

## Assimilação de Dados de Vazão na Previsão de Cheias em Tempo-Real com o Modelo Hidrológico MGB-IPH

Adalberto Meller

Agência Nacional de Águas, ANA  
adalberto.meller@ana.gov.br

Juan Martín Bravo, Walter Collischonn

Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH-UFRGS  
junarbra@iph.ufrgs.br; collischonn@iph.ufrgs.br

Recebido: 16/11/11 - revisado: 14/02/12 - aceito: 02/03/12

---

### RESUMO

Nesse trabalho é descrito um método empírico de assimilação de dados em conjunto com a modelagem hidrológica distribuída, para previsão de cheias em tempo real em uma bacia hidrográfica de médio porte na região sudeste do Brasil, a bacia do rio Piracicaba. Para avaliar o desempenho do método de assimilação proposto são realizadas previsões de cheia, tendo como chuva prevista a chuva observada na bacia, simulando um cenário de previsão em tempo real ideal. São ainda simulados outros cenários de previsão, que incluem chuva futura igual a zero, previsão com base na persistência do último valor observado de vazão e previsão sem assimilação de dados. As previsões são realizadas com intervalo de tempo horário, frequência de 6 horas e horizonte de 48 horas, para a condição de cheias no local das previsões. Os resultados mostram que o método de assimilação tem impactos positivos nos resultados das previsões. Em termos do coeficiente de Nash-Sutcliffe, o uso do procedimento de assimilação promove uma melhora de 10% nas antecedências iniciais, diminuindo para cerca de 3% para o horizonte da previsão.

**Palavras-chave:** previsão de cheias, simulação hidrológica, assimilação de dados.

---

### INTRODUÇÃO

Dentre os diferentes desastres naturais que acontecem ao redor do mundo, as inundações figuram entre os que causam maiores impactos às populações, em termos socioeconômicos. Estima-se que as inundações sejam responsáveis por mais de um terço das perdas econômicas e por cerca de dois terços do número total de pessoas afetadas mundialmente por desastres naturais (Kafle *et al.*, 2007).

O aumento no número de ocorrências de inundações com impactos devastadores observados recentemente no Brasil tem despertado cada vez mais o interesse de diversos setores da sociedade por medidas que permitam antecipar esses eventos, reduzindo seus impactos em termos de vidas e danos à propriedade. Nesse contexto, os Sistemas de Alerta de Cheia (SAC) têm sido reconhecidos como uma das medidas mais efetivas (Srikanthan *et al.*, 1994; Singh, 2005; Shrestha *et al.*, 2008). O objetivo principal de um SAC é prever, com relativa antecedência e precisão, as condições futuras do rio, em pontos

vulneráveis a inundação, para emitir avisos de alerta à população residente ou aos operadores de obras hidráulicas na região. Esse tipo de ação de caráter preventivo assume papel importante na tomada de decisões por parte das autoridades competentes.

Um dos principais componentes de um SAC é o sistema de previsão de cheias. Nas últimas décadas diferentes métodos de previsão hidrológica têm sido propostos. Dependendo do tamanho da bacia e do tempo de deslocamento da onda de cheia na rede de drenagem podem ser utilizados modelos de regressão simples entre variáveis como o nível ou a vazão em diferentes postos fluviométricos, ou ainda modelos baseados essencialmente na propagação do hidrograma de cheias observado a montante do local de interesse (Tucci, 1998; Sene, 2009).

Quando se deseja uma antecedência maior nas previsões de vazão ou nível, torna-se necessário a incorporação da precipitação no processo. Nessa situação, uma das abordagens consagradas para essas previsões é a que utiliza modelos hidrológicos chuva-vazão conceituais. Os modelos chuva-vazão conceituais procuram representar a parte terrestre

do ciclo hidrológico, através de equações baseadas nos processos físicos envolvidos. Uma das principais vantagens da utilização desse tipo de modelos é permitir a simulação de cenários diferentes daqueles usados na calibração – extrapolação - com maior consistência metodológica (Tucci, 1998), característica desejada na simulação de eventos extremos.

Um dos inconvenientes que surgem quando se utiliza um modelo chuva-vazão para previsão de cheias em tempo real, é que o valor estimado pelo modelo no instante de partida da previsão normalmente é diferente daquele observado, o que acaba por degradar as previsões já nos primeiros intervalos de tempo de previsão. Esse desvio se deve a diversos fatores, como: erros nos dados de entrada, deficiência na representação dos processos físicos pelo modelo, erros na calibração do modelo, mudanças nas características da bacia ao longo do tempo ou ainda erros nos dados observados na estação de monitoramento (Serban & Askew, 1991; Srikanthan *et al.*, 1994).

Existindo dados observados de vazão ou nível em tempo real, é possível aproximar o comportamento do modelo à resposta do sistema observada em campo, procedimento conhecido como assimilação de dados ou atualização do modelo. Nesse trabalho é apresentada uma avaliação do desempenho de um procedimento de atualização das variáveis de estado de um modelo hidrológico distribuído (MGB-IPH), aplicado à previsão de cheias em tempo-real na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba.

## A ASSIMILAÇÃO DE DADOS NA PREVISÃO HIDROLÓGICA

Madsen & Skotner (2005) definem a assimilação de dados ou atualização do modelo como um processo de retroalimentação onde a previsão é condicionada às observações no rio, utilizadas para corrigir as condições iniciais do modelo. Embora o nível de água ou a vazão sejam as variáveis mais utilizadas neste processo (Kahl & Nachtnebel, 2008; Divac *et al.*, 2009), outras variáveis como temperatura, umidade do solo e o fluxo latente de calor também podem ser utilizadas.

No contexto da previsão em tempo real, são usadas duas terminologias que indicam o modo no qual o modelo está operando. Quando as previsões de vazões são realizadas empregando-se alguma técnica de assimilação, costuma-se dizer que o modelo opera em “modo de previsão”, “modo de atua-

lização” ou operando “on-line”. Caso contrário, diz-se que o modelo está em “modo de simulação” ou operando “off-line” (Xiong & O’Connor, 2002; Moore, 2007; Sene, 2009).

Os métodos de assimilação de dados na previsão hidrológica são organizados em quatro categorias principais (O’Connell & Clarke, 1981; Refsgaard, 1997): (a) atualização das variáveis de entrada, (b) atualização das variáveis de estado, (c) atualização dos parâmetros do modelo, e (d) atualização das variáveis de saída. A Figura 1 mostra, esquematicamente, como cada um desses métodos interage com o modelo e em qual etapa da previsão hidrológica são aplicados.

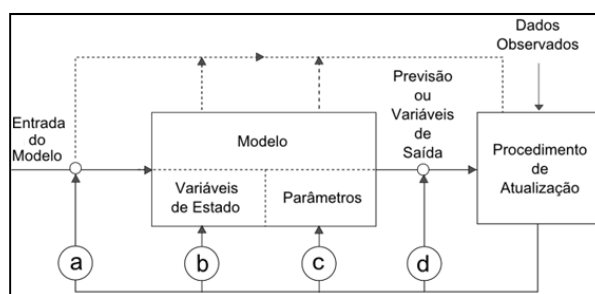


Figura 1 - Métodos usados na assimilação de dados.

Fonte: Refsgaard (1997).

A seguir é feita uma descrição com maior detalhe dos métodos de assimilação:

- a) Atualização das variáveis de entrada: os dados de entrada são modificados de modo que as variáveis de saída do modelo, no instante ou período anterior ao início da previsão, se aproximem dos dados observados. A aplicação dos métodos que pertencem a essa categoria se sustenta no fato das incertezas nos dados de entrada serem frequentemente dominantes sobre os erros da previsão (Refsgaard, 1997; Kahl & Nachtnebel, 2008).

A maior parte desse tipo de procedimento é baseada em algoritmos de tentativa e erro (Srikanthan *et al.*, 1994; Serban & Askew, 1991), sendo a precipitação e a temperatura as variáveis de entrada normalmente utilizadas. Alguns autores chamam a atenção para desvantagens ou inconsistências dos métodos que pertencem a essa categoria. A existência de um número grande de variáveis de entrada consideradas no ajuste, por exemplo, pode tornar a atualização um problema de otimização bastante

complexo (Divac *et al.*, 2009). Kahl & Nachtnebel (2008) comentam que a utilização desse método, no caso da precipitação, está condicionada à ocorrência de precipitação nos instantes anteriores à previsão.

- b) Atualização das variáveis de estado: as condições iniciais do modelo são corrigidas através de algumas de suas variáveis de estado para se obter uma melhor relação entre os dados observados e calculados no início da previsão. O termo “estado” é usado para descrever uma variável do modelo que se situa em um estágio entre a entrada e a saída do modelo (Szollosi-Nagy, 1976 *apud* Moore, 2007).

A técnica se fundamenta na hipótese que os erros presentes nos dados de entrada dos modelos chuva-vazão se acumulam e aparecem nas variáveis definidas a partir de reservatórios conceituais, elementos que tipicamente são parte da estrutura desses modelos (Srikanthan *et al.*, 1994 e Serban & Askew, 1991).

A assimilação das variáveis de estado do modelo pode ser basicamente realizada de duas maneiras: por procedimentos empíricos ou métodos envolvendo o Filtro de Kalman. Nos métodos empíricos as variáveis observadas - normalmente a vazão - são usadas para determinar o erro cometido pelo modelo no instante da previsão. Esse erro pode ser expresso na forma de um fator de ajuste, que é então utilizado para ajustar as variáveis de estado do modelo (Moore *et al.*, 2005). Exemplos de métodos empíricos são apresentados nos trabalhos de Wöhling *et al.* (2006), Paz *et al.* (2007) e Moore (2007).

Abordagens utilizando o Filtro de Kalman têm se tornado bastante utilizadas na atualidade, podendo-se citar os trabalhos de Madsen & Skotner (2005) e Xie & Zhang (2010). Nessa abordagem, os fatores de ajuste das variáveis de estado do modelo são estimados de acordo com as incertezas relativas do modelo e da variável observada, para cada uma das variáveis de estado consideradas, sendo sua aplicação mais adequada a sistemas lineares (Moore *et al.*, 2005). Dessa forma não há garantias que o método produza resultados melhores que os procedimentos empíricos em sistemas não lineares, como aqueles inerentes aos processos hidrológicos.

As variáveis de estado mais utilizadas são: a área de cobertura da neve, a profundidade da camada de neve, a umidade do solo ou a quantidade de água armazenada nos reservatórios conceituais do modelo que representam o armazenamento de água nas camadas superficial, zonas saturadas e não-

saturadas (Serban e Askew, 1991; Divac *et al.* 2009).

- c) Atualização dos parâmetros: Nesta técnica de assimilação de dados os valores mais recentes de vazões ou níveis observados são utilizados para iniciar uma nova fase de calibração dos parâmetros do modelo, podendo ser usados para esse fim algoritmos de otimização (Tucci & Clarke, 1980) ou métodos baseados no Filtro de Kalman (Gomes & Mine, 1998). Os procedimentos que pertencem a essa categoria têm sido pouco utilizados na modelagem chuva-vazão conceitual (Sene, 2009; Divac *et al.*, 2009), embora tenham aplicabilidade reconhecida no caso de modelos baseados em funções de transferência, autorregressivos ou de redes neurais artificiais.

A assimilação dos parâmetros do modelo tem sido alvo de críticas por diversos autores. Serban & Askew (1991), por exemplo, comentam o problema da existência de interdependência entre parâmetros, observada na maior parte dos modelos. Isso significa, em termos gerais, que a modificação de um parâmetro se reflete na necessidade de modificação de outros parâmetros o que, na prática, equivaleria a calibrar novamente modelo a cada instante inicial de previsão. Moore *et al.* (2005) indica que a necessidade de variação dos parâmetros ao longo do tempo é um diagnóstico da deficiência existente na estrutura do modelo.

- d) Atualização da saída: também chamado de predição ou correção do erro, esse método consiste em prever os erros de previsão do modelo, o que normalmente é realizado através de modelos ajustados para a série temporal de diferenças (resíduos) entre os valores observados e calculados. Os métodos que pertencem a essa categoria são considerados os mais amplamente utilizados na previsão hidrológica (Refsgaard, 1997; Yu & Chen, 2005; Xiong & O'Connor, 2002), e têm como principal vantagem o fato de serem aplicados de maneira independente do modelo de previsão, o que simplifica significativamente sua operacionalização na previsão em tempo-real.

Na assimilação da saída de modelos de previsão são utilizados normalmente modelos autorregressivos. Assim sua eficiência depende do grau de persistência do erro entre as vazões observadas e calculadas na série temporal. Exemplos de métodos usados para previsão do erro são: AR (*Auto-Regressive*, e.g. Xiong & O'Connor, 2002), ARMA

(*Auto-Regressive Moving Average*, e.g. Broersen & Weerts, 2005), ARIMA (*Auto-Regressive Incremental Moving Average* e.g. Berthet *et al.*, 2009), redes neurais artificiais (e.g. Goswami *et al.*, 2005; Abebe & Price, 2003), lógica difusa (e.g. Yu & Chen, 2005) ou Filtro de Kalman (Srikanthan *et al.*, 2007).

Kahl & Nachtnebel (2008) citam que modelos autorregressivos do tipo AR promovem bons resultados nos primeiros intervalos da previsão e mostram que a autocorrelação dos erros é muito maior em vazões médias e baixas. Isto acontece, tipicamente, porque os erros causados pelo modelo nos períodos de vazões com essa magnitude geram paralelismo nos hidrogramas. Os erros durante os picos, por outro lado, apresentam uma tendência a oscilar de forma rápida e ampla, diminuindo a persistência do erro e, assim, a possibilidade de aplicação dos métodos de assimilação da saída dos modelos (Serban & Askew, 1991; Moore, 2007; Kahl & Nachtnebel, 2008).

Por fim, é importante destacar alguns aspectos gerais na utilização dos métodos de assimilação de dados para previsões de vazões. De acordo com Environment Agency (2002) *apud* Sene (2009), embora a assimilação de dados possa melhorar significativamente o desempenho dos modelos nas previsões de cheia, os resultados dependem, dentre outros, de dois elementos:

1. um modelo bem calibrado, capaz de reproduzir uma ampla gama de eventos;
2. da qualidade dos dados de entrada do modelo.

Além desses elementos, é importante ressaltar que os efeitos da atualização nos modelos de previsão são limitados no tempo, podendo existir uma antecedência a partir do qual a atualização já não tem um impacto significativo sobre as previsões emitidas (Berthet *et al.*, 2009).

Nesse trabalho é apresentado um conjunto de avaliações de uma técnica de assimilação de dados pertencente à segunda categoria previamente apresentada, que trata da atualização das variáveis de estado de modelos conceituais. A seguir é apresentado uma breve descrição do modelo hidrológico utilizado e seu método de assimilação de dados.

## O MODELO MGB-IPH

O MGB-IPH (Modelo de Grandes Bacias) é um modelo hidrológico conceitual, distribuído, aplicado a grandes bacias hidrográficas, apresentado

por Collischonn (2001). O modelo teve sua estrutura baseada nos modelos LARSIM (Bremicker, 1998) e VIC-2L (Liang *et al.*, 1994), com algumas adaptações.

O modelo MGB-IPH tem passado por aprimoramentos ao longo dos últimos dez anos, tanto de sua estrutura, como de pré-processamento de dados de entrada e de interface ao usuário.

Ao contrário das versões anteriores do modelo MGB-IPH, que utilizava células regulares quadradas como unidade de discretização da bacia hidrográfica, a versão atual do modelo utiliza a discretização por minibacias. Nessa representação, a bacia é também subdividida em um conjunto de elementos. No entanto, nesse caso, os elementos não possuem forma predefinida e são delimitados a partir do modelo numérico do terreno (MNT). Existe ainda uma unidade de divisão maior que são as sub-bacias. As sub-bacias correspondem a um conjunto de minibacias e tem seu exutório definido pelos locais onde existem postos fluviométricos com dados observados.

O intervalo de tempo de cálculo do modelo é diário ou menor, embora alguns processos de cálculo internos, como a propagação de ondas de cheia nos rios, utilizem intervalos de tempo menores.

A maioria das aplicações do modelo MGB-IPH tem sido na simulação hidrológica de grandes bacias hidrográficas, onde normalmente é utilizado o intervalo de tempo diário. Uma das particularidades da aplicação proposta nesse trabalho é a utilização do modelo hidrológico para previsão de cheias em uma bacia de médio porte, com intervalo de tempo horário.

A variabilidade espacial da precipitação no modelo é considerada através da interpolação dos dados de postos pluviométricos para o centróide de cada minibacia. Nesse processo é utilizado o método do inverso do quadrado da distância. A variabilidade dos solos quanto ao tipo e uso é considerada através da utilização de planos de informação, determinados a partir de imagens de satélite ou mapas digitalizados. A variabilidade espacial do relevo é considerada através da utilização do MNT.

O tipo de vegetação e uso do solo dentro de cada minibacia é categorizado dentro de uma ou mais classes utilizando a abordagem de Unidades de Resposta Hidrológica-URH. As URH's são áreas de comportamento hidrológico similar, definidas pela combinação dos mapas de tipo e uso do solo (Kouwen *et al.*, 1993). Dessa forma, o balanço hidrológico é calculado para cada URH em cada minibacia e as vazões estimadas em cada URH são posteriormente

somadas e propagadas até a rede de drenagem.

O balanço de água no solo é realizado utilizando um método baseado na geração de escoamento superficial por excesso de capacidade de armazenamento, porém com uma relação probabilística entre a umidade do solo e a fração de área de solo saturada. A evapotranspiração é estimada pelo método de Penman – Monteith (Shuttleworth, 1993).

A propagação de vazão é realizada em duas etapas. Em primeiro lugar é realizada a propagação de vazão no interior da minibacia, utilizando-se modelos de reservatórios lineares simples. Cada minibacia tem três reservatórios lineares que representam a propagação dos escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo. A vazão de saída dos três reservatórios é somada e propagada pela rede de drenagem utilizando o método Muskingum-Cunge.

Embora alguns processos sejam representados de forma empírica, o modelo hidrológico conta com uma forte base física, o que fortalece a relação entre os parâmetros e as características físicas da bacia. Uma descrição com maior detalhe do modelo pode ser encontrada em Collischonn (2001) e Paiva (2009).

A assimilação de dados no MGB-IPH é realizada através de um método empírico, proposto originalmente por Collischonn *et al.* (2005), sendo sua última versão apresentada nos trabalhos de Paz *et al.* (2007) e Collischonn *et al.* (2007). O método utiliza as vazões observadas em tempo-real para atualizar as condições iniciais do modelo, representadas pelas vazões calculadas ao longo da rede de drenagem e o volume de água armazenado nos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo de cada minibacia do modelo hidrológico.

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 durante um período anterior à previsão, conforme apresentado na Equação 1.

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

onde  $Q_{obs}^t$  e  $Q_{calc}^t$  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

para atualização do modelo.

Segundo o método mencionado, a cada intervalo de tempo de previsão os fatores de correção das sub-bacias são calculados e aplicados às variáveis de estado do modelo para cada uma das minibacias. 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 no método 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.

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

onde  $Q_{at_{i,s}}$  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.

Na atualização do volume de água armazenada nos três reservatórios conceituais o mesmo fator de correção ( $FCA$ ) aplicado à atualização da vazão na rede de drenagem é utilizado. Para os reservatórios, porém, a ponderação ocorre em função da fração do escoamento originária dos reservatórios, representada pela variável  $PBi$ . A correção dos volumes dos reservatórios conceituais é dada por:

Se  $PBi > PBlim$

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

Se  $PBi \leq PBlim$

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

onde  $VBat_{i,s}$  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  $i$ ;  $PB_i$  é a fração da vazão na rede de drenagem originária do reservatório conceitual,  $PBlim$  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.

De acordo com Paz *et al.* (2007), quando o parâmetro  $bx$  assume valores próximos de 1, a atualização dos volumes dos reservatórios conceituais do modelo é relativamente rápida.

## ESTUDO DE CASO E DADOS DISPONÍVEIS

Como estudo de caso nesse trabalho, é utilizada a bacia do Rio Piracicaba, que conta com a disponibilidade de informações de telemetria. A bacia possui área de cerca de 12.000 km<sup>2</sup> e situa-se na porção sudeste do Estado de São Paulo e sul do Estado de Minas Gerais. A Figura 2 apresenta o mapa de localização da bacia e das estações de monitoramento hidrológico e climatológico utilizadas.

O Rio Piracicaba, afluente pela margem direita do rio Tietê, nasce no encontro dos rios Atibaia e Jaguari, no município de Americana-SP. Tem extensão total, da cabeceira à foz, de cerca de 250 km. Seus principais afluentes são os rios Camanducaia, Atibaia, Jaguari e Corumbataí.

O clima na região da bacia é do tipo quente, temperado e chuvoso. O período chuvoso ocorre entre os meses de outubro e abril, e o de estiagem, entre maio e setembro. Os índices de precipitação variam entre 1.200 e 1.800 mm anuais (Irrigart, 2004).

Na década de 1970, foram construídos quatro importantes reservatórios na cabeceira da bacia: Jaguari, Jacareí, Cachoeira e Atibainha. Esses reservatórios, que barram rios homônimos, integram o Sistema Cantareira, um conjunto de infraestruturas (túneis de interligação, canais superficiais e estações de bombeamento) e reservatórios construídos com objetivo de regular a descarga para jusante das seções fluviais barradas e garantir abastecimento da região metropolitana de São Paulo.

Os problemas de inundações na bacia estão, em grande parte, ligados à ocupação das várzeas nos rios a jusante dos reservatórios do Sistema Cantareira. Esse processo se intensificou a partir da década de 1990, estimulado pelo longo período sem vertimentos do sistema. Nos meses de dezembro e janeiro dos anos hidrológicos 2009-2010 e 2010-2011, entretanto, a bacia sofreu com um volume de chuvas significativamente acima da média histórica, tendo

sido observadas inundações nas cidades de Atibaia, Bragança Paulista e Piracicaba.

As informações de entrada do modelo hidrológico MGB-IPH consistem em dados de precipitação e dados climatológicos, além daqueles referentes às características físicas e de cobertura da bacia hidrográfica, dados pelo modelo numérico do terreno e pelos mapas de tipo e uso do solo. São ainda utilizados dados de vazão, na calibração/validação do modelo, e no procedimento de assimilação de dados nas previsões de cheia. Foram usadas as seguintes bases de dados:

- modelo numérico do terreno, derivado da missão STRM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução de 90m, disponibilizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Miranda, 2005);
- para composição das URH's, foram usados dados de tipo de solo do Projeto Radam Brasil, na escala 1:1.000.000, e dados de cobertura vegetal para a América do Sul obtidos via sensoriamento remoto, com resolução aproximada de 1km, desenvolvido por Eva *et al.* (2002);
- dados horários de vazão de 4 estações telemétricas nos rios Piracicaba, Camanducaia, Jaguari e Atibaia, no período de maio/2007 a abril/2011, cedidos pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica-FCTH e o Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo-DAEE;
- dados horários de precipitação de 16 estações telemétricas na bacia, no período de maio/2007 a abril/2011, cedidos pelo FCTH e DAEE;
- dados diários de vazões defluentes dos reservatórios do Sistema Cantareira, no período entre maio/2007 e abril/2011, disponibilizados no sítio da Internet do Comitê de bacia dos Rios Piracicaba, Jundiaí e Capivari - PCJ (<http://www.comitepcj.sp.gov.br>);
- dados diários de variáveis climatológicas, originários de 14 estações na região da bacia do rio Piracicaba (Figura 2), constantes no banco de dados da Agência Nacional de Águas-ANA.

## MÉTODO

A análise do procedimento de assimilação de dados proposto é baseada em um conjunto de simulações utilizando o modelo MGB-IPH aplicado .

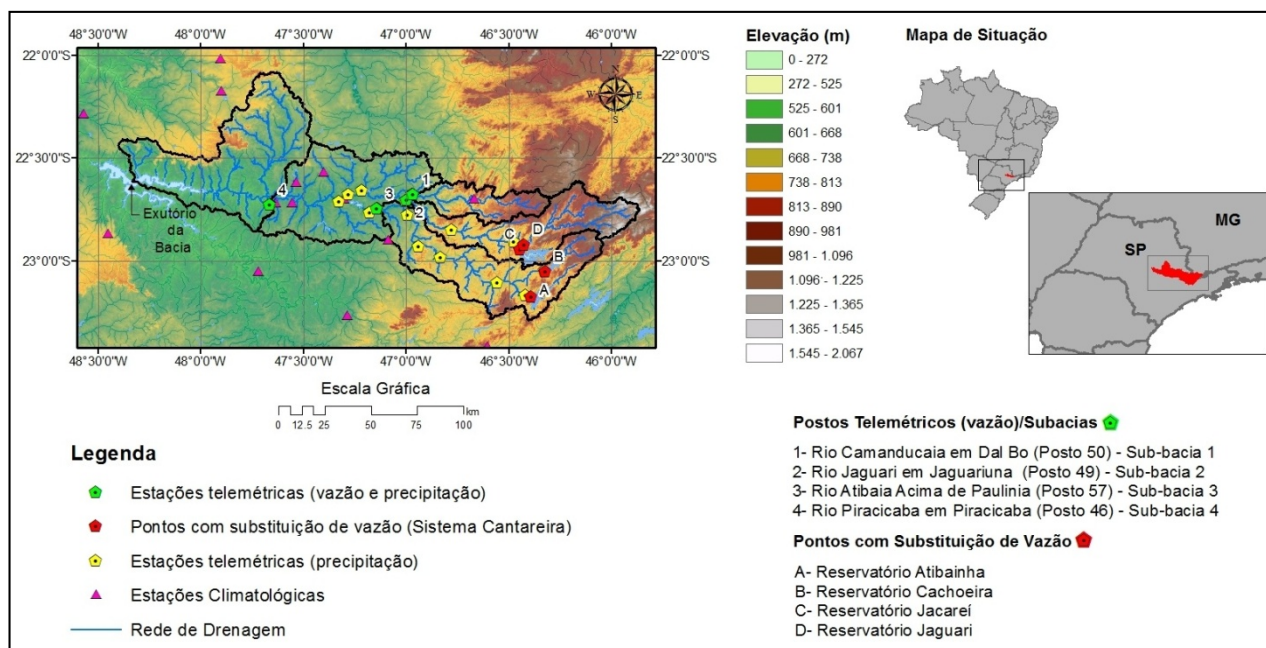


Figura 2 - Mapa de localização da Bacia do Rio Piracicaba.

à bacia hidrográfica do rio Piracicaba. Fazem parte do método de análise os seguintes itens, cada um deles descrito separadamente no texto:

- 1) calibração e validação do modelo MGB-IPH para a bacia hidrográfica do rio Piracicaba;
- 2) método de assimilação de dados;
- 3) previsões de cheias em tempo-real

#### Calibração e validação do modelo hidrológico

Após a validação dos dados de entrada ao modelo, procedeu-se à modelagem hidrológica da bacia do rio Piracicaba com o modelo MGB-IPH. A bacia hidrográfica foi discretizada em 435 minibacias, com áreas entre 1 e 130km<sup>2</sup>, agrupadas em cinco sub-bacias, de acordo com a localização dos postos fluviométricos (Figuras 2 e 3). Da composição entre os tipos e usos do solo resultaram seis URH's, indicadas na Tabela 1.

Para representar o efeito da operação do Sistema Cantareira sobre o escoamento na bacia, os dados de defluência dos reservatórios substituem as vazões calculadas pelo modelo nas minibacias localizadas no local dos aproveitamentos. Essas informações são disponibilizadas em nível diário na operação do sistema, assim foram desagregadas temporalmente para intervalo de uma hora. A utilização

desse procedimento apresentou resultados satisfatórios, uma vez que as alterações na vazão defluente dos reservatórios são programadas, ocorrendo, de modo geral, uma única vez durante o período do dia. Durante as previsões de cheia, essas informações são tidas como conhecidas.

Para fins de simulação de cheias, foram ainda desconsideradas possíveis interferências no escoamento causadas por PCH's ou captações existentes no trecho da bacia em análise, já que impactos dessa natureza tendem a ser menores durante o período de cheias.

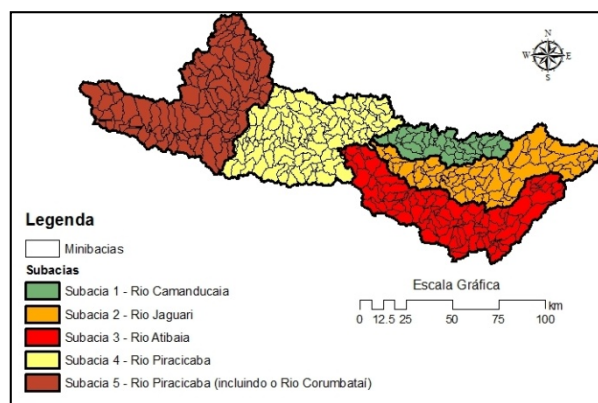


Figura 3 - Discretização do modelo MGB-IPH em minibacias e sub-bacias para a bacia do Rio Piracicaba.

**Tabela 1 - Unidades de Resposta Hidrológica na Bacia do Rio Piracicaba.**

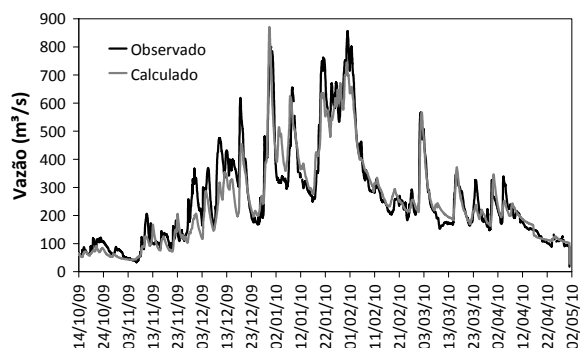
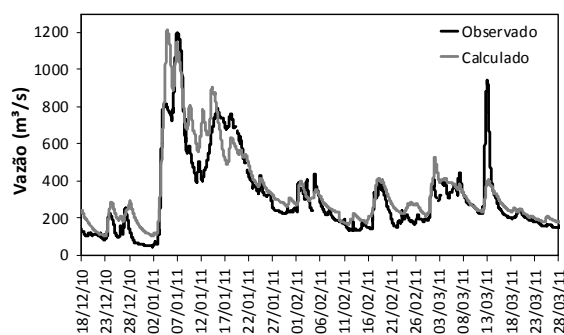
Unidade de Resposta Hidrológica (URH)	Área da Bacia (%)
Área Urbana	5,96%
Campo/Pastagem/Plantio em solo profundo	38,35%
Floresta/Reflorestamento em solo profundo	6,21%
Campo/Pastagem/Plantio em solo raso	44,68%
Floresta/Reflorestamento em solo raso	3,55%
Corpos d'água	1,25%

Durante a calibração, os parâmetros do modelo MGB-IPH foram ajustados, de modo a obter uma boa concordância entre as vazões observadas e calculadas em quatro pontos de controle, mostrados previamente na Figura 2. Dois tipos de técnicas foram usadas: (1) calibração manual, por tentativa e erro e, (2) calibração automática multi-objetivo utilizando o algoritmo MOCOM-UA (Yapo *et al.*, 1998).

As séries de dados horários disponíveis foram divididas em dois períodos. O primeiro, de 01/05/2007 a 30/04/2010, representado 75% da série, utilizado na calibração do modelo. O segundo período, de 01/05/2010 a 30/04/2011, representa 25% da série e foi utilizado na validação do modelo. As funções-objetivo utilizadas na calibração foram o coeficiente de Nash-Sutcliffe, o coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões e o erro percentual de volume. Essas três funções foram também utilizadas como medida de desempenho no período de validação. Os resultados da calibração e validação do modelo são apresentados na Tabela 2. A Figura 4 e a Figura 5 apresentam uma comparação das vazões observadas e calculadas para os maiores eventos de cheia registrados durante a calibração e validação do modelo no posto Piracicaba.

Observa-se, nessas figuras, que o ajuste obtido é razoável, em ambos os períodos analisados. Grande parte das vazões de pico foi bem representada, embora alguns eventos não tenham sido detectados pelo modelo. Esse fato pode ser atribuído, em parte, a má representação espacial da precipitação em algumas sub-bacias, devido a falhas ocorridas nos postos pluviométricos da rede. Esse é um dos principais motivos a que se atribui os resultados insatisfatórios obtidos no período de validação do modelo

na sub-bacia do Rio Camanducaia. Apesar do foco do trabalho ter sido as cheias, as estiagens foram também bem representada pelo modelo.

**Figura 4 - Comparação de vazões calculadas e observadas no posto Piracicaba, período de calibração.****Figura 5 - Comparação de vazões calculadas e observadas no posto Piracicaba, período de validação.**

### Assimilação de dados

Como previamente apresentado, a assimilação de dados no modelo MGB-IPH é realizada por um método empírico, que corrige as condições iniciais do modelo, representadas pelas vazões na rede de drenagem e pelos volumes nos reservatórios conceituais do modelo.

Neste trabalho é realizada uma modificação na maneira com que são atualizadas as vazões na rede de drenagem, que possuem maior impacto na melhora das previsões dos primeiros intervalos de tempo do horizonte de previsão. No método proposto, o fator de atualização *FCA*, definido anteriormente, é ponderado pela distância relativa das



Tabela 2 - Resultados do ajuste do modelo MGB-IPH na bacia hidrográfica do rio Piracicaba.

Rio	Posto	Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Calibração			Validação		
				NS	NSlog	$\Delta V$ (%)	NS	NSlog	$\Delta V\%$
Camanducaia	50 - Dal Bo	1	933	0,71	0,80	-4,70	-0,47	0,75	36,43
Jaguari	49 - Jaguari	2	2.195	0,85	0,76	3,49	0,89	0,89	9,63
Atibaia	57 - Atibaia	3	2.741	0,67	0,74	11,54	0,74	0,80	16,47
Piracicaba	46 - Piracicaba	4	8.953	0,89	0,87	2,14	0,89	0,93	7,89

minibacias ao exutório (ponto  $s$ ) da sub-bacia, segundo a rede de drenagem do modelo, como define a Equação 5.

$$Q_{i,s} = FCA_s \cdot Qcalc_i \cdot (1 - d_i/d_m)^{ebac} + Qcalc_i \cdot [1 - (1 - d_i/d_m)^{ebac}] \quad (5)$$

onde  $Q_{i,s}$  é o valor atualizado da vazão na rede de drenagem na minibacia  $i$ , localizada a montante de  $s$ ;  $d_i$  é a distância da minibacia  $i$  ao ponto  $s$  pela rede de drenagem;  $d_m$  é a distância entre a minibacia mais distante do ponto  $s$  na sub-bacia pela rede de drenagem e  $ebac$  é um parâmetro com valores entre 0 e 1.

Na ponderação pelo termo  $(1 - d_i/d_m)$ , o peso da correção depende somente da distância relativa da minibacia ao exutório. Essa abordagem conduz a correções mais fortes nas minibacias localizadas próximo ao exutório e mais sutis nas minibacias mais distantes.

A hipótese central do método, é que no caso de médias e pequenas bacias, onde os tempos de concentração e propagação na drenagem são da ordem de horas, a ocorrência de um evento de precipitação localizado em uma região próxima ao local de previsão, pode ocasionar uma mudança relevante no comportamento das vazões naquele ponto.

A Figura 6 apresenta um exemplo do impacto da variação do parâmetro  $ebac$  na ponderação do fator  $FCA$ , com o aumento das distâncias relativas das minibacias ao exutório. Nesse exemplo, o fator de correção  $FCA$  no ponto  $s$  é arbitrado como 1,6. As minibacias com o fator de ponderação  $(1 - d_i/d_m)$  próximo a um, se situam próximo ao exutório da sub-bacia, enquanto as com valor de  $(1 - d_i/d_m)$  próximo a zero, em pontos mais distantes. Quando  $ebac$  assume valor zero, as minibacias são corrigidas totalmente pelo fator  $FCA$ , não havendo ponderação. Quando  $ebac$  assume valores próximos a um, as correções tendem a diminuir linearmente com o decréscimo de  $(1 - d_i/d_m)$ .

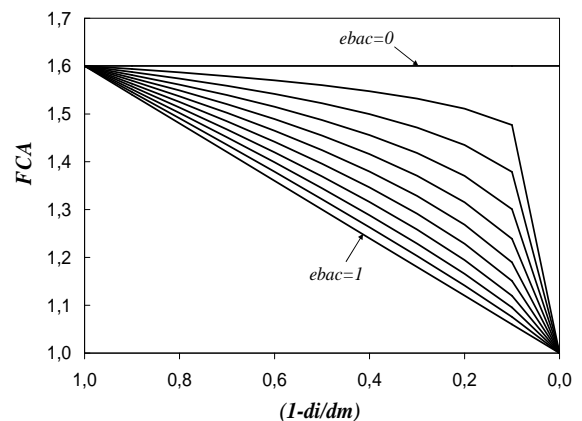


Figura 6 - Impacto da variação do parâmetro  $ebac$  no fator de correção  $FCA$ .

#### Previsões de cheias em tempo-real

Para análise do procedimento de assimilação de dados proposto, inicialmente foram realizadas sucessivas previsões com chuva perfeita no posto Piracicaba (vide Figura 2 ou 3), com intervalo de tempo horário, frequência de emissão de 6h e horizonte de previsão de 48h.

Em cada intervalo de tempo de previsão ( $t_0$ ), foi realizada a assimilação de dados nos quatro locais com dados de vazão disponíveis, seguida da previsão de vazões no posto Piracicaba. O período selecionado para as previsões foi entre a zero hora do dia 01/12/2008 às 21h do dia 30/04/2011, período que apresenta o menor número de falhas na série de vazões observadas e que concentra os eventos de cheia mais representativos da série de dados horários.

O termo chuva perfeita, citado anteriormente, refere-se à utilização da chuva observada como se fosse prevista, simulando-se um cenário de previsão em tempo real ideal, no qual as previsões

de chuva não apresentam erros.

Vinte e quatro diferentes configurações de parâmetros do método de assimilação (*ebac*, *bx* e *PBlim*) foram avaliadas, com objetivo de determinar a melhor configuração dentre os conjuntos assim como promover uma análise de sensibilidade dos parâmetros.

Como indicador da situação de cheias no posto de Piracicaba foi utilizada a vazão de 30% de permanência,  $Q_{30\%}$ , igual a  $114 \text{ m}^3/\text{s}$ . Assim, quando a vazão no instante de início da previsão ( $t_0$ ) é inferior a esse valor, a previsão não é realizada. Outra condição necessária para que seja executada a previsão é a disponibilidade de dados observados no instante de partida da previsão nos quatro pontos onde há assimilação de dados.

Como medidas de desempenho para avaliação das previsões de cheia são utilizados o coeficiente de Nash Sutcliffe (*NS*), o coeficiente de persistência (*CP*, Kitanidis & Bras, 1980), e os erros médios quadrático (*EMQ*) e absoluto (*EMA*), definidos, respectivamente, pelas Equações 6, 7, 8 e 9.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - Q_{p_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - \overline{Q_o})^2} \quad (6)$$

$$CP = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - Q_{p_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - Q_{o_0})^2} \quad (7)$$

$$EMQ = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{p_i} - Q_{o_i})^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_{p_i} - Q_{o_i}| \quad (9)$$

onde  $Q_{p_i}$  é o valor previsto;  $Q_{o_i}$  é o valor observado;  $Q_{o_0}$  é o valor observado no instante  $t_0$ , ponto de partida da previsão;  $\overline{Q_o}$  é o valor médio dos valores observados;  $i$  é a antecedência da previsão e  $N$  é o número de valores.

Nas medidas de desempenho dadas pelas Equações 6 a 7, quanto mais próximo o valor estiver da unidade, melhor são os resultados das previsões. A Equação 6, no entanto, compara o resultado da previsão do modelo hidrológico com o resultado de um modelo hipotético que prevê para todos os intervalos de tempo até o horizonte da previsão, o valor médio da série histórica. Diferentemente, a

Equação 7 compara o resultado da previsão do modelo hidrológico com o resultado de um modelo hipotético que prevê para todos os intervalos de tempo até o horizonte da previsão, o último valor observado, para o qual é adotado o termo persistência. Dessa forma quando o coeficiente da Equação 7 apresenta valores menores que zero, a previsão com o modelo hidrológico apresenta resultados inferiores a utilizar como valor previsto o último valor observado.

Para o fim de comparação, são ainda efetuadas previsões, para o mesmo período mencionado, em outros três cenários, que são:

- previsão com chuva zero: nesse cenário há atualização das condições iniciais do modelo, mas as previsões são realizadas como se não ocorresse precipitação ao longo das 48h do horizonte de previsão. Nessas previsões é utilizada a configuração de parâmetros do método de assimilação de dados que apresentou o melhor resultado com chuva perfeita;
- previsão sem assimilação de dados: equivale à previsão de cheias com chuva observada e com o modelo chuva-vazão em modo *off-line*, ou seja, sem atualização de suas condições iniciais;
- previsão com base na persistência: todos os valores de vazão previstos ao longo do horizonte de previsão são iguais a vazão observada no instante de partida da previsão ( $t_0$ ).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nas previsões no Posto Piracicaba são apresentados nos gráficos da Figura 7. Ao todo foram realizadas cerca de 35.000 previsões com o modelo MGB-IPH, nos diferentes cenários propostos. Ainda na Figura 7, as linhas em cinza representam os resultados das previsões com chuva perfeita, utilizando as diferentes configurações de parâmetros do método de assimilação de dados de vazão. As linhas em vermelho representam a configuração de parâmetros que apresentou o melhor resultado nas previsões nesse mesmo cenário. As linhas em verde, laranja e azul representam, respectivamente, os cenários com chuva zero, sem assimilação de dados e com base na persistência, descritos anteriormente.

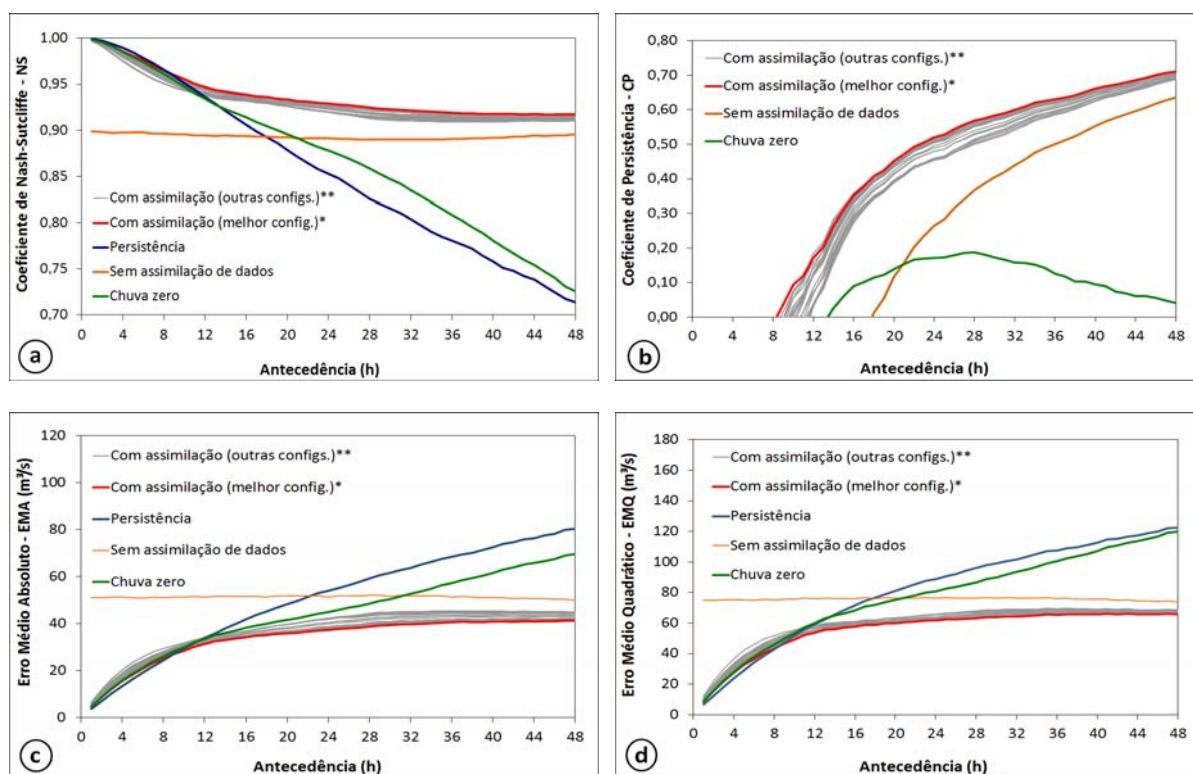


Figura 7 - Resultados das previsões de cheia para o posto Piracicaba: (a) coeficiente de Nash Sutcliffe; (b) coeficiente de persistência; (c) Erro médio absoluto e (d) erro médio quadrático. \*configuração de parâmetros do método de assimilação que apresentou o melhor resultado nas previsões. \*\* demais configurações de parâmetros.

A Figura 7a, apresenta os resultados das previsões em termos do coeficiente de Nash-Sutcliffe. Pode-se observar, que independentemente da configuração de parâmetros adotada para o método de assimilação, os resultados das previsões com chuva perfeita apresentam valores superiores a 0,90 para qualquer antecedência, mantendo valores maiores que 0,96 para antecedências de até 6 horas e se estabilizando em valores próximos a 0,92, a partir da quadragésima hora de previsão. A tendência de diminuição do desempenho do modelo de previsão ao longo do horizonte também é observada nas Figuras 7c e 7d, que mostram que os erros médios absoluto e relativo aumentam com o aumento da antecedência, como esperado.

Observa-se ainda na Figura 7a, que para o coeficiente de Nash-Sutcliffe os resultados das previsões em todos os cenários possuem desempenho similares até cerca de 8 horas de antecedência. A partir daí, as previsões no cenário com assimilação de dados apresentam melhora perceptível em relação ao demais cenários.

Dos gráficos da Figura 7 conclui-se que o resultado da assimilação de dados com o melhor conjunto de parâmetros (linha em vermelho) tem impacto positivo em relação às previsões sem assimilação (linha em laranja). Em termos do coeficiente de Nash-Sutcliffe (Figura 7a), a melhora nos primeiros intervalos de tempo do horizonte de previsão é de cerca de 10%, diminuindo para cerca de 3% para antecedências próximas a 48h.

Na Figura 7b, se compara o resultado das previsões do modelo hidrológico com o resultado de um modelo hipotético que prevê para todos os intervalos de tempo até o horizonte da previsão, o último valor observado, através do coeficiente de persistência. Nesse gráfico são suprimidos os valores negativos. Observa-se que não existe ganho evidente em se utilizar as previsões com o modelo chuva-vazão para antecedências inferiores a cerca de 8 horas. Para antecedências maiores a 18h, entretanto, todos os cenários (com assimilação, sem assimilação e com chuva zero) apresentam benefício em relação a se utilizar o último valor observado como previsão.

A comparação entre os resultados das previsões nos cenários com chuva zero e com assimilação de dados demonstram o benefício que pode ser obtido com a incorporação de previsões de precipitação a partir de antecedências maiores que aproximadamente 8h. No caso do uso de previsões com chuva perfeita, o *EMQ* é reduzido a 50% em relação ao cenário com chuva zero na antecedência de 48h (Figura 7d).

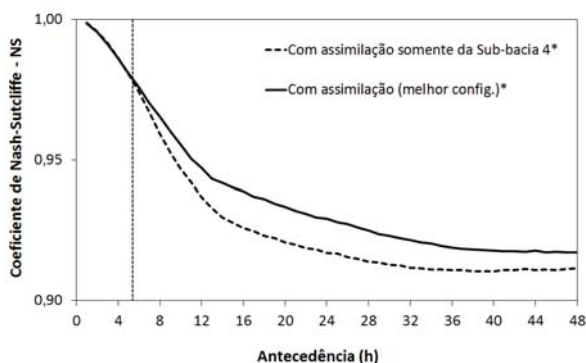
Outro elemento que merece destaque nos resultados apresentados na Figura 7, resulta da comparação dos cenários sem assimilação de dados e com chuva zero. No cenário sem assimilação de dados, o modelo é utilizado sem atualização das variáveis de estado e com dados observados de precipitação como previsão. Assim, não é feita correção da condição inicial do sistema. No cenário com chuva zero, por sua vez, é feita a correção da condição inicial, e a condição de contorno, representada pela precipitação, tem valor igual a zero.

A antecedência a partir da qual o desempenho do modelo no cenário com chuva zero passa a ser inferior do que no cenário sem assimilação de dados, aproximadamente 20 h (Figura 7a), marca o ponto em que as condições de contorno assumem maior importância do que as condições iniciais. Isso significa dizer, que até esse instante, a atualização das condições iniciais são mais relevantes na qualidade das previsões de cheia do que a própria condição de contorno, dada pela precipitação.

Na Figura 8, são apresentados os resultados de uma análise adicional, onde o método de assimilação de dados foi aplicado somente à Sub-bacia 4, não sendo atualizadas as sub-bacias 1, 2 e 3 (sub-bacias de montante). Da comparação com os resultados do cenário com assimilação em todas as sub-bacias, previamente apresentado na Figura 7, é possível observar que a atualização do escoamento nas sub-bacias 1, 2 e 3 contribui para a melhora da qualidade das previsões no Posto Piracicaba a partir do sexto intervalo de tempo de previsão. Isso ocorre devido ao tempo de propagação do escoamento no canal entre os pontos de atualização de montante (exutório das sub-bacias) e o posto de Piracicaba, estimado em seis horas.

No estabelecimento das diferentes configurações do método de assimilação, os parâmetros *ebac* e *bx* tiveram sua faixa de variação limitada entre 0 e 1, e o parâmetro *PBlim*, entre 0,1 e 0,3. De modo geral, as diferentes configurações promoveram resultados semelhantes em termos do coeficiente de Nash-Sutcliffe. No caso das demais medidas de desempenho, entretanto, a melhor configuração de parâmetros apresenta melhora mais evidente em

relação as demais configurações, como pode se observar nas Figuras 7b, 7c e 7d (vide que a escala dos gráficos são diferentes).



**Figura 8 - Comparação dos resultados das previsões no Posto Piracicaba em termos do Coeficiente de Nash-Sutcliffe: (1) assimilação de dados aplicada somente à Sub-bacia 4 (Posto Piracicaba) e, (2) assimilação aplicada a todas sub-bacias. \*configuração de parâmetros do método de assimilação que apresentou o melhor resultado nas previsões.**

O parâmetro que apresentou maior sensibilidade foi *bx*, relacionado à atualização dos volumes armazenados nos três reservatórios conceituais do modelo. Os parâmetros *ebac* e *PBlim* apresentaram menor sensibilidade no resultado das previsões. A configuração de parâmetros que apresentou o melhor resultado nas previsões é a apresentada na Tabela 3, a seguir.

**Tabela 3 - Configuração de parâmetros do método de atualização que apresentou os melhores resultados na previsão com chuva perfeita.**

Parâmetro do método de assimilação		
<i>PBlim</i>	<i>ebac</i>	<i>bx</i>
0,2	0,1	0,8

O valor do parâmetro *bx* próximo à unidade indica que a atualização dos volumes nos reservatórios de escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo do modelo deve ser rápida na bacia do rio Piracicaba. O valor de *ebac* próximo a 0, por sua vez, indica a correção da vazão na rede de drenagem é importante mesmo em minibacias mais distantes do ponto com observação de vazão.

Nas Figuras 9 e 10 são apresentados os resultados das previsões em termos de vazões. A Figura 9 apresenta uma comparação entre as vazões calculadas e previstas para as antecedências de 6 e 48 horas, usando chuva perfeita e o melhor conjunto de parâmetros do procedimento de assimilação. Pode-se observar que para a antecedência de 6 horas os valores se concentram mais próximo da linha de 45° do gráfico.

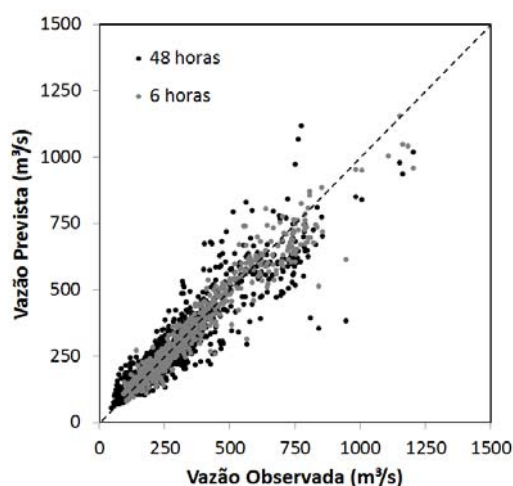


Figura 9 - Vazões calculadas versus previstas para antecedências de 6 e 48 horas, utilizando chuva perfeita e a melhor configuração de parâmetros do modelo de assimilação.

A Figura 10 mostra ainda algumas das previsões realizadas durante o período chuvoso no ano hidrológico 2010-2011 na bacia. Observa-se que quando não há assimilação de dados, a discrepância entre os valores observados e previstos no instante de partida das previsões é acentuada, o que contribui para a degradação dos resultados nas antecedências iniciais. As previsões com chuva futura igual a zero, por outro lado, promovem uma subestimativa das vazões previstas, que ficam evidentes a partir do oitavo intervalo de tempo de previsão.

Por fim, uma das questões importantes a respeito do método de atualização é que no caso de médias e pequenas bacias, em que os tempos de propagação na rede de drenagem e outros fenômenos hidrológicos se processam na escala de horas, o ganho obtido pela atualização das variáveis de estado do modelo se deve, fundamentalmente, à atualização da vazão na rede de drenagem e do volume do reservatório que representa a propagação do escoamento superficial do modelo chuva-vazão. A atualização do reservatório de escoamento subterrâneo apresenta menor impacto, embora ainda assim

seja importante na eficiência do método de assimilação. A atualização do reservatório subsuperficial apresentou pouca influência no resultado final das previsões.

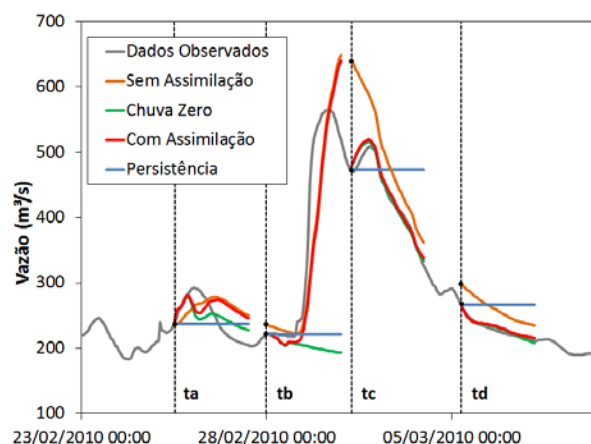


Figura 10 - Hidrogramas previstos no Posto Piracicaba durante um evento de cheia no período chuvoso 2010-2011. (ta) Dia 25/02/2010 12:00; (tb) Dia 28/02/2010 às 00:00; (tc) Dia 02/03/2010 06:00 e (td) Dia 05/03/2010 06:00.

## CONCLUSÕES

Neste trabalho é descrito e aplicado um método empírico de assimilação de dados de vazão em conjunto com a modelagem distribuída chuva-vazão, na previsão de cheias em tempo real na bacia do Rio Piracicaba. O método descrito é uma variante daquele proposto por Paz *et al.* (2007), desenvolvido para o modelo distribuído MGB-IPH. Para avaliar o resultado do método, nas previsões de cheia foram usados os dados de chuva observados nos postos pluviométricos, tanto no período anterior como no período posterior ao início da previsão de vazão, como se fossem previsões de chuva. Foram ainda realizadas previsões em outros cenários, considerando chuva futura igual a zero, previsão sem assimilação de dados e previsão com base na persistência do último valor de vazão observado.

As previsões de cheia foram realizadas continuamente ao longo de 2,5 anos, com intervalo de tempo horário, frequência de 6 horas e horizonte de 48 horas, para a condição de cheia no posto Piracicaba. Em cada intervalo de tempo de previsão é realizada a assimilação de dados nos quatro locais com dados de vazão disponíveis, seguida da previsão de cheias no posto Piracicaba. As medidas de de-

sempenho das previsões foram o coeficiente de Nash-Sutcliffe, o coeficiente de persistência e os erros médios quadrático e absoluto.

Os resultados mostram que o procedimento de assimilação de dados possui impacto positivo na previsão de vazões, especialmente a partir do oitavo intervalo de tempo de previsão. Ao longo de todo horizonte de previsão, as previsões no cenário com assimilação de dados apresentaram valor do coeficiente de Nash-Sutcliffe superiores a 0,90, mantendo valores maiores que 0,96 em horizontes de até 6 horas e se estabilizando em valores próximos a 0,92, a partir da quadragésima hora de previsão.

O parâmetro do procedimento de assimilação que apresentou maior sensibilidade nas previsões está relacionado à atualização do volume armazenado nos reservatórios conceituais do modelo. Os resultados sugerem que o valor desse parâmetro deve ser alto, ou seja, a velocidade de atualização dos reservatórios conceituais do modelo deve ser rápida na bacia do Rio Piracicaba.

A aplicação do método mostrou ainda, que no caso de bacias pequenas ou de médio porte, como é o caso da bacia do Rio Piracicaba, o ganho obtido pelo uso da assimilação de dados se deve, essencialmente, às atualizações da vazão na rede de drenagem e do volume do reservatório conceitual relacionado ao escoamento superficial do modelo chuva-vazão.

Os resultados do trabalho reafirmam a importância da assimilação de dados na previsão de cheias com modelos hidrológicos conceituais, contribuindo de forma efetiva para diminuição das incertezas nas condições iniciais do modelo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FCTH (Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica) e ao DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo) por cederem os dados de telemetria utilizados na pesquisa. O primeiro autor agradece a Agência Nacional de Águas pela concessão de licença para doutorado.

## REFERÊNCIAS

ABEBE, A. J.; PRICE, R. K. Managing uncertainty in hydrological models using complementary models. *Hydrological Sci-*

*ences*, v. 48, n. 5, p. 679-692, Oct 2003.

BERTHET, L.; RAMOS, M.; PERRIN, C.; ANDRÉASSIAN, V.; LOUMAGNE, C. Can discharge assimilation methods be used to improve flood forecasting when few data are available?. In: YILMAZ, K.; YUCEL, I.; GUPTA, H. V.; WAGENER, T.; YANG, D.; SAVENIJE, H.; NEALE, C.; KUNSTMANN, H.; POMEROY, J. *New Approaches to Hydrological Prediction in Data-sparse Regions*. Indian: IAHS, 2009. p. 94-100. (IAHS publication, 333). (Proc. of Symposium HS.2 at the Joint IAHS & IAH Convention, Hyderabad, India, September 2009).

BREMICKER, M. *Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells für das Weser und das Ostsee Einzugsgebiet als Baustein eines Atmosphären-Hydrologie-Modells*. 1998. Dissertation (Doktorgrad) - Geowissenschaftlicher Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität. Freiburg. Germany, 1998.

BROERSEN, P. M. T.; WEERTS, A. H. Automatic error correction of rainfall-runoff models in flood forecasting systems. In: PROCEEDINGS IEEE/IMTC CONFERENCE, 2005, Ottawa, Canada. *Proceedings...* Ottawa, Canada, 2005. p. 1531-1536.

COLLISCHONN, W. *Simulação Hidrológica de Grandes Bacias*. 2001. 277 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COLLISCHONN, W.; HAAS, R.; ANDREOLLI, I.; TUCCI, C. E. M. Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 305, n. 1-4, p. 87-98, Apr 2005.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; CHOU, S. C.; GUILHON, L. G.; CATALDI, M.; ALLASIA, D. Medium-range reservoir inflow predictions based on quantitative precipitation forecasts. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 344, n. 1, p. 112-122, 2007.

DIVAC, D.; MILIVOJEVIĆ, N.; GRUJOVIĆ, N.; STOJANOVIĆ, B.; SIMIĆ, Z. A Procedure for State Updating of SWAT-Based Distributed Hydrological Model for Operational Runoff Forecasting. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, v. 3, n. 1, p. 298-326, 2009.

EVA, H. D.; BELLA, C. M.; GOND, V.; HUBER, O.; SGRENZAROLI, M.; JONES, S.; COUTINHO, A.; DORADO, A.; GUIMARÃES, M.; ELVIDGE, C.; ACHARD, F.; BELWARD, A. S.; BARTHOLOMÉ, E.; BARALDI, A.; DE GRANDI, G.; VOGT, P.; FRITZ, S.; HARTLEY, A. *A vegetation Map of South America*. Luxembourg: European Commission, Joint Research Centre, 2002. EU 20159.

GOMES, J.; MINE, M. R. M. Estimativa de parâmetros de

- modelos hidrológicos utilizando o filtro de Kalman. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 3, n. 2, p. 67-86, 1998.
- GOSWAMI, M.; O'CONNOR, K. M.; BHATTARAI, K. P.; SHAMSELDIN, A. Y. Assessing the performance of eight real-time updating models and procedures for Brosna River. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 9, n. 4, p. 394-411, 2005.
- IRRIGART. Relatório da situação dos recursos hídricos das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá – 2002/2003. Piracicaba, 2004. Disponível em: <www.comitepcj.sp.gov.br/>. Acessado em: 20 jan. 2010.
- KAFLE, T. P.; HAZARIKA, M. K.; SAMARAKOON, L. Development of flood forecasting models for the Bagmati basin in Nepal. In: 28., 2007, Kuala Lumpur, Malaysia. *Proceedings...* [S.l.]: Asian Conference on Remote Sensing 2007.
- KAHL, B.; NACHTNEBEL, H. B. Online updating procedures for a real-time hydrological forecasting system. In: CONFERENCE OF THE DANUBIAN COUNTRIES, 24., 2008, Bled, Slovenia. *Proceedings...* Bled Slovenia: IOP Publishing, 2008. 8 p.
- KITANIDIS, P. K.; BRAS, R. L. Real time forecasting with a conceptual hydrologic model 2: applications and results. *Water Resources Research*, v. 16, n. 6, p. 1034-1044, 1980.
- KOUWEN, N.; SOULIS, E. D.; PIETRONIRO, A.; DONALD, J.; HARRINGTON, R. A. Grouped Response Units for Distributed Hydrologic Modeling. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 119, n. 3, p. 289-305, May/June 1993.
- LIANG, X.; LETTENMAIER, D. P.; WOOD, E. F.; BURGESS, S. J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, v. 99, n. D7, p. 14415-14428, Jul 1994.
- MADSEN, H.; SKOTNER, C. Adaptive state updating in real-time river flow forecasting - A combined filtering and error forecasting procedure. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 308, n. 1-4, p. 302-312, Jul 2005.
- MIRANDA, E. E. (Coord.). *Brasil em Relevô*. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>.
- MOORE, R. J. The PDM rainfall-runoff model. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 11, n. 1, p. 483-499, 2007.
- MOORE, R. J.; BELL, V. A.; JONES, D. A. Forecasting for flood warning. *Comptes Rendus Geoscience*, v. 337, n. 1-2, p. 203-217, Jan-Feb 2005.
- O'CONNELL, P. E.; CLARKE, R. T. Adaptive hydrological forecasting - a review. *Hydrological Sciences Bulletin*, v. 26, n. 2, p. 179-205, 1981.
- PAIVA, R. C. D. *Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias*. Estudo de caso: Bacia do Rio Solimões. 2009. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; ALLASIA, D. Data Assimilation in a large-scale distributed hydrological model for medium-range flow forecasts. In: PROCEEDINGS OF SYMPOSIUM HS2004 AT IUGG2007, 2007, Perugia. Perugia: IAHS, 2007. p. 471-478. (IAHS Publication, 313).
- REFSGAARD, J. C. Validation and intercomparison of different updating procedures for real-time forecasting. *Nordic Hydrology*, v. 28, n. 2, p. 65-84, 1997.
- SENE, K. Flood Warning, Forecasting and Emergency Response. Berlin: Springer, 2009. 316 p.
- SERBAN, P.; ASKEW, A. J. Hydrological Forecasting and Updating Procedures. In: van de VEN, H. M.; GUTKNECHT, G.; LOUCKS, D. P.; SALEWICZ, K. A. (Ed.). *Hydrology for the Water Management of Large River Basins*. Vienna: IAHS, 1991. 357-369. (IAHS publication, n. 201). (Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991).
- SHRESTHA, M. S.; ARTAN, G. A.; BAJRACHARYA, S. R.; SHARMA, R. R. Using satellite-based rainfall estimates for streamflow modeling: Bagmati Basin. *Journal of Flood Risk Management*, v. 1, n. 2, p. 89-99, Aug 2008.
- SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation. In: MAIDMENT, D. (Ed.). *Handbook of Hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1993.
- SINGH, R. D. Real-time flood forecasting - Indian Experiences. In: INTERNATIONAL G-WADI MODELLING WORKSHOP, 28., 2005, India. *Proceedings...* India: National Institute of Hydrology, 2005.
- SRIKANTHAN, R.; AMIRTHANANTHAN, G.; KUCZERA, G. Real-time Flood Forecasting Using Ensemble Kalman Filter. In: OXLEY, L.; KULASIRI, D. (Ed.). MODSIM 2007 INTERNATIONAL CONGRESS ON MODELLING AND SIMULATION. MODELLING AND SIMULATION, 2007, New Zealand. *Proceedings...* New Zealand: Society of Australia and New Zealand, 2007. p. 74-80.
- SRIKANTHAN, R.; ELLIOTT, J. F.; ADAMS, G. A. A Review of Real-Time Flood Forecasting Methods. A report as part of



Project D4: development of a real-time flood forecasting model. Australia: Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology (CRC), 1994.

TUCCI, C. E. M. Previsão em Tempo Real. In: TUCCI, C. E. M. *Modelos Hidrológicos*. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 1998. 678 p.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Adaptive forecasting with a conceptual rainfall-runoff model. In: Hydrological Forecasting. Proceedings of Oxford Symposium, 1980, Oxford. *Proceedings...* Oxford: IAHS, 1980. p. 425-454. (IAHS publication, n. 129).

WÖHLING, T. H.; LENNARTZ, F.; ZAPPA, M. Technical Note: Real-time updating procedure for flood forecasting with conceptual HBV-type models. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 10, p. 783-788, 2006.

YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 204, n. 1-4, p. 83-97, Jan 1998.

YU, P.; CHEN, S. Updating real-time flood forecasting using a fuzzy rule-based model. *Hydrological Sciences Journal*, v. 50, n. 2, p. 265-278, 2005.

XIE, X.; ZHANG, D. Data assimilation for distributed hydrological catchment modeling via ensemble Kalman filter. *Advances in Water Resources*, v. 33, n. 6, p. 678-690, Jun 2010.

XIONG, L.; O'CONNOR, K. M. Comparison of four updating models for real-time river flow forecasting. *Hydrological Sciences Journal*, v. 47, n. 4, p. 621-639, Aug 2002.

### ***Discharge Data Assimilation for Real Time Flood Forecasting With MGB-IPH Distributed Hydrologic Model***

#### ***ABSTRACT***

*This paper presents an empirical data assimilation method applied to a real-time flood forecasting hydrological model based on the MGB-IPH hydrological model. A medium-size basin located in Southeastern Brazil was selected as a case study, primarily because of the availability of hourly hydrologic information. Streamflow forecasts were calculated with lead times up to 48 hours, at hourly intervals. Several forecast scenarios were simulated with the MGB-IPH model: (1) forecasting with data assimilation and "perfect" precipitation forecasts (in which observed precipitation was used as a forecast of precipitation); (2) forecasting with data assimilation and zero precipitation*

*forecasts; and (3) forecasting without data assimilation and "perfect" precipitation forecasts. Forecasts from these three scenarios were compared to observed streamflows and to forecasts from a naïve model which assumes that the last recorded streamflow will be held constant up to the end of the forecast horizon. Several performance measures such as the Nash–Sutcliffe efficiency coefficient, the mean absolute error and the mean relative error were used to assess the relative performance of the models. Results show that the data assimilation method has positive impacts on real-time flood forecasting, increasing the forecast accuracy for all lead-times.*

**Key-words:** *Flood forecasting, data assimilation, hydrological modeling.*