

PREVISÃO HIDROLÓGICA DE VAZÕES PARA A CIDADE DE GOVERNADOR VALADARES UTILIZANDO MODELO LINEAR DE PROPAGAÇÃO

Alice Silva de Castilho¹, Lília Maria de Oliveira²

Resumo - Sistema de alerta contra enchentes é uma medida não estrutural adotada na minimização de prejuízos causados por cheias nas bacias hidrográficas. A CPRM/SUREG-BH tem operado por três anos consecutivos um sistema de alerta na bacia do rio Doce durante o período chuvoso. Este sistema consiste na coleta e análise de dados de diversas entidades, elaboração de previsão hidrológica e transmissão de informações. Para a cidade de Governador Valadares utiliza-se previsão hidrológica de vazões baseada em modelo linear de propagação.

Abstract - Flood warning system is a not structural procedure utilised to minimise the damages caused by inundation in the hydrological basins. CPRM – Brazilian Geological Survey has operated for three years a flood warning system in Doce River Basin during the rainy season. This System consists in data collection and analysis for different organisms, elaboration of hydrological predictions and transmission of information. The hydrological prediction of Governador Valadares city is based in a linear propagation model.

Palavras-Chave – Previsão hidrológica, modelo linear de propagação, sistema de alerta.

INTRODUÇÃO

A bacia do rio Doce está situada na região sudeste brasileira e possui uma área de drenagem de 83.400 km², 86% dentro do Estado de Minas Gerais e 14% dentro do Estado do Espírito Santo.

¹ CPRM – Serviço Geológico do Brasil – Av. Brasil, 1731 – Funcionários – Belo Horizonte – Minas Gerais – Brasil – CEP: 30.140.002 – Tel: 31- 3261-0378 – Fax: 31-3261-4484 – alice@cprmbh.gov.br

² CPRM – Serviço Geológico do Brasil – Av. Brasil, 1731 – Funcionários – Belo Horizonte – Minas Gerais – Brasil – CEP: 30.140.002 – Tel: 31- 3261-0378 – Fax: 31-3261-4484 – lilia@cprmbh.gov.br

Em fevereiro de 1979 ocorreu uma grande cheia que incentivou a criação, em dezembro de 1981, de um Grupo Interministerial de Trabalho com o objetivo de realizar estudos de prevenção e controle de cheias na bacia do rio Doce. Este grupo relacionou não só medidas estruturais para este controle, como também não estruturais, destacando-se, dentre elas a criação e operação de um sistema de alerta.

Assim, na década de 80, o extinto DNAEE instalou uma série de estações telemétricas na bacia com transmissão via telefone ou rádio. Já na década de 90, foram instaladas estações com transmissão via satélite e os dados disponibilizados via Internet. A rede foi criada e operada continuamente mas, um sistema de alerta capaz de coletar, analisar dados e alertar a população, em tempo hábil sobre a ocorrência de enchentes, não chegou a ser implantado.

Por outro lado, a bacia foi escolhida para o desenvolvimento de um projeto piloto de gestão de bacias hidrográficas através da Cooperação Técnica entre os governos brasileiro e francês com o objetivo de simular um sistema de gestão de recursos hídricos de acordo com o modelo francês. Este projeto foi iniciado em 1989 e finalizado em 1993, com três etapas distintas: Diagnóstico, Plano Diretor e Simulação Financeira.

Em 1996, dando continuidade ao projeto foi implantada a ADOCE - Agência Técnica da Bacia do Rio Doce, coordenada e financiada pela ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica e operada pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil.

Em janeiro de 1997, houve nova grande cheia na bacia e, a partir daí, a ADOCE começou a operar precariamente um sistema de alerta contra enchentes.

No decorrer do ano de 1997 o sistema foi aperfeiçoado e operado no período chuvoso seguinte. Nesta ocasião as cidades beneficiadas e estações telemétricas foram visitadas e nestes locais foram realizados levantamentos de seções transversais, de marcas de cheia e de características hidráulicas das seções visando à extrapolação das curvas-chaves e à definição das cotas de alerta e inundação dos pontos críticos das cidades beneficiadas.

Em meados de 1998 o projeto ADOCE foi interrompido e conseqüentemente os trabalhos para a melhoria do sistema de alerta também.

Devido a esforços conjuntos da CPRM, ANEEL e IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas garantiu-se a operação do sistema nos períodos de dezembro de 1998 a março de 1999 e dezembro de 1999 a março de 2000, quando foi possível, além da operação do sistema, a realização da análise de frequência das vazões máximas das estações telemétricas, a estimativa do tempo de retorno das cotas de alerta, de inundação e de grandes cheias na bacia do rio Doce, a análise de frequência da incidência de vazões de alerta e inundação e a avaliação da previsão hidrológica.

DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A operação do Sistema de Alerta foi composta pelas seguintes etapas: coleta de dados, armazenamento, análise, elaboração da previsão hidrológica e meteorológica, transmissão das informações.

O Sistema de Alerta implantado funcionou nas dependências da CPRM-SUREG/BH onde foram coletados dados de estações hidrometeorológicas da ANEEL, CEMIG e SIMGE – Sistema de Meteorologia e Recursos Hídricos de Minas Gerais, além das vazões defluentes de usinas hidroelétricas pertencentes à Alcan, Belgo Mineira, CEMIG e ESCELSA.

Estes dados foram analisados e repassados diariamente via fax para os 16 municípios beneficiados pelo Sistema: Ponte Nova, Nova Era, Antônio Dias, Timóteo, Coronel Fabriciano, Ipatinga, Governador Valadares, Tumiritinga, Itueta, Resplendor, Galiléia, Conselheiro Pena, Aimorés, Baixo Guandu, Colatina e Linhares.

Os pontos de coleta de dados do Sistema foram os mais diversos, a saber (Tabela 01 e Figura 01) :

- 07 estações fluviométricas e pluviométricas da ANEEL com transmissão automática via telefone;
- 04 estações fluviométricas e pluviométricas da ANEEL com transmissão via rádio pelo observador;
- 01 estação fluviométrica da ANEEL com transmissão via telefone pelo observador;
- 06 usinas hidrelétricas: uma da Alcan, uma da Belgo Mineira, três da CEMIG e uma da ESCELSA com transmissão de dados de vazão defluente via telefone por operadores;
- 04 estações pluviométricas da CEMIG com transmissão via telefone por operadores;
- 03 estações pluviométricas do SIMGE com transmissão via satélite pela Internet.

Além disso, o SIMGE elaborou, diariamente, a previsão meteorológica para a bacia contendo a última imagem de satélite disponível na Internet, o total precipitado no dia anterior e a previsão de chuva para os quatro dias subseqüentes.

Figura 1- Diagrama Unifilar do Sistema de Alerta da Bacia do Rio Doce

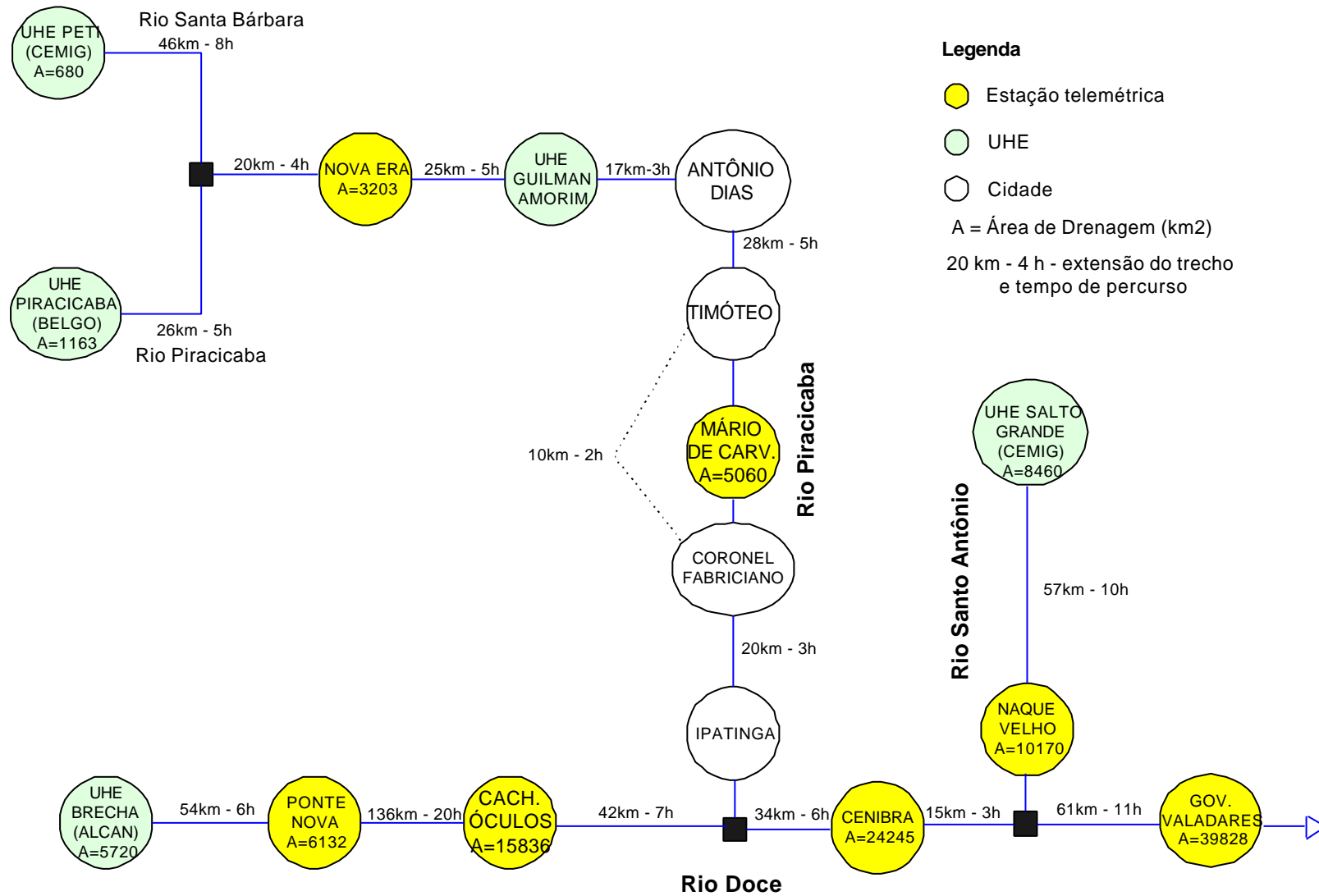


Figura 1- Diagrama Unifilar do Sistema de Alerta da Bacia do Rio Doce - continuação

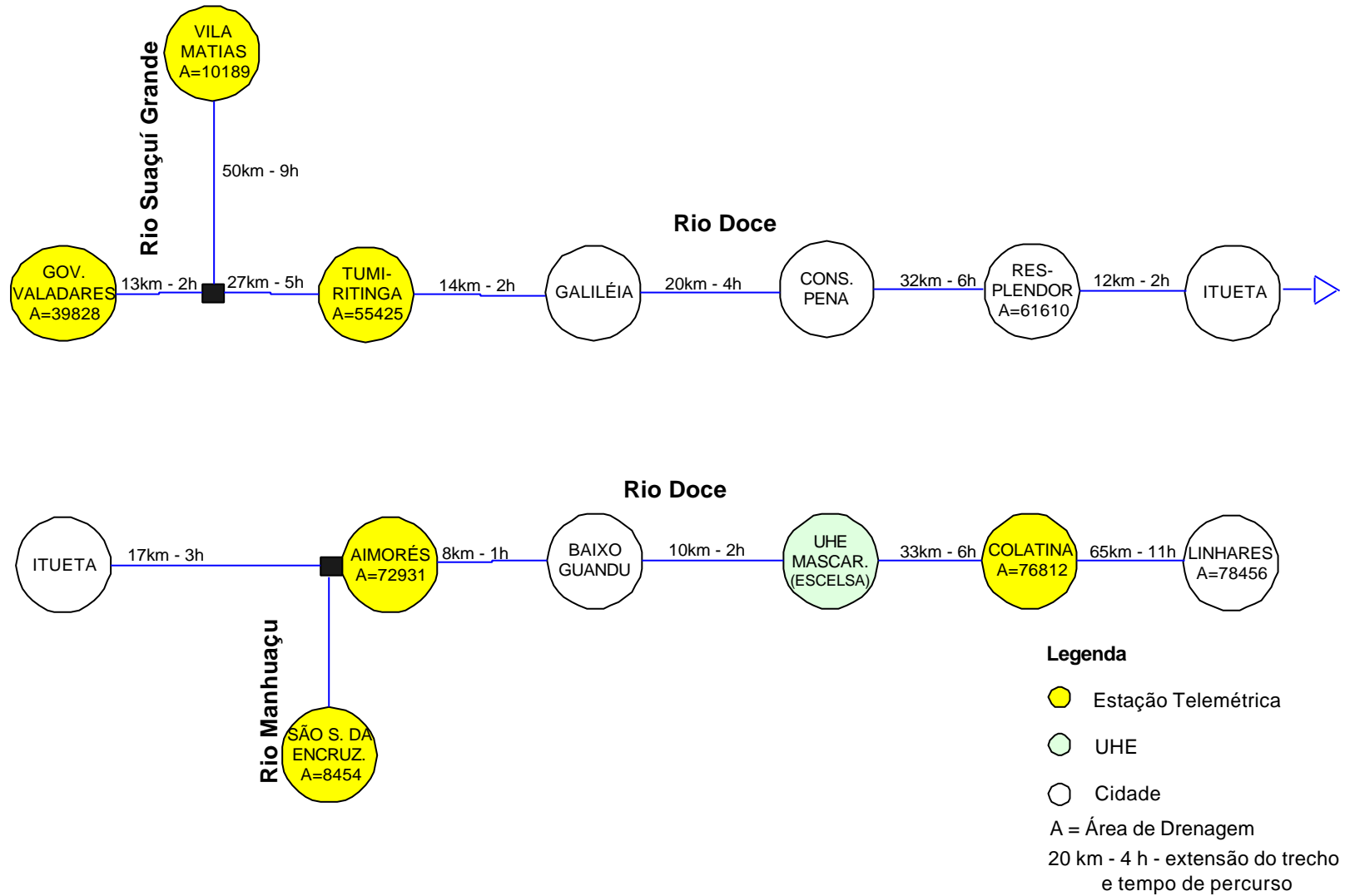


Tabela 01 – Pontos de Monitoramento do Sistema de Alerta.

Estação	Entidade	Tipo de Transmissão	Tipo de Dado	Rio/Município
UHE Brecha	Alcan	Telefone	Vazão	Rio Piranga
Viçosa	IGAM	Satélite	Precipitação	Viçosa
Ponte Nova Jusante	ANEEL	Automática	Cota e Precipitação	Rio Piranga
Cachoeira dos Óculos Montante	ANEEL	Rádio	Cota e Precipitação	Rio Doce
UHE Peti	CEMIG	Telefone	Vazão e Precipitação	Rio Santa Bárbara
UHE Piracicaba	Belgo Mineira	Telefone	Vazão	Rio Piracicaba
São Gonçalo do Rio Acima	CEMIG	Telefone	Precipitação	Barão de Cocais
Nova Era IV	ANEEL	Telefone	Cota	Rio Piracicaba
Guilman Amorim	CEMIG	Telefone	Vazão	Rio Piracicaba
Mário de Carvalho	ANEEL	Automática	Cota e Precipitação	Rio Piracicaba
Ipatinga	IGAM	Satélite	Precipitação	Ipatinga
Cenibra	ANEEL	Automática	Cota e Precipitação	Rio Doce
Fazenda Meloso	CEMIG	Telefone	Precipitação	Rio Guanhães
Fazenda Ouro Fino	CEMIG	Telefone	Precipitação	Rio Santo Antônio
UHE Salto Grande	CEMIG	Telefone	Vazão	Rio Santo Antônio
Naque Velho	ANEEL	Rádio	Cota e Precipitação	Rio Santo Antônio
Governador Valadares	ANEEL	Automática	Cota e Precipitação	Rio Doce
Vila Matias Montante	ANEEL	Automática	Cota e Precipitação	Rio Suaçuí Grande
Tumiritinga	ANEEL	Rádio	Cota e Precipitação	Rio Doce
Caratinga	IGAM	Satélite	Precipitação	Caratinga
São Sebastião da Encruzilhada	ANEEL	Rádio	Cota e Precipitação	Rio Manhuaçu
Aimorés Casa de Bombas	ANEEL	Automática	Cota e Precipitação	Rio Doce
UHE Mascarenhas	ESCELSA	Telefone	Vazão	Rio Doce
Colatina Corpo de Bombeiros	ANEEL	Automática	Cota e Precipitação	Rio Doce

METODOLOGIA

A previsão hidrológica de vazões em tempo real pode ser feita utilizando modelo linear de propagação, da forma:

$$Q_{t+\tau} = aI_t + bQ_t + c \quad (1)$$

Onde:

$Q_{t+\tau}$ - vazão de saída no trecho no tempo $t + \tau$

Q_t - vazão de saída no trecho no tempo t

I_t - vazão de entrada no trecho no tempo t

Os parâmetros a , b , c podem ser estimados com base K e X do modelo de Muskingun, que estão relacionados com as características do trecho. Esta estimativa pode ser gráfica ou com base nos mínimos quadrados. Ressalta-se que esta equação também expressa uma equação de regressão múltipla.

Na escolha do período a ser calibrado deve-se levar em conta de preferência somente o hidrograma de cheia, pois em previsão em tempo real, não é importante que o modelo se ajuste bem no período de recessão.

Na avaliação da equação ajustada para a previsão em tempo real é necessário analisar os seguintes aspectos:

1. Plotagem dos hidrogramas observado e calculado com atenção especial na subida dos hidrogramas;
2. Cálculo das seguintes estatísticas a serem analisadas em conjunto

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [(Q_o(t+\tau) - Q_c(t+\tau))]^2}{\sum_t [Q_o(t+\tau) - Q_m]^2} \quad (2)$$

$$RD = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [(Q_o(t+\tau) - Q_c(t+\tau))]^2}{\sum_t [Q_o(t+\tau) - Q_o(t)]^2} \quad (3)$$

Onde:

R^2 - coeficiente de Nash

RD – coeficiente RD

Q_o – vazão observada

Q_c – vazão calculada

t – tempo

Segundo Tucci (1998) a estatística R^2 compara a redução do desvio quadrático do erro do modelo com o desvio quadrático do modelo alternativo de prever sempre a média dos valores. Mas no caso de previsão de vazões em tempo real, não existe nenhuma lógica em prever sempre a média. Portanto a estatística RD, complementa a anterior, pois compara a redução do desvio quadrático do erro do modelo com o desvio quadrático do modelo de prever o valor atual.

Quanto mais próximo de 1 o valor de R^2 , melhor o ajuste do modelo, desde que RD não apresente valores negativos, pois neste caso o modelo prevê valores de vazão no tempo $t+\tau$ muito diferentes do que a vazão no tempo t ao longo do hidrograma de cheia.

3. Cálculo do erro padrão (EP) e comparação com a vazão do hidrograma;

$$EP = \sqrt{\frac{1}{n(n-2)} \left[n \sum y^2 - (\sum y)^2 - \frac{[n \sum xy - (\sum x)(\sum y)]^2}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \right]} \quad (4)$$

Onde:

y – variável dependente

x – variável independente

n – tamanho da amostra

O erro padrão é uma medida na quantidade de erro da previsão de y para um x individual. No caso do modelo y é a vazão calculada Q_c e x a vazão observada Q_o .

4. Cálculo do desvio percentual - DP

$$DP = \left(\frac{Q_o - Q_c}{Q_o} \right) 100 \quad (5)$$

RESULTADOS

A previsão hidrológica em Governador Valadares pode ser feita com 12 horas de antecedência utilizando as estações de Cenibra e Naque Velho. Este tempo de antecedência foi calculado adotando como velocidade média da onda de cheia 1,5 m/s e checado através de comparação de cotagramas e fluviogramas entre as estações, discretizados a cada 2 horas para Cenibra e Governador Valadares. A área de drenagem em Governador Valadares é da ordem de 40.000 km² sendo a área monitorada através de Cenibra e Naque Velho, 34.000 km² (85%).

Em Governador Valadares foram definidas cotas de alerta e de inundação; esta foi determinada através de nivelamento topográfico do ponto mais baixo da cidade; e aquela foi definida de acordo com o tempo de subida dos hidrogramas da cheia de janeiro de 1997, discretizados a cada 12 horas. As cotas de alerta e de inundação são 330 e 370 cm e correspondem às vazões de 1830 e 2300 m³/s respectivamente.

A previsão definida anteriormente acrescentava 15 % à soma das vazões nas duas estações de montante e apresentava desvio percentual médio de 10%, foi definida através de correlação linear, e os seus resultados são apresentados nas Figuras 2, 4, 5, 6, 7 e 8.

A nova previsão foi feita através de modelo linear de propagação utilizando os dados das estações fluviométricas de Naque Velho, Cenibra e Governador Valadares.

Para a calibração e validação do modelo de previsão hidrológica foram escolhidos 6 eventos com vazões máximas acima de 1.800 m³/s, que corresponde à vazão de alerta em Governador Valadares, Tabela 2.

Tabela 2 – Características dos períodos de calibração e validação

Número do Evento	Período	Tamanho da Amostra	Q _{máx} (m ³ /s)	Período de Retorno (anos)	Erro Padrão (EP – m ³ /s)	Razão entre EP/Q _{máx} x 100%
1	05/01/91-20/04/91	212	2771,0	3	66,79	2,41
2	02/01/92-11/03/92	140	3404,0	6	59,08	1,74
3	12/12/93-15/05/94	310	1869,4	1,3	49,27	2,64
4	16/11/94-22/01/95	136	2078,2	1,5	42,41	2,04
5	17/11/96-25/01/97	140	7205,0	100	194,72	2,70
6	26/11/97-31/12/97	72	2305,0	1,9	63,73	2,76

Foi selecionado o evento 2 para o ajuste do modelo e os demais foram usados na validação. No evento 2 os coeficientes de correlação calculados entre a variável dependente e as variáveis independentes foram os seguintes:

- Vazões em Cenibra e vazões em Governador Valadares defazadas em 12 horas – 0,925;

- Vazões em Naque Velho e vazões em Governador Valadares defazadas em 12 horas – 0,892;
- Vazões em Governador Valadares defazadas em 12 horas – 0,982;
- Vazões em Cenibra e Naque Velho – 0,684;
- Soma das vazões em Cenibra e Naque Velho e as vazões em Governador Valadares – 0,958;
- Soma das vazões em Cenibra e Naque Velho e as vazões em Governador Valadares defazadas em 12 horas – 0,990.

Na tentativa de calibração do modelo linear de propagação observou-se que os resultados eram melhores quando utilizada a soma das vazões em Naque Velho e Cenibra do que as vazões nestas estações separadamente para a estimativa das vazões em Governador Valadares. Tal fato ocorre por que a estação de Naque Velho está localizada muito próxima à confluência do rio Santo Antônio com o Rio Doce, portanto a maior parte da propagação da vazão desta estação se dá no próprio Rio Doce.

A necessidade de utilização das variáveis: soma de vazões em Cenibra e Naque Velho no tempo t e vazões em Governador Valadares no tempo t para a estimativa da vazão em Governador Valadares no tempo $t + \tau$, pode ser justificada através dos coeficientes de correlação parcial, os quais são altos, conforme mostrado a seguir:

- Coeficiente de correlação parcial entre vazão em Governador Valadares no tempo $t + \tau$ e soma das vazões em Cenibra e Naque Velho no tempo t , levando-se em conta a vazão em Governador Valadares no tempo t – 0,915;
- Coeficiente de correlação parcial entre vazão em Governador Valadares no tempo $t + \tau$ e a vazão em Governador Valadares no tempo t levando-se em conta a soma das vazões em Cenibra e Naque Velho no tempo t , – 0,834.

A estimativa dos parâmetros a , b e c da equação (1) foi feita através do método dos mínimos quadrados. A equação calibrada é da seguinte forma, com coeficiente de Nash, $R^2=0,994$, e $RD=0,837$:

$$Q_{GV}(t+12) = 0,58(Q_{NV}(t)Q_{CE}(t)) + 0,40Q_{GV}(t) + 110,61 \quad (6)$$

Onde:

$Q_{GV}(t+12)$ – vazão em m^3/s em Governador Valadares no tempo $t + 12$ horas

$Q_{GV}(t)$ – vazão em m^3/s em Governador Valadares no tempo t

$Q_{NV+CE}(t)$ – soma das vazões em m^3/s em Naque Velho e Cenibra no tempo t

Verifica-se através das Figuras 2, 4, 5, 6, 7, e 8 que o modelo escolhido reproduz de maneira satisfatória a subida dos hidrogramas de cheia bem como a magnitude de seus picos. Como se pode observar na Figura 3 os desvios percentuais são distribuídos de maneira tendenciosa para vazões abaixo de 1000 m³/s, o que era de se esperar pois o modelo foi calibrado para hidrogramas de cheia.

Os valores altos do coeficiente de Nash (R^2) e RD, bem como os valores baixos da razão entre o erro padrão e a vazão máxima do evento, da ordem de 2% na calibração e de 3% na validação, reforçam a possibilidade da utilização do novo modelo na previsão hidrológica de vazões em Governador Valadares.

**Figura 2- Previsão de Níveis no Rio Doce em Governador Valadares
com Antecedência de 12 Horas - Calibração
Ano Hidrológico 91/92**

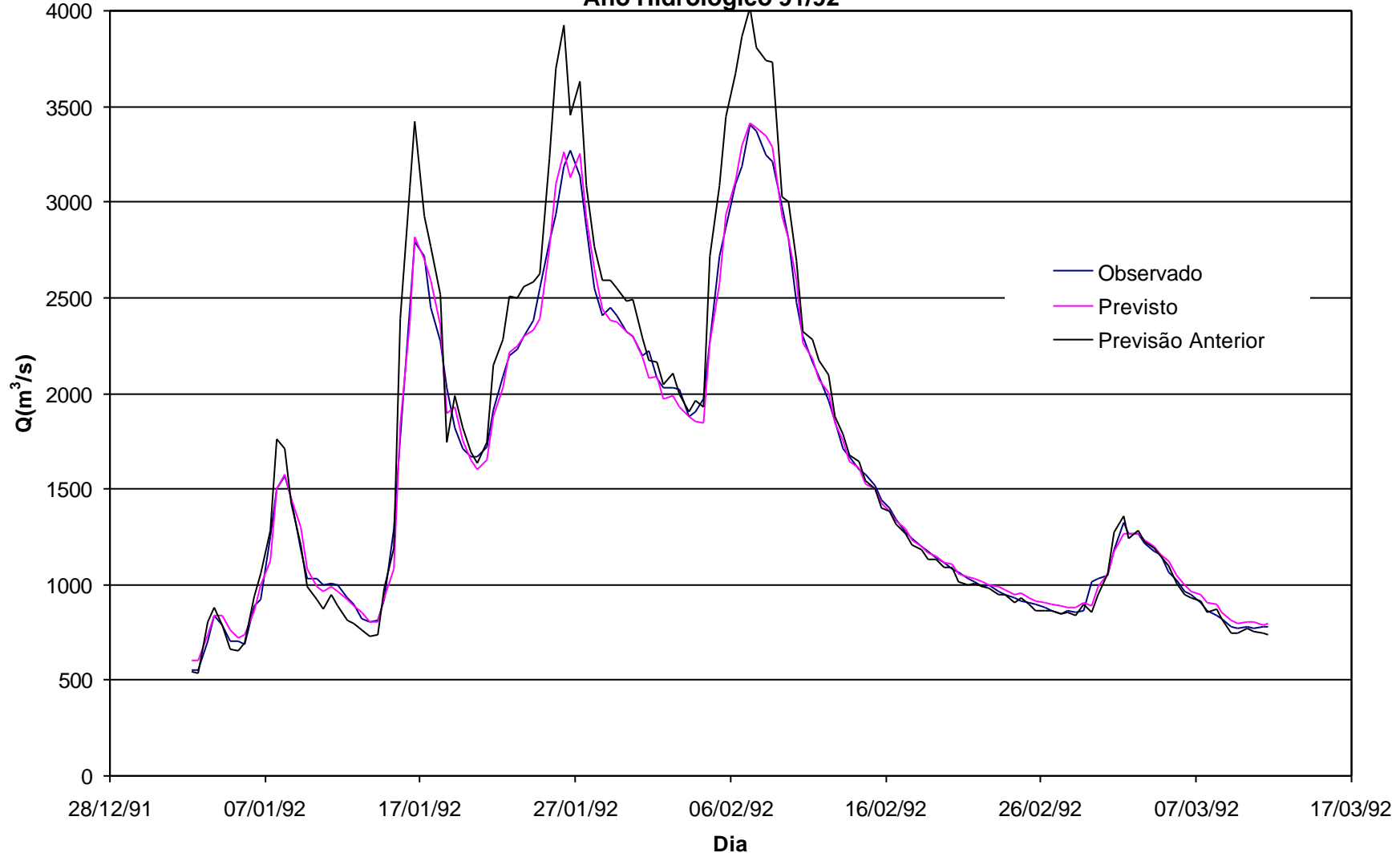
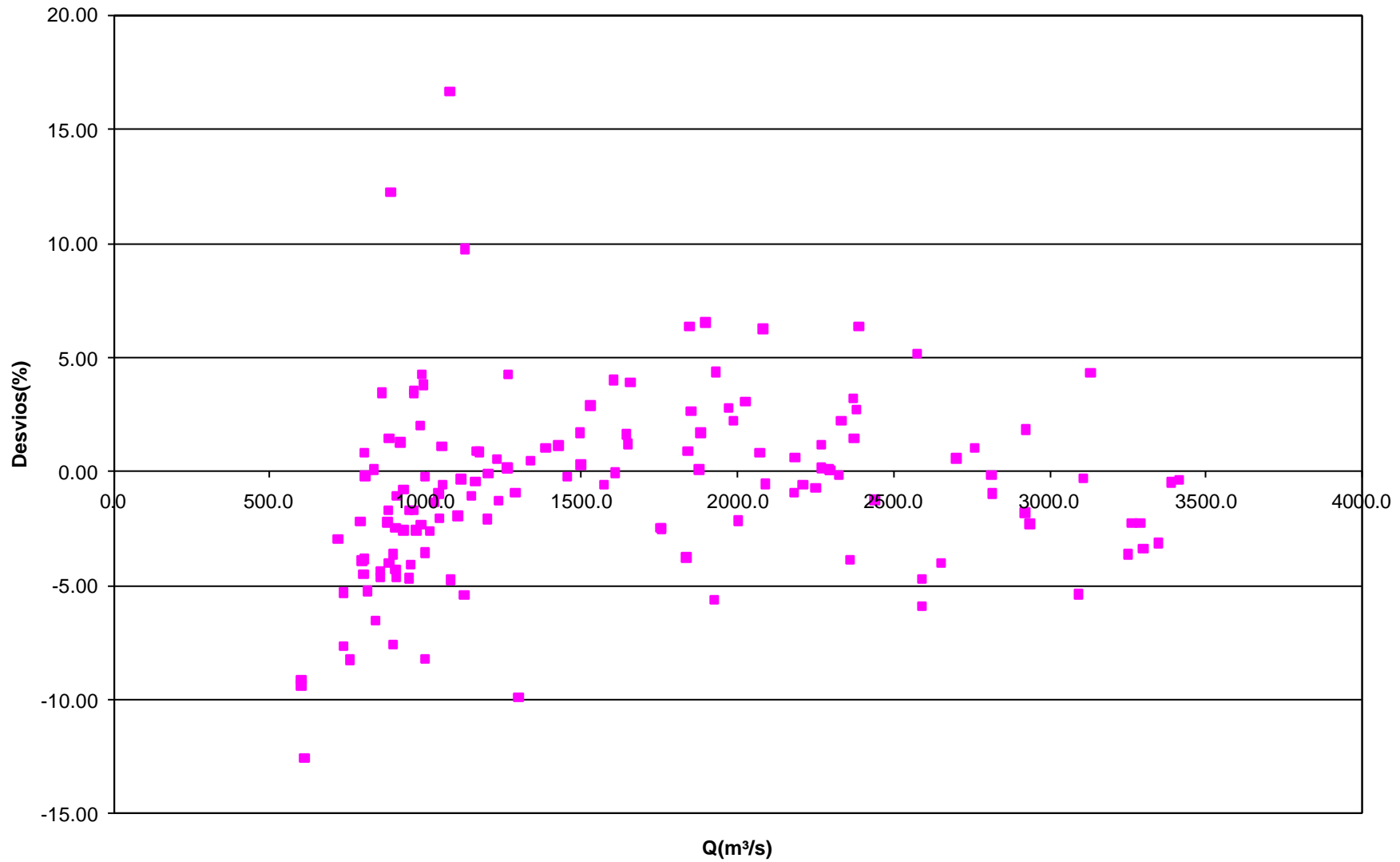
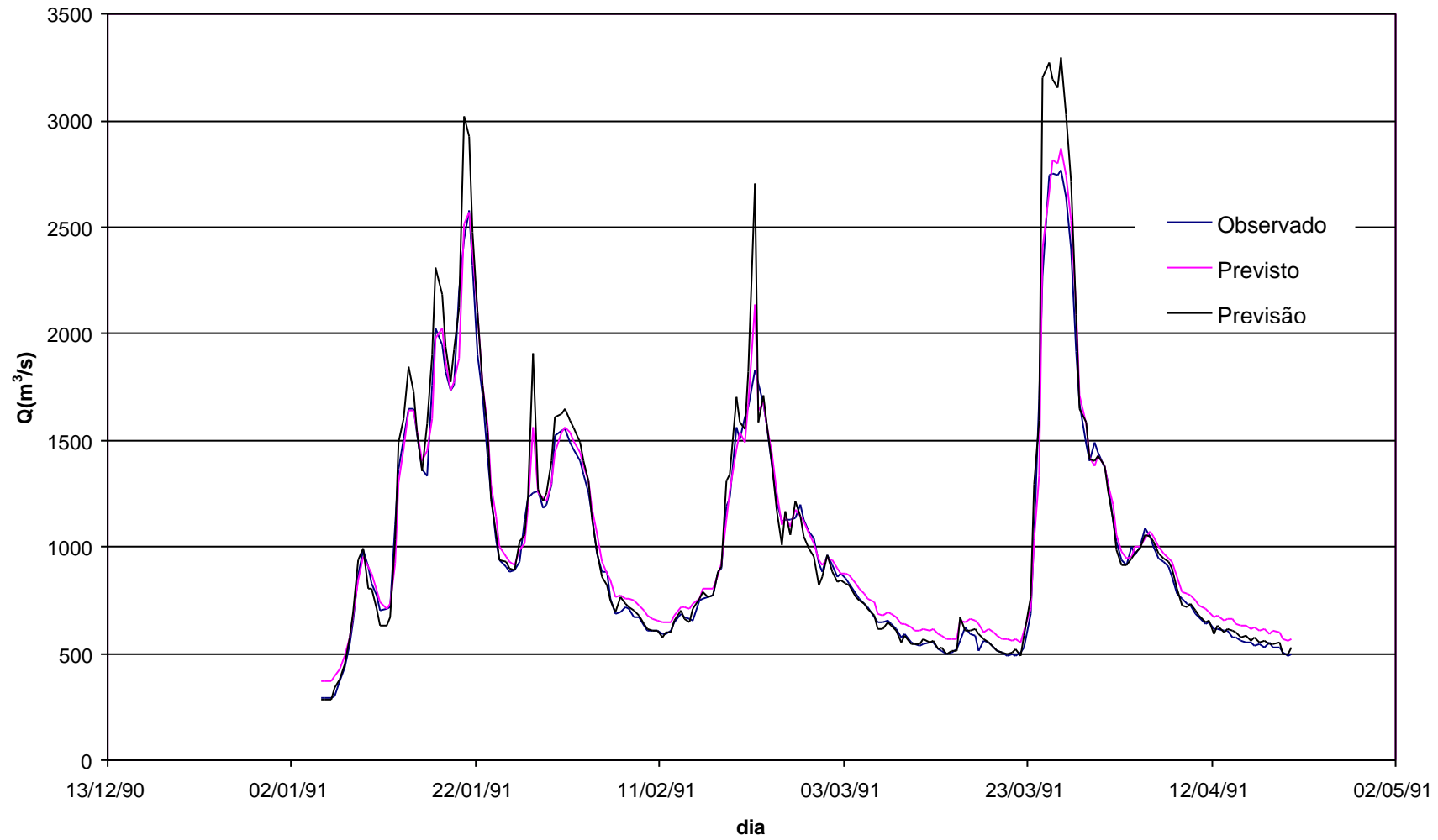


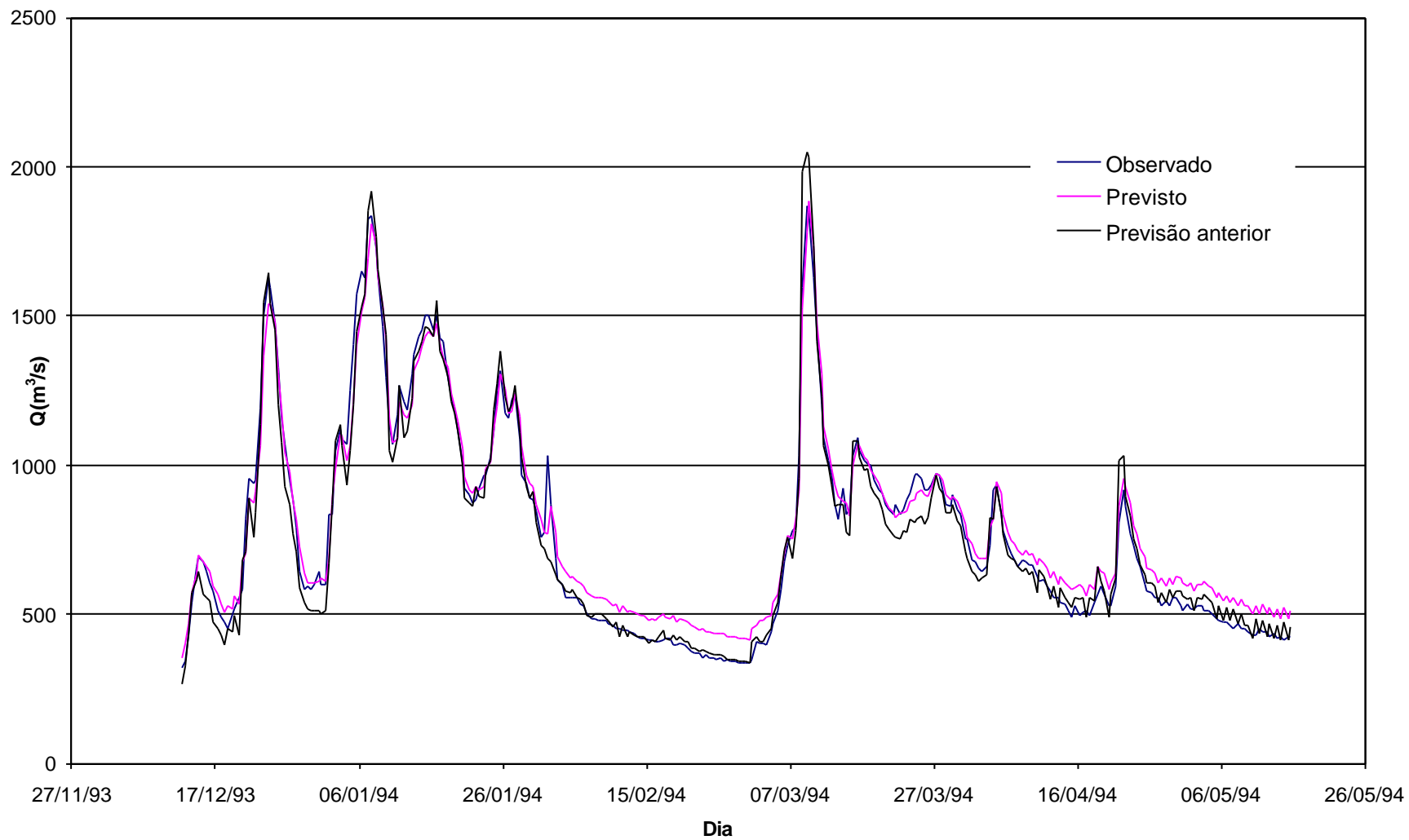
Figura 3 - Análise dos Desvios - Calibração



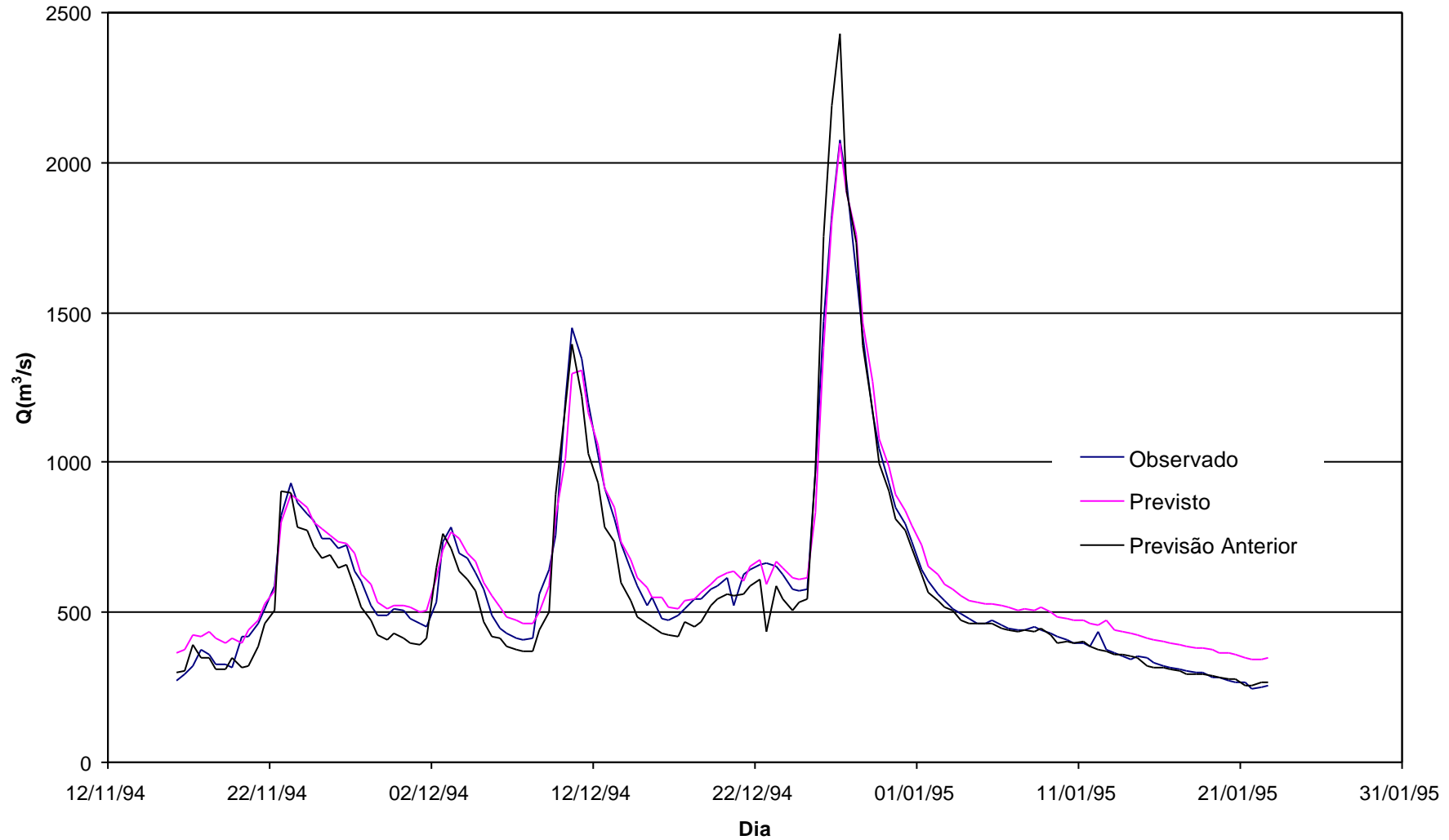
**Figura 4 - Previsão de Níveis no Rio Doce em Governador Valadares com Antecedência de 12 Horas
Ano Hidrológico 90/91- Validação**



**Figura 5 - Previsão de Níveis no Rio Doce em Governador Valadares com Antecedência de 12 Horas - Validação
Ano Hidrológico 93/94**



**Figura 6 - Previsão de Níveis no Rio Doce em Governador Valadares com Antecedência de 12 Horas - Validação
Ano Hidrológico 94/95**



**Figura 7 - Previsão de Níveis no Rio Doce em Governador Valadares com Antecedência de 12 Horas - Validação
Ano Hidrológico 96/97**

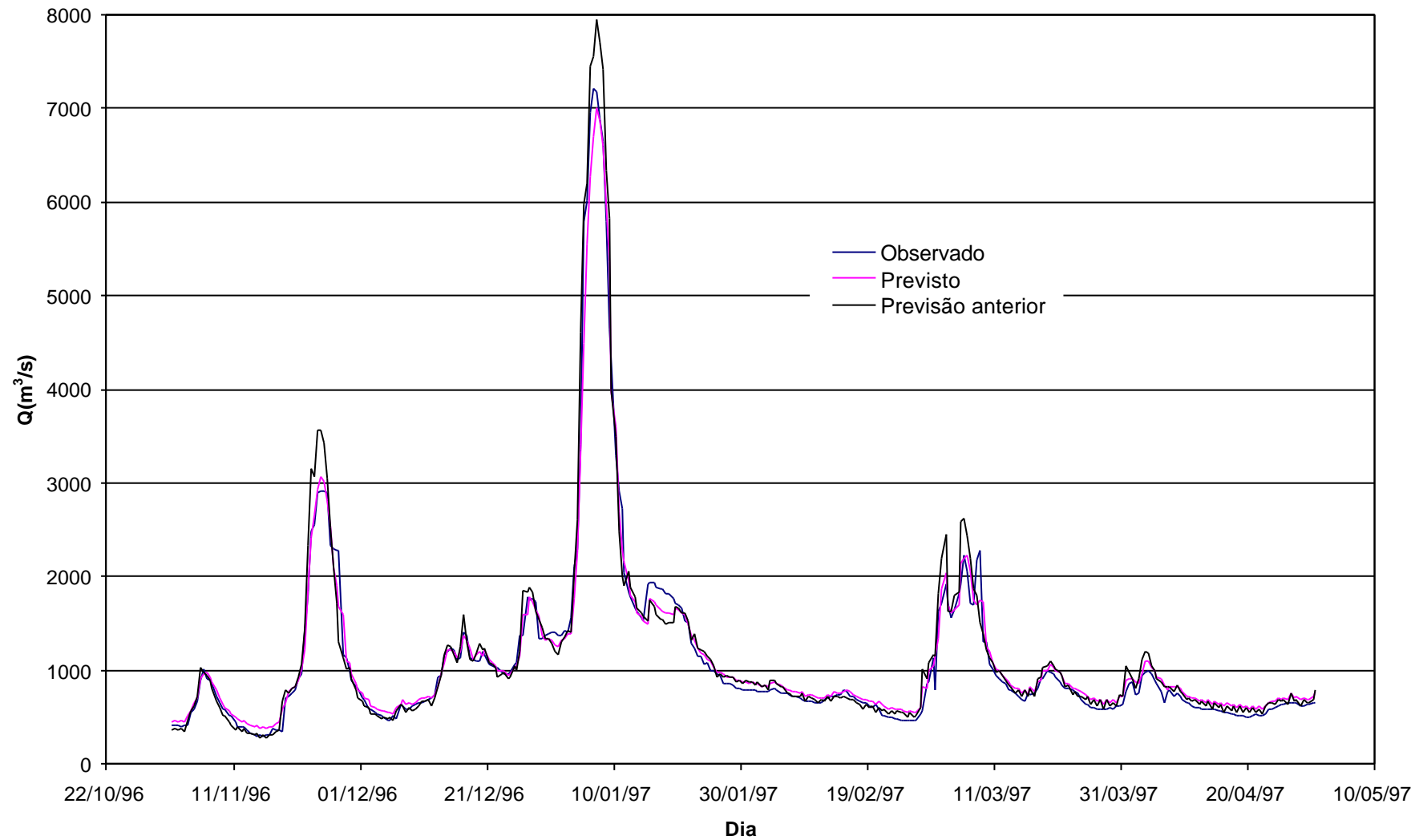
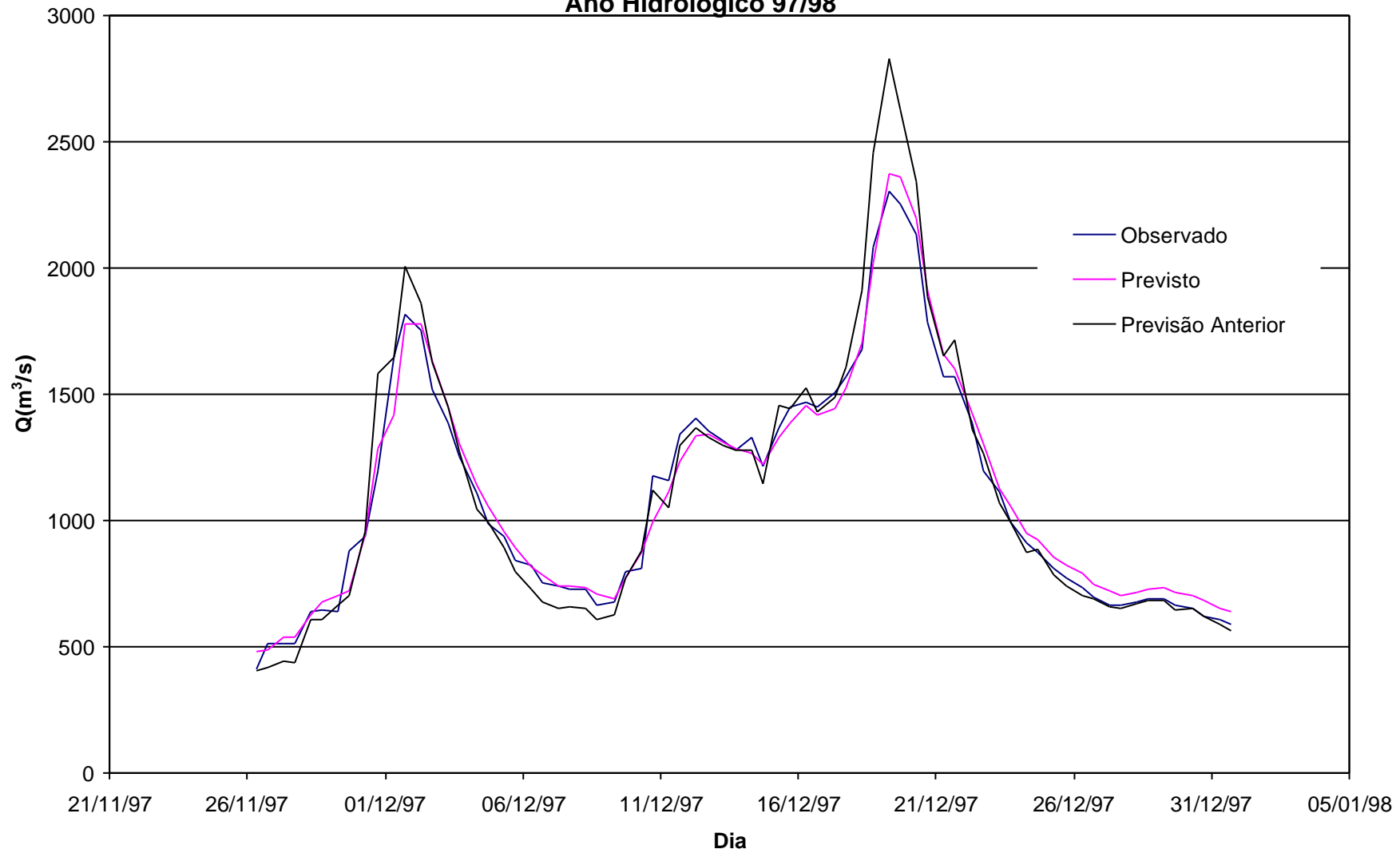


Figura 8 - Previsão de Níveis no Rio Doce em Governador Valadares com Antecedência de 12 Horas - Validação Ano Hidrológico 97/98



CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Utilizando a nova equação verificou-se uma melhoria significativa na previsão de vazões para Governador Valadares, tanto em relação a subida do hidrograma, quanto na estimativa da vazão máxima e desvio percentual, Figuras 2, 4, 5, 6, 7 e 8. Entretanto o modelo linear de propagação calibrado com hidrogramas de cheia não se ajustou muito bem para vazões menores do que 1000 m³/s, Figura 3. Neste caso recomenda-se que seja utilizado o modelo anteriormente definido, ou seja, acrescentando 15% à soma das vazões em Cenibra e Naque Velho.

Além disso durante a previsão em tempo real, visando a melhoria dos resultados, pode-se atualizar os parâmetros do modelo conforme Tucci,1998.

Ressalta-se que a utilização do modelo linear de propagação só foi possível em Governador Valadares devido à grande quantidade de dados disponível, em uma discretização adequada.

Infelizmente nas outras estações da bacia do rio Doce, onde não há um número suficiente de dados, não pode-se aplicar modelos deste tipo e a previsão hidrológica continua sendo feita através de regressão múltipla entre vazões, mas com a validação feita de maneira insatisfatória. Nestas estações para a calibração e validação da previsão hidrológica é necessária a série histórica de vazões defluentes de usinas, as quais até o momento, ainda não foram disponibilizadas para o Sistema de Alerta. Acredita-se, com a Resolução nº 396 da ANEEL, a qual solicita a instalação de estações automáticas nos aproveitamentos hidrelétricos e de disponibilização dos dados, que o problema das séries das vazões defluentes possa ser contornado.

BIBLIOGRAFIA

ADOCE. Termo de referência - Sistema de Gerenciamento de Informações de Recursos Hídricos para Bacia do Rio Doce - GRH - Doce. Etapa 1: Alerta Hidrológico. Belo Horizonte, CPRM, 1997.

CPRM. Sistema de Alerta contra Enchentes da Bacia do Rio Doce – Relatório Técnico da Operação do Sistema de Alerta – Dezembro de 1998 a Março de 1999. Belo Horizonte, 1999.

CPRM. Sistema de Alerta contra Enchentes da Bacia do Rio Doce – Relatório Técnico da Operação do Sistema de Alerta – no período de Dezembro de 1999 a Março de 2000. Belo Horizonte, 2000.

Tucci, Carlos E. M.. Modelos Hidrológicos. Editora da Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, 1998.