

Estudo de regionalização por transferência de parâmetros do Modelo IPH II na bacia do Rio Ijuí/RS

Recebido: 21/09/11
revisado: 25/09/13
aceito: 25/03/14

Vitor Souza Viana Silva, Olavo Correa Pedrollo,
Nilza Maria dos Reis Castro, Luisa Vieira Lucchese

RESUMO: O modelo hidrológico chuva-vazão IPH II, versão WIN_IPH2, foi aplicado nas sub-bacias hidrográficas do rio Ijuí com a finalidade de explorar seu potencial para a transferência dos parâmetros, resultantes do processo de calibração de uma bacia maior, para utilização em bacias menores. O processo de regionalização proposto tem o intuito de verificar o desempenho do modelo para uso em situações de escassez de dados fluviométricos. Para obter os valores dos parâmetros do modelo, este foi calibrado na sub-bacia do Ijuí, em Ponte Mística (9.426 km²), no período de 1989-1992, com verificação no período de 1995-1998. Os parâmetros resultantes do processo de calibração foram transferidos para as sub-bacias menores, porém, outros parâmetros utilizados pelo modelo são específicos destas sub-bacias, sendo estes a área de drenagem, a percentagem de área impermeável, o coeficiente de forma do histograma tempo-área sintético, o tempo de concentração e as condições iniciais (vazão subterrânea, vazão de percolação e vazão superficial). As vazões calculadas pelo modelo foram comparadas às vazões observadas para sete sub-bacias, cujas áreas variam na faixa de 629 a 5.414 km². O coeficiente de determinação (R^2), o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) e o erro em volume (ΔV , em percentagem), foram as estatísticas utilizadas para avaliar o desempenho do modelo no processo da transferência de parâmetros. Os resultados mostraram que o modelo IPH II apresentou bom desempenho na aplicação à bacia do rio Ijuí, em Ponte Mística (9.426 km²), com R^2 , NS e ΔV , respectivamente, iguais a 0,94, 0,88, e -1,584% para a série de calibração, e 0,95, 0,88, e -16,43% para a série de verificação. No processo de transferência dos valores dos parâmetros obtidos em Ponte Mística para as 6 sub-bacias, o modelo IPH II produziu resultados com valores de NS entre 0,84 a 0,50. Observou-se, pela análise dos resultados, que o processo de regionalização através da transferência de parâmetros pode ser uma técnica aceitável para a obtenção de séries de vazões em bacias hidrográficas menores com a falta de dados fluviométricos com o uso do modelo IPH II versão WIN_IPH2.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem chuva-vazão, transferência de parâmetros, diferentes escalas.

ABSTRACT: The rainfall-runoff hydrological model IPH II, version WIN_IPH2, was applied to the sub-basins of the Ijuí river, in order to explore its potential for the transfer of parameters resulting from the calibration process of a larger basin, for use in minor basins. The regionalization process proposed aims to verify the performance of the model for use in situations of lack of stream flow data. To obtain the values of model parameters, it was calibrated to the Ijuí river sub-basin at Mystic Bridge (9,426 km²) in the period 1989-1992, with verification in the period 1995-1998. The parameters resulting from the calibration process were transferred into smaller sub-basins, however, other parameters used in the model are specific to these sub-basins, which are the drain area, the percentage of impermeable area, the form coefficient for the time-area synthetic histogram, the time of concentration and the initial conditions (underground seepage flow, percolation flow and surface flow). The flows calculated by the model were compared to the flows observed for seven sub-basins whose areas are in the range 629-5,414 km². The coefficient of determination (R^2), the Nash-Sutcliffe coefficient (NS) and the error in volume (ΔV , in percent) statistics were used to evaluate the performance of the model in the process of parameter transfer. The results demonstrated that the model IPH II showed good performance in implementing to the Ijuí river basin in Mystic Bridge (9,426 km²), with R^2 , NS and ΔV , respectively, equal to 0.94, 0.88, and -1.584 % for the series of calibration, and 0.95, 0.88 and -16.43 % for the series of verification. In the transfer of parameter values obtained at Mystic Bridge to use in 6 sub-basins, the IPH II model produced results with NS values ranging between 0.84 and 0.50. It was observed by an analysis of the results given by IPH II model, version WIN_IPH2, that the regionalization process by transferring parameters may be an acceptable technique to obtain series of flows in minor basins which lack of stream flow data.

KEYWORDS: rainfall-runoff modeling, parameter transfer, different scales.

INTRODUÇÃO

Os dados de vazão em uma bacia hidrográfica são necessários para diversas atividades, entre elas: planejamento e gestão dos recursos hídricos; avaliação da disponibilidade de água para irrigação; projeto de barragens e usinas hidrelétricas; avaliação dos riscos de cheia seca. No entanto, em muitos casos, não se dispõe de séries de vazões medidas nas bacias, ou estas são insuficientes, em termos de qualidade e quantidade (Masih *et al.*, 2010).

A solução das dificuldades encontradas para as estimativas de dados em bacias hidrográficas sem medições fluviométricas já foi apontada como uma das grandes questões da hidrologia (Tucci, 2002; Silvapalan *et al.*, 2003). Modelos hidrológicos, teoricamente, poderiam ser usados para gerar as vazões, desde que os dados necessários para a simulação do modelo (clima, solo, geomorfologia, etc.) estivessem disponíveis com detalhamento suficiente, o que nem sempre ocorre.

Uma alternativa simples para a obtenção de uma série de vazões, para os casos em que não se dispõe de medidas fluviométricas, pode ser o uso da técnica da regionalização, a qual consiste na extrapolação de parâmetros, ou de variáveis hidrológicas, de uma bacia hidrográfica para outra.

Os métodos utilizados para a obtenção das séries de vazões, através da regionalização de parâmetros de modelos matemáticos, podem ser classificados em três subgrupos: relações de regressão entre os parâmetros (Kokkonen *et al.*, 2003); interpolação espacial de

parâmetros (Merz e Blöschl, 2004); transferência dos parâmetros de um modelo chuva-vazão (Kokkonen *et al.*, 2003; Wagener *et al.*, 2007; Xiaoli *et al.*, 2009; Masih *et al.*, 2010).

O objetivo deste estudo foi a avaliação da alternativa da transferência de parâmetros, estimados em uma bacia principal, para sub-bacias de diversas magnitudes de área, admitindo-se a hipótese da relativa uniformidade espacial do comportamento das variáveis hidrológicas (Xu, 2003, Xiaoli *et al.*, 2009, Masih *et al.*, 2010). Foi utilizado o modelo IPH II, versão WIN_IPH2 (Bravo *et al.*, 2007), para estimativa de vazões em sete sub-bacias do rio Ijuí (de 19,5 a 5.414 km²), a partir de parâmetros transferidos da bacia principal, de Ponte Mística (9.426 km²), na qual as demais estão embutidas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Descrição da bacia e dos dados

A bacia do rio Ijuí situa-se na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (Brasil), entre as coordenadas 28°00' e 29°00' de latitude Sul e 53°00' e 56°00' de longitude Oeste (Figura 1). A bacia possui suas nascentes no planalto meridional gaúcho e segue no sentido leste-oeste até desaguar na margem esquerda do Rio Uruguai, drenando uma área de 10.703 km². A maior parte das atividades econômicas desta bacia está ligada ao setor primário (SEMA/RS, 2000). A região é caracterizada por uma agricultura intensiva de soja e milho no verão e aveia e trigo no inverno. O manejo do solo adotado na região era o convencional, com

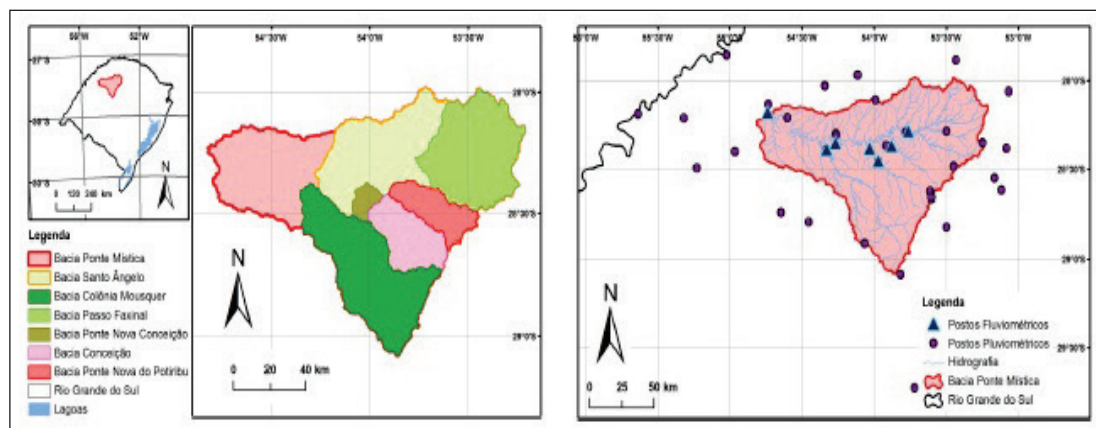


FIGURA 1. Visualização da bacia do rio Ijuí, das suas sub-bacias e a localização dos postos fluviométricos e pluviométricos.

uso de aração do solo e gradagem até 1994, quando grande parte dos agricultores adotou o plantio direto, não fazendo o revolvimento do solo e plantando sobre os resíduos da cultura anterior. Algumas classificações do solo da região são caracterizadas como latossolo vermelho, nitossolo vermelho e neossolo litólico. O regime de precipitações é bem distribuído durante todo o ano, apresentando chuvas mensais entre 120 e 150 mm, com um total anual médio de 1750 mm (Castro *et al.*, 1999). Os principais usos da água se destinam à irrigação e ao abastecimento público, além da geração de energia em pequenas centrais hidrelétricas (PCHs). A escolha da bacia do Ijuí foi motivada por ser considerada representativa do derrame basáltico no Sul do Brasil, e por apresentar características físico-climáticas homogêneas (Borges e Borda, 1990, Pereira *et al.*, 2013), além de possuir monitoramento hidrológico das bacias embutidas (micro à meso escala), coordenado pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS) desde 1989.

Foram utilizados dados de 44 pluviômetros e pluviógrafos localizados no interior e nas áreas adjacentes à bacia do rio Ijuí (Figura 1), sendo uma parte constituída pelos dados disponibilizados ao público pelo sistema de informações hidrológicas da Agência Nacional de Águas (ANA), e outra parte, constituída por mais 21 postos localizados nas bacias do Taboão e do Turcato, resultantes de monitoramento realizado pelo IPH-UFRGS (Castro et. al., 2000). A localização destes postos pluviométricos, latitude e longitude, período inicial e final das séries, são descritas em Silva (2011). A Tabela 1 mostra a localização dos postos fluviométricos das sub-bacias do rio Ijuí e as suas áreas de drenagem.

As séries de dados de entrada para a geração das vazões calculadas com o modelo IPH II são as médias, sobre a bacia, das precipitações e das evapotranspirações potenciais. Os dados diários de evapotranspiração foram estimados pela equação de Penman-Montheith (Tucci, 2005), e complementados com registros diários de um evaporímetro de Piché, obtidos da estação climatológica da INMET, localizada em Cruz Alta (longitude 53°36'00" e latitude 28°38'00"). Isto foi feito devido à inexistência de dados climatológicos necessários para a aplicação da equação de Penman-Montheith para todo o período de estudo. Admitiu-se a não variabilidade espacial da evapotranspiração, sendo adotados os mesmos valores para todas as bacias analisadas.

Os dados foram divididos em dois períodos. O primeiro, de 02/01/1989 a 31/01/1992, foi utilizado para a calibração do modelo IPH II, na bacia de Ponte Mística. O segundo, de 01/01/1995 a 24/01/1998, foi utilizado para a verificação, em cada uma das sete sub-bacias, com os parâmetros obtidos na etapa anterior.

Cálculo da precipitação média na bacia por grade regular

As precipitações médias diárias em todas as bacias foram calculadas pela relação entre o somatório dos valores das precipitações nos nós definidos no interior dos limites da bacia pelo número total destes nós após a aplicação de um método de interpolação, para diferentes grades regulares em função da escala da bacia (Figura 2).

TABELA 1
Postos fluviométricos das sub-bacias do rio Ijuí.

Nome	Área (km ²)	Latitude (sul)	Longitude (oeste)
Ponte Mística	9.426	28°10'53"	54°44'18"
Santo Ângelo	5.414	28°21'19"	54°16'06"
Colônia Mousquer	2.131	28°23'23"	54°19'51"
Passo Faxinal	2.003	28°17'13"	53°45'51"
Ponte Nova Con- ceição	966	28°23'05"	54°01'53"
Conceição	805	28°27'18"	53°58'15"
Ponte Nova do Potiribu	629	28°22'15"	53°52'45"

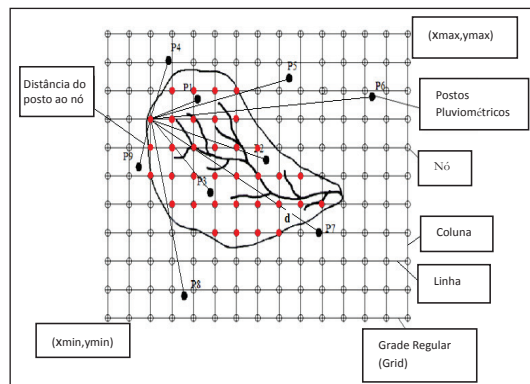


FIGURA 2. Esquemas para determinação da precipitação média com base nos valores nodais presentes no interior dos limites da bacia (Silva, 2011).

Um algoritmo programado no SURFER 8.0 foi utilizado para interpolar os valores nos nós, a partir de: i) informações dos valores máximos e mínimos das coordenadas do retângulo que contém toda a bacia; ii) número de linhas e colunas (que expressam o detalhamento desejado); iii) contorno da área de drenagem da bacia, representado por um conjunto de pontos com coordenadas x e y (Silva 2011).

A equação 1 usada na interpolação dos valores nodais é expressa por,

$$Z(x, y) = \sum_{i=1}^n W_i Z_i \quad (1)$$

onde $Z(x,y)$ representa o valor interpolado para o nó da grade regular, Z_i representa o valor do ponto amostrado vizinho (posto pluviométrico), W_i representa o peso obtido e (x,y) são as coordenadas do ponto considerado da grade.

O método adotado para o cálculo dos pesos (W_i) para cada nó da grade regular foi o interpolador chamado de Vizinho Natural (Smith et al., 2009). Neste método, os pesos são obtidos com base na relação entre as áreas de influência formadas pelos pluviômetros mais próximos a o nó da grade regular a ser interpolado. O algoritmo utilizado compõe-se de duas etapas. A primeira etapa consiste na determinação das áreas de influência através da geração dos polígonos de Voronoi, os quais são construídos a partir das mediatrizes da triangulação de Delaunay, cujos vértices são as coordenadas dos pluviômetros. A segunda etapa consiste na obtenção de uma área de influência, com os vértices dos triângulos formados por segmentos de retas que, no exemplo da figura 3, unem os pluviômetros P_1 , P_4 , P_5 , P_6 e P_9 , ao nó da grade representado por $Z(X_o, Y_o)$. Posteriormente, são geradas mediatrizes nos segmentos de reta dos triângulos, e a intersecção das mediatrizes com as arestas dos Polígonos de Voronoi, gerados na primeira etapa, resultam na formação de uma área de influência ou subconjunto.

O peso do Vizinho Natural (W_i), para interpolar o valor em $Z(X_o, Y_o)$, é calculado em função da área de influência formada pelos postos pluviométricos P_1 , P_4 , P_5 , P_6 e P_9 (Figura 3). A equação utilizada para representar a área de influência, por exemplo, do posto pluviométrico P_1 , é representado pela relação entre áreas (Equação 2).

$$W_i = \frac{A_{abfg}}{A_{abcde}} \quad (2)$$

onde,

W_i = peso do vizinho natural

A_{abfg} = área de influência formada entre os vértices a, b, f, g do subconjunto;

A_{abcde} = área de influência formada entre os vértices a, b, c, d, e do subconjunto.

Repete-se o procedimento sucessivamente para as demais relações de áreas dos postos P_4 , P_5 , P_6 e P_9 . Neste método de interpolação duas condições devem ser seguidas: o somatório dos pesos deve ser igual a 1 (e os pesos devem apresentar valores no intervalo entre zero e um).

O método de interpolação Vizinho Natural foi selecionado para este trabalho com base em Silva (2011), que comparou este método com outros (média, triangulação linear, inverso ponderado das distâncias), concluindo, mediante avaliação estatística e análise de sensibilidade, que o mesmo produziu melhores resultados.

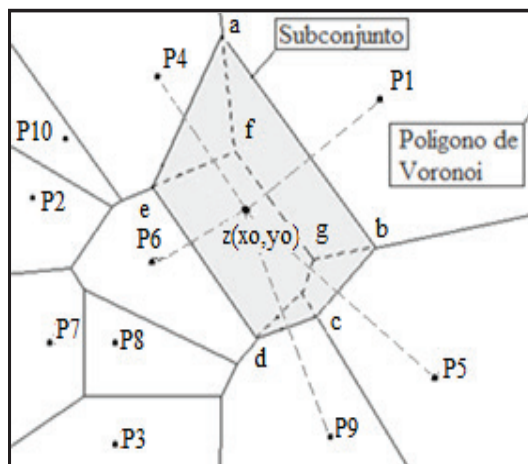


FIGURA 3. Sobreposição de áreas de polígonos de Voronoi e do sub-conjunto (Pi são as posições dos postos pluviométricos, e as letras são os vértices dos polígonos).

O uso da técnica da geração de campos de precipitação por grades regulares e posterior obtenção da média dos valores dos nós da malha, com base em medidas pontuais de chuva consistidas, pode ser uma alternativa pela não necessidade de preenchimentos de falhas de séries temporais de chuvas em determinados dias nos

postos pluviométricos empregados na interpolação. Esta técnica apresenta-se como mais uma alternativa para utilização em modelos do tipo concentrado chuva-vazão, como é o caso do modelo WIN_IPH2 conforme foi demonstrado por Silva (2011).

O modelo IPH II e a versão WIN_IPH2

O modelo IPH II, desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) na década de 70, é um modelo conceitual concentrado que simula o processo de transformação da chuva, em vazão, e baseia-se nos seguintes algoritmos: perdas por interceptação e por evapotranspiração; separação de escoamento; propagação dos escoamentos superficiais e subterrâneos. O fluxograma do modelo está apresentado em Mine (1998) e Tucci (2005).

A versão WIN_IPH2 (Bravo et. al. 2006), do modelo IPH II, utilizada neste trabalho, admite parâmetros que podem ser fornecidos pelo usuário, e que caracterizam a bacia, os quais são a área da bacia (A), a porcentagem de área impermeável (AIMP), um coeficiente de forma da bacia (n), e o tempo de concentração (tc). Estes parâmetros devem ser fornecidos ao modelo, juntamente com as condições iniciais estimadas, que são: a percolação (em m^3/s), a vazão subterrânea (em m^3/s) e a vazão superficial (em m^3/s).

Outros parâmetros, em sua maioria de natureza física, podem ser ajustados na versão WIN_IPH 2. São os parâmetros: a capacidade máxima do reservatório hipotético de interceptação, R_{max} (mm); a capacidade de infiltração para $t = 0$, I_0 ($mm \cdot h^{-1}$); a capacidade de infiltração mínima, I_b ($mm \cdot h^{-1}$); o parâmetro de decaimento da infiltração no solo, h (adimensional); o parâmetro Alfa, que afeta a separação dos escoamentos quando a precipitação é menor que a capacidade de infiltração; o parâmetro de propagação do escoamento superficial, $ksup$ (horas); e o parâmetro de propagação do escoamento subterrâneo, $ksub$ (horas).

O parâmetro R_{max} , o qual representa a capacidade de armazenamento máximo em um reservatório hipotético de interceptação pela vegetação, é utilizado pelo primeiro algoritmo, de perdas.

O saldo da evapotranspiração potencial que não é atendido diretamente pela precipitação ou pela interceptação inicial, é descontado do armazenamento de água do solo, proporcionalmente ao teor de umidade deste.

A parcela resultante do algoritmo de perdas pode gerar escoamento superficial ou infiltrar no solo.

A parcela de água que precipita sobre áreas impermeáveis gera escoamento superficial sem que ocorra infiltração, sendo a porcentagem de área impermeável representada pelo parâmetro AIMP (Mine, 1998; Tucci, 2005; Villanueva et. al., 2005; Bravo et. al., 2007).

Os parâmetros I_0 , I_b e h , que são, respectivamente, as capacidades inicial e mínima de infiltração e o parâmetro de decaimento de infiltração de água no solo, são característicos da equação de infiltração de Horton e Berthelot, sendo utilizados pelo algoritmo de separação do escoamento (Tucci, 2005). O parâmetro de decaimento, h , com valor positivo menor do que um, é relacionado ao tipo de solo, sendo usualmente determinado de forma manual pelo usuário ou pelos recursos de calibração automáticos no WIN_IPH 2 (Bravo et. al., 2006).

O parâmetro denominado Alfa (α), no caso da simulação de séries contínuas de longo período, participa do algoritmo de separação do escoamento quando a precipitação é menor que a capacidade de infiltração (Bravo et. al., 2007). O parâmetro afeta, nestes casos, as proporções de precipitação que escoam superficialmente, as quais são menores à medida que o Alfa é maior.

A propagação do escoamento superficial pelo modelo é feita através do método de Clark (1945), o qual é uma combinação do chamado histograma tempo-área (HTA) com um modelo de reservatório linear simples. O HTA representa a translação da chuva pelo deslocamento sobre a superfície da bacia, enquanto que o reservatório linear representa os efeitos de armazenamento das partículas de água no percurso até o ponto da saída da bacia (Tucci, 2005).

O HTA é aproximado pelo uso de um histograma sintético, cujas ordenadas são as diferenças consecutivas entre as proporções de áreas contribuintes, em relação à área total da bacia, para cada isócrona (linhas de igual tempo de deslocamento até o exutório) considerada. Os tempos de deslocamento considerados são definidos como proporções do tempo de concentração, variando de zero a um, e as proporções de áreas contribuintes resultam de fórmulas que dependem do tempo de deslocamento e do coeficiente n , que representa a forma da bacia (Tucci, 2005; Bravo et. al., 2006).

O volume de escoamento superficial é distribuído no tempo pelo histograma tempo-área (HTA) e filtrado (para se levar em conta o efeito do armazenamento na bacia) pelo modelo reservatório linear

simples, cujo parâmetro K_{sup} representa o tempo de retardo do escoamento superficial (Tucci, 2005).

A versão WIN_IPH2 do modelo IPH II, possibilita a realização da calibração dos parâmetros do modelo de forma automática ou manual. Os recursos automáticos baseiam-se na otimização de funções monobjetivo (algoritmo SCE-UA descrito por Duan *et al.*, 1992) ou multiobjetivo (algoritmo MOCOM-UA descrito por Yapo *et al.*, 1998). São técnicas heurísticas de otimização baseadas em algoritmos evolutivos

Esta nova versão do modelo admite a imposição de limites dos valores dos parâmetros (R_{max} , K_{sup} , K_{sub} , I_b , I_o , h e α) tanto no processo de calibração manual como no processo de calibração automática, seguindo sugestões de Collischonn e Tucci (2003). Estes intervalos são estabelecidos para garantir que resultem em parâmetros com significado físico. No aplicativo os parâmetros apresentam limites inferiores e superiores com os seguintes valores: R_{max} (0 e 9), K_s (0,01 e 10), K_{sub} (10 e 500), I_b (0,1 e 10), I_o (10 e 300), h (0,01 e 0,999) e α (0,01 e 20).

Collischonn e Tucci (2003) avaliaram que um número de 10 execuções do modelo IPH II, é suficiente para que o algoritmo SCE-UA possa encontrar o ótimo global para um conjunto de parâmetros com valores com pouca discrepância. Para este trabalho, a calibração automática, foi realizada em 10 aplicações sucessivas do algoritmo SCE-UA com a função objetivo de Nash-Sutcliffe (NS), na bacia do Ijuí, em Ponte Mística (9.426 km²), no período de 02/01/1989 a 31/01/1992.

Avaliações de desempenho do modelo

A avaliação do desempenho do modelo hidrológico de transformação da chuva em vazão consiste na verificação da capacidade do mesmo em representar, da melhor forma possível, a realidade, mediante a comparação dos resultados das vazões simuladas com as vazões observadas. Diversos autores usaram como índices para avaliação da qualidade dos resultados de modelos hidrológicos como o R^2 que é o coeficiente de determinação e o coeficiente de eficiência NS de Nash-Sutcliffe (Krause *et al.*, 2005; Jha *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2007; Parajuli *et al.*, 2009). O R^2 e o NS descrevem o quanto a dispersão dos dados observados é em relação aos calculados. Para complementar a análise estatística o erro em volume (ΔV), expresso em porcentagem. Este índice avalia a tendência geral que os dados simulados subestimam (valores de ΔV posi-

tivos) ou superestimam (valores de ΔV negativos) os dados medidos em termos de conservação de volume ao longo da série temporal de vazões. São consideradas aceitáveis, tendo em conta o objetivo deste estudo, as simulações com R^2 maior ou igual a 0,6, conforme adotado por Moriasi *et al.* (2007), NS maior ou igual a 0,5 e ΔV no intervalo entre -25 e + 25%.

O processo de transferência de parâmetros e as considerações específicas para as bacias estudadas e as respectivas simulações

O método de regionalização proposto para a obtenção das séries temporais de vazões nas sub-bacias é a transferência de parâmetros, com uso do modelo hidrológico chuva-vazão WIN_IPH2. A aplicação do método consiste, primeiramente, na estimativa dos valores dos parâmetros para a bacia, os quais se pretende generalizar para as sub-bacias, através do processo de calibração automática.

Este conjunto de parâmetros é, então, utilizado para a verificação da capacidade de transferência, com aplicação nas sub-bacias, tendo-se em conta as características particulares de cada uma, representadas pelos parâmetros específicos destas, a área (A), a porcentagem de área impermeável (AIMP), o coeficiente de forma (n) e o tempo de concentração (tc).

Todas as bacias, neste estudo, possuem formas que admitem o coeficiente de forma, n, igual a 1,5, que corresponde a uma elipse.

Os tempos de concentração adotados, para cada bacia, seguiram, as recomendações de Sherman (1949), de um valor entre 12 e 24 horas para bacias com área superior a 2.500 km², e um valor entre 6 e 12 horas para bacias com áreas entre 250 e 2.500 km². A sensibilidade do modelo a este parâmetro, porém, mantida a ordem de grandeza recomendada, revelou-se irrelevante para este estudo.

As condições iniciais da simulação para a vazão subterrânea, para a vazão de percolação e para a vazão superficial foram atribuídas mediante o método da estimativa por tentativa e erro, ou seja, atribuiu-se valores para as mesmas até resultar um melhor ajuste gráfico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calibração e verificação dos parâmetros do modelo na bacia do rio Ijuí em Ponte Mística

A calibração dos parâmetros do modelo, para a bacia do Ijuí, em Ponte Mística (9.426 km²), resultou

nos parâmetros com valores médios e desvios em relação a média dos parâmetros de I_b , I_o , h , K_{sup} , K_{sub} , R_{max} Alfa iguais a $121,150,042 \pm (\text{mm.h}^{-1})$, $0,992 \pm 0,013$ (mm.h^{-1}), $0,725 \pm 0,007$ (adm), $5,8720,014 \pm$ (h), $20,181 \pm 0,476$ (h), $6,8900,223 \pm$ (h), e $5,6280,906 \pm$ (%), respectivamente para 10 execuções conforme sugestões proposto por Collischonn e Tucci (2003). Estes resultados mostram que este pequeno desvio em relação a média representa que o algoritmo evolutivo SCE-UA conseguiu produzir conjunto de valores de parâmetros próximo ao ótimo global (Collischonn e Tucci (2003) no processo de calibração.

Os resultados das estatísticas de desempenho para a análise dos parâmetros no processo de calibração foram considerados satisfatórios para as 10 execuções. Os resultados dos valores médios e desvios em relação a média dos parâmetros das estatísticas de desempenho do coeficiente de NS foram igual a $0,9400,001 \pm$, R^2 igual a $0,883 \pm 0,001$ e ΔV de $0,1660,0075 \pm$. Sendo resultados satisfatórios segundo Moriasi *et al.* (2007).

O conjunto de parâmetros da execução 4 produziu melhores resultados com valores de $I_b=121,288$ (mm.h^{-1}), $I_o=0,996$ (mm.h^{-1}), $h=0,721$ (adm), $K_{sup}=5,869$ (h), $K_{sub}=20,456$ (h), $R_{max}=6,804$ (h) e Alfa= $5,243$ (%). As estatísticas de desempenho para esta execução apresentou coeficiente de $NS=0,88$, $R^2=0,95$ e $\Delta V=16,43\%$, e estes parâmetros foram também avaliados mediante o processo de verificação de parâmetros.

A resposta do modelo para o conjunto de parâmetros da execução 4 pode ser vista nas figuras 4 e

5, as quais representam os processos de calibração e de verificação, respectivamente.

Identifica-se que o modelo consegue reproduzir bem as vazões, em todas as faixas de ocorrência, inclusive na série de verificação, e mesmo para magnitudes maiores do que as observadas na calibração.

O processo de transferência de parâmetros entre escalas

O conjunto selecionado, após a verificação, para o teste da capacidade de generalização, foi aplicado nas sub-bacias do Santo Ângelo ($5,414 \text{ km}^2$), Colônia Mousquer ($2,131 \text{ km}^2$), Passo Faxinal ($2,003 \text{ km}^2$), Ponte Nova Conceição (966 km^2), Conceição (805 km^2) e para a sub-bacia Ponte Nova do Potiribú (628 km^2), com os mesmos parâmetros obtidos na calibração, no período de 02/01/1989 a 31/01/1992, para a verificação da capacidade de transferência destes.

As Figuras 6 a 11 são apresentadas hidrogramas observadas e simulados, nas diferentes sub-bacias. Na Tabela 2 são apresentados os valores dos índices estatísticos aplicados para avaliar o desempenho do modelo nas sub-bacias, utilizando os parâmetros calibrados em Ponte Mística no período de 02/01/1989 a 31/01/1992.

A Tabela 2 mostra que o processo de transferência de parâmetros apresentou resultados satisfatórios, pois os índices estatísticos de desempenho resultaram em intervalos de valores dos coeficientes de $0,5 \leq NS \leq 0,84$, $0,69 \leq R^2 \leq 0,93$; $0,5 \leq NS \leq 0,84$ e $-22,28\% \leq \Delta V \leq 14,79\%$, estando de acordo com os critérios de

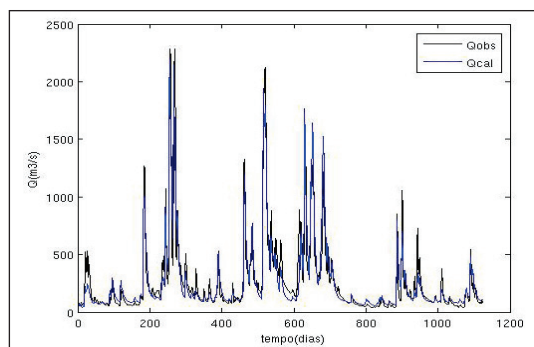


FIGURA 4. Vazões observadas e calculadas com a série de calibração (02/01/1989 a 31/01/1992) na bacia do Ijuí, em Ponte Mística.

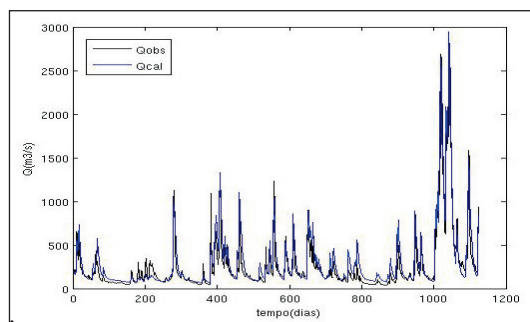


FIGURA 5. Vazões observadas e calculadas com a série de verificação (01/01/1995 a 24/01/1998) na bacia do Ijuí, em Ponte Mística.

TABELA 2
Valores dos índices estatísticos de desempenho nas diferentes escalas

Sub-bacias	Índices Estatísticos		
	R ²	NS	ΔV (%)
Santo Ângelo (5.414 km ²)	0,93	0,84	14,79
Colônia Mousquer (2.131 km ²)	0,88	0,77	-10,74
Passo Faxinal (2.003 km ²)	0,69	0,67	-22,28
P. Nova Conceição (966 km ²)	0,76	0,5	-7,65
Conceição (805 km ²)	0,79	0,55	-2,48
Ponte Nova do Potiribu (629 km ²)	0,87	0,74	12,30

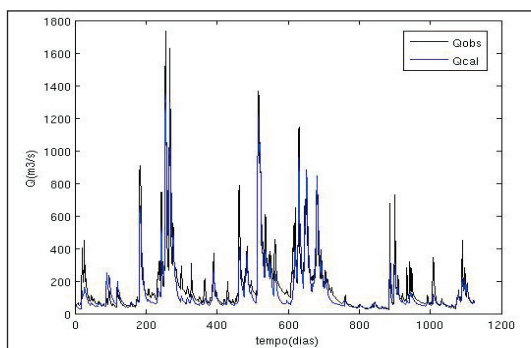


FIGURA 6. Vazão calculada e observada na sub-bacia do Santo Ângelo (5.414 km²), no período de 02/01/1989 a 31/01/1992.

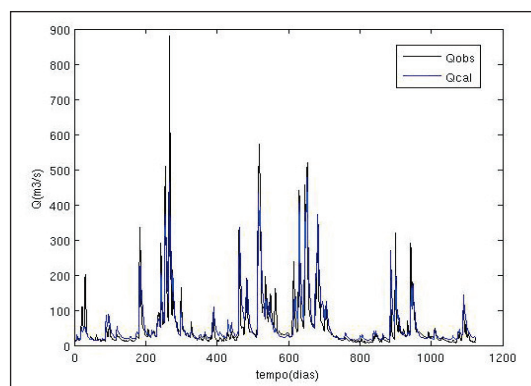


FIGURA 7. Vazão calculada e observada na sub-bacia da Colônia Mousquer (2.131 km²), no período de 02/01/1989 a 31/01/1992.

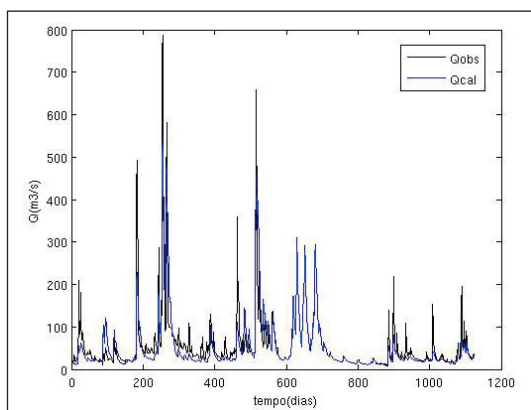


FIGURA 8. Vazão calculada e observada na sub-bacia do Passo Faxinal (2.003 km²), no período de 02/01/1989 a 31/01/1992.

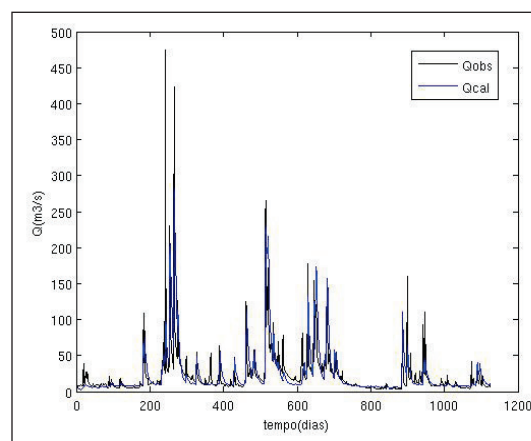


FIGURA 9. Vazão calculada e observada na sub-bacia da Ponte Nova Conceição (966 km²), no período de 02/01/1989 a 31/01/1992.

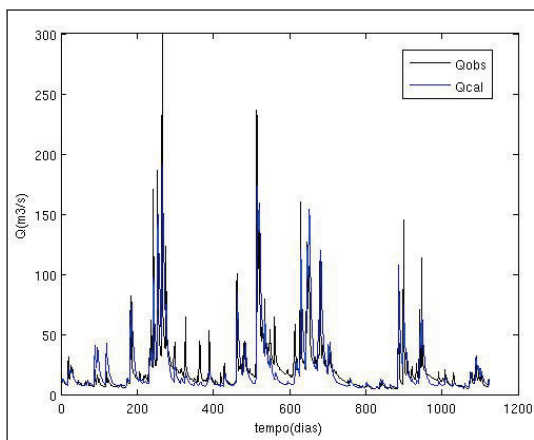


FIGURA 10. Vazão calculada e observada na sub-bacia da Conceição(805 km²), no período de 02/01/1989 a 31/01/1992.

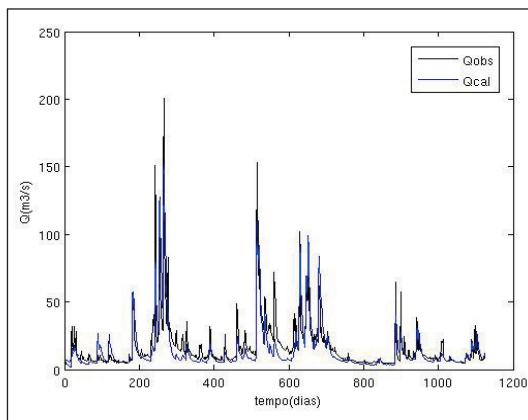


FIGURA 11. Vazão calculada e observada na sub-bacia da Ponte Nova do Potiribu(629 km²), no período de 02/01/1989 a 31/01/1992.

Moriasi *et al.* (2007). Ocorreu também perda de eficiência do modelo nas sub-bacias de 5.414 a 966 km², tanto maior quanto menor a escala das sub-bacias analisadas. Para bacias menores que 966 km², porém, os resultados não foram bons, possivelmente devido à maior variabilidade dos processos hidrológicos e das características físicas.

Resultados semelhantes, com perdas de eficiência do modelo em função da escala da bacia, foram encontrados por Servat & Dezetter (1993). Eles avaliaram o desempenho de modelos chuva-vazão na parte norte ocidental da Costa do Marfim, e constataram que os resultados do NS, resultante da aplicação com transferência de parâmetros, foram bastante baixos em todas as bacias. Seibert (1999) aplicou a mesma técnica de transferência de parâmetros de um modelo chuva-vazão (HBV), em 11 bacias hidrográficas na Suécia com áreas entre 7 e 950 km², e encontrou valores do NS entre 0,7 e 0,73 para as duas menores bacias e valores entre 0,79 e 0,88 para as outras nove bacias. Xiaoli *et al.* (2009), utilizaram o mesmo modelo chuva-vazão (HBV) que Seibert (1999) em 13 sub-bacias no Sul da China, com áreas entre 37,2 e 2.091 Km², e os resultados da transferência dos parâmetros resultaram em valores de NS médios de

0,72. Masih *et al.*, (2010), avaliaram a transferência de parâmetros em 11 bacias hidrográficas do Irã com áreas entre 475 e 2.522 km², obtendo valores de NS entre 0,11 e 0,75.

Em estudos anteriores de regionalização de vazões na bacia do rio Ijuí foram observadas similaridades espaciais, com pequena variabilidade espacial das variáveis e funções obtidas (IPH, 1991). Silva *et al.* (2003), avaliaram as extrapolações superiores da regionalização de vazões utilizando as sub-bacias do rio Ijuí (meso escala) e duas sub-bacias do rio Uruguai a jusante da confluência do rio Ijuí (macro escala), e extrapolações inferiores de regionalização de vazões das sub-bacias do rio Potiribu. Silva *et al.* (2003) obtiveram bons resultados na regionalização de vazões nestas bacias, aceita-se que estas sejam representativas desta região, o que indica uma uniformidade espacial da vazão.

A uniformidade da bacia do rio Ijuí também foi constatada no presente estudo, pelos resultados satisfatórios da transferência de parâmetros das bacias maiores para as bacias menores, com base nos índices estatísticos de desempenho com o uso do Nash-Sutcliffe (NS) coeficiente de determinação (R^2) e o erro em volume (ΔV).

CONCLUSÕES

O método da transferência de parâmetros de uma bacia da ordem de 10.000 km² para bacias até 629 km² revelou-se adequado, com bom desempenho para bacias maiores que 2.000 km² (NS >0,67) e médio desempenho para bacias menores que 1.000 km² (0,5 < NS < 0,74). Observou-se que, para as quatro bacias

maiores que 966 km², houve um padrão de perda de eficiência do NS da maior para a menor bacia.

Com base nos resultados, conclui-se que o processo de regionalização através da transferência de parâmetros pode ser uma técnica importante para a obtenção de séries de vazões em bacias hidrográficas representativas com escassez de dados fluviométricos.

Referências

- BORGES, A.L. & BORDAS, M.P. Escolha de bacias representativas experimentais para estudo da erosão no planalto basáltico sulamericano. In: Congresso brasileiro e encontro nacional de pesquisas sobre conservação de solo, Londrina, Anais, 1990.
- BRAVO, J.M.; ALLASIA, G. G. P.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A. & TUCCI, C. E. M. Manual de usuário do WIN_IPH2. Versão 1.0. Editora: Rutinéia Tassi, Porto Alegre, 62 pg., 2006.
- BRAVO, J. M.; ALLASIA, Daniel; COLLISCHONN, Walter; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, Carlos. Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH II com fins educacionais. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo. Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, v.1, 2007.
- CASTRO, N. M. dos R.; AUZET, A. V.; CHEVALLIER, P.; LEPRUN, J.C. Land use change effects on runoff and erosion from plot to catchment scale on the basaltic plateau of southern Brazil. *Hydrological Processes*, v. 13, p.1621-1628, 1999.
- CASTRO, N. M. dos R.; CHEVALIER, P.; GOLDENFUM, J. A. Projeto Potiribu, atualização 1989-1998 – dados básicos de fluviometria e pluviometria (com anexos). IPH: UFRGS, Revista Recursos Hídricos, Vol. 35, 2000.
- CLARK, C.O. (1945). "Storage and the unit hydrograph". *ASCE*, v 110, pp. 1416-1446.
- COLLISCHONN, W & TUCCI, C. E. M.. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* RBRH, v. 8, n. 3, p.27-39, jul/set 2003.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research* 28(4), pp. 1015-1031, 1992.
- Giandotti, M. Considerazioni idrologiche sulle del Po. Com speciali riguardo alla piene del novembre 1951. *Giornale del Genio Civile*, Roma n. 9. 1953.
- IPH (1991), Regionalização de Vazões do Rio Grande do Sul, CEEE/IPH 3 volumes, 1991.
- JHA, M.; ARNOLD, J. G.; GASSMAN, P. W.; GIORGI, F.; GU, R. R. Climate change sensitivity assessment on upper mississippi river basin streamflows using SWAT. *Journal of The American Water Resources Association*. pp. 997-1015. Agosto, 2006.
- KOKKONEN, T.S., JAKEMAN, A.J., YOUNG, P.C., KOIVUSALO, H.J. Predicting daily flows in ungauged catchments: model regionalization from catchment descriptors at the Coweeta Hydrologic Laboratory. North Carolina. *Hydrological Processes*, v. 17, 2219-2239, 2003.
- KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BÄSE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89–97, 2005.
- MASIH, I., UHLENBROOK, S., MASKEY, S., AHMAD, M.D. Regionalization of a conceptual rainfall-runoff model based on similarity of the flow duration curve: A case study from the semi-arid Karkheh basin. Iran, *Journal of Hydrology*, v. 391, p. 188-201. 2010.
- MERZ, B., BLÖSCHL, G. Regionalization of catchment model parameters, *Journal of Hydrology*, 287, 95–123, 2004.
- MINE, M. R. M. Método determinístico para minimizar o conflito entre geração de energia e controle de cheias. Tese de Doutorado. 146f., UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Recursos Hídricos e Ambiental, 1998.
- MORIASI, D. N., ARNOLD, J. G., VAN LIEW, M. W., BINGNER, R. L., HARMEL, R. D., VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* ISSN 0001-2351, 2007.
- PARAJULI, P. B.; NELSON, N. O.; FREES, L. D.; MANKIN, K. R. Comparison of AnnAGNPS and SWAT model simulation results in USDA-CEAP agricultural watersheds in south-central Kansas. *Hydrol. Process.* 23, 748–763, 2009.
- PEREIRA, M. A. F.; KOBIYAMA, M.; CASTRO, N. M. R. Análise de homogeneidade na bacia hidrográfica do rio Ijuí-RS. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves/RS, 2013.
- SEIBERT, J. Regionalization of parameters for a conceptual rainfall-runoff model. *Agriculture Forest Meteorology*. 98-99, 279-293, 1999.
- SEMA-RS Secretaria Estadual do Meio Ambiente, Rio Grande do Sul. Relatório Anual sobre a Situação dos Recursos Hídricos no Estado do Rio Grande do Sul e Inventário Hidrelétrico da sub-bacia 75, 2000.
- SERVAT, E., DEZETTER, A. Rainfall-runoff modelling and water resources assessment in northwestern Ivory Coast. Tentative extension to ungauged catchments. *Journal of Hydrology* 148, 231-248, 1993.

SHERMAN, L. K. The Unit Hydrograph Method, In: *Physics of the Earth*. Edited by O. E. Menizer, Dover Publications, Inc. New York, NY, 514-525, 1949.

SILVA, O. B. J.; Bueno, E. O.; Tucci, C. E. M. & Castro, N. M. R. Extrapolação espacial na regionalização de Vazões. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, volume 8, nº 1, 21-27, 2003.

SILVA, V. S. V. Estimativa de precipitação pontual em diferentes escalas para uso em modelo chuva-vazão concentrado. Dissertação de Mestrado. 156 f., UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Recursos Hídricos e Ambiental, 2011.

SILVAPALAN, M., TAKEUCHI, K., FRANKS, S.W., GUPTA, V.K., KARAMBIRI, H., LAKSHMI, V., LIANG, X., MCDONNELL, J.J., MENDIONDO, E.M., O'CONNELL, P.E., OKI, T., POMEROY, J.W., SCHERTZER, D., UHLENBROOK, S., ZEHE, E., IAHS. Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrol. Sci. J.* 48(6), 857-880, 2003.

SMITH, M. J.; GOODCHILD, M. F. & LONGLEY, A. P. A comprehensive guide to principles, techniques and software tools, 3^o Edition, 2009.

TUCCI, C. E. M. Regionalização de Vazões. Editora da UFRGS ABRH ANEEL ANA 250p, 2002.

TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Editora Universitária UFRGS, Porto Alegre, 2005.

VILLANUEVA, A. O. N.; ALLASIA, D. G.; NEVES, M.; TASSI, R.; BERNHARDT, S., Manual de Fundamentos do IPHS1. Versão 2.11. 42 pp. Disponível em: <http://www.iph.ufrgs.br/iphs1>, 2005.

WAGENER, T., SIVAPALAN, M., TROCH, P., WOODS, R. Catchment classification and hydrologic similarity. *Geography Compass*: (1), 10.1111/j.1749-8198.2007.00039, 2007.

XIAOLI, J.; CHONG-YU, X.; QI, Z.; YONGQIN, D. C. Regionalization study of a conceptual hydrological model in Dongjiang basin, south China. *Quaternary International* 208, 129–137, 2009.

XU, C. Testing the transferability of regression equations derived from small sub-catchments to a large area in central Sweden. *Hydrology and Earth Systems Science* v. 7, p.317–324, 2003.

YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of hydrology*, v. 204, pp. 83-97, 1998.

ZHANG, X.; SRINIVASAN, R.; HAO, F. Predicting hydrologic response to climate change in the Luohe river basin using the SWAT model. *Transactions of the ASABE – American society of Agricultural and Biological Engineers*. Vol 50(3): 901-910, 2007.

Vitor Souza Viana Silva Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS.
E-mail: vitorsvs@bol.com.br

Olavo Correa Pedrollo Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS.
E-mail: olavopedrollo@gmail.com

Nilza Maria dos Reis Castro Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS.
E-mail: nilza@iph.ufrgs.br

Luisa Vieira Lucchese Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS.
E-mail: luisa.lucchese@ufrgs.br