

Avaliação de um Método de Assimilação de Erros nas Previsões de Vazões de Curto Prazo Afluentes ao Reservatório da UHE Camargos

Yuri Givago Queiroga

CPRM – Serviço Geológico do Brasil - MG

Mauro Naghettini, Nilo Nascimento

Escola de Engenharia da UFMG.

naghet@dedalus.loc.ufmg.br, niloon@ehr.ufmg.br

Recebido: 16/11/04 revisado: 06/01/05 aceito: 07/06/05

RESUMO

As previsões hidrológicas são de grande importância no planejamento e controle operacional de sistemas de recursos hídricos. Os procedimentos de assimilação dos erros ou atualização das previsões de vazões de curto prazo têm como objetivo melhorar a eficiência e proporcionar uma maior confiabilidade em seus resultados. Para o fim de previsão de vazões, usa-se no presente artigo o modelo conceitual de simulação hidrológica denominado Rio Grande, tendo como estudo de caso a bacia do Rio Grande na UHE Camargos, em Minas Gerais. Este modelo é composto de três módulos principais: o Módulo de Produção, responsável pela produção do escoamento em toda área da sub-bacia, o Módulo de Concentração, responsável pela concentração do escoamento nos postos de controle, e o Módulo de Propagação, responsável pela propagação do escoamento na calha fluvial. Procedeu-se à modelagem estocástica dos erros de simulação, nas estações que compõe a bacia em estudo, visando sua aplicação na atualização das previsões de vazões de curto prazo afluentes à UHE Camargos. O procedimento de assimilação dos erros tem como base a correção das vazões simuladas ou previstas pela aplicação de um modelo estocástico da série de erros. Os modelos estocásticos aqui considerados são os do tipo autoregressivos de ordem p , ou AR(p), e os do tipo autoregressivos e de médias móveis de respectivas ordens p e q , ou ARMA(p,q). A análise dos resultados apresenta evidências de que, de fato, a aplicação deste procedimento de atualização das vazões simuladas para as estações imediatamente a montante do reservatório melhora consideravelmente as previsões de curto prazo das vazões afluentes à UHE Camargos.

Palavras-chave: Previsões hidrológicas; vazões; reservatório.

INTRODUÇÃO

As previsões hidrológicas são um instrumento importante na hidrologia aplicada, podendo ser utilizadas em sistemas de alerta de eventos extremos (cheias e/ou secas) e na operação de sistemas de recursos hídricos, tais como reservatórios e outras estruturas hidráulicas. Um número crescente de experiências mundiais de controle operacional associadas à previsão de curto prazo demonstra que, quaisquer que sejam as alternativas consideradas eficazes para a realização de prognóstico das afluências a um dado reservatório de aproveitamento de recursos hídricos, os benefícios delas decorrentes justificam os custos de sua implementação. Isto se traduz por um planejamento racional de operação em tempo real do sistema, incluindo controle ótimo de válvulas e comportas, automação, noção clara das restrições operativas e, acima de tudo, uma maior antecipação

no comprometimento (ou não) de volumes importantes de reservação (O'Connell, 1980).

O modelo hidrológico é uma das ferramentas que a ciência desenvolveu, para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas e condições futuras. Os erros de simulação ou previsão hidrológica têm sua origem em diversos fatores, que podem ser a incapacidade do modelo de representar o processo chuva-vazão, a incerteza na estimativa dos parâmetros, erros nos dados utilizados no processo de calibração do modelo ou mesmo falhas na concepção do modelo (Lee & Singh, 1999). A descrição incompleta dos processos físicos, representados por um modelo conceitual chuva-vazão, pode ser percebida, por exemplo, pela presença de forte autocorrelação ou inércia na série de erros de simulação. Essas propriedades da série de erros representam a parte da variância das vazões na bacia ou sub-bacia que não são explicadas pelo modelo e que podem ser

aproveitadas no desenvolvimento de um procedimento de assimilação dos erros. A implementação de um procedimento de assimilação de erros visa, portanto, aumentar a eficiência das previsões de vazões de curto prazo, realizadas pelo modelo de previsão hidrológica, proporcionando uma maior confiabilidade nos resultados.

Este trabalho utiliza-se do modelo RIO GRANDE de previsão e simulação hidrológica, fruto de um projeto de pesquisa desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas e financiado pelo Departamento de Planejamento Hidroenergético da CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. Esse modelo é aplicado na simulação e previsão de vazões de curto prazo afluentes ao reservatório da UHE Camargos, localizado na bacia do rio Grande, no sul do estado de Minas Gerais.

Este estudo propõe um procedimento de assimilação dos erros a ser incorporado nas previsões de vazões de curto prazo afluentes a usina hidrelétrica (UHE) de Camargos baseado na modelagem estocástica dos erros de simulação. Tal procedimento é, por sua vez, testado e os resultados analisados; em seguida, alguns argumentos e indícios são levantados buscando avaliar a sua real utilidade na atualização das vazões afluentes previstas ao reservatório.

BACIA DO RIO GRANDE EM CAMARGOS

A bacia do Rio Grande na UHE Camargos é uma sub-bacia da bacia do Rio Grande, cuja área de drenagem é de 6.280 km². Localiza-se ao sul do estado de Minas Gerais, próximo aos municípios de São João Del Rei e Barbacena. Os dois principais cursos d'água formadores da bacia são o próprio rio Grande e o rio Aiuruoca.

Essa bacia está inserida em um sistema de gerenciamento de dados, denominado STH – Sistema de Telemetria Hidrometeorológica, que envolve uma extensa rede telemétrica de monitoramento de variáveis hidrológicas e climatológicas em várias bacias do estado de Minas Gerais e de interesse da CEMIG. A bacia de Camargos possui, ao todo, cinco postos telemétricos do STH que fornecem dados fluviométricos e pluviométricos em tempo real. A Figura 1 mostra esquematicamente a delimitação dessa bacia em sub-bacias, onde cada estação corresponde a um ponto de controle. A descrição dos postos que compõem a rede encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Postos pluviométricos e fluviométricos telemétricos localizados na bacia do rio Grande na UHE Camargos

| Sub-Bacia | Área [km ²] | Postos Pluviométricos e Fluviométricos de Controle |
|-----------|-------------------------|--|
| 1 | 2.064 | UHE Camargos – Montante |
| 2 | 1.565 | Madre de Deus de Minas |
| 3 | 1.581 | Fazenda Laranjeiras |
| 4 | 540 | Aiuruoca |
| 5 | 530 | Bom Jardim de Minas |
| Total | 6.280 | |

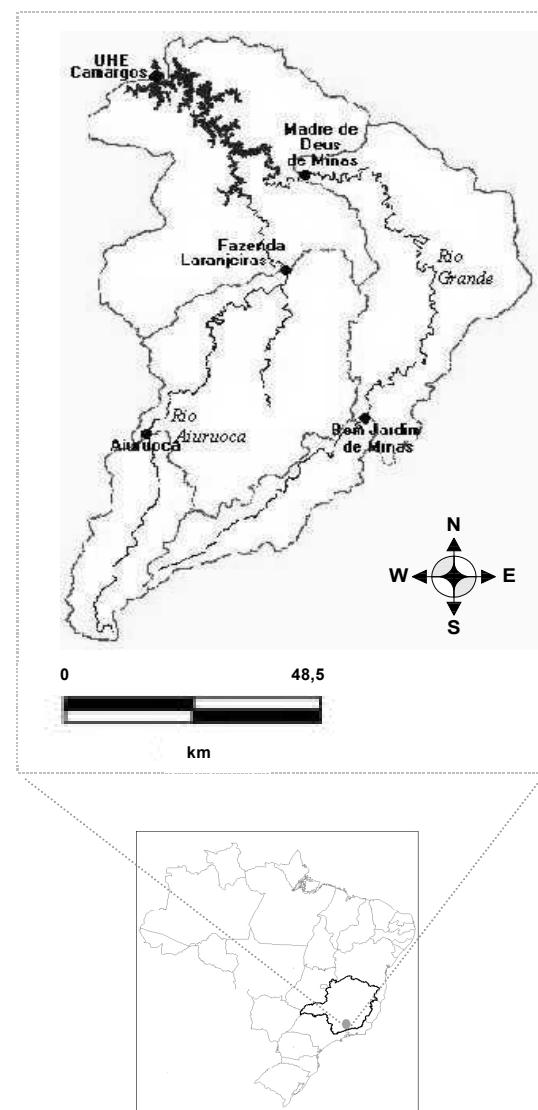


Figura 1 – Mapa da bacia do Rio Grande em Camargos – Adaptado de EHR-UFMG (2002).

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E PREVISÃO DE VAZÕES DE CURTO PRAZO: O MODELO RIO GRANDE

Descrição do Modelo

O modelo RIO GRANDE é um modelo do tipo chuva-vazão semi-distribuído que incorpora soluções atuais de modelagem matemática de processos hidrológicos testadas em diferentes bacias hidrográficas. Ele basicamente se divide em três módulos principais: o de produção, concentração e o de propagação do escoamento nos cursos d'água.

A) Módulo de Produção

O módulo de produção do modelo RIO GRANDE é inteiramente baseado na conceitualização do modelo Xinanjiang, inicialmente descrito por Zhao et al. (1980), cuja estrutura também é usada, em quase sua totalidade, pelo modelo ARNO (Todini, 1996) e, em menor grau, pelo modelo NWSRFS do National Weather Service norte-americano. Segundo Zhao (1984), a estrutura conceitual adotada no modelo Xinanjiang adapta-se bem a regiões úmidas e semi-úmidas, possuindo forte analogia física, com parâmetros relacionados às características físicas da bacia.

A principal característica do modelo Xinanjiang, sobre o qual se baseia o módulo de Produção do modelo RIO GRANDE, é o conceito de formação do escoamento somente quando é superado o volume máximo de armazenamento de umidade do solo. Em outras palavras, não haverá escoamento até que a umidade do solo da zona aerada atinja a chamada capacidade de campo.

O solo, ou qualquer outro meio poroso, possui a capacidade de reter contra a gravidade, e pelos efeitos de capilaridade, uma certa quantidade de água, constituindo, assim, um armazenamento. A máxima capacidade desse armazenamento recebe o nome de capacidade de campo. Por definição, a água contida nesse armazenamento não produz escoamento e só é deplecionada pela evaporação ou transpiração da vegetação. Conseqüentemente, a evapotranspiração torna-se o principal fator de controle na perda de umidade do solo.

Pode-se visualizar o fluxograma geral do módulo de produção na Figura 2. Todos os símbolos dentro dos blocos representam variáveis (de estado, de entrada, de saída e internas); os símbolos localizados fora dos blocos são parâmetros.

As variáveis de entrada do modelo RIO GRANDE são a evapotranspiração potencial,

estimada a partir de dados de tanque evaporimétrico, e a chuva média no intervalo de tempo considerado. A variável de saída do módulo de produção é o deflúvio total (**CIN**) afluente à rede de drenagem, expresso em mm/km².

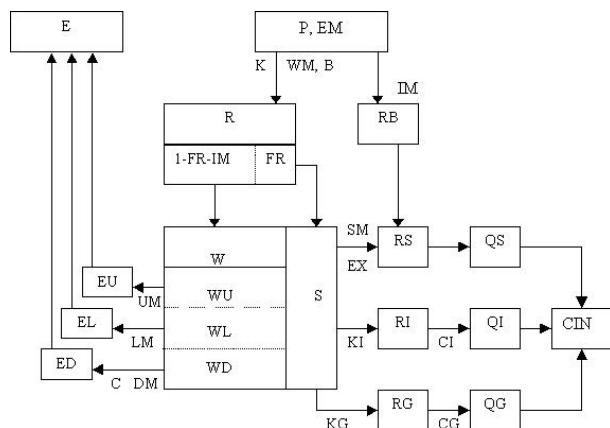


Figura 2 – Fluxograma geral do módulo de Produção do modelo RIO GRANDE – adaptado de Zhao (1984).

As variáveis de estado são a tensão média espacial (**W**), representando a quantidade de água armazenada no instante considerado, e a água livre média espacial (**S**), que representa a quantidade de água contida no solo disponível para o escoamento. A tensão média espacial da água no solo (**W**) possui três componentes, que representam a quantidade de água armazenada em suas três camadas: superior (**WU**), inferior (**WL**) e profunda (**WD**). **FR** representa a área permeável geradora do escoamento, estando diretamente relacionada com **W**. **RB** é o escoamento gerado diretamente da área impermeável, sendo uma parcela do escoamento superficial. **R** é o escoamento produzido na área permeável e dividido em três componentes, que são: o escoamento superficial (**RS**), sub-superficial (**RI**) e subterrâneo (**RG**). Esses três componentes fluem ao sistema de drenagem com velocidades diferentes e são representados pelos respectivos afluxos **QS**, **QI** e **QG**, e que formam o deflúvio total (**CIN**).

Os símbolos representados fora dos blocos são os parâmetros do módulo de Produção do modelo RIO GRANDE. **K** é o coeficiente de tanque, usado para estimar a evapotranspiração potencial a partir dos dados de tanques evaporimétricos.

WM e **B** são dois parâmetros que descrevem a distribuição da tensão da água no solo. **WM** é a

capacidade de tensão média espacial (ou de armazenamento), que tem os componentes: **UM**, **LM**, **DM**. **B** é o expoente da curva de distribuição da tensão de água.

IM é a fração da área impermeável.

SM e **EX** são parâmetros semelhantes à **WM** e **B**, que descrevem a capacidade de distribuição de água livre no solo.

KI e **KG** são os coeficientes do escoamento sub-superficial e subterrâneo, respectivamente. **CI** e **CG** são os coeficientes de recessão do escoamento sub-superficial e subterrâneo, respectivamente.

Uma descrição mais detalhada dos parâmetros do módulo de Produção é mostrada em EHR-UFMG (2002).

B) Módulo de Concentração

No modelo RIO GRANDE, o módulo de produção resulta em uma série de pulsos discretos de lâminas de escoamento total CIN, incluindo os fluxos superficial, sub-superficial e subterrâneo, sobre uma área unitária da sub-bacia em estudo, em N intervalos do tempo interno de cálculo entre as datas inicial e final de simulação. Em cada um destes intervalos de tempo, a unidade usual de CIN é $\text{mm}/(\Delta t \cdot \text{km}^2)$.

Embora se presuma a uniformidade destas lâminas de escoamento sobre a sub-bacia em estudo, há que se considerar que diferentes áreas irão concentrar suas respectivas contribuições em diferentes tempos, na seção exutória pertinente. No modelo RIO GRANDE, esta consideração é posta em prática através de uma função de transferência baseada no hidrograma unitário sintético de Clark, tal como formulação original do Hydrologic Engineering Center do U. S. Army Corps of Engineers (HEC, 1981). Maiores detalhes ver EHR-UFMG (2002).

C) Módulo de Propagação

O módulo de propagação em cursos d'água do Modelo RIO GRANDE fundamenta-se na formulação do modelo de onda difusiva proposta por Cunge (ver Ponce, 1989) e conhecida por Muskingum-Cunge.

Calibração do Modelo Rio Grande

O modelo RIO GRANDE oferece as alternativas de calibração manual e automática. O módulo de calibração automática permite optar entre dois algoritmos diferentes, um de busca local – método de Rosenbrock (Rosenbrock, 1960) e outro global - algoritmo genético (Duan et al., 1992). Na

calibração do modelo foi adotada uma combinação entre procedimentos manual e automático. Os parâmetros do módulo de produção e concentração foram, em sua maioria, obtidos por meio de fórmulas empíricas e das características das sub-bacias. Maiores detalhes em EHR-UFMG (2002).

Para a calibração do modelo nas diferentes sub-bacias, foram utilizados dados pluviométricos e fluirométricos diários das estações descritas na Tabela 1 do período de 01/01/1994 a 31/07/1998. Para a sub-bacia correspondente a UHE Camargos, devido à presença do reservatório, foram adotados os parâmetros do módulo de produção do posto Fazenda Laranjeiras para representar sua margem esquerda, e do posto Madre de Deus de Minas para representar sua margem direita.

Tabela 2 – Calibração do modelo Rio Grande: critério de Nash. Fonte: EHR-UFMG (2002)

| Posto | Nash (%) |
|------------------------|----------|
| Aiuruoca | 77,2 |
| Bom Jardim de Minas | 79,6 |
| Fazenda Laranjeiras | 69,3 |
| Madre de Deus de Minas | 78,7 |

A calibração do modelo foi executada em três fases. Inicialmente foi utilizado o algoritmo de busca global (algoritmo genético). Em seguida, para obter o espaço paramétrico de busca refinada, o conjunto de parâmetros encontrados por aquele algoritmo foi utilizado na inicialização do algoritmo de busca local (Rosenbrock). Finalmente, os parâmetros calibrados pelo método de Rosenbrock passaram ainda por um refinamento manual. Maiores detalhes em EHR-UFMG (2002). Os resultados da calibração em cada posto, podem ser vistos nas Figuras 3(a) a 3(d), que mostram os hidrogramas observados e simulados, sendo também representados pelos coeficientes de Nash na Tabela 2.

EHR-UFMG (2002) ressalta que a calibração dos parâmetros do modelo Rio Grande é, de fato, sensível ao algoritmo de busca utilizado, resultando, desta forma, em diferentes conjuntos de parâmetros “ótimos”. Apesar de não ser objetivo do presente estudo, o impacto que essas diferenças podem ter na modelagem de erros e na atualização das previsões é um assunto a ser aprofundado. Em teoria, se métodos robustos de calibração são utilizados e se máximos locais são adequadamente detectados e tratados, espera-se que os conjuntos de parâmetros estimados por estes diferentes métodos não mos-

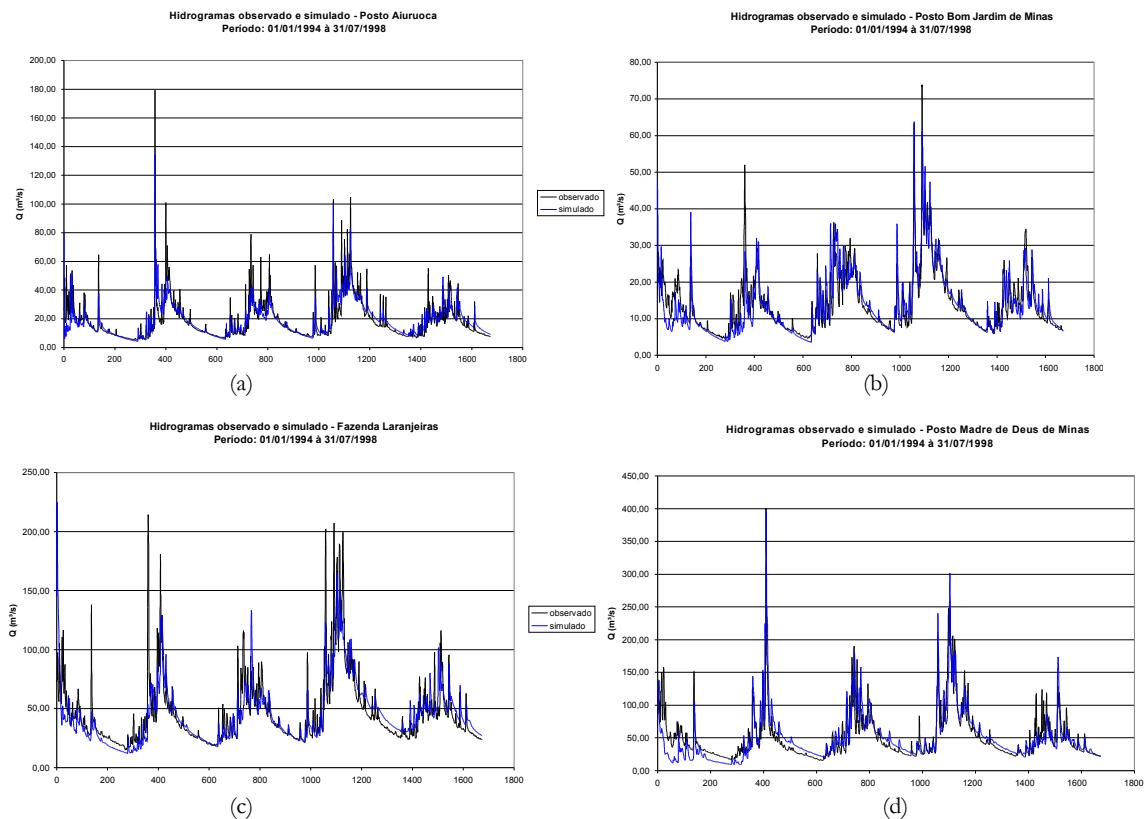


Figura 3 – Hidrogramas observado e simulado no período de calibração de 01/01/1994 a 31/07/1998 para as estações de (a) Aiuruoca, (b) Bom Jardim de Minas, (c) Fazenda Laranjeiras e (d) Madre de Deus de Minas

trem grandes diferenças. Por outro lado, não se sabe ao certo, como as estruturas fundamentais das séries de erros de simulação, tais como a homocedasticidade e a autocorrelação, responderão a essas mudanças. Portanto, é importante ressaltar a possibilidade de se selecionar diferentes modelos estocásticos de erros como consequência da utilização de diferentes conjuntos de parâmetros, mesmo que haja pequenas diferenças nos valores dos parâmetros. Estes importantes assuntos serão objetos de futuras investigações.

ASSIMILAÇÃO DOS ERROS NA PREVISÃO HIDROLÓGICA

Introdução

Segundo Madsen et al. (2000), a assimilação de dados é um processo de retro-alimentação ou *feedback*, na qual as previsões do modelo hidrológico

estão condicionadas às observações realizadas no sistema, como por exemplo: as medições de cota ou de vazão dos rios. Um procedimento de atualização é adotado a partir da assimilação de informações, obtidas através de medições em tempo real, com o objetivo de melhorar o estado inicial do sistema antes de ser realizada a previsão, ou ainda na correção do modelo, durante o período das previsões.

Os procedimentos de assimilação de dados podem ser classificados de acordo com as variáveis que são modificadas no processo de *feedback* da assimilação de dados, por exemplo: variáveis de entrada, variáveis de estado, parâmetros ou variáveis de saída do modelo (WMO, 1992). O procedimento apresentado neste artigo pertence a esta última categoria. Uma revisão de diferentes metodologias de procedimentos de atualização pode ser vista em Reefsgaard (1997).

Os modelos de previsão de vazões de curto prazo normalmente utilizam-se de informações

disponibilizadas em tempo real através de estações pluviométricas e fluviométricas telemétricas. Os dados observados de cotas das estações fluviométricas permitem as estimativas das vazões, que por sua vez são utilizadas para determinar os erros da previsão. Esses erros são, portanto, a diferença entre as vazões observadas e previstas (ou simuladas).

$$\varepsilon = Q_{obs} - Q_{sim} \quad (1)$$

A idéia de um procedimento de atualização pela modelagem estocástica dos erros é simples e baseia-se na correção das vazões simuladas ou previstas pelo modelo hidrológico chuva-vazão (Q_{sim}) através de uma estimativa (previsão) dos erros. Por exemplo, para uma previsão de vazão do intervalo de tempo $t+1$, ter-se-ia:

$$\hat{Q}_{t+1} = Q_{sim,t+1} + \hat{\varepsilon}_{t+1} \quad (2)$$

O modelo de simulação e previsão hidrológica chuva-vazão utiliza-se da previsão de precipitação para poder prever a descarga $Q_{sim,t+1}$. A previsão do erro pode-se dar através de um modelo de série temporal ou estocástico, ou seja, ela é função dos erros medidos em intervalos de tempos anteriores, conforme a relação:

$$\hat{\varepsilon}_{t+1} = f(\varepsilon_t, \varepsilon_{t-1}, \dots) \quad (3)$$

Segundo Lettenmaier & Wood (1993) a atualização através da modelagem estocástica dos erros é mais efetiva quando os erros da previsão hidrológica são altamente autocorrelacionados. De fato, esta parece ser uma propriedade comum em modelos conceituais de simulação hidrológica. Lundberg (1982) diz que ao se comparar as vazões simuladas com as vazões observadas, freqüentemente percebe-se uma forte inércia nos erros. Isto significa, em outras palavras, que se o modelo de simulação/previsão superestima a vazão no tempo atual, é bem provável que o faça no instante seguinte. É esse comportamento que torna o modelo do tipo autoregressivo, dentre os modelos de série temporais, um dos mais adequados para ser

utilizado como modelo estocástico na assimilação dos erros de previsão.

As Previsões do Modelo Rio Grande

As previsões de vazão afluente ao reservatório da UHE Camargos, feitas pelo modelo RIO GRANDE, são fixadas, quanto à antecedência, em 3, 5 e 7 dias. Esses tempos de antecedência foram adotados na concepção do modelo para que houvesse compatibilidade com os modelos de previsão meteorológica utilizados pela CEMIG. Em outras palavras, os modelos de previsão meteorológica fornecem prognósticos de precipitação para 3, 5 e 7 dias, consequentemente, o modelo RIO GRANDE utiliza-se desses prognósticos para prever as vazões com os mesmos tempos de antecedência.

O modelo Rio Grande apresenta três esquemas de previsão, que se diferem entre si pela maneira na qual as observações hidrológicas são empregadas pelo modelo na realização da previsão – maiores detalhes podem ser vistos em EHR-UFMG (2001). Neste estudo, o esquema adotado é aquele que considera a simulação de toda a bacia a partir das previsões meteorológicas. Esse esquema divide-se em três etapas:

Na primeira etapa ocorre a produção do escoamento nas sub-bacias Aiuruoca e Bom Jardim de Minas e concentração do escoamento nos postos de controle (ver Figura 1).

Na segunda etapa, as vazões concentradas nos postos, Aiuruoca e Bom Jardim de Minas, são propagadas até os postos de jusante, Fazenda Laranjeiras e Madre de Deus de Minas, respectivamente, e somadas às vazões produzidas e concentradas nestas sub-bacias.

Na terceira e última etapa, as vazões totais concentradas nos postos Fazenda Laranjeiras e Madre de Deus de Minas são propagadas nas calhas fluviais e somadas às vazões produzidas na sub-bacia em torno do reservatório e concentradas no posto de controle UHE Camargos – Montante. Segundo EHR-UFMG (2002), o módulo de concentração desta sub-bacia desconsidera, para efeitos de cálculo, a presença do reservatório, devido à velocidade do escoamento ser aí praticamente nula.

A proposta deste estudo é que a assimilação dos erros seja aplicada nas estações de Madre de Deus de Minas e Fazenda Laranjeiras, ou seja, as vazões previstas em ambas as estações seriam atualizadas e, em seguida, propagadas e se somariam às vazões simuladas na área incremental (em torno

do reservatório), formando a vazão total afluente a UHE Camargos.

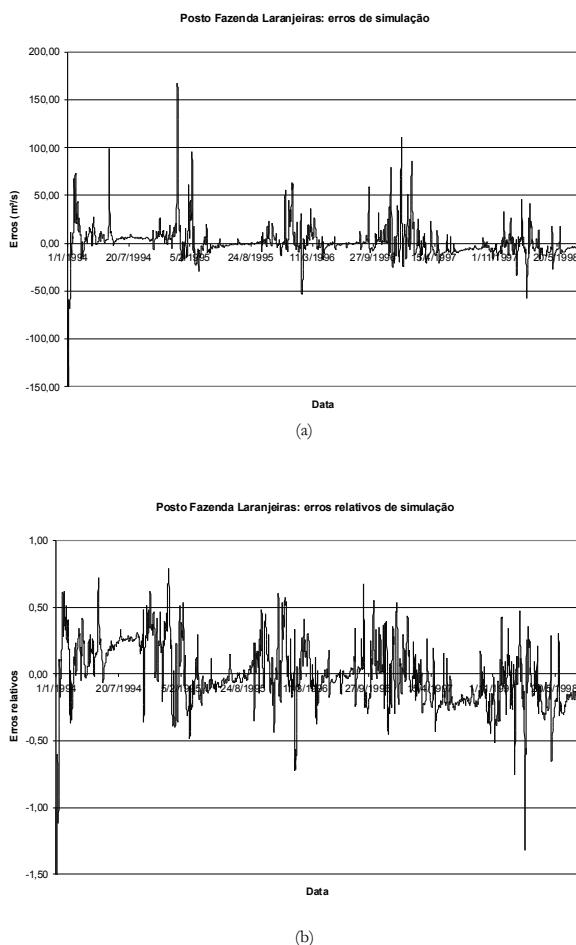


Figura 4 – (a) Série de erros diários e (b) série de erros relativos de simulação hidrológica em Fazenda Laranjeiras.

Análise das Séries de Erros

Os modelos estocásticos geralmente assumem que a série temporal da variável em estudo é *estacionária e normalmente distribuída*. As séries de erros da simulação hidrológica no período 01/01/1994 à 31/07/1998 de todas as sub-bacias mostram um comportamento sazonal típico que é o aumento da variância dos erros com o aumento da magnitude das vazões nos períodos chuvosos, do que se conclui sobre a não estacionariedade da variância dos erros (ver Figura 4(a)). Além disso, por meio do teste do Qui-Quadrado e gráficos de probabilidade normal, verificou-se que a suposição de normalidade da série de erros diários de

simulação é rejeitada em todas as sub-bacias em estudo.

Para que a hipótese de estacionariedade da variância fosse respeitada foi tomada uma decisão prática de se trabalhar somente com a série de erros diários do período chuvoso, que abrange os meses de outubro a março, assumindo neste estudo que as variâncias nesse período são da mesma ordem de grandeza.

Para minimizar o problema da não normalidade da série de erros dois métodos de transformação desta variável foram avaliados: a transformação logarítmica das vazões de forma que o erro fosse a diferença entre os logaritmos das vazões e a transformação do erro em *erro relativo* ($\text{erro}_{rel,t} = e_t / Q_{obs,t}$) – ver Figura 4(b). Foram analisados os gráficos de probabilidade normal para os períodos chuvosos correspondentes aos anos 1995-1996, 1996-1997, 1997-1998. A análise desses gráficos, tal como exemplificado na Figura 5, permitiu que se decidisse pela transformação do erro em erro relativo, para as sub-bacias Fazenda Laranjeiras e Madre de Deus de Minas.

A modelagem Estocástica

Na modelagem estocástica foi considerado o modelo autoregressivo de ordem p ou simplesmente AR(p), cuja formulação geral é descrita por Salas (1993) como:

$$y_t = \mu + \sum_{j=1}^p \phi_j (y_{t-j} - \mu) + \varepsilon_t , \quad (4)$$

onde, ε_t é uma variável aleatória normal e independente, conhecida como resíduo, com média zero e variância σ_ε^2 . A série de resíduos é independente, ou seja, é não-correlacionada com y_{t-p}, \dots, y_{tp} .

Foi considerado também o modelo autoregressivo – média móvel ou ARMA (p,q), cuja formulação é:

$$y_t = \mu + \sum_{j=1}^p \phi_j (y_{t-j} - \mu) + \varepsilon_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} , \quad (5)$$

com p parâmetros autoregressivos, ϕ_1, \dots, ϕ_p , e q parâmetros de média móvel, $\theta_1, \dots, \theta_q$.

Os parâmetros dos modelos AR(1), AR(2), ARMA(1,1) e ARMA(2,1) foram estimados utilizando-se o software MINITAB. Para a seleção do modelo estocástico, foram utilizadas as séries de

erros relativos diários do período de outubro de 1996 a março de 1997.

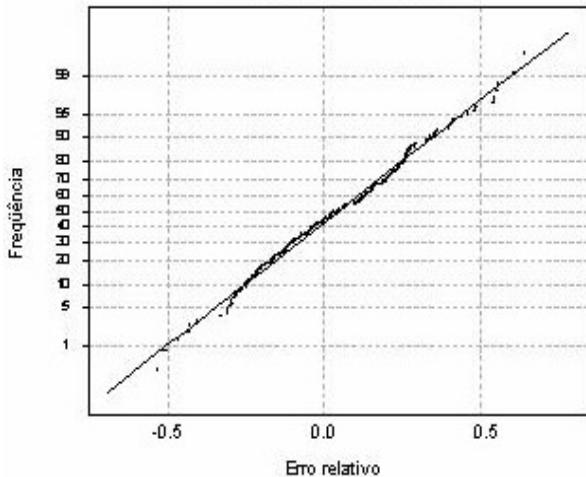


Figura 5 – Gráfico de probabilidade normal da série de erros relativos de Madre de Deus de Minas do período chuvoso 1997-1999

A modelagem teve basicamente as seguintes etapas:

- Identificação preliminar dos modelos através da análise de correlogramas (ACF) e funções de autocorrelação parcial (PACF);
- Com os parâmetros estimados para cada modelo, foi realizada a análise dos resíduos (testes de normalidade e independência); quando mais de um modelo se mostrava adequado, a escolha se dava por meio do critério de Akaike modificado (AICC), tal como sugerido em Salas (1993).

Os modelos escolhidos para a estação Fazenda Laranjeiras e Madre de Deus de Minas foram os do tipo autoregressivo. Ambos os modelos são expressos a seguir com os respectivos coeficientes de correlação (R):

- Estação Fazenda Laranjeiras – AR(1):

$$erro_{rel,t+1} = 0,731 \cdot erro_{rel,t}; R=0,728 \quad (6)$$

- Estação Madre de Deus de Minas – AR(2):

$$\begin{aligned} erro_{rel,t+1} &= 0,977 \cdot erro_{rel,t} - 0,208 \cdot erro_{rel,t-1}; \\ R &= 0,817 \end{aligned} \quad (7)$$

É importante lembrar que por se estar trabalhando com erros relativos em ambas as estações, a assimilação do erro nas vazões previstas não se dá mais pela soma destas com a previsão dos erros, conforme mostrado na equação 2 do item 4.1, e sim pela expressão:

$$\hat{Q}_{obs,t+1} = \frac{Q_{sim,t+1}}{1 - erro_{rel,t+1}} \quad (8)$$

Observa-se que $Q_{sim,t+1}$ e $erro_{rel,t+1}$ são conhecidos, o primeiro é determinado pelo modelo RIO GRANDE e o segundo pelo modelo estocástico dos erros (equações 6 e 7).

Procedimento de Assimilação de Erros – Análise dos Resultados

Os modelos estocásticos selecionados (equações 6 e 7) foram testados e validados em dez eventos de cheia ocorridos nos períodos chuvosos de 1995-1996 e 1997-1998; foram escolhidos eventos coincidentes em ambas as sub-bacias – Madre de Deus de Minas e Fazenda Laranjeiras.

Para comparação dos resultados encontrados para as vazões previstas com e sem atualização ou assimilação dos erros, foram calculados os erros absolutos médios relativos (RMAE). O RMAE é definido, segundo Salas (1993), como a razão entre o erro médio absoluto e a vazão média observada no período considerado, ou seja:

$$RMAE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{obs}(i) - Q_{sim}(i)|}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{obs}(i)}$$

A Tabela 3 mostra os valores dos RMAE's calculados para todos os eventos, considerando os diferentes tempos de antecedência (3, 5 e 7 dias), em Fazenda Laranjeiras e Madre de Deus de Minas.

É importante lembrar, que o procedimento de assimilação de erros foi testado em eventos que, de fato já ocorreram, e consequentemente, os cenários de precipitação são conhecidos. Dessa forma, como sugerido por Toth et al. (1999), as análises dos resultados não são estritamente indicativas da atual performance alcançada em pre-

Tabela 3 – Valores do RMAE das previsões realizadas pelo Modelo Rio Grande (MRG) com e sem assimilação dos erros (atualização) para diferentes tempos de antecedência em Fazenda Laranjeiras e Madre de Deus de Minas

| Evento | Previsões | Fazenda Laranjeiras | | | Madre de Deus de Minas | | |
|----------------------------|-------------------|---------------------|--------------|--------------|------------------------|--------------|--------------|
| | | Antecedência (dias) | | | Antecedência (dias) | | |
| | | 3 | 5 | 7 | 3 | 5 | 7 |
| 1 | MRG | 0,184 | 0,137 | 0,121 | 0,324 | 0,432 | 0,443 |
| | MRG + Atualização | 0,138 | 0,103 | 0,101 | 0,107 | 0,257 | 0,303 |
| | Variação (%) | -24,7 | -24,9 | -16,6 | -67,0 | -40,5 | -31,6 |
| 2 | MRG | 0,527 | 0,388 | 0,329 | 0,132 | 0,179 | 0,305 |
| | MRG + Atualização | 0,492 | 0,364 | 0,311 | 0,151 | 0,145 | 0,266 |
| | Variação (%) | -6,7 | -6,1 | -5,5 | 13,6 | -19,3 | -12,7 |
| 3 | MRG | 0,513 | 0,522 | 0,499 | 0,342 | 0,275 | 0,278 |
| | MRG + Atualização | 0,396 | 0,438 | 0,431 | 0,127 | 0,156 | 0,198 |
| | Variação (%) | -22,8 | -16,2 | -13,6 | -62,8 | -43,4 | -28,9 |
| 4 | MRG | 0,149 | 0,132 | 0,155 | 0,458 | 0,400 | 0,299 |
| | MRG + Atualização | 0,084 | 0,083 | 0,118 | 0,149 | 0,168 | 0,142 |
| | Variação (%) | -43,8 | -37,2 | -24,0 | -67,5 | -58,1 | -52,5 |
| 5 | MRG | 0,336 | 0,288 | 0,257 | 0,323 | 0,234 | 0,248 |
| | MRG + Atualização | 0,315 | 0,270 | 0,242 | 0,224 | 0,191 | 0,223 |
| | Variação (%) | -6,5 | -6,1 | -5,7 | -30,8 | -18,5 | -10,2 |
| 6 | MRG | 0,260 | 0,335 | 0,346 | 0,238 | 0,240 | 0,230 |
| | MRG + Atualização | 0,143 | 0,239 | 0,266 | 0,149 | 0,169 | 0,173 |
| | Variação (%) | -45,1 | -28,5 | -23,2 | -37,6 | -29,3 | -24,6 |
| 7 | MRG | 0,209 | 0,156 | 0,126 | 0,514 | 0,423 | 0,373 |
| | MRG + Atualização | 0,137 | 0,137 | 0,109 | 0,409 | 0,333 | 0,295 |
| | Variação (%) | -34,6 | -12,6 | -13,5 | -20,5 | -21,4 | -21,1 |
| 8 | MRG | 0,121 | 0,096 | 0,155 | 0,262 | 0,286 | 0,309 |
| | MRG + Atualização | 0,025 | 0,020 | 0,103 | 0,173 | 0,223 | 0,266 |
| | Variação (%) | -79,5 | -78,9 | -33,3 | -34,1 | -21,9 | -14,0 |
| 9 | MRG | 0,334 | 0,257 | 0,214 | 0,242 | 0,206 | 0,178 |
| | MRG + Atualização | 0,203 | 0,172 | 0,140 | 0,248 | 0,213 | 0,184 |
| | Variação (%) | -39,2 | -33,0 | -34,5 | 2,5 | 3,5 | 3,6 |
| 10 | MRG | 0,858 | 0,790 | 0,725 | 0,354 | 0,312 | 0,295 |
| | MRG + Atualização | 0,683 | 0,654 | 0,615 | 0,277 | 0,251 | 0,245 |
| | Variação (%) | -20,3 | -17,2 | -15,2 | -21,7 | -19,8 | -16,8 |
| Média das variações | | -32,3 | -26,1 | -18,5 | -32,6 | -26,9 | -20,9 |

visões de curto prazo, mas sim da performance que é idealmente alcançada quando um prognóstico perfeito de precipitação é realizado.

A Tabela 3 mostra que, com exceção apenas das previsões realizadas em Madre de Deus de Minas para os eventos 2, com 3 dias de antecedência, e 9, com 3, 5 e 7 dias de antecedência (conforme marcado nesta Tabela), a aplicação da assimilação dos erros nas previsões, em geral, promove uma redução do erro absoluto médio relativo (RMAE). Em Fazenda Laranjeiras, por exemplo, para previsões de 3, 5 e 7 dias, a assimilação dos erros faz com que o RMAE sofra uma redução média de 32,3%, 26,1% e 18,5%, respectivamente. Da mesma forma, em Madre de Deus de Minas, as reduções são, respectivamente, 32,6%, 26,9% e 20,9%. Embora

os RMAE's para os diferentes tempos de antecedência tenham sido calculados com um número de ordenadas diferentes entre si e, portanto, não possam ser comparados diretamente, os resultados parecem indicar um melhor desempenho da assimilação em previsões de menor antecedência. Vale ressaltar que a redução do RMAE é uma forma, dentre diversas possíveis, de se mostrar os benefícios da assimilação dos erros na previsão hidrológica.

As Figuras 6 e 7 mostram os hidrogramas simulados pelo modelo RIO GRANDE e o resultante da aplicação da assimilação de erros diariamente nas vazões simuladas no período chuvoso outubro de 1997 a março de 1998. A Tabela 4 compara os coeficientes de Nash para cada uma dessas situações.

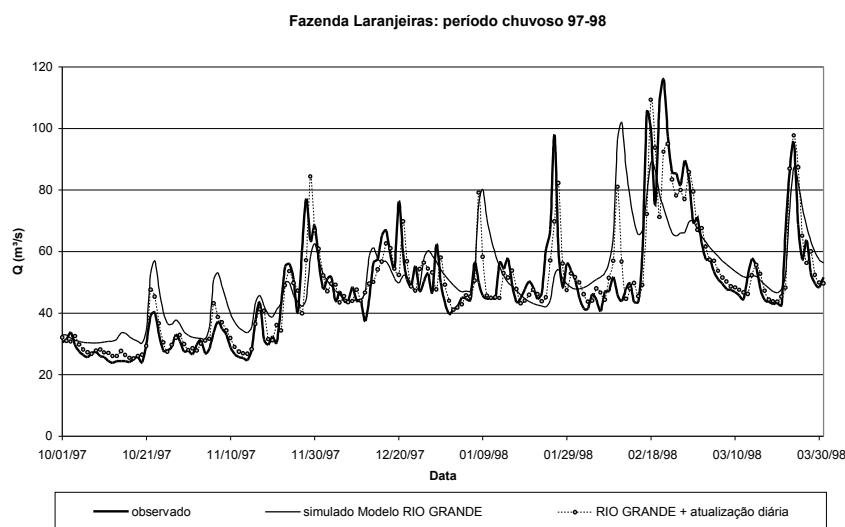


Figura 6 – Período chuvoso 1997-1998 em Fazenda Laranjeiras – hidrogramas observado e simulado com e sem atualização diária

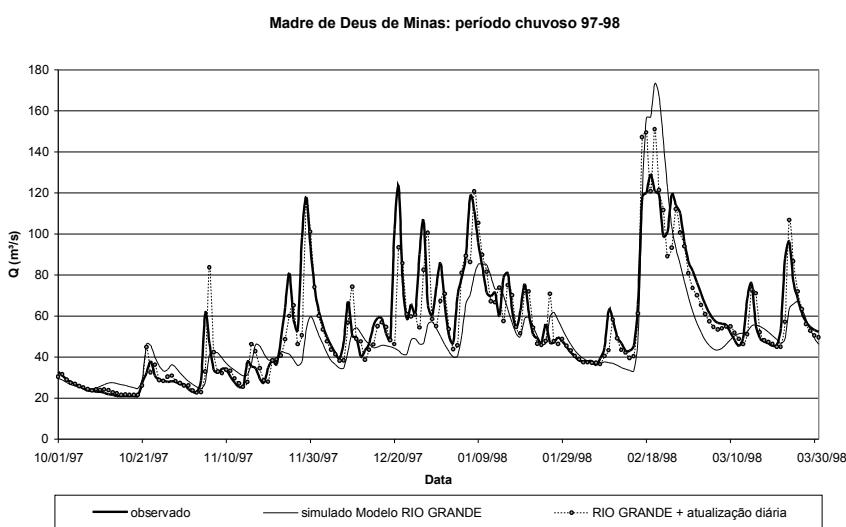


Figura 7 – Período chuvoso 1997-1998 em Madre de Deus de Minas – hidrogramas observado e simulado com e sem atualização diária

Os resultados da Tabela 4 mostram que a aplicação da assimilação de erros ou atualização diária das vazões simuladas pelo modelo RIO GRANDE no período chuvoso 1997-1998 promoveu uma melhora significativa no ajuste, representado pelo aumento do coeficiente de Nash de 46,2% para

77,7% em Fazenda Laranjeiras e de 48,8% para 80,1% em Madre de Deus de Minas. Tais resultados demonstram, portanto, a utilidade da aplicação da assimilação de erros, dando bons indícios de que sua aplicação na previsão hidrológica de curto prazo pode ser, de fato, muito útil.

Tabela 4 – Coeficiente de Nash para o período chuvoso 1997-1998 em Fazenda Laranjeiras e Madre de Deus de Minas: simulação do modelo RIO GRANDE com e sem atualização diária

| Simulação no Período 1997-1998 | Fazenda Laranjeiras R ² (%) | Madre de Deus de Minas R ² (%) |
|---|---|--|
| Modelo Rio Grande | 46,2 | 48,8 |
| Modelo Rio Grande + atualização diária | 77,7 | 80,1 |
| Variação | +68% | +64% |

CONCLUSÕES

A análise das séries de erros diários de simulação mostrou que essa variável não respeitava as condições de estacionariedade e normalidade, necessárias para a modelação estocástica. Para que essas premissas fossem respeitadas optou-se por trabalhar com a série de erros relativos, nas estações de Fazenda Laranjeiras e Madre de Deus de Minas, considerando somente o período chuvoso.

Quanto a aplicação da assimilação dos erros nas previsões, percebe-se que ela é mais efetiva quando aplicada na atualização das vazões previstas com menor antecedência, ou seja, a atualização das vazões previstas com 3 dias apresentou resultados melhores do que aquelas previstas com 7 dias.

A princípio não há como provar a melhora das previsões de vazões afluentes à UHE Camargos com a aplicação da assimilação de erros nas estações de Fazenda Laranjeiras e Madre de Deus de Minas. Entretanto, os bons resultados encontrados na aplicação deste procedimento em ambas as estações localizadas próximas e imediatamente a montante do reservatório, aliado ao fato de que juntas controlam 67,1% da área da bacia são indícios que tal procedimento possa de fato melhorar as previsões de vazões afluentes ao reservatório.

REFERÊNCIAS

DUAN, Q., SOROOSHIAN, S. and GUPTA, V. *Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models*. Water Resour. Res., 28, 1015-1031, 1992

EHR-UFMG. *Relatório Técnico Parcial 1: Modelos de Simulação Hidrológica para Previsão de Vazões de Curto Prazo*. Belo Horizonte, MG, 2001.

EHR-UFMG. *Relatório Técnico Parcial 3: Modelo Rio Grande de Simulação Hidrológica para Previsão de Vazões de Curto Prazo*. Belo Horizonte, MG, 2002.

HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. *HEC-1 Flood Hydrograph Package – Reference Manual*. U. S. Army Corps of Engineers, Davis, 1981.

LEE Y. H. & V. P. SINGH. *Tank Model Using Kalman Filter*. Journal of Hydrologic Engineering, October, 1999.

LETTENMAIER, D. P. & E. F. WOOD. *Hydrologic Forecasting*, in: *Handbook of Hydrology*, Maidment D. R., Ed., McGraw-Hill, 26.1 – 26.30, 1993.

LUNDBERG, A. *Combination of a Conceptual Model and an Autoregressive Error Model for Improving Short Time Forecasting*. Nordic Hydrology, 233-246, 1982.

MADSEN, H., BUTTS, M.B., KHU, S.T. AND LIONG, S.Y. *Data assimilation in rainfall-runoff forecasting*. The 4th International Conference on Hydroinformatics, Cedar Rapids, Iowa, USA. *Hydroinformatics*, 23-27, July, 2000.

O'CONNELL, P. E. *Real Time Hydrological Forecasting and Control*, Proceedings of 1st International Workshop, Institute of Hydrology, Wallingford, 1980.

PONCE, V. M. *Engineering Hydrology – Principles and Practices*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 608p, 1989.

REFSGAARD, J. C. *Validation and Intercomparison of Different Updating Procedures for Real-Time Forecasting*. Nordic Hydrology, 28, 65-94, 1997.

ROSEN BROCK, H. *An automatic method for finding the greatest or best value of a function*. Computer J., 3, 175-181, 1960.

SALAS, J. D. *Hydrologic Forecasting*, in: *Handbook of Hydrology*. Maidment D. R., Ed. McGraw-Hill, 19.1 – 19.72, 1993.

TODINI E. *The ARNO Rainfall-Runoff Model*. Journal of Hydrology, 175, pp. 339-382, 1996.

TOTH, E., A. MONTANARI & A. BRATH. *Real-Time Flood forecasting via Combined Use of Conceptual and Stochastic Models*. Phys. Chem. Earth (B), Vol. 24, Nº 7, pp.793-798. Elsevier Science Ltd., 1999.

WMO. *Simulated Real-Time Intercomparison of Hydrological Models*. Operational Hydrology

- Report n. 38, World Meteorological Organisation, Geneva, 1992.
- ZHAO, R.J. *Watershed Hydrologic Modelling*. Water Resources Power Press, Beinjing, 1984.
- ZHAO, R.J., Y. L. ZHUANG, L. R. FANG, X. R. LIU & Q.S. ZHANG. *The Xinanjiang Model*, Hydrological Forecasting Proceedings, Oxford Symposium, IAHS 129, pp. 351-356, 1980.

Evaluation of an Error Assimilations Method for the Short Term Forrecast of the Stream Flow into the Camargos Hydroelectric Plant Reservoir.

ABSTRACT

Hydrological forecasting is an important tool in the planning and operational control of water resources systems. The purpose of data assimilation or updating procedures, as applied to short-term streamflow forecasting is to improve accuracy and provide more reliable results. In this paper, streamflow forecasting is accomplished by means of a conceptual rainfall-runoff model, named Rio Grande, which has been applied to simulate the inflows of the Rio Grande river basin to the reservoir of the Camargos hydropower plant, in the Brazilian state of Minas Gerais. This model consists of three main modules: the Production Module, which is responsible for the runoff formation over the sub-basin area, the Concentration Module, which is responsible for the flow concentration at the outlet of the sub-basin, and the Propagation Module, which is responsible for flow propagation through the river channel. A stochastic model for the simulation of errors in each sub-basin is proposed, in order to update the short-term forecasts of inflows to the Camargos reservoir. Data assimilation is based on the correction of simulated discharges by adding to them the forecasts of the stochastic model errors. The stochastic models considered here are of the p-th order autoregressive AR(p)-type and/or of the p-th and q-th order autoregressive and moving average ARMA(p,q)-type. The analysis of the results shows that the application of that procedure to the upstream control stations closest to the reservoir may considerably improve short-term inflow forecasting.

Key-words: Hydrological forecasting; reservoir.