

MODELAGEM HIDROLÓGICA DE SISTEMA HÍDRICO COMPLEXO DO SEMIÁRIDO BAIANO

Bárbara Valois Coutinho Dias Dos Santos

Graduanda do curso de Engenharia ambiental - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. (b_valois@hotmail.com)

Andrea Sousa Fontes

Doutora em Geofísica – UFBA. Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. (asfontes@gmail.com)

Resumo

A gestão dos recursos hídricos depende da caracterização da dinâmica do escoamento na bacia hidrográfica, a qual pode ser fundamentada através do conhecimento de variáveis hidrológicas, adquirido com o monitoramento contínuo dessas variáveis. No entanto, esse monitoramento é, muitas vezes, escasso, especialmente em bacias que apresentam vazões de menores magnitudes, tal como ocorre em regiões semiáridas. Tal problema tem sido atenuado com adoção de ferramentas matemáticas de modelagem hidrológica, que gera informação a partir da simplificação da representação e compreensão do comportamento hidrológico da bacia. O presente trabalho teve como objetivo propor ajuste metodológico de calibração para modelar o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio Salitre, sub-bacia do rio São Francisco, localizada em região semiárida, que configura um sistema hídrico complexo devido às características climática e geológicas, utilizando o modelo hidrológico SMAP. Foram contempladas as etapas de calibração e validação do modelo em sua versão diária, sendo proposta a aplicação da técnica de multicalibração, que consiste na calibração de diferentes conjuntos de parâmetros de acordo com condições hidrológicas distintas e critérios de calibração. Os resultados obtidos com a multicalibração foram comparados ao resultado da calibração convencional do modelo, sendo verificada melhoria na representação das vazões com a adoção da técnica de multicalibração.

Palavras-chave: Multicalibração, modelo SMAP, rio Salitre.

Abstract

The management of water resources depends on the flow dynamics characterization in the basin, which can be substantiated through knowledge of hydrological variables, acquired with continuous monitoring of these variables. However, this monitoring is often scarce, especially in basins of semi-arid regions. This problem has been mitigated by adopting mathematical tools like hydrological modelling, which generates information from the simplification of the representation and understanding of the basin hydrological behaviour. This research aimed to propose a methodological adjustment in the hydrology model calibration of the Salitre river basin, located in semiarid region, which configures a complex water system due to its climatic and geological characteristics, using the hydrological model SMAP. Steps of model calibration and validation in its daily version were included, approaching the multicalibration technique, which consists in a definition of different sets of calibration parameters, proposed for different hydrological conditions and calibration criteria. The multicalibration results compared with the conventional calibration results, being verified improvement in the representation of the flow by adopting the multicalibration technique.

Keywords: Multicalibration, SMAP model, Salitre river.

INTRODUÇÃO

O entendimento do regime de vazões em uma bacia hidrográfica é essencial aos estudos hidrológicos que tenham como objetivo subsidiar o gerenciamento de recursos hídricos e o planejamento de ações e projetos que

contemplem diferentes usos da água. Uma dificuldade sempre presente resulta da baixa disponibilidade de dados de medição de variáveis hidrológicas, a exemplo de chuva, vazão e evaporação, de forma a caracterizar a disponibilidade de água no espaço e tempo. A medição sistemática dessas variáveis compõe as

atividades de monitoramento dos recursos hídricos, que deve ser realizado de forma contínua para fundamentar a gestão de recursos hídricos.

No monitoramento hidrológico, é mais comum a existência de dados de precipitação, uma vez que seu processo de medição é mais simples. Já os dados de vazão são mais escassos, principalmente em decorrência da logística necessária, uma vez que dependem de uma equipe de hidrometria especializada, equipamentos topográficos e de medida de velocidade e utilização de barco, elevando o custo associado.

O Brasil é um país de dimensões continentais e dispõe de uma grande e complexa rede hidrográfica. Assim sendo, um monitoramento completo das variáveis hidrológicas (com destaque para precipitação e vazão), em todos os rios do país, se torna inviável. Devido a este fato, aliado à complexidade da logística do monitoramento e gestão da informação, há uma escassez de dados hidrológicos nas bacias hidrográficas do Brasil, de modo geral. Paiva e Paiva (2001) atribuem tal carência de dados ao fato da implantação do sistema de monitoramento ter como principal agente o setor de energia elétrica, sendo estratégica sua priorização naqueles mananciais com potencial para geração de energia.

É observado, portanto, especialmente em bacias hidrográficas do semiárido, a necessidade de gestão dos recursos hídricos num contexto de insuficiência de monitoramento das variáveis hidrológicas. Deste modo, salienta-se a importância da utilização de ferramentas para explorar as informações existentes, utilizando de forma eficiente os dados disponíveis. Uma destas ferramentas, segundo Tucci (1998), é a modelagem hidrológica, que facilita a compreensão e representação do comportamento de bacias hidrográficas e permite prever condições diferentes das encontradas. Atualmente, há inúmeros modelos hidrológicos, consagrados, com diversas finalidades. Um modelo pode ser definido como representação de um sistema, considerando-se sistema a estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que apresenta uma resposta a determinado estímulo, em um tempo específico.

Neste cenário de escassez de dados, se enquadra a bacia hidrográfica do rio Salitre (BHS), uma sub-bacia do Rio São Francisco, totalmente

inserida na região semiárida do Estado da Bahia e palco de conflitos pelo uso da água. Rios intermitentes são característicos de regiões semiáridas, com escoamento superficial apenas na época de chuva. No entanto, a bacia do rio Salitre apresenta grande complexidade, com trechos intermitentes e trecho perene devido à contribuição do escoamento subterrâneo. Aliado a esse comportamento, outra dificuldade encontrada para entendimento do comportamento hídrico da bacia é o fato de existir apenas um posto de medição de vazão, para uma área de drenagem de mais de 13.000 Km².

Em decorrência da necessidade de gestão dos recursos hídricos em concomitância com a escassez de dados, a BHS foi motivo de outros estudos com aplicação de modelagem hidrológica, a exemplo de Oliveira *et al.* (2005), Meira Neto *et al.* (2011) e Santos *et al.* (2012). Entretanto, os resultados obtidos são apresentados com ressalvas. Oliveira *et al.* (2005) aplicaram o modelo SWAT para o período 1975 e 1979, recomendando melhoria na quantidade de dados disponíveis. Meira Neto *et al.* (2011) avaliaram a aplicabilidade do modelo hidrológico SWAT na bacia do rio Salitre, atualizando o período de análise e constatando dificuldades na representação do escoamento de base, relacionadas à escassez de dados hidrológicos. Santos *et al.* (2012) aplicaram o modelo hidrológico SMAP, apresentando a dificuldade de representação das magnitudes das vazões, na etapa de validação da versão mensal, e de representação do escoamento de base, na calibração da versão diária.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo testar a calibração e validação de modelo hidrológico chuva-vazão para o rio Salitre, considerando sua condição hidrológica de escoamento anual, com aplicação da técnica de multicalibração, que consiste na calibração de diferentes conjuntos de parâmetros de acordo com cenários definidos. Para isso, foi aplicado o modelo hidrológico concentrado *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP), visando contribuir na geração de séries sintéticas de vazão, importantes para subsidiar a gestão estratégica dos recursos hídricos na bacia.

Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Salitre está totalmente inserida no estado da Bahia,

abrangendo uma área de 14.351 Km², localizada conforme apresentado na Figura 1.

Localizada na região semiárida, a BHS é caracterizada por uma distribuição (espacial e temporal) irregular das chuvas e ocorrência de déficit hídrico. Conseqüentemente, há trechos de intermitência de vazões ao longo do rio. A nascente do rio Salitre está localizada no município de Morro do Chapéu e deságua na margem direita do rio São Francisco, em Juazeiro, ao norte, a jusante da barragem de Sobradinho. Na margem esquerda do rio Salitre, ao norte da bacia, está localizado o rio Pacuí. A vazão deste afluente é a de maior influência no escoamento superficial do rio Salitre em seu trecho baixo.

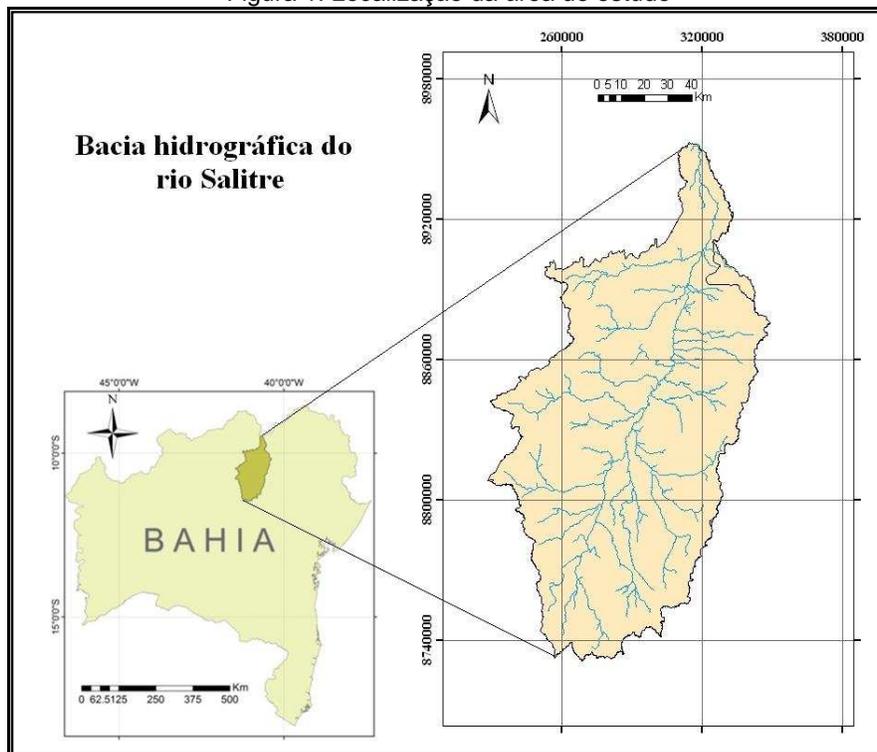
Ao longo da bacia, há grande influência dos domínios calcários e de coberturas detriticas, ocorrências geológicas favoráveis ao escoamento superficial das águas, desfavorecendo o armazenamento subterrâneo. No entanto, nota-se a presença de metassedimentos na região da nascente do rio Pacuí. As características hidrogeológicas e topográficas dessa região propiciam o confinamento de águas subterrâneas, sendo a vazão de base da região uma importante contribuição ao rio Salitre. Tais fatores são

determinantes da condição perene do Salitre a jusante da confluência com o rio Pacuí (BAHIA, 2004).

Por volta de 1983, foi construída a barragem Ouro Branco no município de Orolândia, modificando a contribuição da área de drenagem a montante do reservatório. Desde que foi construído o barramento, não houve extravasamento e, portanto, não houve contribuição para jusante da sua área de drenagem.

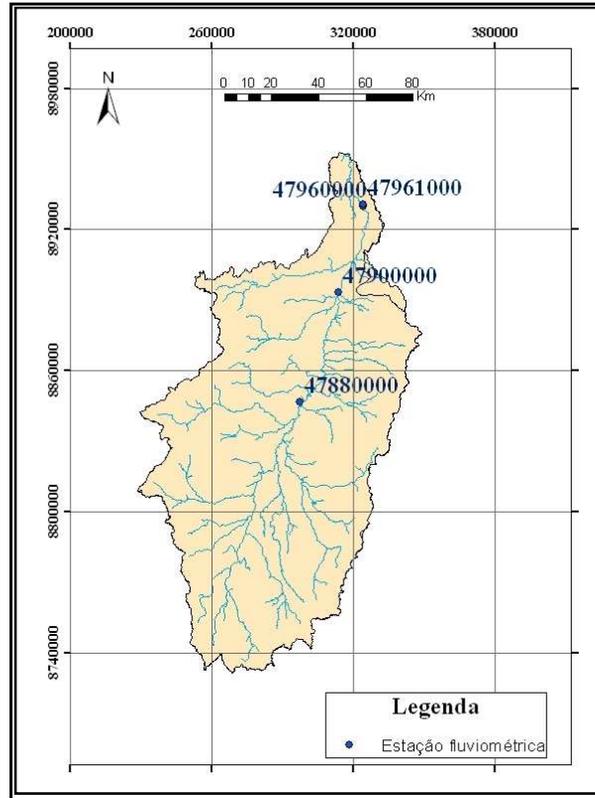
Na área da bacia do rio Salitre, há registro de quatro estações fluviométricas, sendo que apenas três possuem dados de vazão, sendo que as estações 47960000 e 47961000 representam medição em uma mesma seção, o que está evidenciado pelo mesmo valor na medição correspondente ao ano de 1973. Nessa seção, houve apenas um pequeno deslocamento no posicionamento da estação de medição devido a aspectos operacionais. Na estação 47900000 (Abreus), existe uma boa disponibilidade de dados abrangendo o período de 1984 até os dias atuais. A localização dessas estações está apresentada na Figura 2.

Figura 1: Localização da área de estudo



Fonte: autoria própria.

Figura 2: Mapa de localização das estações fluviométricas registradas na bacia de estudo



Fonte: autoria própria.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada contempla as seguintes etapas: (i) levantamento e tratamento de dados hidroclimáticos; (ii) definição dos cenários climáticos de acordo com a classificação da condição hidrológica; (iii) calibração do modelo SMAP em sua versão diária; (iv) validação dos parâmetros ajustados na calibração; (v) comparação das vazões mínimas de referência calculadas; e (vi) avaliação da multicalibração.

Os dados de precipitação e vazão foram obtidos no banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA, 2013), disponível no Hidroweb, e no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2013). Eventuais falhas nas séries de precipitação no período de análise foram preenchidas através do método da Ponderação Regional, descrito por Tucci (2007).

Para os dados de precipitação, verificou-se uma melhor disponibilidade de dados nos

períodos compreendidos entre 1963 e 1991 e entre 2003 e 2012. Foi definido como período de estudo o mais recente, contemplando a série histórica de cinco estações pluviométricas [1040028, 1040036, 1041015, 1041013 (ANA, 2013) e 83186 (INMEP, 2013)].

Os dados de evapotranspiração inseridos no modelo foram calculados a partir da série de temperatura média diária, disponíveis no BDMEP, sendo o cálculo da evapotranspiração potencial diária realizado pela formulação proposta por Hargreaves-Samani, constante em Chagas *et al.* (2006), utilizando dados de Petrolina, Senhor do Bonfim, Morro do Chapéu e Jacobina.

Para verificar a qualidade das séries fluviométricas, foi realizada a análise de consistência baseada na equação da curva-chave, conforme descrito por Tucci (2002), que analisa a qualidade das séries de vazão comparando os dados de cota e vazão medidas, para a elaboração da curva-chave, com dados de cota e vazão observadas, resultantes da extrapolação da referida curva.

Diante da dificuldade em simular vazões na área de estudo e visando obter uma melhor representatividade do modelo hidrológico, realizou-se a calibração de sua versão diária para diferentes cenários climáticos. Para tal, as séries de vazão e de precipitação foram classificadas de acordo com períodos úmidos, médios ou secos, considerando-se o período correspondente ao ano hidrológico da bacia hidrográfica.

A série de dados de vazão obtida foi classificada de acordo com a condição hidrológica, conforme a metodologia descrita por Genz e Luz (2012). Tal metodologia define a condição hidrológica (CHid) a partir do cálculo da anomalia, coeficiente adimensional que compara a vazão anual à de longo termo, considerando o desvio padrão da série fluviométrica. Para classificar os anos quanto à precipitação, foram calculadas as precipitações totais anuais na área da bacia, considerando-se o período correspondente ao ano hidrológico, e cada ano da série foi classificado de acordo com valores obtidos para a anomalia da precipitação.

Fundamentado na classificação dos anos hidrológicos quanto à precipitação, foram definidos os períodos para calibração e validação da versão diária do modelo SMAP apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Definição de aplicação dos anos hidrológicos na versão diária do modelo SMAP

Período	Cenário Climático	Aplicação
10/2004 a 09/2005	Úmido	Calibração
10/2005 a 09/2006	Úmido	Validação
10/2006 a 09/2007	Médio	Validação
10/2007 a 09/2008	Médio	Calibração
10/2010 a 09/2011	Seco	Calibração
10/2011 a 09/2012	Seco	Validação

Fonte: autoria própria.

A metodologia de cálculo da evapotranspiração potencial diária adotada foi desenvolvida por Hargreaves-Samani (*apud* CHAGAS *et al.*, 2006).

O SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) é um modelo de simulação hidrológica do tipo chuva-vazão, classificado como determinístico, conceitual e concentrado, desenvolvido por Lopes, Braga e Conejo em 1981 (LOPES *et al.*, 1981). Inicialmente, foi desenvolvida a versão diária do modelo, sendo posteriormente elaborada a versão mensal, com adaptações em sua estrutura.

A metodologia de simulação de vazão diária pelo modelo é constituída a partir da representação das fases do escoamento (superficial, de base e recarga) em três reservatórios: reservatório do solo (zona aerada), reservatório da superfície da bacia e reservatório subterrâneo (zona saturada), com variáveis atualizadas a cada dia.

A calibração do modelo foi realizada por método de tentativa e erro, com a verificação do ajuste dos parâmetros na calibração do modelo baseada em três aspectos: (i) verificação da aderência do gráfico de vazão calculada ao de vazão observada, através de observação visual; (ii) cálculo do valor de correlação; e (iii) cálculo dos valores das funções objetivo, que representam o ajuste da calibração para os valores de vazão máximos, mínimos e médios. Na calibração do modelo SMAP, objetivou-se minimizar os valores dessas funções objetivo, o que representa uma melhor aproximação entre os valores simulados e observados.

A versão diária do modelo hidrológico foi calibrada para os períodos de diferentes cenários climáticos, através de ajustes do modelo realizados para anos hidrológicos úmidos, médios e secos, sendo obtidos diferentes conjuntos de parâmetros calibrados para cada um desses cenários. No presente trabalho, o processo descrito é chamado de processo de multicalibração.

Considerando o comportamento complexo do sistema hídrico modelado, foram definidos quatro critérios de calibração distintos, para verificação de qual situação melhor representa o comportamento do escoamento na bacia para cada cenário climático. Em virtude da importante influência do rio Pacuí no escoamento do rio Salitre, principalmente no período seco, optou-se por um critério considerando a área da bacia e outro levando em conta apenas a área de drenagem desse rio (992 Km²). Essa situação foi combinada com o critério de extrapolar a faixa de variação recomendada para o parâmetro de abstração inicial (volume de água necessário para o preenchimento dos vazios do solo), de forma a representar a contribuição do escoamento básico da região do rio Pacuí, responsável pela condição perene do rio na seção de medição de vazão em estudo, mantendo-se esse parâmetro na faixa recomendada na metodologia. Os critérios de calibração estão definidos no Quadro 1.

Figura 1: Representação do modelo SMAP em sua versão diária

DADOS DE ENTRADA	PROCESSO SIMULADO	REPRESENTAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO	PARÂMETROS	DADOS DE SAÍDA
Precipitação Evapotranspiração Tipo de solo	Vazão	$R_{solo}(i+1) = R_{solo}(i) + P - E_s - E_r - Rec$ $R_{sup}(i+1) = R_{sup}(i) + E_s - E_d$ $R_{sub}(i+1) = R_{sub}(i) + Rec - E_b$ Inicialização: $R_{solo}(1) = Tu_{in} \cdot Str$ $R_{sup}(1) = 0$ $R_{sub}(1) = E_{bin} / (1 - k_k) / Ad \cdot 86.4$ Onde: R_{solo} = reservatório do solo (zona acrada) R_{sup} = reservatório da superfície da bacia R_{sub} = reservatório subterrâneo (zona saturada) P = chuva E_s = escoamento superficial E_r = evapotranspiração real Rec = recarga subterrânea E_d = escoamento direto E_b = escoamento básico Tu_{in} = teor de umidade inicial (adimensional) E_{bin} = vazão básica inicial (m^3/s) Ad = área de drenagem (km^2)	Str - capacidade de saturação do solo (mm) K_{2t} - constante de recessão do escoamento superficial (dias) C_{rec} - parâmetro de recarga subterrânea (%) A_i - abstração inicial (mm) $Capc$ - capacidade de campo (%) K_{kt} - constante de recessão do escoamento básico (dias) Faixas de variação: $100 < Str < 2000$ $0,2 < K_{2t} < 10$ $0 < C_{rec} < 20$ $2 < A_i < 5$ $30 < Capc < 50$ $30 < K_{kt} < 180$	Série sintética de vazão diária

Fonte: autoria própria.

Quadro 1: Descrição dos critérios de calibração para versão diária do modelo SMAP

Critério	Descrição
1	Calibração considerando-se área de drenagem total da bacia hidrográfica, desconsiderando-se a área de drenagem da barragem de Ouarolândia, e sem extrapolação do parâmetro abstração inicial
2	Calibração considerando-se área de drenagem total da bacia hidrográfica, desconsiderando-se a área de drenagem da barragem de Ouarolândia, com extrapolação do parâmetro abstração inicial
3	Calibração considerando-se área de drenagem do rio Pacuí, sem extrapolação do parâmetro abstração inicial
4	Calibração considerando-se área de drenagem do rio Pacuí, com extrapolação do parâmetro abstração inicial

Fonte: Autoria própria

A validação dos parâmetros foi realizada através da aplicação dos parâmetros obtidos na fase de calibração no modelo, utilizando dados de entrada referentes a um período distinto daquele utilizado na calibração.

Para análise dos resultados, foram adotados como índices comparativos, além dos

valores de correlação, funções objetivo e vazões média, mínima e máxima obtidos na calibração e na validação, coeficientes de Nash-Sutcliffe (The Nash-Sutcliffe Efficiency – NSE), Erro médio quadrático (RMSE), Erro percentual no volume (EV) e proporção de acertos.

Visando fornecer subsídio à gestão dos recursos hídricos, foi composta uma série diária de dados calculados para o período em estudo, com os parâmetros calibrados para cada cenário climático definido. A partir dessa série, foram calculados valores de vazões mínimas de referência Q_{90} e $Q_{7,10}$, as quais são de importante aplicação na outorga do uso da água e enquadramento dos corpos d'água.

A vazão mínima de referência Q_{90} é obtida através do cálculo da curva de permanência, a qual, conforme Tucci (2007), consiste na relação entre vazão e frequência em que é igualada ou superada. A Q_{90} corresponde, portanto, à vazão com 90% de frequência de ocorrência.

A vazão mínima de referência $Q_{7,10}$ equivale à vazão mínima de sete dias de duração e tempo de retorno de dez anos. O valor da $Q_{7,10}$ é calculado a partir da estatística básica, através de distribuições de frequência, às quais associa a vazão a um tempo de recorrência. Neste trabalho, considerou-se a distribuição de Weibull para obtenção do resultado da vazão de referência.

Para análise dos resultados obtidos com a calibração para os diferentes cenários climáticos, foi realizada uma nova calibração do modelo para toda série de dados, considerando o critério de melhor calibração encontrado para a multicalibração. Desta forma, foram simuladas duas séries de dados distintas: a primeira simulada com três conjuntos de parâmetros calibrados para cada cenário climático; e a segunda simulada com um conjunto de parâmetros calibrados para toda série.

Com as duas séries de vazões calculadas, compararam-se os valores de Q_{90} e $Q_{7,10}$ destas duas séries, tendo como referência de comparação os valores de Q_{90} e $Q_{7,10}$ da série de vazão diária observada disponível no banco de dados. Para comparação entre os resultados, foram calculados, também, os coeficientes de desempenho NSE, RMSE, EV e proporção de acertos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados da calibração dos parâmetros para cada critério referente às três condições climáticas.

Com a calibração do modelo SMAP pelo método da multicalibração, observou-se uma tendência a um melhor resultado extrapolando-se

a faixa de variação determinada para o parâmetro de abstração inicial, considerando-a negativa.

Na calibração da versão diária do modelo SMAP para o período seco, foi observado melhor desempenho para representação de valores médios de vazão e resultados de representatividade menor para valores máximos. No entanto, como os dados constantes na série histórica para vazões de maiores magnitudes abrangem os erros da curva-chave identificada na análise de consistência dos dados, o desempenho do modelo não pode ser considerado como inferior, uma vez que o resultado inferior de representatividade dessas vazões pode ser atribuído à má qualidade dos dados observados.

Para a condição hidrológica seca, os coeficientes calculados apresentaram melhor valor para o critério que corresponde à área de drenagem do rio Pacuí e à extrapolação do valor de abstração inicial (Critério 4). Justificam-se tais resultados devido à influência do rio Pacuí no escoamento em períodos secos, que resulta de características de rio perene.

Além do valor da abstração inicial (A_i) negativo, a constante de recessão do escoamento básico (K_{kt}) esteve acima do limite de 180 dias sugerido por Lopes (1999), nos quatro critérios de calibração. Demonstrando a dinâmica do escoamento no rio Salitre, a extrapolação do valor do parâmetro mencionado pode ser justificada pelo significativo confinamento de águas no aquífero da região do rio Pacuí e manutenção da vazão do rio Salitre, sem ocorrência de recessão do escoamento com o fim do evento chuvoso.

Para a condição hidrológica média, a análise considerou a área de drenagem total da bacia e abstração inicial dentro da faixa recomendada, sendo que as vazões máximas calculadas foram aquelas que mais se distanciaram dos valores observados. Entretanto, para a validação da calibração desse período, os resultados de correlação e Funções Objetivo obtidos na etapa de validação apontam uma representatividade pouco satisfatória. Para a condição hidrológica média, o Critério 4 também apresenta resultados satisfatórios.

Já para a condição hidrológica úmida, a análise dos resultados obtidos indicam possibilidade de consideração dos parâmetros calibrados, levando em conta a área de drenagem do rio Pacuí, sem extrapolação do parâmetro abstração inicial (Critério 3), que apresentou um

melhor valor de correlação e menor FO para mínimos. Recomenda-se maior proximidade entre valores mínimos, uma vez que a definição das vazões de referência ocorre em relação às vazões mínimas, além dos dados da estação fluviométrica analisada serem mais consistentes para tais valores. A escolha considerou, também, a melhora significativa no resultado de correlação e boa aproximação da vazão média calculada à vazão

média observada para o critério selecionado. Para a validação desses parâmetros, essa calibração apresentou uma correlação de 52% entre valores calculados e observados, no entanto, os resultados de Funções Objetivo (FO) foram pouco satisfatórios. O Critério 2, entretanto, representa melhor as vazões máximas, considerando a representação de cheias na bacia que proporciona a contribuição da área de drenagem total da bacia.

Tabela 2: Funções Objetivo calculada com os resultados da calibração dos parâmetros para cada critério de estudo

Condição Hidrológica	Coeficiente	Critério 1	Critério 2	Critério 3	Critério 4	Representação gráfica
Seca	Correlação	0,58	0,74	0,64	0,75	
	FOmín	37,52	9,35	13,89	9,03	
	FOmáx	46,42	16,07	22,78	15,70	
	FOméd	27,02	8,45	11,92	8,17	
Média	Correlação	0,65	0,60	0,64	0,66	
	FOmín	38,12	51,69	28,38	30,25	
	FOmáx	205,85	273,10	270,66	265,78	
	FOméd	56,63	31,21	21,74	21,49	
Úmida	Correlação	0,67	0,58	0,67	0,60	
	FOmín	430,04	333,51	180,79	259,19	
	FOmáx	1020,42	42,12	49,75	41,71	
	FOméd	2198,77	55,85	92,88	52,08	

Fonte: autoria própria.

A comparação dos resultados de representatividade do modelo para as diferentes condições hidrológicas e critérios de calibração, nas etapas de calibração e validação diárias,

apontou um melhor desempenho na representação de vazões no período seco, enquanto que foi observado desempenho inferior de representatividade no período úmido. A Tabela

3 apresenta os coeficientes de desempenho para as condições hidrológicas avaliadas, considerando a série histórica simulada para os parâmetros selecionados.

Para verificação da melhoria na série histórica simulada pela utilização da multicalibração, foi realizada calibração convencional para a área de drenagem total da bacia hidrográfica, desconsiderando-se a área de drenagem da barragem de Ouroândia, com

extrapolação do parâmetro abstração inicial. A Tabela 4 apresenta a comparação entre os resultados de vazões de referência obtidos com a calibração para as diferentes condições hidrológicas e critérios de calibração (multicalibração) e os obtidos com a calibração para o período total sem critérios de calibração distintos (calibração convencional), relacionando-os aos valores observados.

Tabela 3: Coeficientes de desempenho para cenários de calibração diária do modelo SMAP

Coeficiente	Valor		
	Período Seco	Período Médio	Período Úmido
NSE	-1,05	-0,37	-0,77
RMSE	0,20	0,73	0,52
EV (%)	11,89	25,52	30,03
Proporção de acertos	0,50	0,21	0,27

Fonte: autoria própria.

Tabela 4: Vazões de referência calculadas e observadas

Vazão de referência	Q ₉₀ (m ³ /s)	Q _{7,10} (m ³ /s)
Calculada considerando a multicalibração	0,32	0,26
Calculada considerando a calibração convencional	0,51	0,54
Observada	0,31	0,22

Fonte: autoria própria.

Observa-se, nos resultados de vazões de referência obtidos, a contribuição da calibração para diferentes cenários climáticos ao desempenho do modelo, uma vez que houve melhoria na representatividade dos valores observados na multicalibração, se comparada à calibração convencional.

A Tabela 3 apresenta os valores de coeficientes de desempenho obtidos para calibrações considerando e não considerando cenários climáticos distintos.

Notam-se, na Tabela 5, melhores resultados de representatividade com a multicalibração. Apesar dos valores dos coeficientes de desempenho se apresentarem pouco satisfatórios nas duas situações expostas, foi obtida melhoria com a divisão dos períodos de acordo com as características climáticas, sendo observado NSE cinco vezes maior, RMSE e EV duas vezes menores e aumento na proporção de acertos para a multicalibração, com relação à calibração geral para a série.

Tabela 5: Coeficientes de desempenho do modelo para calibrações, considerando e não considerando cenários climáticos

Coeficiente	Valor	
	Multicalibração	Calibração
NSE	-5,46	-25,51
RMSE	0,60	1,22
EV (%)	33,08	77,30
Proporção de acertos	0,23	0,14

Fonte: autoria própria.

CONCLUSÕES

Foi observada insuficiência de dados de vazão na bacia hidrográfica do rio Salitre, havendo apenas uma estação fluviométrica com monitoramento contínuo (estação de Abreus), o que levou à adoção da modelagem hidrológica do tipo chuva-vazão para a geração de séries, a fim de subsidiar a gestão dos recursos hídricos na área da bacia. Aplicou-se o modelo SMAP para simulação chuva-vazão na bacia, devido à sua simplicidade e êxito em aplicações em rios de região semiárida.

A importante contribuição do escoamento básico da região do rio Pacuí, especialmente nos períodos secos, determina uma condição de intermitência a montante da confluência do Pacuí com o Salitre, e vazão perene à sua jusante. Desta forma, foi sugerida a calibração do modelo para diferentes cenários climáticos, com objetivo de alcançar melhor representação do escoamento, considerando o comportamento distinto entre os períodos úmido, médio e seco.

Nas etapas de calibração e validação diárias, realizadas para diferentes cenários climáticos, foi obtido um melhor resultado de desempenho do modelo para o período correspondente à condição hidrológica seca.

A análise da representatividade realizada para as etapas de calibração e validação do modelo obteve resultados dos coeficientes de desempenho do modelo calculados com valores próximos aos esperados, excetuando-se o valor de NSE, que indicou representação insatisfatória nas três condições hidrológicas para a validação.

Considerando os resultados de desempenho, evidenciados por valores de correlação e Funções Objetivo, compatibilidade entre os regimes de variação de vazões calculada e observada e valores dos coeficientes de desempenho adotados na análise da representatividade, a aplicação da versão diária do modelo foi considerada adequada para representação do escoamento no rio Salitre diante da situação de disponibilidade de informação e geração de informação para ações de gestão.

Os resultados obtidos indicaram melhor representatividade do volume escoado e, conseqüentemente, valores médios. Para fins de gestão dos recursos hídricos, o comportamento supracitado é adequado.

O modelo foi considerado restrito para extrapolação temporal dos valores de vazão, sendo indicado para espacialização dos dados. No entanto, tal resultado é válido para a bacia em estudo, uma vez que a deficiência de informações fluviométricas é espacial - a série de vazão é extensa (período de 1984 até a atualidade), contudo, há somente uma estação de medição em toda bacia, ressaltando que essa espacialização no período seco corresponde apenas à área de drenagem do rio Pacuí.

Destaca-se a contribuição do trabalho realizado para a bacia hidrográfica estudada, a qual, devido às interações hidrológicas, apresentou dificuldades de modelagem em estudos anteriormente realizados.

Enfatiza-se, ainda, a melhoria de resultados em decorrência da multicalibração. A aplicação de diferentes conjuntos de parâmetros pode representar significativo ganho na qualidade dos dados simulados, conforme demonstrado com a comparação entre os valores de vazões de referência e coeficientes de desempenho calculados na calibração, considerando os diferentes cenários e calibração total da série, quando relacionados aos valores observados de vazão.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Hidroweb* – Sistema de Informações Hidrológicas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb>>. Acesso em: 08 mar. 2013.

BAHIA. Superintendência de Recursos Hídricos. *Plano Estadual de Recursos Hídricos*. Salvador, 2004. CD-ROM.

CHAGAS, G. F. B.; SOUZA, A. M. L.; ROCHA, E. J. P. Estimativa da taxa de evapotranspiração pelos métodos de Hargreaves-Samani (1985) e Linacre (1977) em área de floresta tropical - Caxiuanã/PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis. *Anais...* Brasília: SBMET, 2006. Disponível em: <http://www.cbmet.com/edicoes.php?pageNum_Recordset_busca=8&totalRows_Recordset_busca=1006&cgid=14>. Acesso em: 27 jan. 2013.

GENZ, F.; LUZ, L.D. Distinguishing the effects of climate on discharge in a tropical river highly impacted

by large dams. *Hydrological Sciences Journal*, v. 57, p. 1020-1034, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *BDMEP* - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 08 mar. 2013.

LOPES, J.E.G.; BRAGA JR.; B.P.F.; CONEJO, J.G.L. Simulação hidrológica: aplicações de um modelo simplificado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 3., 1981, Fortaleza. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 1981 (v. 2, p. 42-62).

MEIRA NETO, A. A.; FONTES, A. S.; MEDEIROS, Y. D. P. Aplicabilidade do modelo SWAT a um sistema hidrológico complexo de clima semi-árido. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2011. CD-ROM.

OLIVEIRA, R. C.; OLIVEIRA, M. Q. C.; MEDEIROS, Y. D. P. Aplicação do modelo SWAT em região semiárida. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS

HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2005. CD-ROM.

PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Porto Alegre: ABRH, 2001.

SANTOS, B. V. C.; FONTES, A. S.; MEDEIROS, Y. D. P. M. Modelagem Hidrológica da bacia do Rio Salitre como subsídio para estudos da qualidade da água. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 33., 2012, Salvador. *Anais...* Rio de Janeiro: ABES, 2012. (Pen drive).

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia, ciência e aplicação*. 4. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2007.

_____. *Modelos hidrológicos*. 1. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.

_____. *Regionalização de vazões*. 1. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS. 2