67	51	78
Maio	111	51	66	46	59
Junho	108	55	62	51	57
Julho	115	60	59	52	51
Agosto	94	55	61	59	65
Setembro	133	61	65	46	49
Outubro	145	72	73	50	50
Novembro	121	55	72	45	60
Dezembro	150	56	72	37	48
Total	1522	696	812	46	53

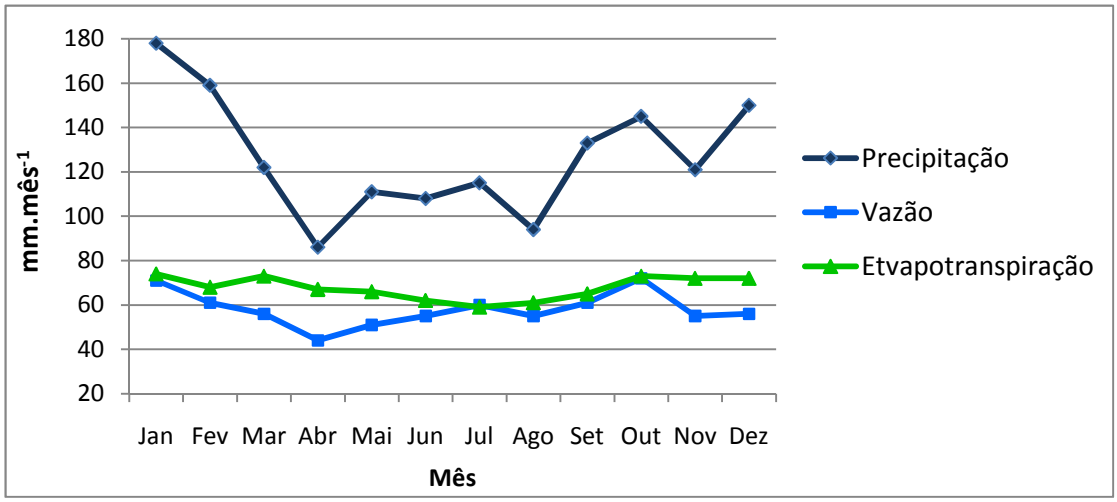

Figura 4: Balanço hídrico sazonal para a bacia do alto rio Negro.

A evapotranspiração média anual tem valor de 812 mm.ano^{-1}, sendo a componente de maior magnitude no balanço hídrico da bacia do alto rio Negro, correspondendo a 53%. Já a vazão média anual possui valor de 696 mm.ano^{-1}, abrangendo 46% do balanço hídrico. A variação média anual no armazenamento de água da bacia foi de 0,9% do total precipitado para todo o período analisado (31 anos, de 1967 a 2007). Para longos períodos de tempo, espera-se que a variação do armazenamento de água em uma bacia hidrográfica seja nula. Portanto, considera-se o valor de 0,9% não representativo, sugerindo que as estimativas realizadas por este método são coerentes.

Para o ano de 1990, um ano chuvoso, com uma precipitação anual de 2.069 mm, o método do balanço hídrico sazonal estimou a evapotranspiração anual em 806 mm. Isto sugere uma variação positiva no armazenamento da bacia, já que P-Q=884 mm, de modo que a variação seria de +78 mm.

Para o ano de 2006, o ano mais seco da série histórica estudada, com uma precipitação anual total de 934 mm, o método do balanço hídrico sazonal estimou a evapotranspiração anual em 788 mm, 14,6 % maior do que a diferença entre a precipitação e vazão totais anuais (687 mm). O balanço hídrico sazonal apresentou uma variação negativa do armazenamento de água na bacia, o que é esperado para os anos mais secos, sugerindo uma depleção de 101 mm no armazenamento do aquífero para o ano de 2006.

CONCLUSÕES

A metodologia do balanço hídrico sazonal desenvolvida por Kan (2005) se mostra satisfatória para analises em períodos anuais, sendo capaz de captar a diferença de comportamento entre anos secos e chuvosos e variações interanuais no armazenamento da bacia.

A metodologia de análise é robusta e bastante dependente da qualidade dos dados de entrada e da metodologia de identificação dos períodos de recessão, especialmente na escolha do número mínimo de dias dos períodos de recessão. As estimativas da evapotranspiração na análise do balanço hídrico da bacia reforçam a elevada importância desta na disponibilidade de água.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao programa de pós-graduação em engenharia ambiental da UFSC e ao CNPq e CAPES pelo fomento, e agradecem à Akemi Kan, autora do modelo, pela atenção dispensada em sanar dúvidas.

REFERÊNCIAS

BRUTSAERT, W. (1982). *Evaporation into the atmosphere.* Kluwer Academic Publishers, Países Baixos. 302p.

EMBRAPA. (2002). *Atlas climático da região Sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul*. Wrege, M. S. et al. Editores técnicos. - Brasília, DF. 334 p.

GIGLIO, J. N. Caracterização das Áreas de Inundação em Rio Negrinho - SC. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2010. 85 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental - UFSC).

GOERL, R. F. (2010) Estudo de inundações em Rio Negrinho -SC sob a ótica dos desastres naturais. Florianópolis: UFSC/CFH/GCN. 103f. Dissertação (Mestrado em Geografia) -Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina.

LINO, J. F. L.; KOBIYAMA, M.; MALUTTA, S. (2007) Relação de sólidos em suspensão com vazão e precipitação na bacia hidrográfica do Alto Rio Negro, Região Sul do Brasil. In *Anais* do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental Belo Horizonte.

PEREIRA, A. R. et al. (2002). *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas.* Guaíba: Agropecuária, 478p.

KAN, A. (2005). *Estimativa de Evapotranspiração Real com Base na Análise de Recessão dos Hidrogramas.* 257 f. Tese (Doutorado em Ciências, pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharia dos Setores de Tecnologia e Ciências Exatas). Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

SOUZA, R. M.; SANTOS, I.; KOBIYAMA, M. (2009) O modelo SWAT como ferramenta para a gestão de recursos hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro. In *Anais* do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos Campo Grande: ABRH.

TUCCI, C. E. M. (1997). *Hidrologia: ciência e aplicação.* ABRH / Editora da UFRS. Porto Alegre -RS: 2ª ed. 943 p.

UDA, P. K. (2012) Avaliação da evapotranspiração real da bacia do alto Rio Negro, região sul brasileira, por meio do modelo SEBAL. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS. 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.