

Simulação Hidrológica Mensal em Bacias Hidrográficas sem Monitoramento Fluviométrico

Isabel Saraiva, Wilson Fernandes, Mauro Naghettini

Universidade Federal de Minas Gerais

bel_saraiva@yahoo.com.br, wilson@ehr.ufmg.br, naghet@netuno.lcc.ufmg.br

Recebido: 10/06/10 - revisado: 12/10/10 - aceito: 20/12/10

RESUMO

Os modelos de simulação hidrológica chuva-vazão são aplicados para a obtenção de séries sintéticas de vazões a partir de dados históricos de precipitação. Há uma crescente demanda em aplicar esses modelos hidrológicos para bacias hidrográficas para as quais se tem uma rede de monitoramento fluviométrico incipiente, ou até mesmo inexistente. Entretanto, na ausência de dados fluviométricos, o modelo de transformação de chuva em vazão não pode ter seus parâmetros calibrados. Como alternativa, pode-se utilizar métodos de transferência espacial de informações, denominados de regionalização hidrológica, para inferir os parâmetros do modelo chuva-vazão em locais desprovidos de dados de vazão. Os métodos estudados nesta pesquisa foram aplicados na bacia do Rio Paraopeba, afluente do Rio São Francisco, localizada no estado de Minas Gerais. Tal bacia foi escolhida devido à sua disponibilidade de dados. O modelo hidrológico utilizado neste trabalho é o SMAP em escala mensal, cuja estrutura conta com seis parâmetros relacionados às características físicas da bacia. Para a regionalização foi utilizado o método da regressão linear múltipla, relacionando os parâmetros com as características geomorfológicas, climáticas, hidrogeológicas e pedológicas da bacia. As equações obtidas foram verificadas, quanto a sua adequação, pelo método Jack-knife. Os resultados encontrados mostram que o método permite inferir vazões médias mensais em locais desprovidos de dados com uma boa precisão. Além disso, uma vez que os modelos regionais foram construídos a partir de características físicas de fácil obtenção, avalia-se que o método pode ser reavaliado e estendido para outros locais não estudados aqui.

Palavras-chave: Regionalização hidrológica, modelos chuva-vazão, SMAP.

INTRODUÇÃO

Os modelos de simulação hidrológica chuva-vazão podem ser aplicados para a obtenção de séries sintéticas de vazões a partir de dados históricos de precipitação e evaporação. Percebe-se uma crescente demanda em aplicar modelos hidrológicos em bacias hidrográficas, nas quais se tem uma rede de monitoramento fluviométrico incipiente, ou até mesmo inexistente. Sabe-se, entretanto, que na ausência de dados fluviométricos, o modelo de transformação de chuva em vazão não pode ter seus parâmetros calibrados a partir da comparação direta entre as vazões simuladas e observadas. Nessas circunstâncias, é preciso utilizar métodos de transferência espacial de informações ou, em outras palavras, compensa-se a insuficiente caracterização temporal de determinada variável por sua melhor caracterização espacial, tal como preconizado nos princípios gerais da regionalização hidrológica.

Com a finalidade de contribuir para o conhecimento e entendimento referente à disponibilidade hídrica em bacias desprovidas ou carentes de uma rede de monitoramento hidrométrico, este trabalho busca estudar um método de análise regional hidrológica, que permita estimar os parâmetros de um modelo hidrológico chuva-vazão por meio de relações com as características climáticas e geomorfológicas da bacia hidrográfica em estudo.

Um modelo de simulação hidrológica chuva-vazão, ou simplesmente modelo chuva-vazão, é uma representação matemática simplificada dos processos que ocorrem no ciclo da água em uma bacia hidrográfica, e é utilizado para simular respostas da bacia a eventos de precipitação. Tais estudos hidrológicos se fazem necessários em bacias rurais, bem como em bacias urbanas, com vistas à obtenção de séries de vazões úteis para a gestão de recursos hídricos e aplicações em projetos de engenharia. Dessa maneira pode-se compreender e conhecer os impactos advindos das intervenções humanas, por

meio de simulações de diferentes cenários de uso e ocupação do solo na bacia em estudo.

Para as aplicações supracitadas, destacam-se os modelos conceituais, uma vez que esses utilizam uma estrutura lógica com equações matemáticas compostas de parâmetros, os quais apresentam analogias com os processos físicos envolvidos. Além disso, essa classe de modelagem requer uma menor quantidade de dados de entrada quando comparados aos modelos fisicamente fundamentados, nos quais se tem a necessidade de uma maior quantificação dos processos hidrológicos modelados, de modo a permitir sua utilização prática. Esse fato ocorre porque os modelos fisicamente fundamentados apresentam relações diretas dos parâmetros e de suas funções, com os processos físicos, fazendo-se necessária uma estrutura do modelo mais delineada e complicada, face à complexidade de todos os fatores que afetam o ciclo hidrológico.

Os processos hidrológicos, tais como a precipitação, a evaporação, a infiltração e o escoamento em rios dependem de um grande número de fatores, o que dificulta na quantificação destes fenômenos físicos. O modelo chuva-vazão é uma possível representação desses processos, buscando estimar a disponibilidade hídrica simulando as vazões na saída da bacia considerando diferentes eventos de precipitação. Entretanto, o ambiente natural está sempre sendo modificado, sendo necessário monitorar o seu comportamento, para que seja possível prever a sua resposta a diferentes ações, tais como precipitações extremas, modificações do uso do solo e estiagens (Tucci, 1998). Assim sendo, é importante que os parâmetros estimados para o modelo possam ser relacionados com as características naturais e com o uso do solo da bacia hidrográfica, possibilitando a inferência de informações hidrológicas em locais com ausência de dados de vazão.

Segundo Yadav *et al.* (2007) a dificuldade em utilizar modelos hidrológicos em bacias não monitoradas pode ser dividida em dois tipos de situações: utilização de modelos fisicamente fundamentados e regionalização de parâmetros de modelos conceituais a partir das características físicas da bacia. Esses mesmos autores descrevem cada uma dessas situações da seguinte forma: o primeiro caso, espera-se que os parâmetros do modelo estejam diretamente relacionados com as características físicas da bacia, podendo ser estimados pela coleta de dados físicos na bacia, entretanto diferenças de escalas e erros na estrutura do modelo, muitas vezes dificultam a especificação desses dados físicos; na segunda situação, para aplicar modelos conceituais, utilizando regionalização de parâmetros, uma estru-

tura de modelo hidrológico parcimonioso é selecionada e ajustada para respostas observadas de bacias hidrográficas monitoradas. Em seguida, equações de regressão são desenvolvidas na tentativa de explicar os valores dos parâmetros que foram calibrados.

Ainda se tratando dessa segunda situação, embora alguns dos parâmetros do modelo possuam uma forte correlação com características físicas de bacias hidrográficas, é comum que pouca ou nenhuma correlação significativa seja encontrada para parâmetros de diferentes modelos. Além disso, essa abordagem também apresenta mais alguns desafios como, por exemplo, os erros de estrutura do modelo e as dificuldades de se encontrar uma estratégia de calibração adequada, preservando o significado físico dos parâmetros do modelo. Ao mesmo tempo, há uma premissa de que a incerteza é inerente e inevitável na modelagem hidrológica (Yadav *et al.*, 2007).

Nesse sentido, diversas iniciativas têm sido feitas em busca de avanços para realizar previsões de vazões em bacias sem monitoramento fluviométrico. Uma dessas iniciativas é a da IAHS – *International Association of Hydrological Sciences*, a qual consiste no esforço da comunidade científica internacional em buscar e implementar programas para fazer previsões de vazões em bacias sem monitoramento hidrométrico intitulada *Predictions in Ungauged Basins – PUB*. Sivapalan *et al.* (2003) definem PUB como a previsão ou previsão de informações hidrológicas em bacias não monitoradas ou pouco monitoradas, no que diz respeito à quantidade ou qualidade da água, associadas às incertezas dessas estimativas, usando dados climáticos, pedológicos, de uso do solo e geológicos.

Nesse contexto, a presente pesquisa propõe uma metodologia para a regionalização de parâmetros de um modelo conceitual de simulação hidrológica chuva-vazão, em intervalo de tempo mensal, por meio de métodos estatísticos, visando equacionar a relação dos parâmetros deste modelo com as características fisiográficas, geológicas e meteorológicas da bacia, permitindo, assim, a inferência de informações hidrológicas em regiões com carência de dados fluviométricos.

MATERIAL E MÉTODOS

O Modelo Hidrológico

A finalidade do modelo na aplicação deste trabalho é estimar uma série de vazões médias mensais em bacias sem monitoramento fluviométrico.

Para utilizar modelos hidrológicos para predição de vazões em bacias não monitoradas é enfatizada por vários autores (Kim e Kaluarachchi, 2008; Limbrunner *et al.* 2005; Diniz, 2008; Alexandre *et al.* 2005) a necessidade de se trabalhar com modelos hidrológicos parcimoniosos, ou seja, com um reduzido número de parâmetros a serem estimados.

No que se refere à disponibilidade de dados hidrológicos, a maioria dos modelos utiliza, no mínimo, os dados de precipitação, evaporação e vazão em sua estrutura. À medida que a complexidade do modelo aumenta, outros dados, tais como o uso do solo e a geologia da bacia, são necessários. Uma vez que o objetivo desta pesquisa é justamente estimar vazões em bacias desprovidas de dados fluviométricos, verifica-se que o modelo a ser utilizado deve ser o mais simples possível no tocante aos dados de entrada. Um modelo com tais características é o SMAP, do acrônimo *Soil Moisture Accounting Procedure*, introduzido por Lopes *et al.* (1981). Trata-se de um modelo conceitual, com apenas 4 parâmetros calibráveis e 2 parâmetros de inicialização fixos, que mostrou resultados satisfatórios nas avaliações aqui realizadas. Além disso, o SMAP necessita somente de dados mensais de precipitação e evaporação, os quais são relativamente abundantes nos locais onde a metodologia foi testada.

O SMAP simula o balanço da umidade do solo fundamentado em três reservatórios lineares fictícios que representam a superfície e as zonas não saturada e saturada do solo. Neste trabalho escolheu-se trabalhar com dados mensais e, portanto o reservatório de superfície é excluído da estrutura do modelo, pois o amortecimento desse reservatório ocorre em intervalos menores que o mês. A equação de separação da chuva efetiva do SCS - *Soil Conservation Service* é utilizada para efetuar o cálculo da chuva efetiva. A Figura 1 ilustra a estrutura de integração dos reservatórios fictícios, empregada pelo modelo.

A cada evento de precipitação (P), é feito um balanço de massa. Uma fração da precipitação é calculada pela equação 1 obtida pelo método do SCS e transferida como escoamento superficial.

$$ES = \frac{(P - A_i)^2}{(P - A_i + S)} \quad (1)$$

Na equação 1 A_i é a abstração inicial e S é a abstração potencial (quantidade máxima de água que pode ser retida no solo). No método do SCS a abstração potencial S é parametrizada pela variável CN (*curve number*), que tem valores crescentes com a

taxa de impermeabilização do solo, sendo o máximo teórico igual a 100.

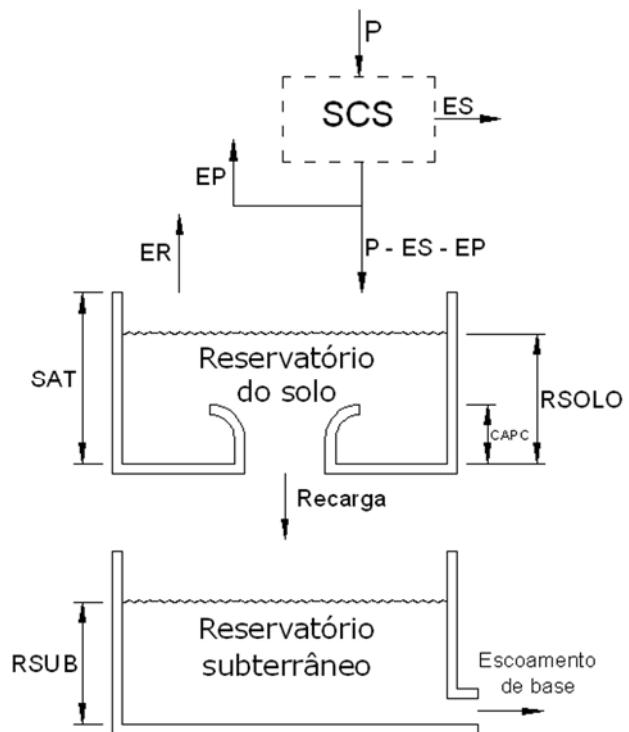


Figura 1 - Esquema físico do modelo SMAP
(Adaptado de Lopes *et al.*, 1981)

A técnica do SCS que, em geral, se aplica para eventos isolados de precipitação-vazão, foi substituída por Lopes *et al.* (1981) por uma função exponencial para ser utilizada de forma contínua. Tal substituição foi oportuna no caso desta pesquisa uma vez que a variável CN seria calculada como um valor médio o que o tornaria pouco sensível às variabilidades das bacias. Essa função substitui uma família de curvas do SCS que dependem da precipitação efetiva, dada por:

$$ES = P \times TU^{E2} \quad (2)$$

na qual, TU é a taxa de umidade do solo e $E2$ é o parâmetro de escoamento superficial, adimensional, determinado a partir de valores observados de chuva e vazão.

No reservatório do solo (RSOLO) ocorrem duas saídas: uma através das perdas por evapotranspiração (ER) e a outra pela recarga (REC) do reservatório subterrâneo (RSUB). A recarga acontece quando for ultrapassada a capacidade de campo do

solo, que ocorre quando a quantidade de água infiltra-se for maior que a capacidade do solo de reter água por capilaridade. A entrada de água no *RSOLO* é dada por: $P - ES - EP$, na qual EP é a evapotranspiração potencial. As duas saídas mencionadas são quantificadas pelas seguintes equações:

$$ER = EP \times TU \quad (3)$$

$$REC = RSOLO \times TU^4 \times CREC \quad (4)$$

nas quais, $CREC$ é o coeficiente de recarga subterrânea.

O modelo inicia-se com as seguintes condições de umidade:

$$RSOLO(1) = SOLIN \times SAT \quad (5)$$

$$RSUB(1) = \frac{SUBIN \times A \times 2630}{1 - K} \quad (6)$$

nas quais $SOLIN$ é a taxa de umidade inicial do solo, $SUBIN$ é a vazão básica inicial, A é a área de drenagem, SAT é a capacidade de saturação do solo e K é a constante de recessão do escoamento subterrâneo.

Finalmente o cálculo da vazão é dado pela soma dos escoamentos superficiais e de base na área de drenagem da bacia.

A calibração dos parâmetros do modelo foi feita de forma automática, utilizando o algoritmo DDS – *Dynamically Dimensioned Search* – desenvolvido por Tolson (2005). O DDS é um algoritmo de busca que foi desenvolvido com a finalidade de encontrar soluções satisfatórias, não necessariamente ótimas, de acordo com uma função objetivo. A busca é realizada sorteando-se soluções candidatas com um conjunto de valores de parâmetros e estes valores são, em seguida, perturbados, ou seja, alterados em seu valor, de forma aleatória. Estas perturbações são amostradas de uma distribuição normal com uma média de zero e desvio padrão 0,2. Caso o conjunto de parâmetros amostrados forneça um melhor valor para a função objetivo, este é tomado como referência para a próxima amostragem.

Foi adotado como critério a minimização da diferença entre as vazões estimadas e observadas dada pela seguinte função objetivo:

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_{obs}^i - Q_{est}^i}{Q_{obs}^i} \right)^2 \quad (7)$$

na qual Q_{est} é a vazão estimada pelo modelo, Q_{obs} é a vazão observada e n é o número de meses simulados. O modelo SMAP possui seis parâmetros em sua estrutura, dentre os quais apenas quatro foram estimados pela calibração automática, a saber: $E2$, $CREC$, K e SAT .

As variáveis de estado iniciais do modelo *SOLIN* e *SUBIN* são estimadas de acordo com o período inicial da calibração, sendo recomendado iniciar no final do período de estiagem, quando tais parâmetros possuem valores mínimos.

Foi utilizado o critério de Nash para avaliar a qualidade da calibração, tal critério é dado por:

$$NASH = 1 - \frac{\sum (Q_{est} - Q_{obs})^2}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (8)$$

Uma análise gráfica dos dados de saída foi realizada de forma a avaliar a adequação do modelo aos dados observados.

Regionalização de Parâmetros

Segundo Vogel (2005), a dificuldade em calibrar um modelo de simulação hidrológica em locais sem dados de vazão é similar ao de estimar uma distribuição de probabilidades em bacias sem monitoramento fluviométrico e, portanto, a regionalização de parâmetros de modelos é beneficiada pelo longo histórico de métodos estatísticos de análise regional de freqüências.

Alguns dos métodos de transferência espacial de informações hidrológicas são descritos por Vogel (2005), tais como: Regressão, Interpolações espaciais e Calibração híbrida. Exemplos de aplicação desses métodos são apresentados por Alexandre *et al.* (2005), Kim e Kaluarachchi (2008), Helvemans *et al.*, (2006), Fernandez *et al.* (2000) e Castellarin *et al.* (2007).

O método estatístico de análise regional utilizado neste trabalho é o de regressão múltipla, sugerido por Kim e Kaluarachchi (2008) como um método já aprimorado que geralmente apresenta resultados satisfatórios, dependendo do modelo hidrológico utilizado e das características da bacia a serem relacionadas.

As características mencionadas dizem respeito às propriedades físicas e geomorfológicas tais como: área de drenagem, declividade, comprimento do talvegue, densidade de drenagem, precipitação média anual dentre outras. É possível ainda relacionar com a variável *CN* do modelo desenvolvido pelo SCS que pode ser mapeada para cada região.

Para possibilitar a relação dos parâmetros de um modelo hidrológico com as características físicas da bacia é necessário que estas tenham uma variabilidade espacial no local em estudo. Por esse motivo o levantamento dessas características constitui-se uma parte importante do estudo de regionalização de parâmetros de um modelo hidrológico.

No trabalho aqui descrito, o método de regressão linear múltipla foi utilizado para regionalizar os parâmetros do modelo SMAP. As variáveis explicativas foram escolhidas pelo método estatístico *Step Forward Regression*, o qual realiza um teste de uma seqüência de combinações possíveis de variáveis, acrescentando-as passo a passo. Esse método é aplicado iterativamente de modo a incluir variáveis explicativas, verificando as respectivas significâncias por meio do cálculo da estatística F_{parcial} . Assim, após avaliar essas combinações a mais significativa é a escolhida.

O teste do F_{parcial} utiliza a distribuição F de Snedecor determinando-se os níveis de significância que se deseja para avaliar a contribuição de uma variável explicativa ao modelo de regressão múltipla (Naghettini e Pinto, 2007).

Análise de sensibilidade

O método para análise de sensibilidade utilizado neste trabalho foi o proposto por Abdulla e Al-Branih (2000) que o aplicaram para reduzir o número de parâmetros a serem estimados para o modelo conceitual de transformação de chuva em vazão SFB – *Surface inFiltration Baseflow*.

O método proposto é realizado adotando o seguinte procedimento:

1. O modelo é calibrado automaticamente para todos os parâmetros do modelo;
2. Faz-se uma alteração no valor de apenas um parâmetro mantendo fixos os demais, as porcentagens de alteração indicadas são de $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, $\pm 30\%$, $\pm 50\%$;
3. Calcula-se a variação no escoamento total em porcentagem;
4. Repete-se os passos 1 a 3 para todos os outros parâmetros.

A análise de sensibilidade é importante para se conhecer a estrutura do modelo e entender como os valores dos parâmetros alteram os resultados da simulação.

Verificação

Para a avaliação do resultado obtido no método de regressão, foram quantificados e analisados os erros contidos no modelo regional e, por meio desses, as incertezas. Foi utilizado o método *Jack-knife*, o qual consiste em uma repetida análise dos resultados obtidos excluindo-se um dos postos para a regressão com a finalidade de validar o modelo utilizando o mesmo. Esse procedimento deve ser feito para todos os postos utilizados na regionalização dos parâmetros do modelo, visando verificar se os erros são aceitáveis.

Este procedimento é resumido por Castellarin *et al.* (2007), passando pelas seguintes etapas:

1. selecionam-se as N estações fluviométricas utilizadas no estudo;
2. uma das estações, chamada aqui de estação s , é retirada do modelo ajustado;
3. o modelo regional é então refeito considerando a relação dos dados de vazão com as características geomorfoclimáticas da bacia das $N-1$ estações restantes;
4. usando o modelo regional produzido na etapa 3 é feita a estimativa de vazões para a estação s ;
5. as vazões estimadas na etapa 4 são comparadas com as vazões observadas da estação s calculando-se o somatório de erros relativos;
6. as etapas 2 a 5 são repetidas $N-1$ vezes, podendo-se ao final obter valores para analisar a robustez do modelo regional.

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Localização da bacia em estudo

Foi realizada uma aplicação na bacia hidrográfica do Rio Paraopeba, sub-bacia do Rio São Francisco, localizada a montante da barragem de Três Marias, na região central do estado de Minas Gerais. Essa bacia foi escolhida devido à disponibilidade de dados necessários para a validação do método de regionalização estudado.

Dados Hidrológicos e Meteorológicos Utilizados

Os dados de vazão e precipitação utilizados neste trabalho são os disponibilizados pela ANA e consistidos pela CPRM (2001). Os dados evaporimétricos foram obtidos do posto Porto Pará, operado pela CEMIG.

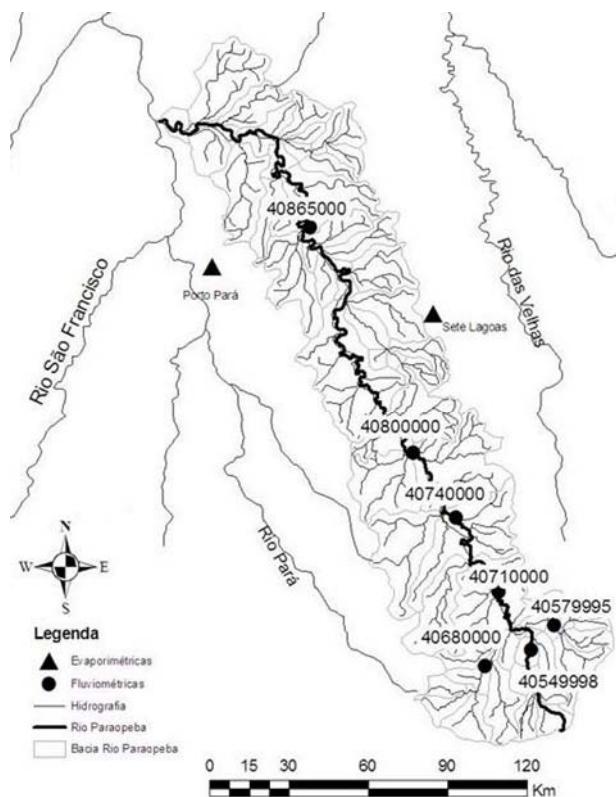


Figura 2 - Localização da área de estudo

Os dados de entrada do modelo são: evaporação, vazão média e precipitação, em intervalo mensal. Devem possuir o mesmo período base para possibilitar a simulação hidrológica e não podem ter falhas, uma vez que a simulação hidrológica de forma contínua depende das características temporais de cada série. As estações evapormétrica e as fluviométricas foram plotadas no mapa da bacia em estudo a fim de se conhecer a distribuição espacial das informações hidrológicas (figura 2).

Análise da Calibração

As estações fluviométricas utilizadas para a calibração automática dos parâmetros do modelo estão apresentadas na tabela 1. O período base utilizado é de outubro de 1992 a setembro de 1998, totalizando seis anos de dados mensais.

A calibração dos quatro parâmetros do modelo foi realizada automaticamente utilizando-se o algoritmo de busca global denominado DDS – *Dynamically Dimensioned Search*, desenvolvido por Tolson (2005).

Tabela 1 - Estações fluviométricas usadas na calibração dos parâmetros do modelo

Código	Área (km ²)	Q_{mlt} (m ³ /s)	NASH
40549998	461	8,3	0,81
40579995	579	10,4	0,75
40680000	486	8,7	0,71
40710000	2.760	47,4	0,86
40740000	3.939	66,9	0,88
40800000	5.680	87,1	0,76
40865001	10.192	145,4	0,74

O número de tentativas para a calibração foi 900 e o número de avaliações da função objetivo foi 200 para todas as sub-bacias estudadas. O número de tentativas de busca do algoritmo foi definido fixando-se duas estações fluviométricas e realizando testes de calibração. A avaliação para a definição do número de repetições do algoritmo de busca é feita pelo coeficiente de NASH, em relação ao qual observa-se que a partir de determinado número de repetições não ocorre melhorias no desempenho da calibração.

Considerando que o início da simulação do modelo foi no mês de outubro, início do ano hidrológico, verificou-se que taxa de umidade do solo *SOLIN* é próximo ao mínimo observado e igual a 0,35, como foi proposto por Lopes *et al.* (1981). A vazão de base inicial, *SUBIN*, foi estimada pelo estudo de regionalização realizado por CPRM (2001).

Os ajustes encontrados foram considerados satisfatórios pela avaliação feita nos coeficientes de NASH e pela análise gráfica do hidrograma observado e simulado. Na figura 3, mostra-se um exemplo de ajuste realizado para o posto 40549998, São Brás do Suaçuí.

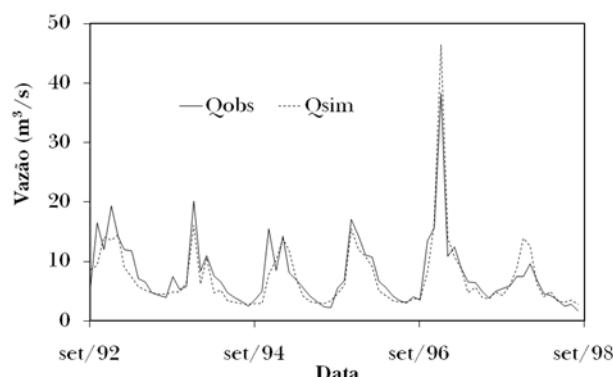


Figura 3 - Variação temporal de vazões observadas e simuladas na estação São Brás do Suaçuí

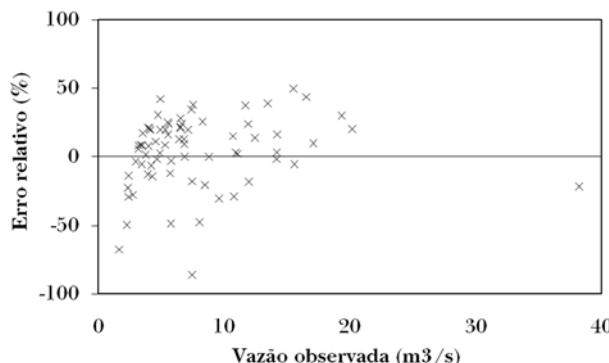


Figura 4 - Dispersão dos erros relativos em relação à vazão média mensal observada na simulação realizada na estação São Brás do Suaçuí

Na figura 4, observa-se que a dispersão dos erros relativos apresenta-se de forma aproximadamente constante. Isso indica que a função objetivo não priorizou nenhuma parte específica do hidrograma (picos ou estiagens).

Regionalização de Parâmetros

De acordo com a estrutura do modelo SMAP, foram levantadas características físicas, climáticas, pedológicas e hidrogeológicas, dentre as quais apenas as pedológicas e hidrogeológicas apresentaram correlação com os parâmetros do modelo. As variáveis escolhidas foram:

- Cesc: coeficiente de escoamento
- η : porosidade do solo (m^3/m^3)
- PM: ponto de murcha permanente (cm^3/cm^3)
- CAD: capacidade de água disponível (mm)
- Cesp: capacidade específica ($m^3/h.m$)
- Arm: armazenamento subterrâneo (mm)
- T: transmissividade do aquífero (m^2/dia)

Os valores dos parâmetros e das características das sub-bacias, com exceção ao coeficiente de escoamento, foram estimados por EMBRAPA (2005) e estão apresentados na tabela 2. A partir dessas variáveis foi possível explicar os valores de cada um dos quatro parâmetros a serem obtidos por meio das seguintes equações de regressão:

$$CREC = -0,39 + 1,27Cesc \quad \{ R=0,94 \} \quad (9)$$

$$SAT = 7,05Cesc - 1,48PM^{0,78} \quad \{ R=0,88 \} \quad (10)$$

$$E2 = -0,96Cesc - 1,29PM^{-0,77} \quad \{ R=0,81 \} \quad (11)$$

$$K = 0,35Cesc^{0,076} PM^{0,026} Cesp^{0,480} T^{-0,033} \quad \{ R=0,98 \} \quad (12)$$

Dentre as variáveis utilizadas para regionalizar os parâmetros do modelo SMAP, o coeficiente de escoamento (Cesc) é a única cuja estimativa exige alguma informação fluviométrica. De fato, o coeficiente de escoamento Cesc é obtido pela relação entre as variáveis altura média anual de precipitação e deflúvio anual. Apesar disso, tendo em vista a alta correlação da variável Cesc com os parâmetros do SMAP e a significativa melhoria da qualidade dos modelos regionais após a sua inclusão, resolveu-se mantê-la nas equações de estimativa de parâmetros. Vale ressaltar, entretanto, que ao lidar com bacias desprovidas de dados fluviométricos, a variável Cesc e/ou as variáveis que lhe dão origem teriam que ser obtidas por métodos regionais, ou até mesmo por interpolação em um mapa de isolinhas, possibilitando, assim, a aplicação das equações 9 a 12.

Na figura 5, apresenta-se um exemplo de dispersão dos valores calibrados *versus* simulados, para um dos quatro parâmetros ajustados. Observa-se que o modelo encontrado apresenta um ajuste adequado. Para os outros três parâmetros os ajustes encontrados foram semelhantes.

Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade avaliou qual a ordem de influência de cada parâmetro no resultado da simulação. O procedimento é realizado fazendo-se perturbações definidas em um dos parâmetros do conjunto ótimo encontrado na calibração automática mantendo-se fixos os demais. Esse estudo de sensibilidade foi realizado para apenas uma estação, a São Brás do Suaçuí, código 40549998.

O estudo foi feito utilizando o conjunto ótimo encontrado como ponto de partida para se fazer perturbações, para mais e para menos, correspondentes a 10, 20, 30 e 50% do valor central.

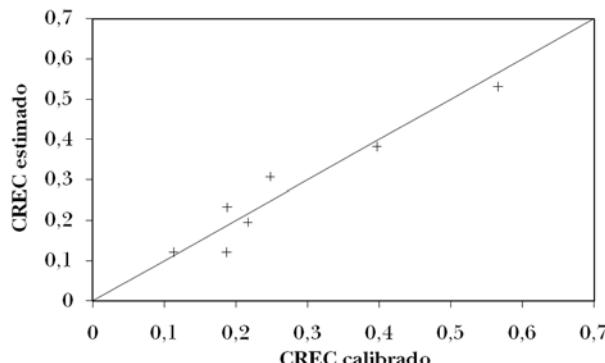
Na tabela 3, pode-se verificar a influência de cada parâmetro nos dados de saída do modelo. Observa-se que o parâmetro $E2$ é o que mais influencia os resultados. O parâmetro menos sensível para este caso é o SAT , o que não era de se esperar uma vez que no meio natural tal fator interfere significativamente na disponibilidade hídrica da bacia.

Tabela 2 - Valores ajustados dos parâmetros e características das bacias

Estação	CREC	K	SAT	E2	Cesc	η	PM	CAD	Cesp	Arm	T
40549998	0,078	0,900	1359	4,80	0,38	0,547	0,215	111,7	0,610	200,8	25,0
40579995	0,060	0,899	1699	4,44	0,36	0,538	0,216	108,1	0,656	195,3	65,7
40680000	0,181	0,900	961	4,35	0,44	0,468	0,169	63,7	0,641	202,7	60,5
40710000	0,127	0,900	1304	4,12	0,40	0,519	0,197	95,4	0,654	201,8	72,8
40740000	0,063	0,891	1457	5,07	0,35	0,528	0,196	101,6	0,640	201,3	59,0
40800000	0,051	0,875	1456	5,47	0,33	0,520	0,182	97,6	0,653	194,8	95,6
40865001	0,028	0,898	1663	6,67	0,33	0,515	0,178	94,5	0,694	190,9	108,4

Tabela 3 - Porcentagens de alteração no escoamento total para variações dos parâmetros para a estação São Brás do Suaçuí

Parâmetro	(+50%)	(+30%)	(+20%)	(+10%)	(-10%)	(-20%)	(-30%)	(-50%)
E2	-11,17	-7,69	-5,53	-3,00	3,50	7,74	12,88	27,36
CREC	5,98	3,74	2,55	1,30	-1,43	-2,92	-4,52	-8,05
K	X	X	X	X	-4,60	-6,39	-7,39	X
SAT	-1,17	-0,99	-0,79	-0,48	0,60	1,48	2,67	6,65
SOLIN	5,07	2,96	1,94	0,94	-0,97	-1,88	-2,76	-4,42
SUBIN	7,71	4,62	3,07	1,53	-1,57	-3,12	-4,66	-7,78

**Figura 5 - Parâmetro CREC calibrado versus estimado**

Para o parâmetro K não foi possível realizar as mesmas alterações feitas aos outros parâmetros, devido ao fato de os limites de valores pré-definidos para este parâmetro não permitirem.

Verificação

A verificação foi realizada pelo método *Jack-knife*. Esse método visa verificar se o modelo encontrado é robusto, retirando-se estação por estação e verificando os resíduos da equação de regressão múltipla. Portanto, os modelos escolhidos anteriormente (equações 9 a 12) foram ajustados novamente com uma estação a menos. Para a estação retirada foram calculados os erros relativos dos parâmetros estimados.

Enfatiza-se que na estimativa dos parâmetros de determinada estação retirada os dados da mesma não foram em momento algum utilizados para a obtenção das equações de ajuste, essa premissa torna o método válido para a verificação dos modelos regionais. Os resultados dessas estimativas estão apresentados na tabela 4.

Observa-se que os erros relativos dos parâmetros estimados em relação aos calibrados apresentam alguns valores altos. Entretanto, como os parâmetros são pouco sensíveis, erros dessas magnitudes não alteraram a qualidade da simulação, conforme pode ser verificado pela tabela 5.

Tabela 4 - Porcentagens dos erros relativos dos parâmetros estimados em comparação com os calibrados para cada estação retirada

Estação retirada	ε_{E2}	ε_{SAT}	ε_{CREC}	ε_K
40549998	15,34	11,64	28,39	1,07
40579995	7,63	11,57	22,14	0,10
40680000	4,16	5,09	12,35	0,002
40710000	7,59	5,03	4,90	0,01
40740000	2,88	5,71	8,76	0,46
40800000	14,69	13,25	51,12	0,90
40865001	17,32	14,04	25,86	0,90
Média	9,94	9,47	21,93	0,49

A tabela 5 mostra que os erros relativos dos parâmetros não afetam sobremaneira os resultados da simulação. Isso leva a considerar que tais erros são aceitáveis e indicam que as equações de regressão podem ser utilizadas em locais sem dados.

Tabela 5 - Índices de desempenho na verificação da regionalização de parâmetros para cada bacia

Estação	Erro relativo médio	Nash	$Q_{med,sim}$	$Q_{med,obs}$
40549998	0,21	0,85	7,9	7,9
40579995	0,23	0,73	9,3	10,3
40680000	0,26	0,67	9,0	11,7
40710000	0,16	0,84	47,7	51,4
40740000	0,15	0,89	60,4	63,0
40800000	0,24	0,71	78,6	87,9
40865001	0,21	0,65	141,8	135,9
Média	0,21	0,76		

CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

Os resultados encontrados no decorrer da aplicação feita na bacia do Paraopeba foram satisfatórios, permitindo dizer que o método proposto pode ser empregado para estimar séries de vazões mensais em bacias sem dados, no interior da região estudada.

Como esperado, verificou-se que os parâmetros do modelo SMAP são mais correlacionados com as características do solo e subsolo do que com as características físicas e geomorfológicas da bacia. Esse fato fica evidenciado pelas relações regionais mostradas nas equações (9) a (12).

Avaliando-se as equações regionais encontradas verificou-se que as mesmas oferecem estimativas razoáveis para os parâmetros do modelo SMAP. Além disso, foi verificado que o modelo é pouco sensível à variação dos parâmetros, o que o torna particularmente robusto no que se refere à estimativa de séries sintéticas de vazões médias mensais em locais desprovidos de registros fluviométricos.

Por outro lado, deve-se ter cautela ao utilizar as equações regionais, uma vez que as mesmas foram obtidas a partir de somente 7 postos fluviométricos. Assim, recomenda-se que em futuras pesquisas mais postos sejam adicionados ao modelo, referendando os resultados aqui encontrados.

Além disso, a aplicação foi favorecida pela disponibilidade de dados hidrogeológicos compila-

dos pela CPRM (2001) e EMBRAPA (2005). Em locais com escassez de tais dados, a utilização do método pode se tornar complicada e dispendiosa, uma vez que deve ser precedida de estudos e levantamentos de campo.

No que se refere à melhoria dos resultados obtidos e futuros desenvolvimentos, recomenda-se:

- Fazer o estudo em uma área com maior disponibilidade de dados (mais estações fluviométricas) e em bacias com maior variabilidade climática, geológica, pedológica e hidrológica. Tal variabilidade se faz necessária uma vez que na aplicação aqui realizada, verificou-se que alguns parâmetros do SMAP apresentaram valores aproximadamente constantes ao longo da bacia do rio Paraopeba, o que dificultou sua regionalização;
- Avaliar as incertezas inerentes ao método proposto. Sobretudo as incertezas relativas à representação concentrada do modelo SMAP, à variabilidade das propriedades físicas das bacias estudadas, à variabilidade dos dados de entrada e às correlações entre os parâmetros;
- Estender o estudo para pequenas bacias (área de drenagem inferior a 100 km²) conhecendo-se detalhadamente a área de estudo, fazendo-se levantamentos de campo de uso do solo, e avaliar o efeito da alteração dessa variável no comportamento hidrológico da bacia.

Por fim, verifica-se a necessidade de que novas pesquisas sejam endereçadas no sentido de incluírem no modelo regional os erros de amostragem e modelagem chuva-vazão, bem como na obtenção de dados característicos do solo e subsolo em locais diferentes daqueles aqui estudados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – pela concessão da bolsa de estudos. Agradecimentos também à FAPEMIG (PPM-00158-09) e ao CNPq (301133/2009-3) pelos auxílios concedidos. Os autores são gratos também aos revisores

anônimos pelas diversas sugestões que proporcionaram maior clareza a este artigo

REFERÊNCIAS

- ABDULLA, F.; AL-BADRANIH, L. Application of rainfall-runoff model to three catchments in Iraq. *Journal des Sciences Hydrologiques*. v. 45, n. 1, 2000.
- ALEXANDRE, A. M. B.; MARTINS, E. S.; CLARKE, R. T.; REIS JUNIOR, D. S. *Regionalização de parâmetros de modelos hidrológicos*. In: Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, PB, 2005.
- CASTELLARIN, A.; CAMORANI, G.; BRATH, A. Predicting annual and long-term flow-duration curves in ungauged basins. *Advances in Water Resources*. v. 30, p. 937-953, 2007.
- CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – Superintendência Regional de Belo Horizonte. *Regionalização de vazões sub-bacias 40 e 41*. Convênio 015/2000 ANEEL – 013/CPRM/2000, Relatório Final, Volumes I e II. Belo Horizonte, 2001.
- DINIZ, L. S. *Regionalização de parâmetros de modelos chuva-vazão utilizando redes neurais*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Atributos físicos de solos e distribuição das fitofisionomias de cerrado na bacia hidrográfica do rio Jardim*, DF. EMBRAPA Cerrados: DF, 2005.
- FERNANDEZ, W.; VOGEL, R. M.; SANKARASUBRAMANIAN, A. Regional calibration of watershed model. *Journal des Sciences Hydrologiques*. vol. 45, n. 5, 2000.
- HEUVELMANS, G.; MUYS, B.; FEYEN, J. Regionalisation of the parameters of hydrological model: comparison of linear regression models with artificial neural nets. *Journal of Hydrology*. v. 319, p.245-265, 2006.
- KIM, U.; KALUARACHCHI, J. J.; Application of parameter estimation and regionalization methodologies to ungauged basins of Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology*. n. 362, p. 39-56, 2008.
- LIMBRUNNER, J. F.; VOGEL, R. M.; CHAPRA, S. C. A parsimonious watershed model. Capítulo 22 In: SINGH, V. P.; FREVERT, D. F. (Ed.) *Watershed Models*. Colorado: ed. CRC Press, p. 549-567, 2005.
- LOPES, J. E. G.; BRAGA JÚNIOR, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. *Simulação hidrológica: aplicação de um modelo simplificado*. In: Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, v.2, 42-62, Fortaleza, 1981.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E.J.A. *Hidrologia estatística*. 1a ed. Belo Horizonte: CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Superintendência Regional de Belo Horizonte, 2007, 552 p.
- SIVAPALAN, M. ; TAJEUCHI, 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. *Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques*. n. 48(6), p. 857-880, 2003.
- TOLSON, B. A. *Automatic Calibration, Management and Uncertainty Analysis: Phosphorus Transport in the Cannonsville Watershed*. Tese de Doutorado, Faculty of the Graduate School of Cornell University, Ithaca, EUA, 2005.
- TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.
- VOGEL, R. M. Regional calibration of watershed models. Capítulo 3 In: SINGH, V. P.; FREVERT, D. F. (Ed.) *Watershed Models*. Colorado: ed. CRC Press, p.47-71, 2005.
- YADAV, M.; WAGENER, T.; GUPTA, H. Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. *Advances in Water Resources*. v. 30, p. 1756-1774, 2007.

Regionalization of Parameter Estimation of Hydrological Models in Ungauged Basins

ABSTRACT

Rainfall-runoff simulation hydrological models are generally applied to obtain synthetic series from historical rainfall records. A recent increase has been noticed in the demand for applying hydrological simulation models in watersheds in which there is an incipient gauge network or even no streamflow gauging at all. However, in the absence of streamflow data, rainfall-runoff models cannot have their parameters calibrated. Thus, it is necessary to use methods to transfer spatial information, generally referred to as hydrological regionalization, which is the approach used in this paper. The methods described here were applied to the Paraopeba river basin, a tributary of the São Francisco river, located in the Brazilian state of Minas Gerais. The hydrologic model used in this study is SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) which was calibrated using as objective function the minimization of the errors between the observed and calculated flows. For the regiona-

lization method the multiple linear regression technique was used, relating the model parameters to the geomorphic, climatic, hydrogeological and soil characteristics of the basin. The adjustment equations, as obtained at other gauging stations, were performed using the Jack-knife method and from the performance indices found it can be concluded that the method can be used to evaluate, at least approximately, the availability of water resources in ungauged basins.

Key-words: *Hydrological regionalization, rainfall-runoff models, SMAP.*