

METODOLOGIA PARA PREVISÃO DE VAZÕES NA BACIA DO RIO GRANDE

Rogério Saturnino Braga¹, Marcio Cataldi² & Hadassiana Creton de Oliveira³

RESUMO - Este trabalho relata a metodologia desenvolvida pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS para a realização da previsão de vazões uma semana à frente na bacia do alto/médio rio Grande. Esta metodologia considera a utilização do modelo chuva-deflúvio conceitual SMAP, de forma semiconcentrada (dividido em sub-bacias), com o uso de observações em estações fluviométricas e pluviométricas existentes na bacia e de informações de previsão de precipitação com horizonte de dez dias, obtidas a partir da integração do modelo numérico ETA, em uso no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE. Nestes estudos, foi verificada uma tendência de superestimativa nos valores de precipitação prevista, sendo desenvolvidos métodos para identificação e remoção deste viés. Testes de desempenho desta nova metodologia mostram ganhos significativos nos resultados das previsões das vazões uma semana à frente, quando comparados com os obtidos a partir da metodologia em uso pelo ONS para esta bacia.

ABSTRACT- This work relates the Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS methodologies development to one ahead week inflow forecast to upper and middle Grande river basin. This approach consider the use of the conceptual inflow model - SMAP in semi-concentrated form (divided in sub-basins), using fluviometric and pluviometric observations and forecast precipitation in basin area. The forecast rain was obtained from ETA model, which is operational use at Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC since 1994. A tendency of overestimation in the precipitation values was observed. A method was developed to identify and remove this tendency. Some tests with this new approach showed significant increase on the forecast accuracy when compared with the ONS’s actual approach.

Palavras-chave: Modelo de previsão de vazões, remoção de viés da previsão de precipitação.

1) Engenheiro Civil, Hidrólogo do Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rua da Quitanda 196/10º, 20091-000 Rio de Janeiro, RJ. E-mail rogeriobraga@ons.org.br

2) Meteorologista do Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rua da Quitanda 196/10º, 20091-000 Rio de Janeiro, RJ. E-mail cataldi@ons.org.br

3) Engenheira Civil, Hidróloga do Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rua da Quitanda 196/10º, 20091-000 Rio de Janeiro, RJ. E-mail hadassiana@ons.org.br

1 INTRODUÇÃO

O Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS tem a responsabilidade de elaborar a previsão de vazões naturais médias diárias, semanais e mensais para todos os locais de aproveitamentos hidroelétricos do Sistema Interligado Nacional - SIN, além da geração de cenários mensais a partir do segundo mês, a serem utilizados nos processos de planejamento e programação da operação do SIN. Estas previsões são utilizadas como insumos básicos para a cadeia de modelos de otimização deste Operador, no âmbito do Programa Mensal da Operação – PMO, e suas revisões.

O processo atual de previsão de vazões semanais, para a grande maioria das bacias, utiliza modelos estocásticos univariados, que se baseiam na série histórica de vazões e nas últimas afluições naturais verificadas, não considerando observações de estações pluviométricas ou fluviométricas, nem tampouco informações de previsão de precipitação. Além disso, são obtidas previsões de vazões totais em locais de aproveitamentos hidroelétricos, sendo as vazões relativas às bacias incrementais calculadas a partir de diferenças entre os valores obtidos nessas previsões, sem nenhuma consideração de defasagem temporal devido ao traslado da água entre aproveitamentos.

Em 2000, o ONS verificou a necessidade de aprimorar o processo e as modelagens utilizadas na obtenção das previsões de vazões naturais semanais dos aproveitamentos integrantes do SIN, bem como as previsões relativas às bacias incrementais. Considerando a predominância significativa da hidroeletricidade no parque gerador de energia elétrica do Brasil, a qualidade da previsão da vazão natural dos aproveitamentos hidroelétricos apresenta-se como fator fundamental no planejamento e programação da operação do SIN, pois, a partir destas informações, se tomam decisões de operação visando minimizar os custos e otimizar o uso dos recursos disponíveis.

A partir do início de 2004, com o acompanhamento dos Agentes de Geração e da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, o ONS passou a estudar novas metodologias que pudessem ser utilizadas na previsão de vazões, incorporando, além das vazões naturais passadas, observações de postos pluviométricos e fluviométricos e a previsão de precipitação. Em 2006, o ONS, após autorização da ANEEL, passou a utilizar no PMO e suas revisões, para a bacia do rio Iguaçu, o modelo misto de Redes Neurais - Mineração de Dados/PREVIVAZ – MPCV [ONS (2005)], que incorporava dados observados de vazão e precipitação, além da previsão de precipitação para 10 dias elaborada com a utilização do modelo ETA/CPTEC.

Em 2008, após nova autorização da ANEEL, o ONS passou também a utilizar no processo do PMO e suas revisões outras modelagens de previsão de vazões, com incorporação de informações de precipitação, nas seguintes bacias: bacia do rio Iguaçu, com o modelo Fuzzy – Redes Neurais [ONS/FEC (2005)]; bacia incremental da UHE Itaipu, no rio Paraná, com o modelo misto conceitual/estocástico SMAP-MEL [Fadiga *et al.* (2008)]; bacias incrementais das UHEs São

Simão e Cachoeira Dourada, no rio Paranaíba, com o modelo conceitual distribuído MGB-IPH [Collischonn *et al.* (2007)]; e bacia do rio Uruguai, com o modelo misto de Redes Neurais - Mineração de Dados/PREVIVAZ – MPCV [Borim *et al.* (2008)].

Considerando o melhor desempenho destas novas modelagens, quando comparado com os resultados da modelagem até então vigente [Guilhon *et al.* (2007)], o ONS desenvolveu uma nova metodologia para a previsão de vazões na bacia do Alto/Médio rio Grande (até a UHE Porto Colômbia), envolvendo a utilização do modelo conceitual SMAP e o uso de observações de estações pluviométricas e fluviométricas e de previsões de precipitação na bacia [ONS (2008)]. Como produto, obtém-se a previsão direta das vazões incrementais entre aproveitamentos, com horizonte de até dez dias. Na próxima seção será apresentada a região onde foi aplicada a metodologia, seguida da descrição dos dados utilizados, elucidando o procedimento de remoção do viés da precipitação prevista pelo ETA. Na seção seguinte é apresentada uma breve descrição do modelo SMAP, seguida dos resultados encontrados no estudo e as conclusões e discussões mais pertinentes a ele.

2 DESCRIÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO

2.1 Considerações gerais

A bacia do rio Grande no trecho em estudo (montante da UHE Porto Colômbia) possui uma área de drenagem de 77.427 km² e dez aproveitamentos hidroelétricos em operação integrados ao SIN (Camargos, Itutinga, Funil, Furnas, Mascarenhas de Moraes, L.C.Barreto, Jaguará, Igarapava, Volta Grande e Porto Colômbia).

A precipitação média anual na bacia do rio Grande varia em torno de 1.500 mm, exceto em algumas regiões da Serra da Mantiqueira, onde ultrapassa 3.000 mm. A região tem uma estação chuvosa no verão, estendendo-se de outubro a março, quando ocorrem cerca de 80% do total precipitado sobre a bacia. O trimestre mais chuvoso é formado pelos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. A estação seca é definida pelos meses de junho, julho e agosto, no inverno.

Nos meses de verão, os totais mais significativos de precipitação se devem principalmente a configuração da Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZCAS que, quando ocorre, aciona o transporte de umidade da região Amazônica diretamente para a região da bacia. O deslocamento de frentes frias, áreas e linhas de instabilidade e o próprio aquecimento diurno, também contribuem para a ocorrência de precipitação nesta época do ano.

Durante o inverno, somente o deslocamento de frentes frias ocasiona precipitação na região, sendo que, neste período do ano, elas atingem esta região com menor frequência e menor intensidade, devido principalmente a menor disponibilidade de umidade na atmosfera.

A rede hidrográfica da bacia, estando sob influência das chuvas de verão, registra maiores vazões nos meses de dezembro e janeiro. A vazão média de longo termo (1931/2007) em Porto Colômbia é de 1.323 m³/s, o que corresponde a uma vazão específica de 17,1 l/s/km².

2.2 Configuração das sub-bacias

Para aplicação do modelo, optou-se pela previsão direta das vazões apenas para os aproveitamentos de Camargos, Funil, Furnas e Porto Colômbia. Os seis aproveitamentos restantes do trecho deverão ter suas vazões previstas calculadas, posteriormente, com base em regressões lineares obtidas a partir dos valores previstos para estes quatro locais.

Algumas estações fluviométricas existentes na bacia foram consideradas como pontos de cálculo do modelo, devido à importância de suas localizações e áreas de controle. Estas estações foram a do rio Verde em Porto dos Buenos e a do rio Sapucaí em Paraguaçu, situadas na bacia incremental entre as UHEs Furnas e Funil, bem como a do rio Sapucaí Paulista em Fazenda Capão Escuro, localizada na bacia incremental entre as UHEs Porto Colômbia e Furnas.

A figura 1 e a tabela 1 mostram, respectivamente, a localização e as principais características das sete sub-bacias selecionadas para a aplicação do modelo.

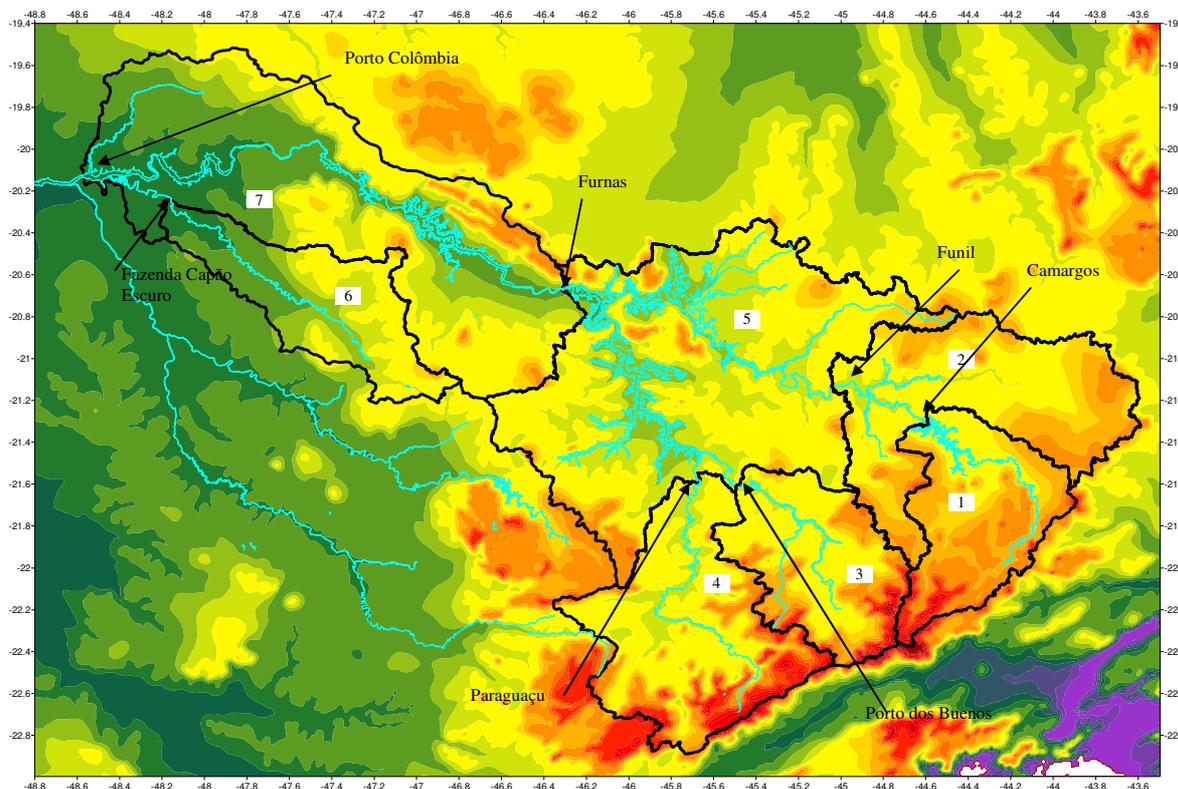


Figura 1 - Localização das sub-bacias

Tabela 1 - Principais características das sub-bacias

Sub-bacia	Área Incremental	Rio	Área (km ²)	% do total
1 - Camargos	UHE Camargos	Grande	6.279	8,1
2 - Funil	UHE Funil / UHE Camargos	Grande	9.491	12,3
3 - Porto dos Buenos	Porto dos Buenos	Verde	6.366	8,2
4 - Paraguaçu	Paraguaçu	Sapucaí	9.501	12,3
5 - Furnas	UHE Furnas / UHE Funil; Porto dos Buenos; Paraguaçu	Grande	20.501	26,5
6 - Fazenda Capão Escuro	Fazenda Capão Escuro	Sapucaí Paulista	5.906	7,6
7 - Porto Colômbia	UHE Porto Colômbia / UHE Furnas; Fazenda Capão Escuro	Grande	19.383	25,0
Total			77.427	100,0

3 DADOS BÁSICOS

3.1 Estações e dados fluviométricos

A tabela 2 apresenta as estações fluviométricas utilizadas nos estudos. As principais estações fluviométricas foram as três citadas anteriormente, ou seja, Paraguaçu, Porto dos Buenos e Fazenda Capão Escuro. As demais estações foram utilizadas no tratamento das vazões incrementais.

Tabela 2 - Estações fluviométricas utilizadas nos estudos

Código	Estação	Rio	Área de Drenagem (km ²)	Operadora
61012001	Madre de Deus de Minas	Grande	2.097	Cemig
61060001	Fazenda Laranjeiras	Aiuruoca	2.102	Cemig
61425000	Paraguaçu	Sapucaí	9.501	Furnas
61537000	Porto dos Buenos	Verde	6.366	Furnas
61787000	Fazenda Capão Escuro	Sapucaí Paulista	5.906	Furnas
61795000	Conceição das Alagoas	Uberaba	1.984	Furnas

3.2 Estações e dados pluviométricos

Com vistas à etapa de calibração e validação dos parâmetros do modelo SMAP, trabalhou-se com uma rede de estações pluviométricas mais densa possível. Desta forma, com base no período de dados a ser utilizado nos estudos (1995 a 2007), foi realizada uma ampla pesquisa de estações existentes na bacia e, posteriormente, uma coleta de dados junto à CEMIG, FURNAS e ANA, além dos dados já disponíveis na Base de Dados Técnica – BDT do ONS. As estações pluviométricas selecionadas para o estudo estão apresentadas na figura 2.

em uso no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC. Os pontos de grade utilizados do modelo ETA têm resolução espacial 40 x 40 km e a chuva média em cada sub-bacia foi calculada a partir de média aritmética de todos os pontos localizados dentro da sub-bacia. A precipitação prevista utilizada foi sempre para o intervalo de 10 dias à frente, no período de 1996 a 2003, com previsões efetuadas sempre com início às quartas-feiras.

Quando comparados os valores médios de precipitação prevista e de precipitação observada, conforme pode ser visto na tabela 3, verifica-se, em todas as sub-bacias, uma tendência de superestimativa dos valores previstos, principalmente em sub-bacias que possuem desníveis mais acentuados em suas cabeceiras. A topografia mais elevada e irregular justifica os valores maiores da relação Previsto/Observado nas sub-bacias de Porto dos Buenos, Paraguaçu, Camargos e Funil e os valores menores nas sub-bacias de Fazenda Capão Escuro e Porto Colômbia. Contudo, o alto valor encontrado para esta relação para a sub-bacia de Furnas não pode ser justificado pela topografia e sua causa deve ser investigada em conjunto com a equipe técnica do CPTEC.

Tabela 3 - Precipitação média anual prevista e observada em cada sub-bacia - Período 1996/2003

Sub-bacia	Precipitação		Pprev/Pobs
	Média Anual (mm)		
	Observada	Prevista	
1 - Camargos	1.434,6	1.820,3	1,27
2 - Funil	1.400,4	1.774,8	1,27
3 - Porto dos Buenos	1.499,5	2.154,4	1,44
4 - Paraguaçu	1.435,6	1.838,3	1,28
5 - Furnas	1.333,9	2.013,3	1,51
6 - Fazenda Capão Escuro	1.532,1	1.716,6	1,12
7 - Porto Colômbia	1.476,6	1.614,8	1,09

Analisando a figura 3, elaborada com os dados de precipitação total média observada e prevista nos nove primeiros dias de cada previsão para a sub-bacia de Camargos, percebe-se que a precipitação prevista pelo modelo ETA tem um comportamento semelhante à observada, alterando apenas a magnitude, o que indica que o modelo foi capaz de reproduzir os fenômenos meteorológicos que ocorreram na bacia, porém possui uma tendência (viés) a superestimar os totais previstos. Com vistas à identificação e remoção deste viés, foram realizados estudos para cada uma das sete sub-bacias, considerando o total de precipitação prevista nos primeiros nove dias de cada previsão realizada para o período 1996/2003. Considerando as análises das características climáticas sazonais da região foram agrupados quatro períodos distintos para identificação e remoção do viés: agosto a novembro; dezembro e janeiro; fevereiro e março; e abril a julho.

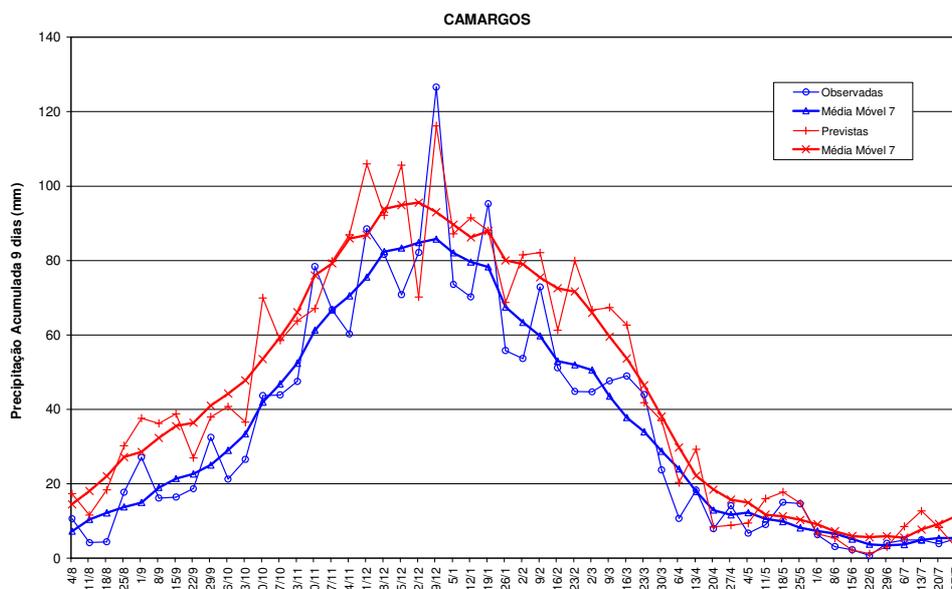


Figura 3 - Precipitação total média observada e prevista na sub-bacia de Camargos (1996/03)

A metodologia utilizada para a identificação e remoção do viés das previsões de precipitação, para cada uma das sete sub-bacias em cada um dos quatro períodos, foi a seguinte:

- Obtenção dos totais de precipitação observada e prevista nos primeiros 9 dias de cada previsão.
- Elaboração de curvas de permanência de precipitação observada e prevista, como exemplificado na figura 4, que é relativa à sub-bacia Camargos no período agosto/novembro.
- Elaboração de gráficos de precipitação prevista versus precipitação observada, plotando-se pontos de mesma frequência da curva de permanência, como o exemplo da figura 5.
- Ajuste de uma equação de segundo grau aos pontos do gráfico, passando pela origem e limitado aos valores de precipitação prevista maiores do que a precipitação observada.
- Cálculo da precipitação diária prevista com remoção de viés para os 10 dias de previsão, por meio da seguinte expressão:

$$P_{pre}(t) = P_{ETA(t)} \times \frac{P_{totpre\ 9dias}}{P_{tot\ ETA\ 9dias}} \quad (1)$$

$$\text{onde: } P_{totpre\ 9dias} = a \times (P_{tot\ ETA\ 9dias})^2 + b \times (P_{tot\ ETA\ 9dias}) \quad (2)$$

$P_{pre}(t)$: precipitação diária prevista com remoção de viés, para cada dia de previsão (mm).

$P_{ETA(t)}$: precipitação diária prevista pelo modelo ETA, para cada dia de previsão (mm).

$P_{totpre\ 9dias}$: precipitação total prevista com remoção de viés, para os 9 primeiros dias (mm).

$P_{tot\ ETA\ 9dias}$: precipitação total prevista pelo modelo ETA, para os 9 primeiros dias (mm).

a e b: constantes da equação de segundo grau obtida para remoção de viés.

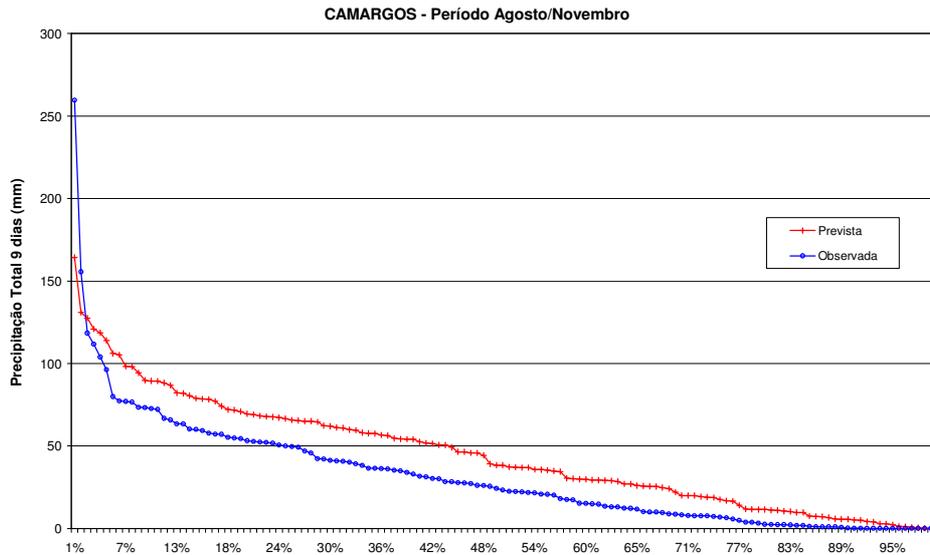


Figura 4 - Curvas de permanência de precipitação - agosto/novembro - Sub-bacia de Camargos

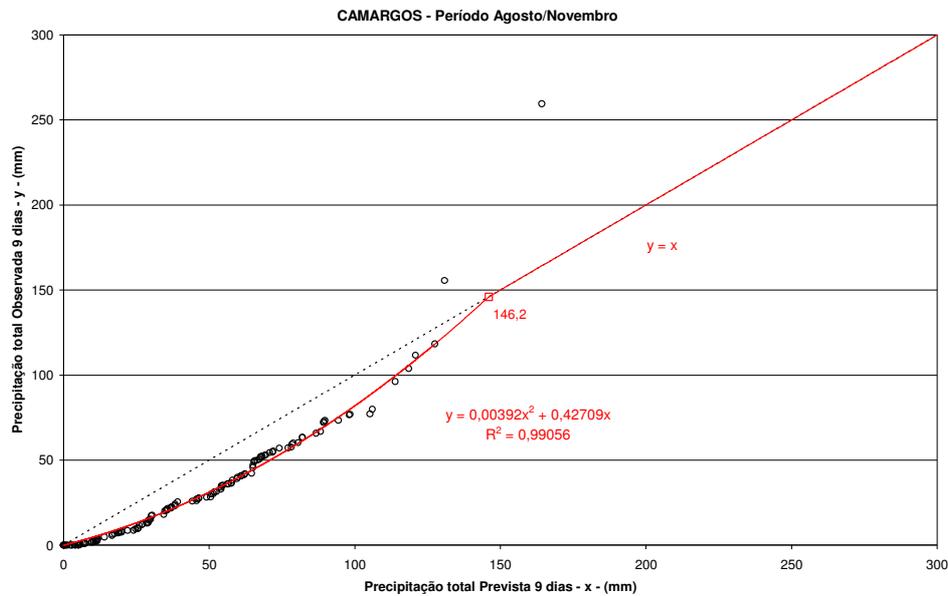


Figura 5 - Precipitação total observada e prevista - agosto/novembro - Sub-bacia de Camargos

A figura 6 apresenta os dados de precipitação total média observada e prevista, sem e com remoção do viés, nos nove primeiros dias de cada previsão, para a sub-bacia de Camargos. É possível verificar que, com a remoção do viés da previsão, os dados apresentam uma melhor distribuição em relação à reta de 45°, bem como a média dos valores de precipitação prevista se aproxima mais da média dos valores de precipitação observada.

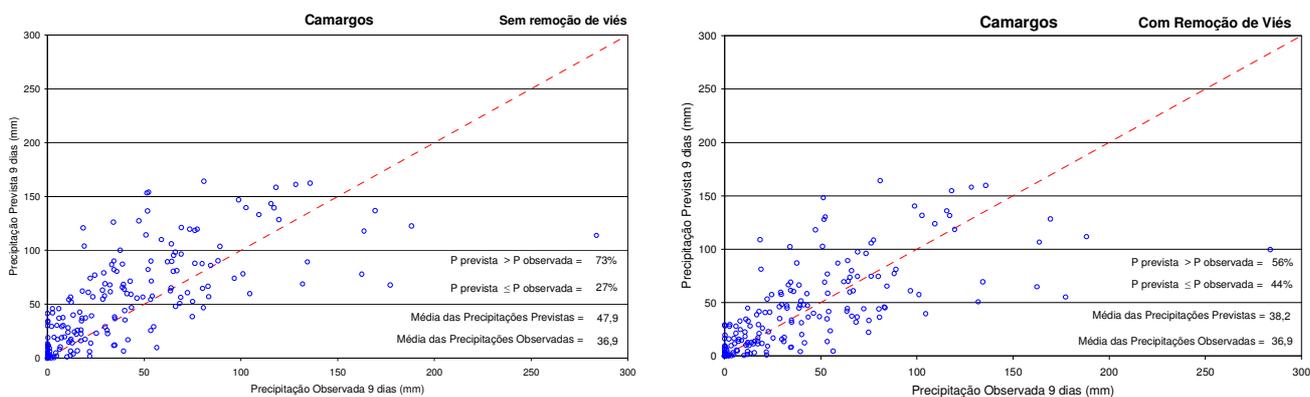


Figura 6 - Precipitação observada e prevista, sem e com remoção do viés, na sub-bacia de Camargos

A tabela 4 apresenta as constantes a e b e os correspondentes limites de aplicação das equações de segundo grau obtidas para a remoção do viés da previsão de precipitação, para cada sub-bacia e período analisado. Observa-se que, para as sub-bacias de Fazenda Capão Escuro e Porto Colômbia, somente se fez a correção do viés para os meses de agosto a novembro.

Tabela 4 - Parâmetros das equações para remoção do viés da previsão de precipitação

Sub-bacia	Período			Período			Período			Período		
	Agosto/Novembro			Dezembro/Janeiro			Fevereiro/Março			Abril/Julho		
	a	b	Limite (mm)	a	b	Limite (mm)	a	b	Limite (mm)	a	b	Limite (mm)
1 - Camargos	0,00392	0,42709	146,2	0,00179	0,69219	172,0	0,00127	0,65057	275,1	0,00725	0,59979	55,2
2 - Funil	0,00443	0,44497	125,3	0,00072	0,80994	264,0	0,00225	0,57288	189,8	0,01544	0,26893	47,3
3 - Porto dos Buenos	0,00351	0,35244	184,5	0,00238	0,47241	221,7	0,00155	0,49249	327,4	0,00814	0,39126	74,8
4 - Paraguaçu	0,00341	0,47233	154,7	0,00203	0,63334	180,6	0,00308	0,52903	152,9	0,00795	0,48164	65,2
5 - Furnas	0,00119	0,52182	401,8	0,00204	0,47112	259,3	0,00152	0,51448	319,4	0,00745	0,44803	74,1
6 - Fazenda Capão Escuro	0,00487	0,43763	115,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7 - Porto Colômbia	0,00037	0,74494	689,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3.4 Séries de vazões naturais e incrementais

As séries de vazões das sub-bacias referentes às estações fluviométricas (Porto dos Buenos, Paraguaçu e Fazenda Capão Escuro) foram fornecidas por FURNAS.

No período entre 01/janeiro/95 a 31/dezembro/2001, foi utilizada a série de vazões naturais da sub-bacia de Camargos, definida no projeto de revisão das séries de vazões da bacia do rio Grande, desenvolvido pelo ONS [Braga et al. (2005); ONS/HICON (2004)]. Para o período posterior, a série de vazões foi obtida pelo processo de modulação [ONS (2005)], a partir dos dados fluviométricos observados nas estações do rio Grande em Madre de Deus de Minas e do rio Aiuruoca em Fazenda Laranjeiras, utilizando tempos de viagem iguais a 14 e 15 horas, respectivamente.

A série de vazões incrementais da sub-bacia de Funil foi obtida pela diferença entre a série de vazões naturais de Funil e a série de vazões naturais de Camargos, anteriormente mencionada e

devidamente propagada com tempo de viagem igual a 13 horas. Em alguns dias do período de estiagem, foi necessária a realização de tratamentos específicos para eliminar valores extremamente baixos e oscilações diárias injustificáveis.

Para obtenção da série de vazões incrementais da sub-bacia de Furnas, primeiro foi calculada a vazão incremental bruta Furnas/Funil, obtida pela diferença entre a série de vazões naturais de Furnas e a série de vazões naturais de Funil, devidamente propagada com tempo de viagem igual a 36 horas. O passo seguinte foi o tratamento da vazão incremental Furnas/Funil, com uso do processo de modulação, a partir dos dados fluviométricos observados nas estações do rio Verde em Porto dos Buenos e do rio Sapucaí em Paraguaçu, utilizando tempos de viagem iguais a 12 e 10 horas, respectivamente. Por fim, as vazões incrementais da sub-bacia de Furnas foram obtidas pela diferença entre as vazões incrementais tratadas Furnas/Funil e as vazões observadas em Porto dos Buenos e em Paraguaçu, devidamente propagadas.

A série de vazões incrementais da sub-bacia de Porto Colômbia foi calculada com metodologia semelhante à Furnas, utilizando para modulação as estações do rio Sapucaí Paulista em Fazenda Capão Escuro e do rio Uberaba em Conceição das Alagoas.

4 O MODELO SMAP

4.1 Concepção do modelo

O modelo SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) é um modelo conceitual de simulação hidrológica, do tipo transformação chuva-vazão [Lopes *et al.* (1982)]. O modelo foi aplicado com sucesso em diversas bacias brasileiras e vem sendo utilizado pelo ONS, desde janeiro de 2008, em combinação com o modelo estocástico multivariado “MEL”, para a previsão de vazões uma semana à frente da bacia incremental da UHE Itaipu, no rio Paraná [Fadiga *et al.* (2008)]. Além do bom desempenho nesta bacia, tanto na fase de testes como na fase de operacionalização, a escolha desse modelo para aplicação à bacia do alto/médio rio Grande deve-se: à facilidade de entendimento da metodologia e do funcionamento do modelo e de seus parâmetros, o que permite a realização de alguns ajustes/aprimoramentos, quando necessário; e à facilidade na obtenção dos dados de entrada necessários e na aplicação para a grande maioria das bacias do SIN.

O modelo SMAP, em sua versão original, é constituído por três reservatórios lineares hipotéticos representando: o reservatório do solo (R_{solo}); o reservatório da superfície (R_{sup}), correspondente ao escoamento superficial da bacia; e o reservatório subterrâneo (R_{sub}), correspondente ao escoamento subterrâneo da bacia (escoamento de base). A concepção básica do modelo, bem como sua formulação, já foi apresentada em diversos trabalhos [Lopes *et al.* (1982); ONS (2008)].

Para a aplicação do modelo SMAP à bacia do alto/médio rio Grande, nas sub-bacias de Porto dos Buenos e de Paraguaçu, constatou-se a necessidade de inclusão de um quarto reservatório, com vistas à simulação de importantes extravasamentos pelas margens e de amortecimentos nos picos das cheias, em eventos de fortes chuvas. Este quarto reservatório linear representaria o armazenamento e o escoamento de água nas planícies de inundação existentes nas duas sub-bacias.

A figura 7 apresenta o esquema do modelo SMAP aplicado à bacia do rio Grande.

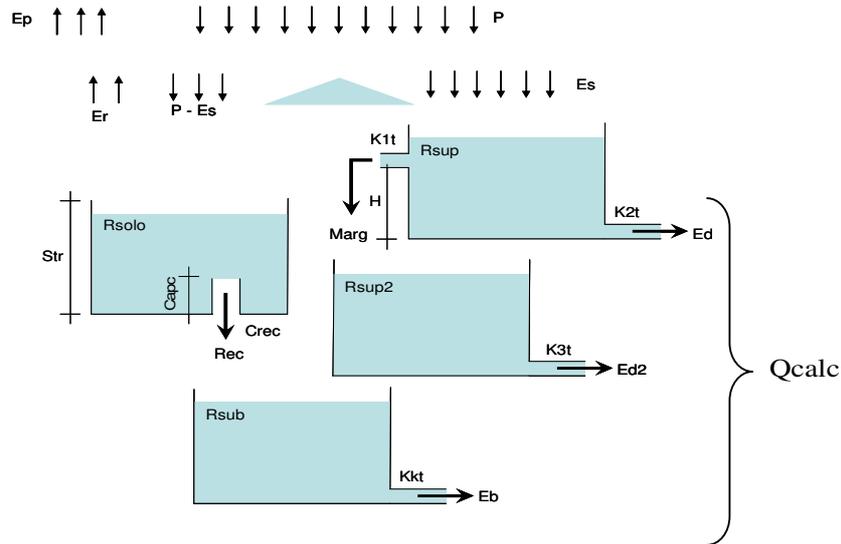


Figura 7 - Esquema do modelo SMAP aplicado à bacia do rio Grande (4 reservatórios)

Outra alteração em relação à configuração original do modelo SMAP, diz respeito a coeficientes de representação temporal que foram introduzidos para o cálculo da precipitação média na bacia a ser considerada pelo modelo - $P_{(t)}$, conforme a seguinte expressão:

$$P_{(t)} = Pb_{(t-3)} \cdot kt_{(-3)} + Pb_{(t-2)} \cdot kt_{(-2)} + Pb_{(t-1)} \cdot kt_{(-1)} + Pb_{(t)} \cdot kt_{(0)} + Pb_{(t+1)} \cdot kt_{(+1)} \quad (3)$$

Onde: $Pb_{(t)}$: precipitação média observada na bacia (mm) no dia t , obtida a partir das observações das estações pluviométricas da bacia e de seus respectivos pesos ke .

$kt_{(-3)}$; $kt_{(-2)}$; .. ; $kt_{(+1)}$: coeficientes de representação temporal.

4.2 Etapa de calibração/validação do modelo

Para o modelo SMAP aplicado à bacia do alto/médio rio Grande, os parâmetros calibrados, para cada sub-bacia estudada, foram os seguintes:

Str: capacidade de saturação do solo (mm).

Capc: capacidade de campo (%).

Crec: parâmetro de recarga subterrânea (%).

K2t: constante de recessão do escoamento superficial (dia).

Kkt: constante de recessão do escoamento básico (dia).

H: altura representativa para início de escoamento em planícies (mm).

K1t: constante de recessão do escoamento para planícies (dia).

K3t: constante de recessão do escoamento da superfície/planícies (dia).

ke1 ; ke2 ; .. ; ken: coeficientes de representação espacial de cada posto pluviométrico.

kt₍₋₃₎ ; kt₍₋₂₎ ; .. ; kt₍₊₁₎ : coeficientes de representação temporal.

kep: coeficiente de ajuste da evapotranspiração potencial média da sub-bacia.

Vale ressaltar que os cinco primeiros parâmetros (Str ; Capc ; Crec ; K2t e Kkt) são os mesmos a calibrar quando se utiliza a versão original do modelo SMAP com três reservatórios. Os três parâmetros seguintes (H ; K1t e K3t) são decorrentes da incorporação do quarto reservatório, que representa o eventual extravasamento pelas margens e escoamento pelas planícies de inundação. Os coeficientes ke; kt e kep devem ser calibrados com vistas a uma melhor representatividade dos dados de precipitação média da sub-bacia - P(t) e de evapotranspiração potencial média da sub-bacia - Ep(t), a serem utilizados pelo modelo. Neste estudo, optou-se por fixar o valor da abstração inicial – Ai em 2,0mm.

Para as fases de calibração e validação do modelo, foram utilizados dois conjuntos distintos de 4 anos de dados. Na seleção destes anos, buscou-se, sempre que possível, situações hidrológicas diversificadas na bacia, ou seja, períodos com cheias anuais baixa, média e alta. A figura 8 apresenta, como exemplo, um dos anos utilizados para a calibração dos parâmetros da sub-bacia de Camargos. Além dos hidrogramas observado e calculado pelo modelo SMAP, é apresentado o hidrograma do escoamento básico, proveniente do reservatório subterrâneo.

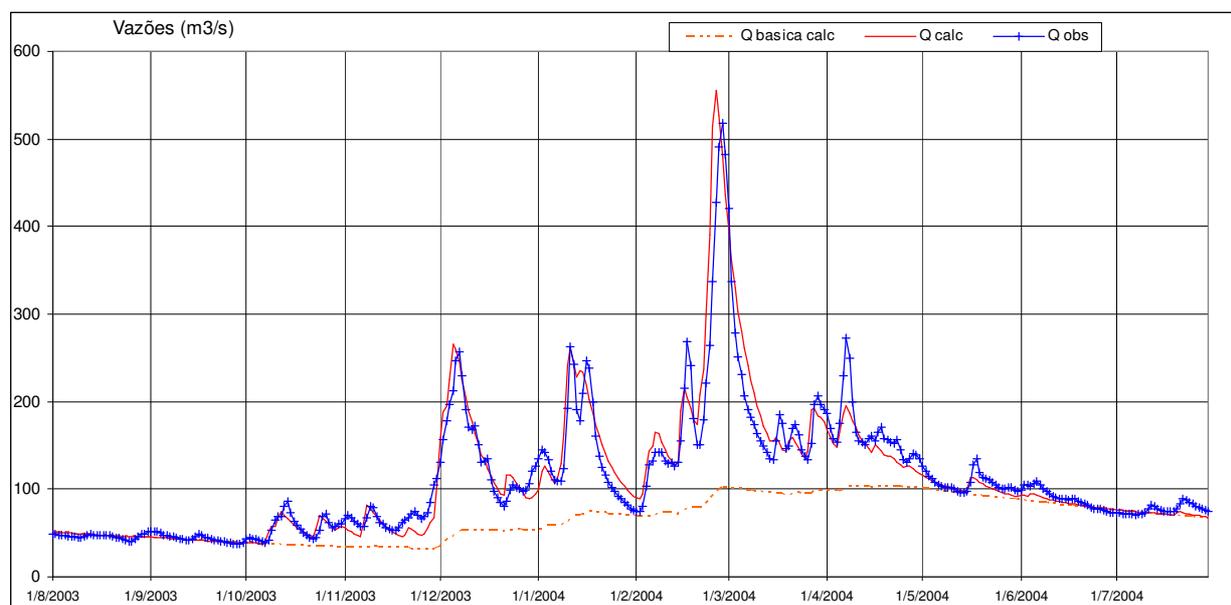


Figura 8 - Calibração dos parâmetros do modelo - Período 2003/2004 - Sub-bacia de Camargos

A tabela 5 apresenta os parâmetros finais e os resultados obtidos na calibração do modelo para cada uma das sete sub-bacias consideradas nos estudos.

Tabela 5 - Parâmetros e resultados obtidos na calibração do modelo

PARÂMETRO	SUB-BACIA						
	Camargos	Funil	P.dos Buenos	Paraguaçu	Furnas	Faz.C.Escuro	P.Colômbia
Str	100	125	110	115	85	240	115
Capc	42	46	42	50	44	46	42
Crec	100	100	100	100	100	100	100
K2t	5,5	3,9	4,0	5,5	6,5	5,0	8,0
Kkt	150	135	150	140	140	80	100
H	-	-	50	55	-	-	-
K1t	-	-	28	45	-	-	-
K3t	-	-	10	0,2	-	-	-
kt ₍₋₃₎	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
kt ₍₋₂₎	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
kt ₍₋₁₎	0,00	0,05	0,36	0,36	0,25	0,15	0,05
kt ₍₀₎	0,33	0,50	0,34	0,44	0,25	0,25	0,11
kt ₍₊₁₎	0,67	0,45	0,30	0,20	0,50	0,60	0,84
kep	1,01	1,10	0,95	0,97	1,07	0,92	1,10
Erro médio %	11	12	11	11	16	11	12
Erro médio m ³ /s	14	17	15	19	38	9	34

4.3 Etapa de testes de desempenho do modelo

A etapa de testes de desempenho do modelo é realizada com períodos distintos dos utilizados na etapa anterior. O objetivo é a verificação do desempenho do modelo em situações semelhantes às que ocorrerão na fase de operacionalização do mesmo (operação em tempo real), com uma rede de estações pluviométricas de menor densidade (só as que disponibilizam dados diariamente) do que a utilizada na calibração/validação, e com a incorporação das previsões de precipitação para dez dias à frente (de forma diferente da etapa anterior, onde foram utilizados apenas valores observados de precipitação).

O modelo SMAP opera de forma discreta no tempo. A cada intervalo de tempo, há incorporação de precipitação média na bacia, contabilização de perdas por evaporação, liberação de escoamentos e atualização do nível d'água em cada um dos quatro reservatórios. Após algum tempo de uso, é normal a ocorrência de desvios entre o hidrograma de vazões observadas e o hidrograma de vazões calculadas pelo modelo. Em relação às vazões calculadas, esses desvios, em geral, são devidos aos seguintes fatores: erro ou falha nos dados observados de precipitação; não representatividade ou baixa densidade da rede de estações pluviométricas considerada na etapa de testes; não representatividade dos dados de evapotranspiração potencial; deficiência dos parâmetros do modelo obtidos nas etapas de calibração/validação; e deficiência nas formulações básicas do modelo.

Caso esses desvios não sejam corrigidos, ou seja, caso não haja um ajuste razoável entre o hidrograma de vazões observadas e o hidrograma de vazões calculadas pelo modelo em um período significativo de dias anteriores ao dia da previsão, a qualidade das vazões previstas poderá ser comprometida. Este ajuste pode ser obtido a partir da reinicialização do modelo com a aplicação de dois métodos: o ajuste das variáveis de estado iniciais do modelo; e o ajuste dos valores da precipitação observada a serem considerados pelo modelo.

O primeiro método baseia-se no emprego de um algoritmo de otimização para o cálculo das variáveis de estado - R_{sub} , R_{sup} e R_{sup2} , no início do período de 31 dias anteriores ao dia da previsão, com vistas à minimização dos desvios entre os hidrogramas observado e calculado neste período. O segundo método, utilizado com sucesso nas bacias incrementais da UHE Lajeado [De Jesus (2001)] e da UHE Itaipu [Fadiga *et al.* (2008)], consiste no uso do modelo de forma reversa, calculando-se, por meio de um algoritmo de otimização, os valores da precipitação observada - $P^*(t)$ a serem considerados pelo modelo, também com vistas à minimização dos desvios entre os hidrogramas observado e calculado no período de 31 dias anteriores ao dia da previsão. Nos dois métodos, é conveniente impor limites, tanto no ajuste das variáveis de estado iniciais, como no ajuste dos valores de precipitação a serem considerados no modelo, fixando-se percentuais mínimos e máximos a serem aplicados, respectivamente, nas variáveis de estado, calculadas na simulação da semana anterior ao dia da previsão, e nas chuvas médias na bacia, calculadas com base nas estações consideradas na etapa de testes. Neste estudo, optou-se pela utilização concomitante dos dois métodos, já que o desempenho de ajuste das variáveis de estado é melhor no período de chuvas fracas ou nulas e o desempenho do método de ajuste das chuvas médias nas sub-bacias é melhor no período de chuvas de intensidade moderada e forte.

5 RESULTADOS

Os testes de desempenho do modelo SMAP, aplicado à bacia do alto/médio Grande, envolveram um total de 208 simulações (4 anos x 52 semanas) para cada uma das sete sub-bacias consideradas nos estudos, utilizando a metodologia descrita anteriormente. Os testes foram realizados considerando sempre a quarta-feira como o dia da elaboração da previsão, com um horizonte de dez dias à frente. Nos processos do ONS, considera-se sempre a semana operativa de sábado a sexta-feira. Dessa forma, as vazões médias previstas para a próxima semana operativa foram calculadas com base nas médias das vazões diárias previstas para o período entre o quarto e o décimo dia da previsão.

A metodologia atual utilizada para obtenção da previsão de vazões da próxima semana operativa (uma semana à frente), na bacia do alto/médio rio Grande, é realizada a partir do uso do

modelo estocástico univariado PREVIVAZ [CEPEL (2004)], que não considera informações de previsão de precipitação e nem informações de chuva e vazões observadas em estações existentes na bacia. As previsões de vazões das bacias incrementais, necessárias para alimentação dos modelos utilizados pelo ONS nos processos de programação e planejamento da operação do SIN, são calculadas pela diferença entre as previsões de vazões totais obtidas em locais de aproveitamentos.

As comparações entre os desempenhos da metodologia atual e da nova metodologia (metodologia proposta com correção do viés da previsão de precipitação) foram feitas em relação às vazões previstas na sub-bacia de Camargos e nas bacias incrementais Funil/Camargos, Furnas/Funil e Porto Colômbia/Furnas. Além dessas quatro bacias, foram comparadas as vazões previstas para a bacia total de Furnas, apenas para auxílio à análise dos resultados das duas metodologias, já que os modelos de programação e planejamento da operação, utilizados pelo ONS, trabalham com séries de vazões incrementais, sendo as mesmas obtidas, atualmente, por diferença entre as previsões de vazões totais.

As figuras 9 a 12 apresentam as previsões de vazões da próxima semana operativa (4º ao 10º dia) para a bacia total de Furnas, em cada um dos quatro anos utilizados na etapa de testes de desempenho. Na figura 13 observa-se a comparação dos resultados obtidos nas previsões com as duas metodologias. A figura 14 apresenta os erros médios absolutos referentes às previsões com as duas metodologias. A tabela 6 apresenta os principais resultados obtidos nas simulações das previsões de vazões da próxima semana operativa, com a aplicação da metodologia atual e da nova metodologia.

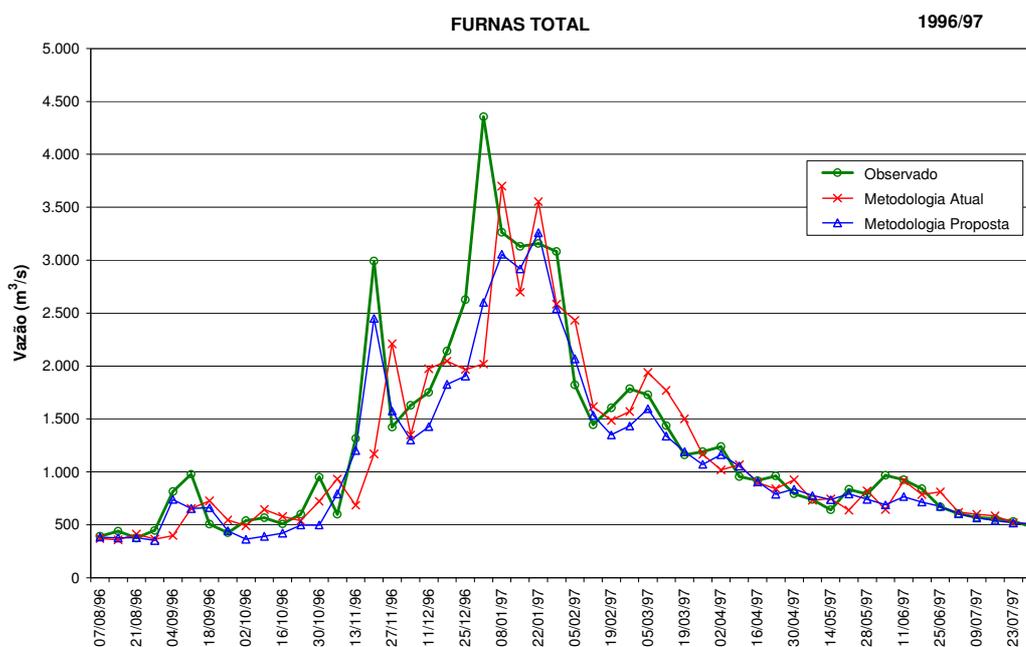


Figura 9 - Previsão de vazões da próxima semana operativa - Bacia total de Furnas - 1996/97

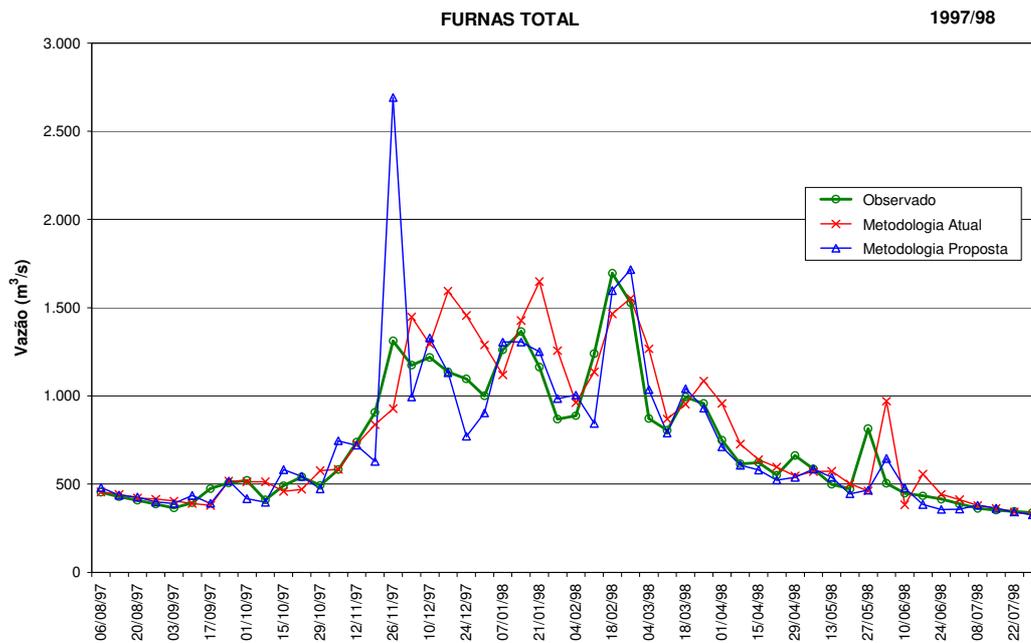


Figura 10 - Previsão de vazões da próxima semana operativa - Bacia total de Furnas - 1997/98

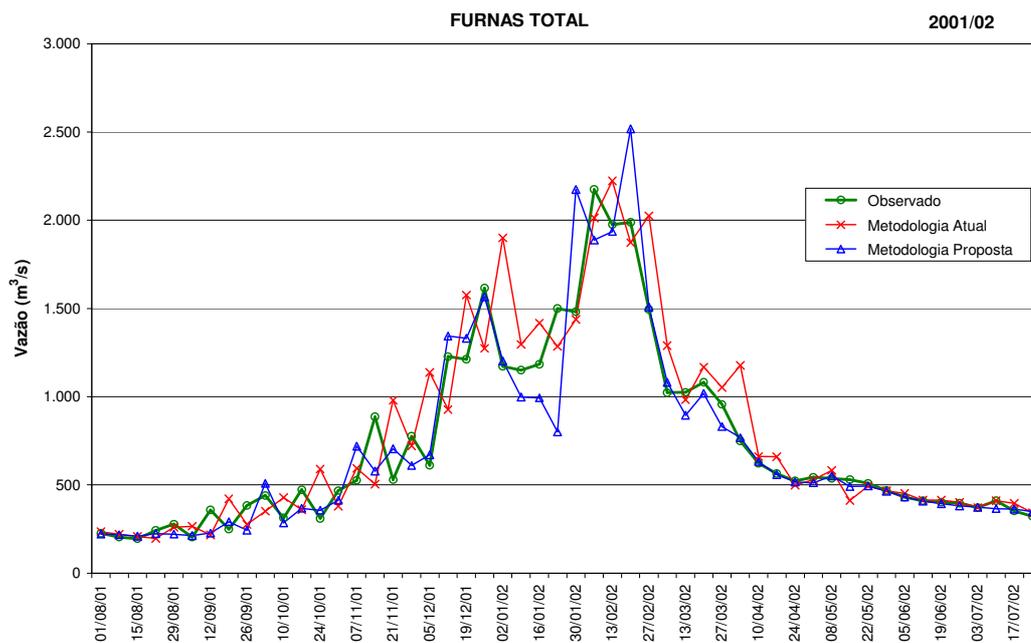


Figura 11 - Previsão de vazões da próxima semana operativa - Bacia total de Furnas - 2001/02

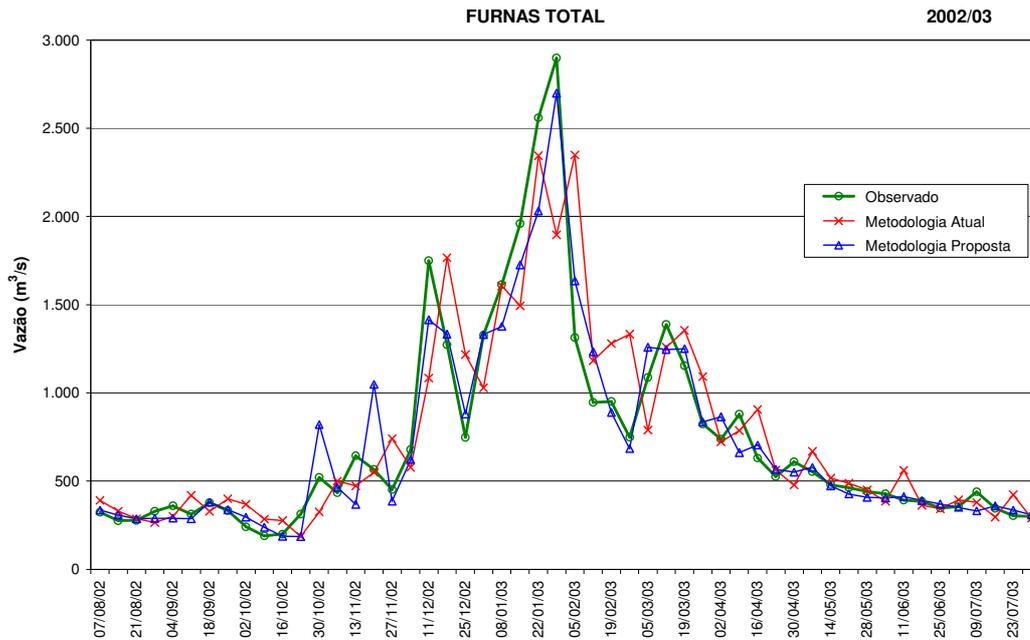


Figura 12 - Previsão de vazões da próxima semana operativa - Bacia total de Furnas - 2002/03

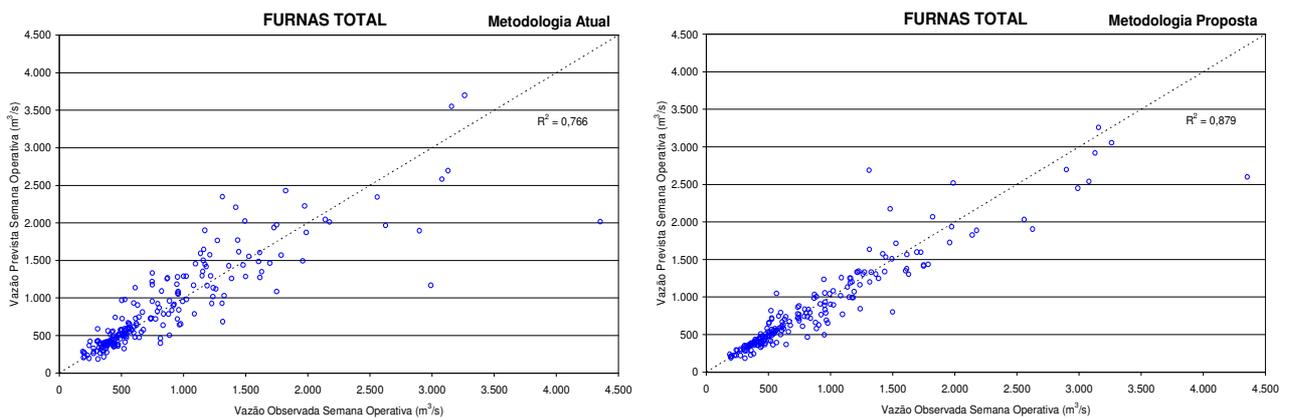


Figura 13 - Resultados obtidos com as duas metodologias - Bacia total de Furnas

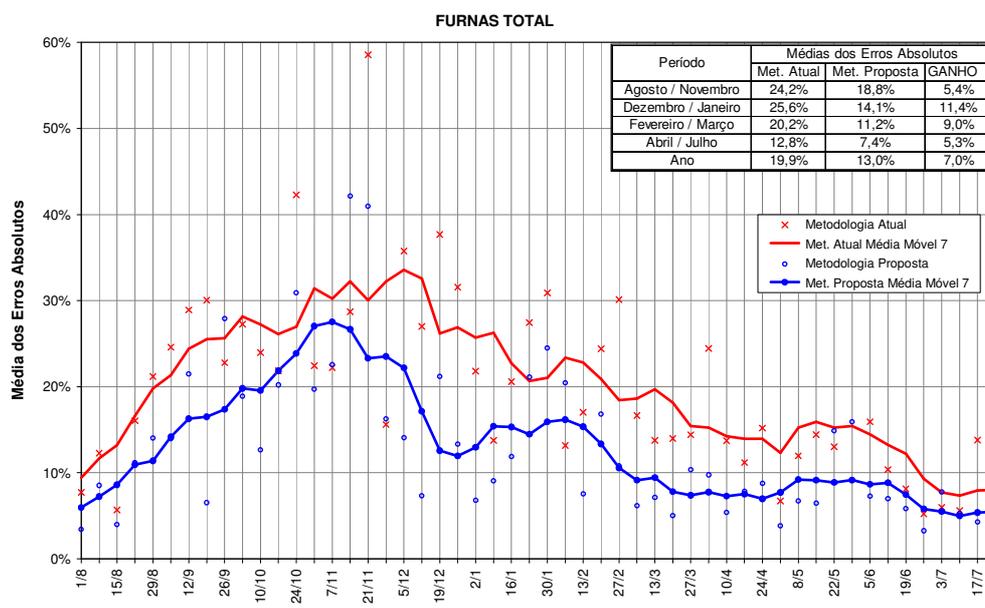


Figura 14 - Média dos erros absolutos na previsão de vazões - Bacia total de Furnas

Bacia	Erros Médios MAPE		Coef. de determin. r^2		Erros maiores que 40%		Ganhos c/ uso da metodologia proposta			
	Metodologia		Metodologia		Metodologia		Diminuição dos erros médios (%)	Freq. (%)	Melhoras maiores que 30% (%)	Pioras maiores que 30% (%)
	Atual (%)	Proposta (%)	Atual	Proposta	Atual (%)	Proposta (%)				
Camargos	18,6	16,0	0,753	0,768	12	8	2,6	59	10	3
Incremental Funil/Camargos	25,8	15,6	0,471	0,632	19	10	10,2	63	15	3
Incremental Furnas/Funil	22,6	14,8	0,766	0,882	15	7	7,8	61	13	3
Incremental Porto Colômbia/Furnas	41,9	14,8	0,605	0,858	37	6	27,1	79	33	1
Furnas Total	19,9	13,0	0,766	0,879	14	5	7,0	63	12	2

Tabela 6 - Principais resultados obtidos nas simulações das previsões de vazões da próxima semana

6 CONCLUSÕES

A metodologia proposta para a previsão de vazões da próxima semana operativa envolve: a utilização do modelo determinístico SMAP, de forma semiconcentrada (dividido em sub-bacias), com o uso de observações de estações fluviométricas e pluviométricas existentes na bacia; o uso de informações de previsão de precipitação (com remoção de viés); a reinicialização do modelo para proporcionar um ajuste adequado entre os hidrogramas de vazões observadas e calculadas pelo modelo no período anterior ao dia da previsão; a utilização de séries de vazões incrementais e, em consequência, a previsão direta das vazões incrementais.

Após as simulações da aplicação desta metodologia proposta, pode-se concluir que:

- De forma geral, o uso de previsões de precipitação traz ganho significativo nos resultados das previsões de vazões. Contudo, foi verificado um viés positivo nas previsões fornecidas pelo modelo ETA (tendência de superestimar os valores da precipitação prevista), sendo desenvolvida, nestes estudos, uma metodologia para identificação e eventual remoção deste viés, que poderá ser utilizada em qualquer bacia do SIN.
- A comparação entre os desempenhos da metodologia proposta e da metodologia atual mostrou, de forma geral, um ganho significativo nos resultados das previsões das vazões da próxima semana operativa com o uso da metodologia proposta, a saber: redução significativa dos erros médios da previsão de vazões em todas as bacias e em todos os períodos do ano; e redução significativa da ocorrência de grandes erros da previsão.

7 BIBLIOGRAFIA

- BLACK, T.L. (1994). "NMC Notes: The new NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. *Weather and Forecasting*", pp. 256-278.
- BORIM, S.; CATALDI, M.; BRAGA, R.S. (2008). "Previsão de vazões naturais semanais com a aplicação de redes neurais e mineração de dados como complemento de um modelo estocástico:

- estudo de caso para a bacia do rio Uruguai*", Anais do II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, Out. 2008.
- BRAGA, R.S.; ROCHA, V.F.; GONTIJO, E.A. (2005). "Revisão das séries de vazões naturais nas principais bacias hidrográficas do Sistema Interligado Nacional", Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Nov. 2005.
- CATALDI, M.; MACHADO, C.O. (2004). "Avaliação da previsão de precipitação utilizando a técnica de Downscale do modelo ETA e suas aplicações no setor elétrico" Anais do XIII Congresso de Meteorologia, 2004.
- CATALDI, M.; MACHADO, C.O.; GUILHON, L.G.F.; CHOU, S.C.; GOMES, J.L.; BUSTAMANTE, J.F. (2007). "Análise das previsões de precipitação obtidas com a utilização do modelo Eta como insumo para modelos de previsão semanal de vazão natural", RBRH, vol.12, nº3, Jul/Set 2007, pp. 5-12.
- CEPEL (2004). "Modelo de previsão de vazões semanais aplicado ao sistema hidroelétrico brasileiro – Modelo Previvaz - Manual de Referência".
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T.; CORBO, M.D.; SILVA, B. C. da; COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D.; PAZ, A.R.da (2007). "Modelo hidrológico distribuído para previsão de vazões incrementais na bacia do rio Paranaíba entre Itumbiara e São Simão". RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol.12, nº3, pp. 43-55.
- DE JESUS, R.M.R. (2001). "Sistema de previsão hidrológica do AHE Lajeado - Relatório interno", THEMAG/INVESTCO".
- FADIGA, F.M.Jr.; LOPES, J.E.G.; MARTINS, J.R.S.; DE BARROS, M.T.L.; DOS SANTOS, R.C.P. (2008). "Modelos de previsão de vazões para a bacia incremental à UHE Itaipu". RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol.13, nº2, pp. 65-76.
- GUILHON, L.G.F.; ROCHA, V.F.; MOREIRA, J.C. (2007). "Comparação de métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidroelétricos", RBRH, vol.12, Nº3, pp. 13-20.
- HAN, J.; KAMBER, M. (2000). *Data Mining: Concepts and Techniques*, Morgan Kaufmann Publishers.
- LOPES, J.E.G.; BRAGA, B.P.F.; CONEJO, J.G.L. (1982). *SMAP - A simplified hydrological model, applied modelling in catchment hydrology*, Ed. V.P.Singh: Water Resources Publications.
- ONS (2005). "Processos de consistência e de consolidação de dados hidráulicos, hidrológicos e hidroenergéticos", NT 076/2005, 26p.
- ONS (2008). "Metodologia para a previsão de vazões uma semana à frente na bacia do alto/médio rio Grande", NT 139/2008, 102p.
- ONS/FEC (2005). "Desenvolvimento de modelo de previsão de vazões com incorporação de informações de precipitação - Bacia do rio Iguaçu - Relatório Final de Metodologia", 151p.
- ONS/HICON (2004). "Estudo de consistência e reconstituição de séries de vazões naturais na bacia do rio Grande - Relatório Final".