

Incorporação de filtro numérico de separação de escoamento na assimilação de dados para previsão de vazões utilizando modelagem hidrológica

Coupling flow separation numerical filters to the data assimilation method for streamflow forecasting using hydrological modeling

Fernando Mainardi Fan¹; Adalberto Meller² e Walter Collischonn³

¹Doutorando do Instituto de Pesquisas Hidráulicas-Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, RS, Brasil
fernando.fan@ufrgs.br

²Especialista em Recursos Hídricos Agência Nacional de Águas (ANA)- Brasil
betomeller@gmail.com

³Professor Adjunto Instituto de Pesquisas Hidráulicas-Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, RS, Brasil
collischonn@uol.com.br

Recebido: 15/05/14 - Revisado: 24/09/14 - Aceito: 14/11/14

RESUMO

Uma das principais etapas da previsão de vazão utilizando modelagem hidrológica é a assimilação de dados para corrigir as variáveis de estado do modelo hidrológico e tornar a condição inicial da previsão a mais próxima possível da realidade observada. Uma forma de realizar assimilação de dados é a utilização de métodos empíricos, que utilizam os dados observados para corrigir diretamente as variáveis do modelo hidrológico. Um exemplo de modelo que utiliza este tipo de técnica empírica é o MGB-IPH, recentemente muito utilizado para previsão de vazões em estudos de caso brasileiros. Contudo, nesta forma de assimilação podem ocorrer problemas quando os dados telemétricos observados apresentam descompassos sobre o volume total de água existente na bacia, o que pode se refletir em perda de qualidade nas previsões. Desta forma, no presente trabalho é apresentada uma pesquisa de investigação sobre a incorporação do uso de filtros de vazão de base para controlar a assimilação de dados empírica em modelos hidrológicos, usando como estudo de caso a técnica utilizada no modelo MGB-IPH. Partiu-se da hipótese de que é possível aprimorar a representação da recessão dos hidrogramas de uma previsão de vazão ao incorporar um controle melhorado da quantidade de água que contribui para o fluxo de base em um local, a partir do uso de filtros digitais de separação de escoamento. Para testar a hipótese foram realizados ensaios de previsões por conjunto retroativas na bacia do Rio São Francisco, na região da UHE Três Marias, para os três períodos chuvosos entre 2010 e 2013. Visualmente os resultados das previsões por conjunto mostram que o problema observado na assimilação de dados foi removido com a utilização do filtro de vazão de base. Este benefício é verificado através de uma melhoria em quatro medidas de desempenho calculadas, onde a maioria dos resultados apontou para melhoras nas previsões. Como conclusão, tem-se que a técnica testada possibilita um melhor desempenho na previsão de vazões utilizando o modelo MGB-IPH, e que o uso de filtros numéricos na assimilação de dados apresenta-se como promissor para outras aplicações similares de assimilação de dados.

Palavras Chave: Assimilação de dados. Separação de escoamento. Previsão hidrológica. Modelagem hidrológica

ABSTRACT

One of the key steps in streamflow forecasting using hydrologic models is data assimilation to adjust the model state variables and make the initial condition the closest possible to observed reality. One way to perform data assimilation is the use of empirical methods, utilizing the observed data to directly fix the variables of the hydrological model. An example of a model that uses this type of empirical technique is MGB-IPH, recently widely used for streamflow forecasting in Brazilian case studies. However, some problems may occur using this method of assimilation when the observed telemetry data mismatch the total volume of water in the basin, which may be reflected by a loss of quality in the forecasts. Thus, research about incorporating the use of baseflow separation filters is tested in this study to improve the empirical data assimilation, using the MGB - IPH model as a case study. The work is based on the hypothesis that it is possible to enhance the hydrograph recession predictions by incorporating an improved control of the amount of water that contributes to the baseflow at a location using digital flow separation filters. To test the hypothesis, some hindcasting experiments were issued in the São Francisco River basin in the HPP Três Marias region for three rainy seasons between 2010 and 2013. Visually the results of the forecasts show that the problem noted in the data assimilation was removed using the baseflow filter. This benefit is also verified through the calculation of four performance measures, where most of the results pointed to improvements in the forecasts. In conclusion, the tested technique enables better performance in streamflow forecasting using the MGB - IPH model, and the use of numerical filters in data assimilation is presented as promising for other similar applications of similar data assimilation techniques.

Keywords: Data Assimilation. Flow separation. Hydrological forecasting. Hydrological modeling

INTRODUÇÃO

A previsão de vazões consiste na estimativa do escoamento em um determinado local de um curso de água com determinada antecedência temporal. De acordo com a antecedência com que as previsões são realizadas podem ser definidas como de curto ou longo prazo. A previsão é geralmente classificada como de curto prazo, quando o horizonte de previsão é de algumas horas até cerca de três semanas (TUCCI, 2005; GEORGAKAKOS; KRYSZTOFOWICZ, 2001; BRAVO et al., 2009; SENE, 2010). A previsão de longo prazo envolve a previsão com antecedência de meses ou anos, sendo muitas vezes chamada de sazonal.

Uma das principais aplicações de um sistema de previsão de vazões de curto prazo refere-se à implantação de sistemas de alerta, os quais permitem uma antecipação de eventos extremos e assim do início das ações de mitigação dos possíveis impactos decorrentes. Outra aplicação importante dos sistemas de previsão é no controle da operação de reservatórios, em que atuam aumentando a segurança e permitindo que usinas hidrelétricas cumpram as suas restrições de operação de forma mais eficiente (LETTENMAIER; WOOD, 1993; BRAVO et al., 2009; BOUCHER et al., 2012).

Para a previsão de vazões de curto prazo podem ser utilizados diferentes tipos de técnicas tais como, por exemplo, modelos auto regressivos, modelos baseados em dados (redes neurais artificiais), modelos de propagação de vazão e modelos hidrológicos de transformação chuva-vazão (LETTENMAIER; WOOD, 1993; TUCCI, 2005; SENE, 2010; MELLER, 2012).

Neste contexto, modelos hidrológicos são frequentemente usados com a incorporação da informação de previsão numérica de precipitação, para estender o horizonte de previsão para além do tempo de concentração da bacia, e melhorar a qualidade da previsão dentro de horizontes determinados (LETTENMAIER; WOOD, 1993; TUCCI, 1998; SENE, 2010).

Adicionalmente, a possibilidade de incluir a informação de modelos de previsão do tempo para a previsão de vazão tem instigado a realização de previsões chamadas de previsão por ensemble ou por conjunto (KRZYSZTOFOWICZ, 2001; DEMRIT et al., 2007; CLOKE; PAPPENBERGER, 2009; Collischonn et al., 2013; MELLER, 2013). Em sua forma mais comum, a previsão de vazões por ensemble utiliza a informação de um conjunto de previsões meteorológicas, derivadas de vários modelos meteorológicos ou de diversos membros de um único modelo meteorológico, como dado de entrada de um modelo hidrológico (CLOKE; PAPPENBERGER, 2009). Como resultado, tem-se um conjunto de distintos cenários possíveis de vazões previstas, que permitem a estimativa de incerteza se a tomada de possíveis melhores decisões em situações de eventos extremos (DEMRIT et al., 2007; RAMOS et al., 2013).

A incorporação de dados de modelos meteorológicos não é uma exclusividade do uso de modelos hidrológicos. Contudo, os modelos hidrológicos com base física fornecem resultados baseados em equações que tentam simular os processos físicos, e assim permitem a extrapolação das previsões para além do domínio dos dados observados com maior consistência metodológica, o que também é um benefício em relação aos métodos

que utilizam somente a informação de vazão e estatísticas para a realização das previsões (TUCCI, 2005; SENE, 2010).

No cenário brasileiro, um exemplo de modelo hidrológico que vem sendo muito utilizado para a previsão de vazões em bacias hidrográficas é o Modelo de Grandes Bacias ou MGB-IPH (COLLISCHONN, 2001). Estudos de caso de previsão de vazão de curto prazo utilizando o modelo MGB-IPH podem ser encontrados nos trabalhos de: Collischonn et al. (2005) e Andreolli et al. (2006), que usaram o modelo para a previsão de vazões na bacia do rio Uruguai; Silva et al. (2007), onde o modelo foi usado para a previsão de vazões em toda a bacia do Rio São Francisco; Tucci et al. (2008), que apresentam o uso do modelo para a previsão de vazões na bacia do Rio Grande; Paiva et al. (2012) e Paiva et al. (2013), que apresentam o uso do modelo para a previsão de vazões na bacia Amazônica; Meller et al. (2013) que apresentam o uso do modelo hidrológico para realização de previsões por ensemble na bacia do rio Paraopeba (MG); Fan et al. (2012) que apresentam o uso do modelo para a previsão de vazões nas bacias dos rios Pelotas e Taquari-Antas (RS); e Fan et al. (2013) que apresentam o uso do modelo para a previsão de vazões afluentes ao reservatório de Três Marias (MG). Finalmente, nos trabalhos de Meller et al. (2014) e Fan et al. (2014), são apresentados dois exemplos de estudos recentes em bacias hidrográficas brasileiras sobre previsão por ensemble nos quais é utilizado o modelo MGB-IPH.

O modelo hidrológico MGB-IPH é um modelo conceitual e distribuído, desenvolvido para aplicação em bacias de grande escala ($>10.000\text{km}^2$). A bacia hidrográfica é representada atualmente dentro do modelo através de uma subdivisão em pequenas bacias hidrográficas, denominadas minibacias, onde os processos hidrológicos como a transformação chuva-vazão são calculados (FAN; COLLISCHONN, 2014).

Em sua versão de distribuição ao público (www.ufrgs.br/hge), o modelo utiliza um método de assimilação de dados empírico para previsão de vazões, proposto originalmente por Andreolli (2003), sendo sua última versão apresentada nos trabalhos de Paz et al. (2007) e Collischonn et al. (2007). Existem ainda variantes desse método, como a proposta por Meller et al. (2012), que sugeriram uma alteração no coeficiente de ponderação do fator de correção das vazões na rede de drenagem.

A seguir, o assunto de assimilação de dados no que tange o interesse desta pesquisa é tratado com mais detalhe.

Assimilação de dados no modelo MGB-IPH

A assimilação de dados, também chamada de atualização, consiste em um processo de retroalimentação em que as observações mais recentes são utilizadas para corrigir as condições iniciais do modelo hidrológico antes de cada previsão, aproximando as condições simuladas pelo modelo às condições observadas em campo.

No contexto da previsão em tempo real, quando o modelo hidrológico utiliza alguma técnica de assimilação de dados (VRUGT et al., 2006; LIU; GUPTA, 2007; LIU et al., 2012) costuma-se dizer que o modelo opera em “modo de previsão”. A Figura 1 ilustra de forma esquemática o efeito da assimilação

de dados sobre uma previsão hipotética. Basicamente, o que se procura obter é o melhor ponto de partida possível para uma previsão de vazão, o que invariavelmente afeta os resultados ao longo do horizonte de previsão, como o valor máximo do pico de uma cheia.

No exemplo esquemático é mostrado como a assimilação de dados pode ser importante, pois uma previsão mais acurada no início pode significar a correta ultrapassagem de um limiar de cheia no futuro.

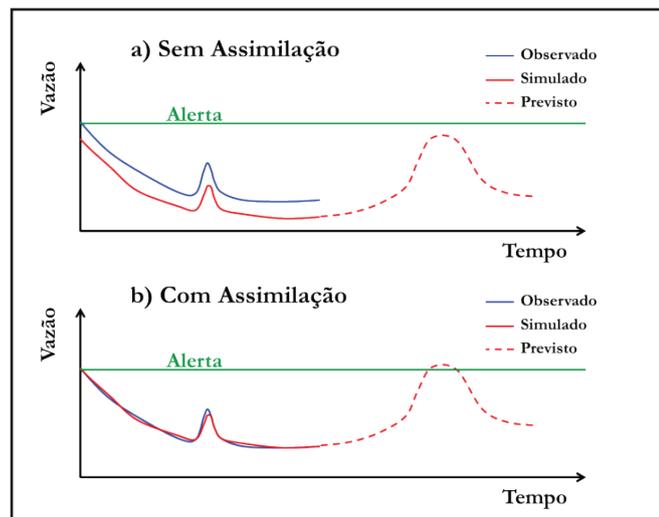


Figura 1 – Representação esquemática do efeito da assimilação de dados sobre um hidrograma

Existem diversas metodologias de assimilação de dados desenvolvida para uso conjunto com modelos hidrológicos. Podem-se citar aquelas baseadas no Ensemble Kalman Filtering e no Particle Filtering (CLARK et al., 2008; LIU et al., 2012). Existem ainda os métodos de assimilação empíricos, em que a correção das variáveis é baseada na estimativa direta de erros cometidos pelo modelo.

A assimilação de dados no modelo MGB-IPH é realizada através de um método empírico que utiliza as vazões observadas em tempo real para atualizar as variáveis de estado do modelo, representadas pelas vazões calculadas ao longo da rede de drenagem e pelo volume de água armazenado nos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo do modelo hidrológico (MELLER et al., 2012).

A atualização das variáveis do modelo se dá através de um fator de correção (FCA), definido como o quociente entre o somatório das vazões observadas e calculadas ao longo de uma janela de tempo imediatamente anterior ao início da previsão, conforme apresentado na Equação 1:

$$FCA_s = \sum_{t=t_0-t_a}^{t_0} Q_{obs}^t / \sum_{t=t_0-t_a}^{t_0} Q_{calc}^t \quad (1)$$

Em que Q_{obs} e Q_{calc} são as vazões observadas e calculadas, respectivamente; t é o tempo de cálculo; t_0 é o instante de tempo da realização da previsão; t_a é o intervalo de tempo durante o qual é feita a comparação entre valores calculados e

observados e s representa o ponto de exutório da sub-bacia, onde existe um posto fluviométrico com dados observados usado para atualização do modelo.

A cada intervalo de tempo de previsão, os fatores de correção são calculados e aplicados às variáveis de estado do modelo, para cada uma das minibacias simuladas. No caso da atualização das vazões na rede de drenagem, o fator FCA é ponderado pela área de drenagem relativa de cada minibacia. Assim, as correções da vazão na rede de drenagem, segundo o método em foco, são mais fortes em minibacias localizadas sobre a drenagem principal, que possuem maiores áreas de drenagem acumuladas.

Na minibacia onde existem dados fluviométricos, as vazões observadas são usadas em lugar das calculadas pelo modelo. Para as demais minibacias, as vazões calculadas pelo modelo são atualizadas de acordo com a Equação 2:

$$Q_{at_{i,s}} = FCA_s \cdot Q_{calc_i} \cdot (A_i/A_s)^{ebac} + Q_{calc_i} \cdot [1 - (A_i/A_s)^{ebac}] \quad (2)$$

Em que $Q_{at_{i,s}}$ é o valor atualizado da vazão na rede de drenagem na minibacia i , localizada a montante do ponto s ; A_i é a área de drenagem acumulada na minibacia i ; A_s é a área de drenagem acumulada na minibacia de exutório da sub-bacia, onde existem dados observados, e $ebac$ é um parâmetro com valores entre 0 e 1 que deve ser definido de forma a encontrar uma boa concordância entre as vazões previstas e observadas.

O mesmo fator de correção (FCA), aplicado à atualização da vazão na rede de drenagem, é utilizado na atualização do volume de água armazenada nos três reservatórios conceituais. Para os reservatórios, entretanto, a ponderação ocorre em função da fração do escoamento oriunda dos reservatórios, representada pela variável PBi .

A correção dos volumes dos reservatórios conceituais quando $PBi > PB_{lim}$, isto é, quando a fração de água escoando no rio de origem subterrânea, estimada pelo modelo, é superior a um limite pré-determinado (PB_{lim}), é dada por:

$$VBat_{i,s} = (FCA_s)^{bx} \cdot VB_i \cdot (PBi) + VB_i \cdot (1 - PBi) \quad (3)$$

em que $VBat_{i,s}$ é o volume atualizado no reservatório na minibacia i , situada a montante de s ; VB_i é o volume calculado do reservatório conceitual na minibacia i ; PBi é a fração da vazão na rede de drenagem originária do reservatório conceitual, PB_{lim} é a fração mínima de água necessária para que haja a correção dos reservatórios conceituais do modelo e bx é um parâmetro de atualização com valores entre 0 e 1 que deve ser definido de forma a encontrar uma boa concordância entre as vazões previstas e observadas.

Quando $PBi < PB_{lim}$, isto é, quando a fração de água escoando no rio de origem subterrânea, ou seja, quando a vazão de base estimada pelo modelo, é inferior a um limite pré-determinado (PB_{lim}), a correção dos volumes é dada por:

$$VBat_{i,s} = VB_i \quad (4)$$

De aplicações anteriores do modelo MGB-IPH (Meller, 2012), *PBlim* assume valores próximos a 30%. De acordo com Paz et al. (2007), quando o parâmetro *bx* assume valores próximos a 1, a atualização dos volumes dos reservatórios conceituais do modelo é relativamente rápida.

No caso da aplicação da Equação 4, a variável de estado do modelo não é atualizada. No caso da aplicação da Equação 3, a variável de estado do modelo é atualizada, sendo o valor original substituído por um valor que depende do Fator de Correção de Atualização (*FCA*) e do percentual de vazão de base estimada no momento em que está sendo feita a correção. Isto significa que, durante as estiagens mais prolongadas, quando uma fração maior da água escoando no rio tem origem subterrânea, é realizada uma correção praticamente integral do *FCA*. Durante as cheias, quando boa parte do escoamento é superficial, por outro lado, nenhuma alteração é feita na variável de estado relacionada ao armazenamento de água subterrânea, como mostra a Equação 4.

Maiores detalhes sobre o funcionamento e um estudo de caso de análise de sensibilidade do método sobre os resultados de previsões de vazão podem ser encontrados em Meller (2012). No presente trabalho é dado foco específico para a busca pela solução de uma deficiência que é encontrada no método, apresentada a seguir.

Deficiências na assimilação de dados empírica em situações de escassez de informação

A técnica de assimilação de dados utilizada no MGB-IPH pode ser classificada como uma metodologia empírica de atualização, já que ela usa diretamente os dados observados considerando-os como paradigmáticos e verdade absoluta, e os aplica diretamente para corrigir as variáveis de estado do modelo.

Dessa maneira, para a previsão de vazões em tempo real, a correção é fortemente dependente da qualidade dos dados de chuva e vazão disponíveis, tanto em termos de resolução temporal como de resolução espacial, para que os fenômenos meteorológicos e hidrológicos que ocorrem na bacia sejam adequadamente representados.

Contudo, no Brasil, a cobertura de redes telemétricas ainda é limitada, embora o número de estações venha aumentando ano após ano, o que abre caminho para a desenvolvimento e operação de novos sistemas de previsão. É bastante comum, por exemplo, apenas a existência de dados telemétricos de chuva e vazão em um mesmo ponto, próximo a rios específicos, onde a antena de transmissão para os dois tipos de dados é aproveitada. Isto pode ser inferido através do próprio portal de telemetria da Agência Nacional de Águas (ANA) - www.ana.gov.br/telemetria.

A baixa densidade espacial de estações telemétricas é inconveniente para os métodos empíricos de assimilação de dados na previsão de vazões, pois pode afetar a distribuição da correção entre as diferentes variáveis de estado do modelo. Em outras palavras, é necessário que o balanço entre a estimativa da quantidade de água precipitada sobre a bacia seja coerente com a vazão observada nos postos fluviométricos.

Quando a rede pluviométrica não é suficientemente densa para detectar adequadamente as chuvas que ocorreram

em uma bacia, mas ao mesmo tempo aumentos de vazão são verificados nos locais com dados fluviométricos, um problema de balanço hídrico tende a ocorrer. Isto acontece por que não é possível inferir corretamente a origem da água que está causando a cheia (detectada nos postos fluviométricos), e assim não é possível inferir de forma adequada como se dá a sua distribuição entre os escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo na bacia hidrográfica. Isto acaba confundindo o esquema de correção do método de assimilação de dados em estudo.

Desta forma, o modelo tende a gerar uma correção descompensada nos diferentes reservatórios lineares que representam a bacia simulada. Quando a rede telemétrica erroneamente indica a inexistência de precipitação na bacia, ocasionada, por exemplo, pela baixa densidade de postos, o método de assimilação tende a gerar uma grande elevação na variável de estado relacionada ao reservatório de água subterrânea, já que não é possível inferir adequadamente a real existência de escoamento superficial ou subsuperficial na bacia.

Nestes casos, onde há a correção exagerada na quantidade água subterrânea, ocorre um efeito negativo especialmente na previsão do pico e das recessões dos hidrogramas de cheia, gerando um patamar de escoamento de base acima do esperado. Este efeito é mostrado no esquema da Figura 2.

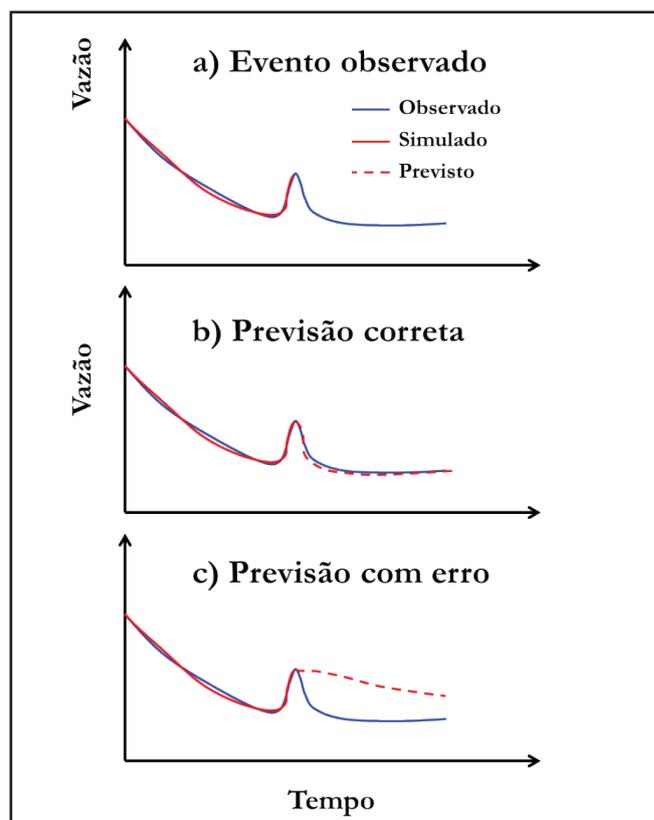


Figura 2 – Representação esquemática do erro ocasionado pela atualização exagerada do reservatório de água subterrânea

Destaca-se, na Figura 2, que “a” apresenta um evento de cheia observado, “b” apresenta o que seria a previsão correta da recessão e “c” mostra o problema ocasionado pela atualização excessiva do reservatório subterrâneo.

Os efeitos negativos comentados anteriormente tendem a causar problemas na previsão de vazão, especialmente em épocas chuvosas, quando ocorrem seqüências de eventos de cheias. A representação inadequada da recessão do hidrograma pode resultar em uma cheia superestimada nas maiores antecedências do horizonte de previsão. A Figura 3 apresenta um exemplo real (utilizando o modelo apresentado em FAN et al., 2013) de uma previsão de vazão realizada para o rio Abaeté (MG), onde pode-se observar uma superestimativa da vazão na recessão do hidrograma, ocasionada pela correção exagerada da quantidade de água subterrânea pelo método de assimilação.

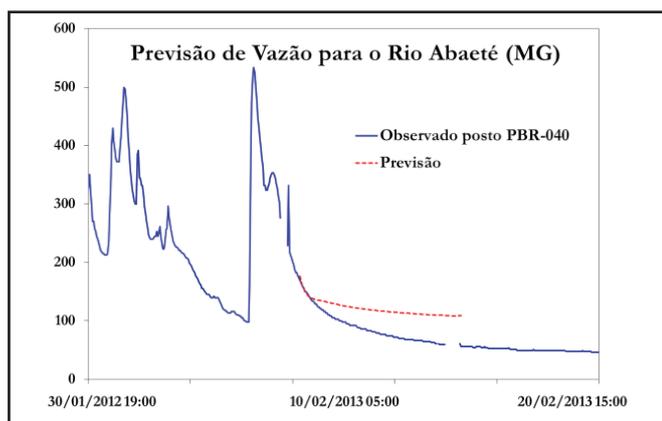


Figura 3 – Super estimativa da vazão na recessão em um exemplo real de previsão de vazão para o rio Abaeté (MG)

OBJETIVO E HIPÓTESE

O objetivo deste artigo é investigar uma técnica de correção para métodos empíricos de assimilação de dados associados a modelos hidrológicos, usando como estudo de caso a técnica utilizada no modelo MGB-IPH, para evitar problemas na correção da variável de estado relacionada à água subterrânea.

Parte-se da hipótese de que é possível melhorar a representação da recessão dos hidrogramas de uma previsão de vazão ao incorporar-se um controle da quantidade de água que contribui para o fluxo de base em um local, a partir do uso de filtros digitais de separação de escoamento, apresentados a seguir.

Filtros numéricos ou digitais constituem-se de métodos matemáticos com certa base física para separar hidrogramas em suas componentes superficial e subterrânea, de forma aproximada (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Na aplicação de filtros supõe-se que a vazão total do hidrograma em um determinado intervalo de tempo é formada por duas componentes -escoamento superficial e escoamento subterrâneo - e que é possível fazer uma estimativa destas a partir da aplicação de uma técnica de cálculo.

Para a separação de escoamento em grandes bacias hidrográficas, que tem importante contribuição subterrânea, um filtro com dois parâmetros foi proposto por Eckhardt (2005):

$$b_i = \frac{(1 - BFI_{\max}) \cdot a \cdot b_{i-1} + (1 - a) \cdot BFI_{\max} \cdot Q_i}{1 - a \cdot BFI_{\max}} \quad (5)$$

em que Q é a vazão total do hidrograma, i é o intervalo de tempo, b é a contribuição do escoamento subterrâneo, a é um parâmetro de forma da recessão, e BFI_{\max} é o máximo percentual de escoamento subterrâneo que o filtro permite calcular. O BFI_{\max} é o máximo valor esperado de um coeficiente denominado *Base Flow Index* (BFI), que é a fração de escoamento subterrâneo estimada para um determinado local. O filtro é aplicado considerando os valores de b_i limitados a valores menores ou iguais a Q_i .

Este filtro tem sido largamente utilizado e tem apresentado resultados promissores na separação de escoamento a partir de hidrogramas, conforme pode ser observado nos trabalhos de Eckhardt (2005), Collischonn e Fan (2012), Dora (2013) e Mattiuzi (2013). Outra vantagem deste filtro é que seus parâmetros podem ser estimados diretamente a partir de uma análise dos hidrograma (COLLISCHONN; FAN, 2012).

Neste artigo é proposta uma aplicação do filtro de base ao método empírico de assimilação de dados do modelo MGB-IPH (versão de distribuição), para o cálculo do parâmetro PBi , que representa a fração do escoamento oriunda do reservatório subterrâneo.

Essa correção é realizada aplicando-se o filtro de vazão de base, dado pela Equação 5, aos dados observados e então calculando-se a fração de água subterrânea através da seguinte equação:

$$PB_i = \frac{b_i}{Q_i} \quad (6)$$

em que PBi é a fração do escoamento oriunda do reservatório subterrâneo no intervalo de tempo i , b_i é a vazão de base calculada, e Q_i é a vazão total observada no ponto.

A utilização do filtro de base proporciona uma estimativa independente da fração de água subterrânea em um local, que não é afetada pela distribuição e qualidade dos dados pluviométricos, o que possivelmente permite uma correção mais próxima da realidade das variáveis de estados relacionadas com o escoamento subterrâneo do modelo hidrológico.

EXPERIMENTO REALIZADO

Para avaliar a hipótese de que a incorporação do filtro de vazão de base é capaz de melhorar o desempenho da assimilação de dados do modelo, foi conduzido um experimento na bacia do Rio São Francisco, delimitada até a confluência com o Rio das Velhas (aproximadamente 60.000 km²), para a qual o modelo MGB-IPH foi calibrado e validado para uso na previsão de vazões.

Detalhes da aplicação do modelo hidrológico para esta bacia podem ser encontrados em Fan et al. (2014), que mostra um estudo de caso completo do uso do modelo para previsão de vazão por ensemble. A base de dados utilizada em Fan et al. (2014) é a mesma utilizada neste trabalho.

A Figura 4 apresenta a localização da área de estudo, com destaque para a cidade de Pirapora e a UHE Três Marias. Esses locais são importantes neste contexto porque a ocorrência de cheias na cidade de Pirapora depende da vazão de fluente na UHE Três Marias. Assim, a operação do reservatório depende

do conhecimento antecipado do regime de vazões afluentes ao reservatório para amenizar o impacto da ocorrência de cheias na cidade de Pirapora.

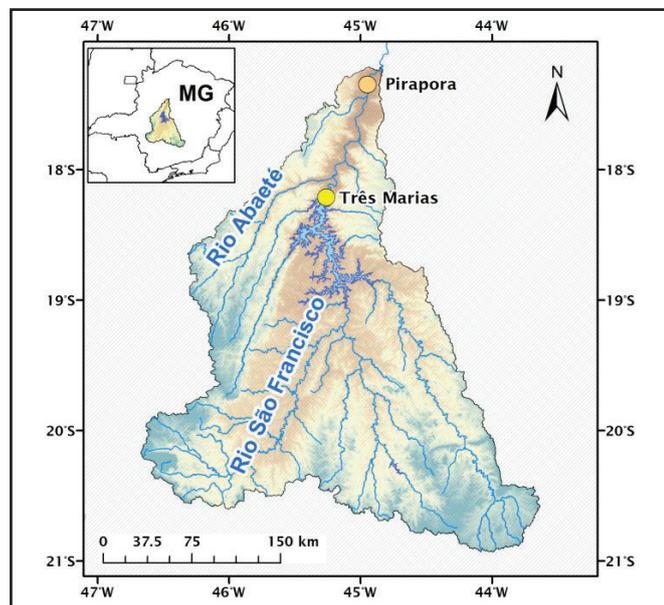


Figura 4 - Localização da área de estudo e pontos de maior interesse para a previsão de vazões (cidade de Pirapora e UHE Três Marias)

A Figura 5 apresenta a distribuição das estações telemétricas de monitoramento de precipitação e vazão existentes na bacia e utilizadas na calibração e validação do modelo hidrológico para a previsão de vazões.

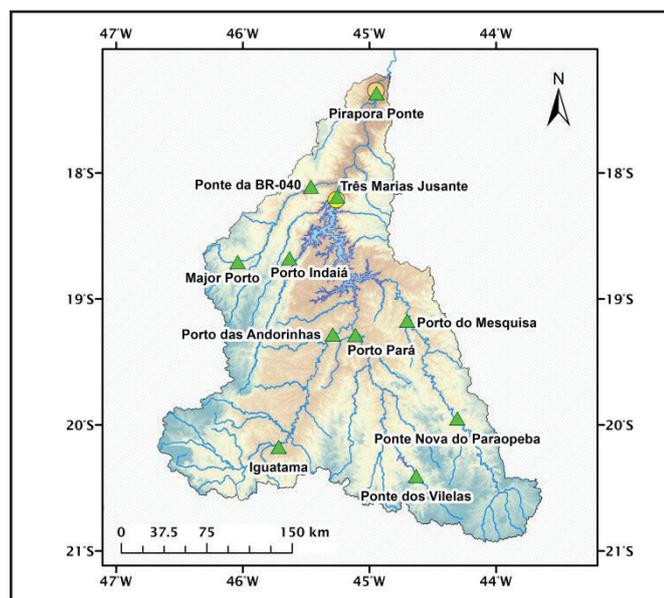


Figura 5 - Estações telemétricas de monitoramento de precipitação e vazão utilizadas neste estudo. As estações medem as duas variáveis

Como dados de entrada ao modelo hidrológico para previsão de vazões, foram utilizadas previsões meteorológicas por conjunto disponibilizadas pelo Global Ensemble Forecasting System (GEFS) da segunda geração do NOAA Global

Ensemble Reforecast Data Set, mantido pelo National Center for Environmental Prediction (NCEP) do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) dos Estados Unidos (HAMILL et al., 2012; GNEITING et al., 2005). Os dados deste modelo meteorológico estão disponíveis em: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/forecasts/reforecast2/download.html>.

O conjunto de previsões contém 11 membros com discretização temporal variável de 3h ou 6h, dependendo da antecedência da previsão, para um horizonte de até 16 dias. Para antecedências de até 72h (3 dias), a discretização temporal das previsões meteorológicas é de 3h. A partir da antecedência de 72h até 284h (16 dias), as previsões possuem discretização temporal de 6h.

Na previsão de vazões, os valores das previsões meteorológicas foram desagregados para discretização horária, assumindo um valor constante e igual dentro do período de desagregação. A resolução espacial da grade do modelo meteorológico é de um grau. Para uso na modelagem hidrológica, os valores previstos da grade do modelo foram interpolados para o centroide de cada uma das minibacias do modelo MGB-IPH, utilizando o método de interpolação IDW (Inverse Distance Weighting ou inverso da distância ao quadrado).

Com esses dados, foi conduzida uma sequência de previsões retroativas para os períodos chuvosos na bacia hidrográfica entre os anos de 2010 e 2013. Os dados de vazão e precipitação utilizados foram fornecidos pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). A sequência de previsões retroativas foi executada com duas variantes do método de assimilação de dados: a primeira utilizando a versão do modelo MGB-IPH com o método original assimilação de dados (PAZ et al., 2007); e a segunda com o modelo MGB-IPH com o método de assimilação com a modificação de incorporação do filtro de vazão de base.

Para comparar os resultados das previsões de vazão por conjunto utilizando os dois métodos de assimilação de dados avaliados, foram adotadas quatro medidas de desempenho: Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQR), Erro Médio Absoluto (EMA), Continuous Ranked Probability Score (CPRS) e a Proporção de Superestimativas. Estas medidas de desempenho, com exceção da última, são relativamente bem conhecidas e utilizadas em um grande número de estudos de avaliação de previsões determinísticas e por conjunto (STANSKI et al., 1989; HERBACH, 2000; WILKS, 2006; YOUNIS, 2008; RENNERT et al. 2009; VELÁZQUEZ, 2009; BROWN et al., 2010; ADDOR, 2011; BRADLEY; SCHWARTZ, 2011; JOLLIFFE; STEPHENSON; 2012; REGONDA et al., 2013). Uma breve descrição de cada uma das medidas de desempenho e de sua interpretação é apresentada a seguir:

Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQR):

Refere-se a raiz quadrada da diferença quadrática média entre a média do conjunto de previsões e as observações correspondentes. A REMQR representa a magnitude do erro cometido na previsão, dando maior peso aos maiores desvios. Quanto mais próximo seu valor estiver de zero, melhores são os resultados das previsões. A REMQR foi calculada a partir da Equação 7:

$$REMQR = \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (Q_o - Q_p)^2 \right)^{1/2} \quad (7)$$

em que Q_p é o valor previsto da vazão; Q_o é o valor observado da vazão; e N é o número total de previsões.

Erro Médio Absoluto (EMA):

É uma medida do erro absoluto entre os dados observados e previstos. No caso de previsões por conjunto, o EMA é calculado comparando-se a média do conjunto de previsões com os dados observados. Valores de EMA para um modelo perfeito são iguais a zero. A Equação 8 apresenta a forma de obtenção do EMA:

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |Q_p - Q_o| \tag{8}$$

em que Q_p é o valor previsto da vazão; Q_o é o valor observado da vazão; e N é o número total de previsões.

Continuous Ranked Probability Score (CRPS) médio:

É uma estatística que resume a qualidade de uma previsão probabilística contínua em um único número, através da comparação da integral dos quadrados das diferenças entre a função de probabilidades acumuladas empíricas das previsões e a função de probabilidades acumuladas empírica das observações. No CRPS os valores mais baixos correspondem a melhores resultados. Matematicamente, o valor do CRPS é dado por (BROWN et al., 2010; ALFIERI et al., 2013):

$$CRPS = \int_{-\infty}^{+\infty} [F_p(Q_p) - F_o(Q_p)]^2 dQ_p \tag{9}$$

em que F_p é o valor da função de probabilidades acumuladas da previsão, que pode ser calculada de forma empírica ordenando cada um dos membros da previsão por conjunto; F_o é o valor da função de probabilidades acumuladas da observação, que é dada por uma função que assume probabilidade igual a unidade para valores de Q_p maiores ou iguais à observação, e zero para valores de Q_p menores que os valores observados.

Uma maneira simples de entender o CRPS é imaginar as funções de probabilidades acumuladas plotadas na forma mostrada na Figura 6. No gráfico, no eixo das ordenadas, estão as probabilidades acumuladas, e no eixo das abcissas os valores das vazões. A linha vertical no centro é a probabilidade acumulada das observações. É importante notar que o CRPS não é exatamente a área entre as duas curvas, por que o termo de diferença entre as probabilidades (diferença vertical entre os gráficos) é elevado ao quadrado.

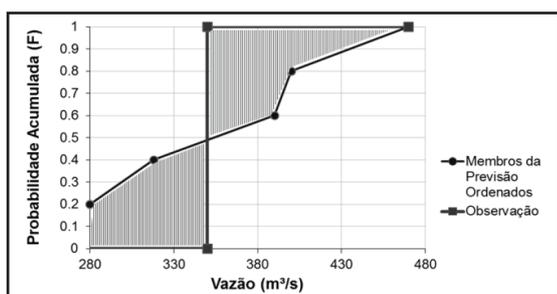


Figura 6 - Comparação entre a curva de probabilidades acumuladas da previsão por conjunto com a curva de probabilidades acumuladas da observação, que só possui um valor único horizontal

Na prática, o valor do CRPS é calculado como uma média através dos n pares de previsões e observações, que levam ao valor utilizado de CRPS médio, dado por:

$$\overline{CRPS} = 1/n \sum_{i=1}^n CRPS_i \tag{10}$$

O valor numérico do CRPS médio não é diretamente interpretável em termos de erro na previsão por si só, mas pode ser utilizado para fins comparativos entre duas previsões por conjunto ou entre previsões por conjunto e determinísticas.

Proporção de Superestimativas:

Esta medida de desempenho consiste na análise seletiva dos resultados de uma medida simples de confiabilidade denominada de Rank Histogram. O Rank Histogram consiste em um gráfico que apresenta a contagem da fração de observações que caem entre dois membros de um conjunto, organizado na forma de um ranking da distribuição das previsões. Esta medida é apresentada na forma de um histograma. Já a Proporção de Superestimativas consiste somente na porção inferior do Rank Histogram, ou seja, é uma contagem do número de observações em uma previsão que fica abaixo de todos os membros de uma previsão por conjunto em cada horizonte de previsão. Ela é uma medida direta da proporção de vezes em que as previsões são superestimadas em cada intervalo de tempo. Essa medida é especialmente útil no contexto deste trabalho porque o método de assimilação investigado causa, conforme explicado anteriormente, um excesso de superestimativa nas previsões e espera-se que a correção aqui proposta possa diminuir esta deficiência. Além disso, seus resultados são mais compreensíveis do que os do Rank Histogram porque são passíveis de serem apresentados em um único gráfico para todos os horizontes de previsão. Como neste trabalho as previsões por conjunto possuem 11 membros, o valor ideal para o a medida de proporção de superestimativas seria 1/11 ou aproximadamente 0,09.

Neste estudo o foco das análises é a representação dos períodos de recessão (vazões baixas). Portanto, para destacar os resultados calculados para as medidas de desempenho, todos os cálculos foram feitos considerando-se como limiar superior a vazão com probabilidade de excedência de 10% (Q_{10}).

RESULTADOS

Nos experimentos ao total foram realizadas previsões para 637 dias, onde cada dia contou com 11 previsões (uma para cada membro do conjunto), com horizonte de previsão de 384 horas (16 dias) cada.

As vazões afluentes ao reservatório foram calculadas pelo modelo hidrológico considerando a vazão de todos os rios que desaguam no reservatório mais a vazão gerada em todas as minibacias abrangidas pelo reservatório.

A apresentação dos resultados é estruturada da seguinte forma: primeiramente é feita uma análise visual de alguns eventos previstos, onde é verificada a importância do uso do filtro de vazão de base e posteriormente são apresentados os resultados das medidas de desempenho.

A Figura 7 apresenta o resultado da previsão de vazões afluentes ao reservatório de Três Marias para um evento ocorrido em fevereiro de 2012. Nesta previsão observa-se o benefício da utilização da assimilação com filtro de vazão de base. Verifica-se, na figura 7a (sem filtro), que praticamente não existe recessão na previsão devido ao excesso de água no reservatório subterrâneo, e, por esse motivo, uma grande cheia é prevista no final do horizonte de previsão. Contudo, na figura 7b (com filtro), verifica-se que o uso da técnica do filtro de vazão de base permite uma previsão da recessão bem mais correta, o que faz com que a previsão da magnitude da cheia pelo conjunto no fim do horizonte de previsão seja bem mais realista.

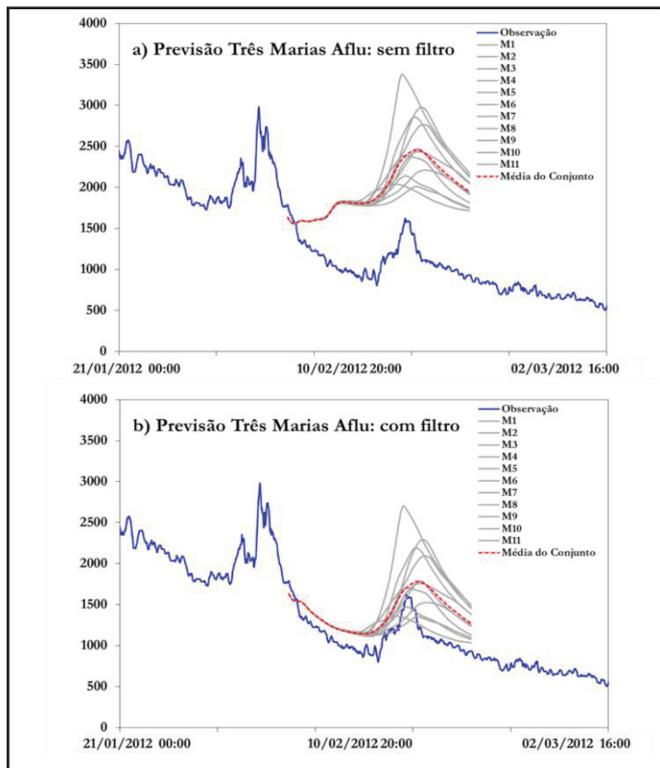


Figura 7 - Comparação entre os resultados da previsão para a vazão afluente a UHE Três Marias em 02/2012 (hidrograma observado em azul, membros da previsão por conjunto em cinza e média do conjunto de previsões em vermelho)

A Figura 8 apresenta uma previsão para a vazão afluente ao reservatório da UHE Três Marias realizada no período entre as duas cheias ocorridas entre dez/2011 e jan/2012, durante o verão. Pode-se notar que a ausência do filtro junto ao método de assimilação (Figura 8a) faz com que as vazões previstas mantenham-se acima de 2000m³/s durante a recessão, muito embora os valores observados sejam da ordem de 1000 m³/s. A utilização do filtro, por sua vez, permite melhorar a representação da recessão entre os dois eventos de cheia na previsão (Figura 8b). Com isto, também se obtêm uma melhora na representação da cheia posterior.

O mesmo benefício associado à utilização do filtro também é notado nas previsões realizadas para outros locais na bacia. A Figura 9 apresenta uma comparação entre os resultados de uma previsão com e sem a utilização da técnica do filtro de

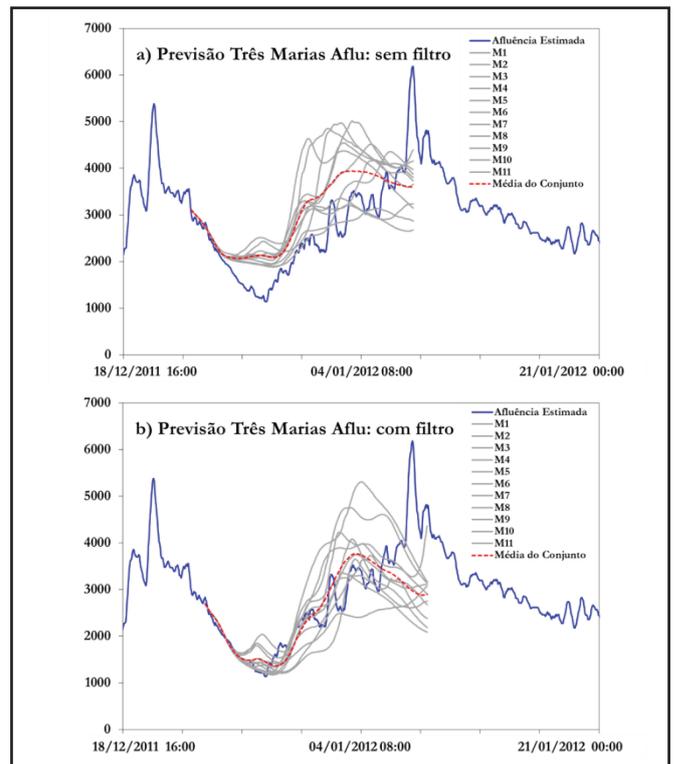


Figura 8 - Comparação entre os resultados de uma previsão para a vazão afluente a UHE Três Marias entre 12/2011 e 01/2012 (hidrograma observado em azul, membros da previsão por conjunto em cinza e média do conjunto de previsões em vermelho)

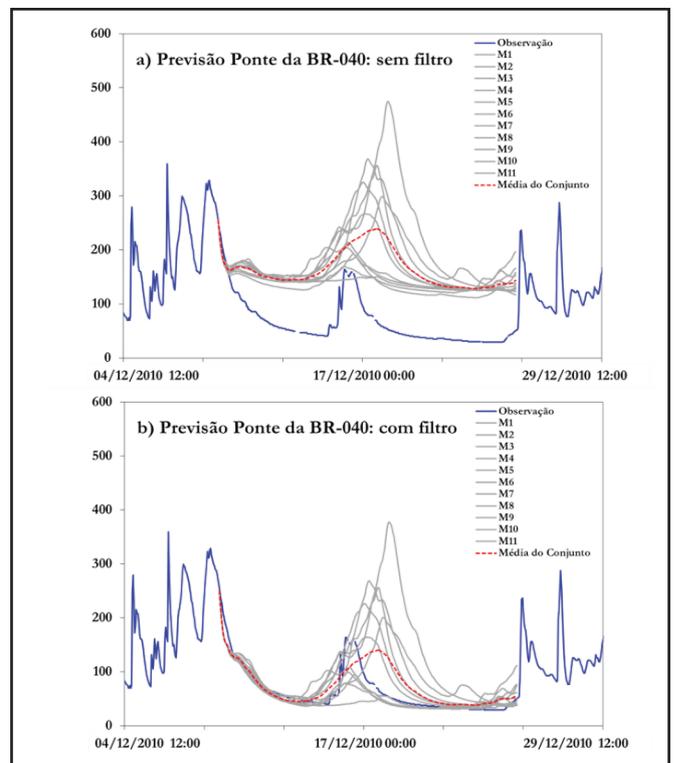


Figura 9 - Comparação entre os resultados de uma previsão para a vazão na Ponte da BR-040 em 12/2010 (hidrograma observado em azul, membros da previsão por conjunto em cinza e média do conjunto de previsões em vermelho)

vazão de base, para o rio Abaeté no local da Ponte da BR-040, para um evento ocorrido durante o mês de dezembro de 2010. Nesta previsão observa-se claramente o benefício da utilização da assimilação com filtro de vazão de base. Verifica-se na figura 9a (sem filtro) que tanto a recessão quanto o pico da cheia no centro do hidrograma são superestimados por todos os membros do conjunto hidrológico. Na figura 9b, onde a previsão é realizada com o uso da técnica do filtro de vazão de base, são observados melhores resultados na representação tanto dos picos como da recessão do hidrograma, especialmente pelo conjunto médio.

A seguir, são apresentados os resultados das medidas de desempenho calculadas para analisar a eficiência do método proposto. A vazão afluente a UHE Três Marias foi selecionada para ilustrar os resultados obtidos.

Na Figura 10 são apresentados os resultados obtidos para a Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) das previsões com e sem a utilização do filtro de base em função do horizonte de previsão. Nessa figura, observa-se um benefício na utilização do filtro de vazão de base para a assimilação de dados, uma vez que o erro cometido com a utilização do filtro é menor que o erro com a utilização do método original para praticamente todas as antecedências de previsão.

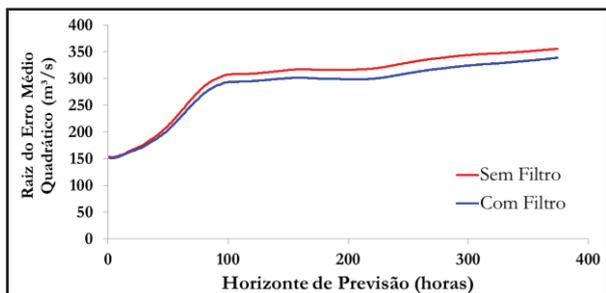


Figura 10 – Resultados de REMQ para a previsão da vazão afluente na UHE Três Marias

A Figura 11 apresenta os resultados obtidos em termos do Erro Médio Absoluto (EMA) das previsões utilizando o filtro e sem sua utilização. Novamente nota-se que existe um benefício na utilização do filtro de vazão de base na assimilação de dados para a previsão da vazão afluente na UHE Três Marias.

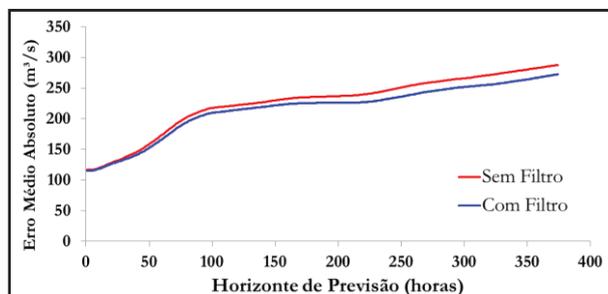


Figura 11– Resultados de EMA para a previsão da vazão afluente na UHE Três Marias

A Figura 12 mostra os resultados para a medida de desempenho CRPS médio. Nota-se que os resultados obtidos para a previsão da vazão afluente na UHE Três Marias apor-

tam novamente para uma vantagem na utilização do filtro de vazão de base.

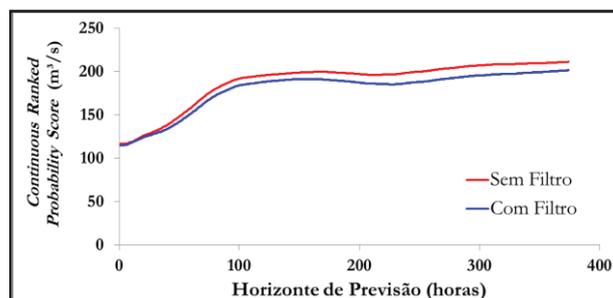


Figura 12 – Resultados de CRPS para a previsão da vazão afluente na UHE Três Marias

Por fim, a Figura 13 apresenta os resultados obtidos para proporção de superestimativas com e sem filtro de vazão de base. Através da figura pode-se inferir que a previsão de vazão por conjunto com a utilização do filtro tende a produzir superestimativas menores das recessões do que as previsões sem a utilização do filtro de vazão de base para assimilação dos dados.

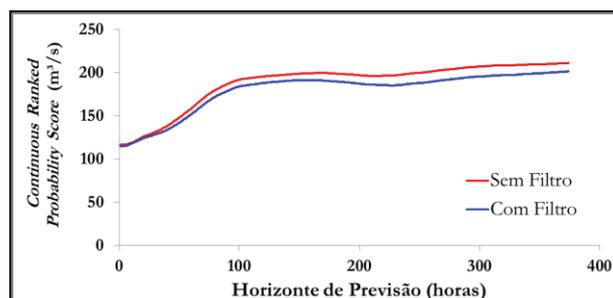


Figura 13 – Proporção de superestimativas para a previsão da vazão afluente na UHE Três Marias

A partir das Figuras 10 a 13, verifica-se também que o benefício do uso do filtro de vazão de base é mais destacado a partir do horizonte de previsão de cerca de 48h para a vazão afluente na UHE Três Marias. Este valor possivelmente está relacionado ao tempo de concentração da bacia, onde a transformação chuva-vazão não é tão importante para a previsão das afluições ao reservatório para horizontes menores que 48 h, e o mais importante é a propagação das vazões pela rede de drenagem.

A tendência foi também de o benefício do uso da técnica baseada no filtro de vazão de base aumentar com o aumento dos horizontes de previsão até antecedências de cerca de 240h a 336h. Nestes horizontes a diferença entre as curvas de desempenho dos dois métodos foi máxima. Isto pode ser constatado na Tabela 1, que apresenta um resumo dos resultados das métricas para horizontes de previsão a cada 48h (dois dias).

De uma forma geral, todas as análises apresentadas apontam para um melhor desempenho do modelo na previsão de vazões quando é utilizado o filtro de vazão de base na assimilação dos dados.

Tabela 1 – Resumo numérico dos resultados das métricas para horizontes de previsão a cada 48h

Sem Filtro				
Horizonte (h)	REMQ	EMA	CRPS	Prop. Sup.
48	208	156	146	0.69
96	306	216	190	0.67
144	315	228	198	0.63
192	317	236	198	0.59
240	326	247	199	0.56
288	342	263	206	0.54
336	349	276	209	0.51
384	356	287	211	0.50
Com Filtro				
Horizonte (h)	REMQ	EMA	CRPS	Prop. Sup.
48	201	150	140	0.66
96	292	208	182	0.63
144	300	220	191	0.58
192	299	226	188	0.54
240	306	233	187	0.50
288	322	249	194	0.47
336	331	260	198	0.45
384	339	272	201	0.42
Diferenças (Com Filtro - Sem Filtro)				
Horizonte (h)	REMQ	EMA	CRPS	Prop. Sup.
48	8	6	6	0.04
96	14	8	8	0.04
144	15	8	7	0.05
192	17	10	9	0.05
240	20	14	12	0.06
288	20	14	12	0.08
336	18	16	11	0.06
384	17	15	10	0.08

*As unidades de medida são as mesmas utilizadas nos gráficos de cada métrica.

CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma investigação sobre a possibilidade de incorporação de filtros numéricos de separação de escoamento para melhorar o desempenho da assimilação empírica de dados em modelos hidrológicos. O estudo de caso utilizado foi a bacia do rio São Francisco, na região da UHE Três Marias, e o modelo hidrológico adotado foi o modelo MGB-IPH.

Os resultados confirmaram a hipótese de que a utilização do filtro de vazão de base melhora o desempenho das previsões hidrológicas, diminuindo os erros das previsões ao permitir controlar de forma mais adequada o escoamento de origem subterrânea na assimilação de dados.

Na análise visual dos hidrogramas previstos em com-

paração aos hidrogramas observados, observou-se um impacto positivo da utilização do filtro de vazão de base na previsão de três eventos distintos.

A superioridade do método que utiliza o filtro foi confirmada na análise dos resultados de medidas de desempenho. É possível notar que os erros cometidos nas previsões são menores quando se utiliza o filtro de vazão de base. Na análise da proporção de superestimativas, observa-se também que a utilização do filtro de vazão de base diminui a proporção de superestimativas de todos os membros da previsão por conjunto.

Como principal conclusão tem-se que a utilização do filtro de vazão de base na assimilação de dados traz um benefício importante para a previsão de vazões, contribuindo para diminuição das incertezas.

Acredita-se que o método de assimilação proposto também possa trazer benefícios quando aplicado a outros métodos empíricos de assimilação de dados que apresentem deficiências similares às apresentadas pelo método atualmente adotado no modelo MGB-IPH e aqui citadas.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao CNPq pela bolsa de Doutorado concedida durante a realização desta pesquisa. Os autores também agradem as sugestões e a colaboração dos dois revisores anônimos para a melhora da versão final do texto.

REFERÊNCIAS

- ADDOR, N.; JAUN, S.; FUNDEL, F.; ZAPPA, M. An operational hydrological ensemble prediction system for the city of Zurich (Switzerland): skill, case studies and scenarios, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 15, p. 2327-2347, 2011. doi:10.5194/hess-15-2327-2011.
- ALFIERI, L.; BUREK, P.; DUTRA, E.; KRZEMINSKI, B.; MURARO, D.; THIELEN, J.; PAPPENBERGER, F. GloFAS – global ensemble streamflow forecasting and flood early warning, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 17, p. 1161-1175, 2013. doi:10.5194/hess-17-1161-201.
- ANDREOLLI, I. ; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; HAAS, R.; REGINA, J. V. M.. Previsão de vazão afluente a um reservatório utilizando previsão quantitativa de chuva. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 11, p. 55-70, 2006.
- BOUCHER, M.-A.; TREMBLAY, D.; DELORME, L.; PERREAULT, L.; ANCTIL, F. Hydroeconomic assessment of hydrological forecasting systems. *J. Hydrol.* 416–417, 133–144, 2012.
- BRADLEY, A.A.; SCHWARTZ, S.S. Summary verification measures and their interpretation for ensemble forecasts. *Monthly Weather Review*, v. 139, n. 9, p. 3075–3089, 2011.
- BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; PILAR, J. V. ; SILVA,

- B. C.; TUCCI, C., . Avaliação dos benefícios de previsões de vazão na operação de reservatórios. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 13, p. 197-213, 2009.
- BROWN, J.D.; DEMARGNE, J.; SEO, D.-J.; LIU, Y. The ensemble verification system (EVS): a software tool for verifying ensemble forecasts of hydrometeorological and hydrologic variables at discrete locations. *Environmental Modelling & Software*, v. 25, n. (7), p. 854–872, 2010.
- CLARK, M. P. et al. Hydrological data assimilation with the ensemble Kalman filter: use of stream flow observations to update states in a distributed hydrological model. *Adv Water Res.*, v. 31, p.1309–1324, 2008.
- CLOKE, H.; PAPPENBERGER, F. Ensemble flood forecasting: a review. *Journal of Hydrology*, v. 375, n. 3-4, p. 613–626, 2009.
- COLLISCHONN W.; DORNELLES, F. *Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais*. ABRH, 2013. 570p.
- COLLISCHONN, W. *Simulação Hidrológica de Grandes Bacias*. 2001. 277f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2001.
- COLLISCHONN, W. ; MELLER, A. ; FAN, F. ; MOREIRA, D.S. ; SILVA DIAS, P.L. ; BUARQUE, D. ; BRAVO, J. M. Short-term Ensemble Flood Forecasting Experiments in Brazil. *Geophysical Research Abstracts*, v. 15, p. 11910, 2013.
- COLLISCHONN, W. ; TUCCI, C. E. M. . Simulação hidrológica de grandes bacias. 2001. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 6, n.2, 2001.
- COLLISCHONN, W. ; TUCCI, C. E. M.; HAAS, R. ; ANDREOLLI, I. Forecasting river Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. *Journal of Hydrology* (Amsterdam), v. 305, p. 87-98, 2005.
- COLLISCHONN, W.; FAN, F. 2012. Defining Parameters for Eckhardt's Digital Base Flow Filter. *Hydrological Processes*, v. 27, n. 18, p. 2614-2622, 2012.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; HAAS, R.; ANDREOLLI, I. Forecasting river Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. *Journal of Hydrology* (Amsterdam), v. 305, p. 87-98, 2005.
- DEMERRITT, D.; CLOKE, H.; PAPPENBERGER, F, THIELEN, J.; BARTHOLMES, J.; RAMOS, M.-H. Ensemble predictions and perceptions of risk, uncertainty, and error in flood forecasting. *Environmental Hazards*, v. 7, p.115–127, 2007.
- DORA, A.S. Quantificação de Reservas Renováveis de Água Subterrânea em Bacias Hidrográficas a Partir de Séries Históricas de Vazão: Uma Ferramenta Para a Gestão e Bacias. 2013. 84f. Trabalho (Conclusão de Curso) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2013.
- ECKHARDT K. How to construct recursive digital filters for base flow separation. *Hydrological Processes*, v. 19, p. 507-515, 2005.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C. ; TUCCI, C. E. M. ; BOTELHO, L. C. M. . DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE PREVISÃO HIDROLÓGICA DISTRIBUÍDA PARA A REGIÃO DA UHE TRÊS MARIAS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XX., 2013. Bento Gonçalves - RS. *Anais.....* Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013.
- FAN, F. M. ; PONTES, P. R. M. ; COLLISCHONN, W.; BELTRAME, L. F. S. . Sistema de Previsão de Vazões para as Bacias dos Rios Taquari-Antas e Pelotas. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, XI., 2012 João Pessoa PB. Sistema de Previsão de Vazões para as Bacias dos Rios Taquari-Antas e Pelotas, 2012.
- FAN, F. M. ; COLLISCHONN, W. . Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, p. 243-254, 2014.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; MELLER, A.; BOTELHO, L. C. M. Ensemble stream flow forecasting experiments in a tropical basin: The São Francisco river case study. *Journal of Hydrology* (Amsterdam), v. 519, Part D, p. 2906-2919, 2014
- GEORGAKAKOS, K.P.; KRZYSZTOFOWICZ, R. 2001. Probabilistic and ensemble forecasting. *Journal of Hydrology*, v. 249, p.1, 2001.
- GNEITING, T. A. E.; RAFTERY, A. H.; WESTVELD III.T.; GOLDMAN. Calibrated probabilistic forecasting using ensemble model output statistics and minimum CRPS estimation. *MonWea. Rev.* v.133, p.1098-1118, 2005.
- HAMILL, T. M. G. T.; BATES, J. S.; WHITAKER, D. R.; MURRAY, M.; FIORINO, T. J.; GALARNEAU, JR. ZHU, Y; LAPENTA, W . NOAA's second-generation global medium-range ensemble reforecast data set. *Bull Amer. Meteor. Soc.*, 2012. submitted.
- HERSBACH, H. Decomposition of the continuous ranked probability score for ensemble prediction systems. *Weather and Forecasting*, v. 15, p. 559–570, 2000.
- JOLLIFFE, I.T.; STEPHENSON, D.B. (Eds.). *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. 2nd Ed., 2012.
- KRZYSZTOFOWICZ, R. The case for probabilistic forecasting in hydrology. *Journal of Hydrology* v. 249, n. 1-4, p. 2–9, 2001.
- LETTENMAIER, D.P.; WOOD, E.F. Hydrologic Forecasting. In: MAIDMENT, D. *Handbook of Hydrology*. . Chapter 22. Ed.

McGraw-Hill, Inc., 1993.

LIU Y.; WEERTS A. H.; CLARK M.; HENDRICKS FRANSSEN H.-J.; KUMAR S.; MORADKHANI H.; SEO D.-J.; SCHWANENBERG D.; SMITH P.; VAN DIJK A. I.; VAN VELZEN N.; HE M.; LEE H.; NOH S. J.; RAKOVEC O.; RESTREPO P. Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: progresses, challenges and emerging opportunities, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, 2012.

LIU, Y.; GUPTA, H.V. Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data 488 assimilation framework. *Water Resour. Res.* v. 43, W07401, 2007. doi: 10.1029/2006WR005756.

MATTIUZI, C.D.P. *Estimativa de Recarga a Partir da Separação de Escoamento de Base na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí/RS*. 2013. 69f. Trabalho (Conclusão de Curso) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2013.

MELLER, A. *Previsão de cheias por conjunto em curto prazo*. 2012. 224f. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

MELLER, A; BRAVO, J.M.; COLLISCHONN, W. Assimilação de dados de vazão na previsão de cheias em tempo-real com o modelo hidrológico MGB-IPH. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.17, n.3, Jul/Set 2012, p.209-224, 2012.

MELLER, A.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D.; DIAS, P.; MOREIRA, D. Previsão de Cheias por Conjunto em Curto Prazo. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, p. 33-49, 2014.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; Bonnet, M. P.; de Gonçalves, L. G. G. On the sources of hydrological prediction uncertainty in the Amazon. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 16, p. 3127-3137, 2012.

PAIVA, R. C. D.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.-P. ;GONÇALVES, L. G. G.; CALMANT, S.; GETIRANA, A. ; SANTOS DA SILVA, J. 2013. Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* (Online), v. 10, p. 2879-2925, 2013.

PAZ AR.; COLLISCHONN W.; TUCCI C.; CLARKE R.; ALLASIA D. Data Assimilation in a Large-scale Distributed Hydrological Model for Medium Range Flow Forecasts. IAHS Press, *IAHS Publication*, No. 313, Wallingford, UK; 471–478, 2007.

RAMOS, M. H.; VAN ANDEL, S. J.; PAPPENBERGER, F. Do probabilistic forecasts lead to better decisions? *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 17, p. 2219-2232, 2013.

REGONDA S. K.; SEO D.; LAWRENCE B.; JAMES D. B.;

DEMARGNE, J. Short-term ensemble stream flow forecasting using operationally-produced single-valued streamflow forecasts – A Hydrologic Model Output Statistics (HMOS) approach. *Journal of Hydrology*, v. 497, p. 80-96, 2013.

RENNER, M., WERNER, M., RADEMACHER, S., AND SPROKKEREEF, E. Verification of ensemble flow forecasts for the River Rhine, *Journal of Hydrology*, v.376, p. 463–475, 2009. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.07.059.

SENE, K., 2010. *Hydrometeorology: Forecasting and Applications*. Publisher: Springer, 2009. 366 p.

SILVA, B. C. ; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. ; DELGADO, M. C. Previsão hidroclimática de vazão de curto prazo na bacia do rio São Francisco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, p. 31-42, 2007.

STANSKI, H.; WILSON, L.; BURROWS, W. *Survey of common verification methods in meteorology*. World Meteorological Organization Geneva, 1989.

TUCCI, C. E. M. *Modelos Hidrológicos*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH. 2.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. M. ; COLLISCHONN, W. ; CLARKE, R. T.;; PAZ, A.R. ; ALLASIA, D. Short- and long-term flow forecasting in the Rio Grande watershed. *Atmospheric Science Letters*, v. 9, p. 53-56, 2008.

VELÁZQUEZ, J. A.; PETTIT, T.; LAVOIE, A.; BOUCHER, M.-A.; TURCOTTE, R.; FORTIN, V.; ANCTIL, F. An evaluation of the Canadian global meteorological ensemble prediction system for short-term hydrological forecasting, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. n. 13, p. 2221-2231, 2009. doi:10.5194/hess-13-2221-2009.

VRUGT JA, GUPTA HV, NUALLÁIN BÓ, BOUTEN W. Real-time data assimilation for operational ensemble streamflow forecasting. *J Hydrometeorol*, v. 7, p.548–65, 2006. <http://dx.doi.org/10.1175/JHM504.1>.

WILKS, D. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 2006.

YOUNIS, J.; RAMOS, M.-H.; THIELEN, J. EFAS forecasts for the March–April 2006 flood in the Czech part of the Elbe River Basin – a case study. *Atmospheric Science Letters*, v. 9, p.88–94, 2008.