

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS**

**ATUALIZAÇÃO DE DADOS DE ENTRADA APLICADA À  
PREVISÃO DE VAZÕES DE CURTO PRAZO**

Juan Carlos Ticona Gutierrez

*Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.*

Prof. Dr. Juan Martin Bravo

**Orientador**

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Daniel Gustavo Allasia Piccilli - UFSM

Prof. Dr. Walter Collischonn – IPH/UFRGS

Profa. Dra. Nilza Maria dos Reis Castro – IPH/UFRGS

Porto Alegre, 20 de Julho de 2015

O presente trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Prof. Juan Martin Bravo.

## RESUMO

Neste estudo, foi realizada uma revisão dos problemas observados na modelagem chuva-vazão, que influenciam a incerteza das condições iniciais dos processos de previsão de vazão. Foi realizada, também, uma revisão do estado da arte de alguns dos modelos de previsão de vazão de curto prazo utilizados no Brasil e, por último, uma revisão das metodologias de atualização de dados empregadas em trabalhos passados. Mas o principal enfoque deste estudo foi à elaboração de uma metodologia de atualização de dados de entrada, baseada na correção do desvio entre a vazão de saída de um modelo hidrológico e a vazão observada, por meio da perturbação dos dados de entrada de precipitação. O estudo de caso está composto por três bacias: Bacia do rio Ijuí, Bacia do rio Tesouras e a Bacia do rio Canoas. Estas bacias foram escolhidas, pois apresentam características distintas, tanto físicas quanto climáticas e, além disso, pela existência de estudos prévios com o modelo hidrológico utilizado neste trabalho. O processo de avaliação do método foi realizado em três etapas: 1) utilizando séries sintéticas; 2) utilizando séries reais; 3) previsão de vazões com atualização de dados. As duas primeiras etapas utilizaram o modelo em modo atualização (“*off-line*”) e, a última, o modelo em modo de previsão (“*on-line*”). Para a aplicação do método é necessário estabelecer condições de parada, sendo então, propostos dois conjuntos de critérios de parada. Com isto, foi estabelecido um conjunto adequado de critérios para que estes fiquem fixos para possibilitar futuras aplicações em outros modelos ou em outros estudos de casos. A técnica de previsão de vazão de curto prazo utilizada foi com base na chuva prevista, sendo adotada a previsão de chuva conhecida ou perfeita. Foram geradas previsões diárias de até 7 dias, durante 20 dias contínuos, escolhendo-se dois eventos de diferentes características em cada uma das bacias do estudo de caso. Em modo previsão os resultados se mostraram promissores, o objetivo desejado inicialmente foi atingido pelos dois conjuntos de critérios de parada propostos. Conseguiu-se ter um ganho significativo até o quarto dia de previsão, como, também, melhoras nos períodos de subidas do hidrograma, porém nos períodos de estiagens o ganho foi quase nulo. Além disso, este trabalho mostrou a viabilidade da utilização do modelo IPH II para a geração de previsões de vazões baseadas em previsão de chuva.

**Palavras-chave:** modelo chuva-vazão; atualização de dados; previsão de curto prazo.

## ABSTRACT

In this study a review of the problems observed in rainfall-runoff modeling has been made, which influence the uncertainty of initial conditions of flow forecasting processes, as well as a review of the state of the art of some of the short-term flow forecasting models used in Brazil and the data update methodologies used in many past jobs. However the focus of this study has been the development of a data entry update methodology based on the correction of the deviation between the output flow of a hydrological model and the observed flow, by means of the disruption of rainfall input data. The case study is composed of the three river basins: River Ijuí, River Tesouras and Canoas. These basins have been chosen due to their different characteristics, both physical and climate, besides having been used in previous studies of the hydrological model used. The evaluation process of the method is done in three steps: 1) using synthetic series; 2) using real series; 3) stream flow forecasting with data update, the first two with the model in update mode ("off-line") and the last in predict mode ("on-line"). For the application of this method is necessary to establish stopping conditions for application, and for this have been proposed two sets of stop criteria. With this, intended to establish an appropriate set of criteria so that they become fixed to permit future applications in other models. The short-term flow forecasting technique used has been based on the forecast rain, adopted the rain forecast known or perfect. Predictions have been generated daily up to 7 days, for 20 consecutive days, choosing two events of different features in each case study basins. In predict mode the results have been promissory, the desired goal initially achieved by the two sets of proposed stopping criteria. It was possible to have a significant gain until the fourth day forecast also improvements in periods of hydrograph increases but not during periods of drought the gain was almost nil. This work has also showed the ability to generate predictions of rain forecast based flow as the IPH II model in real time.

**Keywords:** rainfall-runoff model; data update; short-term forecast.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	II
ABSTRACT .....	III
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Aspectos Gerais.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Organização do trabalho.....	2
2. ATUALIZAÇÃO DE DADOS DE ENTRADA EM PREVISÃO DE VAZÃO .....	4
2.1. Previsão Hidrológica de Vazões .....	4
2.1.1. Classificação das previsões hidrológicas.....	7
2.1.2. Previsão de vazão de curto prazo .....	8
2.2. Técnicas empregadas nas previsões hidrológicas.....	9
2.3. Modelos de previsão de vazões.....	10
2.4. Fontes de erro nos dados observados.....	12
2.4.1. Erros nos dados de chuva .....	12
2.4.2. Erros nos dados de vazões .....	13
2.5. Problemas na geração de previsão de vazões .....	14
2.6. Processos de atualização do modelo .....	15
2.6.1. Atualização dos dados de entrada.....	19
2.6.2. Atualização das variáveis de estado.....	22
2.6.3. Atualização dos parâmetros do modelo.....	23
2.6.4. Atualização das variáveis de saída.....	24
2.7. Medidas de desempenho.....	25
2.7.1. Medidas de desempenho das previsões de vazões .....	25
3. ESTUDO DE CASO .....	27
3.1. Bacia hidrográfica do rio Ijuí.....	28
3.2. Bacia hidrográfica do rio Tesouras .....	32

3.3. Bacia hidrográfica do rio Canoas .....	36
4. METODOLOGIA .....	40
4.1. Método de atualização de dados de entrada .....	40
4.1.1. Procedimento.....	40
4.2. Equação de atualização.....	42
4.3. Função-objetivo e critérios de parada.....	43
4.4. Modelo hidrológico IPH II.....	46
5. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	48
5.1. Avaliação da metodologia com dados sintéticos.....	49
5.2. Avaliação da metodologia com dados reais.....	52
5.3. Previsão de vazões com atualização de dados de entrada.....	56
5.3.1. Eventos analisados na bacia do rio Ijuí.....	56
5.3.2. Eventos analisados na bacia do rio Tesouras .....	57
5.3.3. Eventos analisados na bacia rio Canoas.....	59
6. RESULTADOS .....	60
6.1. Testes com dados sintéticos.....	60
6.1.1. Definição dos parâmetros $N_{Ciclo}$ e $N_{int}$ .....	60
6.1.2. Resultados obtidos na bacia do rio Ijuí .....	62
6.1.3. Resultados obtidos na bacia do rio Tesouras .....	67
6.1.4. Resultados obtidos na bacia rio Canoas.....	71
6.1.5. Análise geral dos resultados nas bacias com séries sintéticas.....	75
6.2. Testes com dados reais.....	77
6.2.1. Resultados obtidos na bacia do rio Ijuí .....	77
6.2.2. Resultados obtidos na bacia do rio Tesouras .....	78
6.2.3. Resultados obtidos na bacia do rio Canoas.....	80
6.2.4. Análise geral dos resultados nas bacias com séries reais.....	81
6.3. Resultados obtidos com o modelo WIN-IPH II em modo previsão.....	83

6.3.1. Resultados obtidos na bacia do rio Ijuí .....	83
6.3.2. Resultados obtidos na bacia do rio Tesouras .....	90
6.3.3. Resultados obtidos na bacia do rio Canoas.....	96
6.3.4. Análise geral dos resultados em modo previsão .....	102
7. CONCLUSÕES.....	103
8. RECOMENDAÇÕES.....	104
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	105
10. ANEXOS .....	111
APÊNDICE A – SÉRIES SINTÉTICAS DE PRECIPITAÇÃO .....	114
APÊNDICE B – INFLUÊNCIA DO VALOR DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO NO MÉTODO DE ATUALIZAÇÃO DE DADOS .....	116
APÊNDICE C – INFLUÊNCIA DA ATUALIZAÇÃO DE DADOS NA SIMULAÇÃO DE VAZÕES .....	118

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2-1</b> Usuários atendidos para diferentes horizontes de previsão.....	5
<b>Figura 2-2</b> Previsão de vazão, a partir de um instante $T_0$ , com base na chuva nula e com base na chuva perfeita. ....	7
<b>Figura 2-3</b> Tipos de erro na simulação hidrológica. ....	15
<b>Figura 2-4</b> Processos de atualização usada em modelos hidrológicos de previsão .....	16
<b>Figura 2-5</b> Etapa Off-Line do Modelo Hidrológico.....	18
<b>Figura 2-6</b> Etapa On-Line do Modelo Hidrológico. ....	18
<b>Figura 2-7</b> Etapas de trabalho com o modelo hidrológico de previsão de vazão. ....	19
<b>Figura 2-8</b> Períodos de tempo usados em uma modelo de previsão hidrológica. ....	19
<b>Figura 2-9</b> Período de atualização de dados e vazão prevista melhorada. ....	20
<b>Figura 2-10</b> Método de modelagem invertida. ....	21
<b>Figura 2-11</b> Método de atualização sequencial. ....	21
<b>Figura 3-1</b> Localização das bacias avaliadas.....	27
<b>Figura 3-2</b> Bacia do rio Ijuí, no posto fluviométrico Santo Ângelo. ....	28
<b>Figura 3-3</b> Bacia do rio Ijuí, localização de postos pluviométricos. ....	29
<b>Figura 3-4</b> Série de valores totais médios na bacia do rio Ijuí, no período 1989-1991. ....	30
<b>Figura 3-5</b> Série de valores totais mensais na bacia do rio Ijuí, no período 1989-1991. ....	31
<b>Figura 3-6</b> Localização da bacia do rio Tesouras. ....	32
<b>Figura 3-7</b> Bacia do rio Tesouras, localização de postos pluviométricos. ....	33
<b>Figura 3-8</b> Série de valores totais médios na bacia do rio Tesouras, no período de 1982-1986.....	34
<b>Figura 3-9</b> Série de valores totais mensais na bacia do rio Tesouras, no período de 1982-1986.....	35
<b>Figura 3-10</b> Bacia do rio Canoas, no posto fluviométrico Villa Canoas. ....	36
<b>Figura 3-11</b> Bacia do rio Canoas, localização de postos pluviométricos.....	37
<b>Figura 3-12</b> Série de valores totais médios na bacia do rio Canoas, no período de 1981-1984.....	38
<b>Figura 3-13</b> Série de valores totais mensais na bacia do rio Canoas, no período de 1981-1984.....	39
<b>Figura 4-1</b> Processo de atualização de dados de precipitação em fase <i>Off-Line</i> .....	41
<b>Figura 4-2</b> Esquema do fundamento operativo da metodologia de atualização.....	42
<b>Figura 4-3</b> Atualização de um dado sem critério de parada. ....	44

<b>Figura 4-4</b> Atualização de um dado com critério de parada.....	44
<b>Figura 4-5</b> Problema na atualização de dados com critério de parada.....	44
<b>Figura 4-6</b> Diagrama esquemático do modelo IPH-II em fase Off-Line. ....	47
<b>Figura 5-1</b> Critérios adotados na aplicação da metodologia proposta. ....	48
<b>Figura 5-2</b> Diagrama da avaliação da metodologia com dados sintéticos. ....	49
<b>Figura 5-3</b> Hidrogramas gerados com séries de chuva sintética e hidrograma gerado com chuva observada, na bacia do rio Ijuí. ....	50
<b>Figura 5-4</b> Hidrogramas gerados com séries de chuva sintética e hidrograma gerado com observada, na bacia do rio Tesouras.....	51
<b>Figura 5-5</b> Hidrogramas gerados com séries de chuva sintética e hidrograma gerado com chuva observada, na bacia Do rio Canoas. ....	51
<b>Figura 5-6</b> Diagrama da avaliação da metodologia com dados reais. ....	52
<b>Figura 5-7</b> Hidrograma observado e simulado da bacia do rio Ijuí, no período de calibração do modelo (01/01/1989-30/05/1989). ....	53
<b>Figura 5-8</b> Hidrograma observado e simulado da bacia rio Tesouras, no período de calibração do modelo (17/11/1982- 15/05/1983). ....	53
<b>Figura 5-9</b> Hidrograma observado e simulado da bacia rio Canoas, no período de calibração do modelo (16/05/1982-20/01/1983). ....	54
<b>Figura 5-10</b> Hidrograma observado e simulado da bacia do rio Ijuí, no período 31/05/1989 - 27/10/1989.....	55
<b>Figura 5-11</b> Hidrograma observado e simulado da bacia do rio Tesouras, no período 16/12/1984 - 13/06/1985.....	55
<b>Figura 5-12</b> Hidrograma observado e simulado da bacia do rio Canoas, no período 12/03/1983 - 27/10/1983.....	56
<b>Figura 5-13</b> Evento 1, observado na bacia do rio Ijuí, 07/09/1989 - 05/10/1989.....	57
<b>Figura 5-14</b> Evento 2, observado na bacia do rio Ijuí, 19/08/1990 - 05/10/1990.....	57
<b>Figura 5-15</b> Evento 1, observado na bacia Tesouras, 03/02/1983 - 19/02/1983.....	58
<b>Figura 5-16</b> Evento 2, observado na bacia Tesouras, 13/01/1985 - 01/02/1985.....	58
<b>Figura 5-17</b> Evento 1, observado na bacia Rio Canoas, 16/05/1982 - 03/08/1982.....	59
<b>Figura 5-18</b> Evento 2, observado na bacia Rio Canoas, 27/06/1983 - 09/07/1983.....	59
<b>Figura 6-1</b> Resultados de testes preliminares, variando ciclos.....	60
<b>Figura 6-2</b> Resultados de testes preliminares, variando iterações.....	61
<b>Figura 6-3</b> Desvio nas precipitações atualizadas, na bacia do rio Ijuí para a FO1.....	63
<b>Figura 6-4</b> Desvio nas precipitações atualizadas, na bacia do rio Ijuí para a FO2.....	64

<b>Figura 6-5</b> Hidrogamas atualizados para FO1, na bacia do rio Ijuí.....	66
<b>Figura 6-6</b> Hidrogamas atualizados para FO2, na bacia do rio Ijuí.....	66
<b>Figura 6-7</b> Desvio nas precipitações atualizadas, na bacia do rio Tesouras para a FO1. .....	68
<b>Figura 6-8</b> Desvio nas precipitações atualizadas, na bacia do rio Tesouras para a FO2. .....	69
<b>Figura 6-9</b> Hidrogamas atualizados para FO1, na bacia Tesouras. ....	71
<b>Figura 6-10</b> Hidrogamas atualizados para FO2, na bacia Tesouras. ....	71
<b>Figura 6-11</b> Desvio nas precipitações atualizadas, na bacia rio Canoas para a FO1.....	72
<b>Figura 6-12</b> Desvio nas precipitações atualizadas, na bacia rio Canoas para a FO2.....	73
<b>Figura 6-13</b> Hidrogamas atualizados para FO1, na bacia rio Canoas.....	75
<b>Figura 6-14</b> Hidrogamas atualizados para FO2, na bacia rio Canoas.....	75
<b>Figura 6-15</b> Hidrograma da bacia Ijuí, aplicando a metodologia para FO1.....	78
<b>Figura 6-16</b> Hidrograma da bacia Ijuí, aplicando a metodologia para FO2.....	78
<b>Figura 6-17</b> Precipitação atualizada da bacia Ijuí, utilizando a FO1 (esquerda) e a FO2 (direita). ....	78
<b>Figura 6-18</b> Hidrograma da bacia Tesouras, aplicando a metodologia para FO1. ....	79
<b>Figura 6-19</b> Hidrograma da bacia Tesouras, aplicando a metodologia para FO2. ....	79
<b>Figura 6-20</b> Precipitação atualizada da bacia Tesouras, utilizando a FO1 (esquerda) e a FO2 (direita). ....	79
<b>Figura 6-21</b> Hidrograma da bacia rio Canoas, aplicando a metodologia para FO1. ....	80
<b>Figura 6-22</b> Hidrograma da bacia rio Canoas, aplicando a metodologia para FO2. ....	80
<b>Figura 6-23</b> Precipitação atualizada da bacia rio Canoas, utilizando a FO1 (esquerda) e a FO2 (direita). ....	81
<b>Figura 6-24</b> Resultados da previsão de vazão do evento 1 na bacia do rio Ijuí. ....	84
<b>Figura 6-25</b> Alcances da previsão de vazão do evento 1 na bacia do rio Ijuí, utilizando a FO1 .....	85
<b>Figura 6-26</b> Alcances da previsão de vazão do evento 1 na bacia do rio Ijuí, utilizando a FO2 .....	86
<b>Figura 6-27</b> Resultados da previsão de vazão do evento 2 na bacia do rio Ijuí. ....	87
<b>Figura 6-28</b> Alcances da previsão de vazão do evento 2 na bacia do rio Ijuí, utilizando a FO1 .....	88
<b>Figura 6-29</b> Alcances da previsão de vazão do evento 2 na bacia do rio Ijuí, utilizando a FO2 .....	89

<b>Figura 6-30</b> Resultados da previsão de vazão do evento 1 na bacia do rio Tesouras....	90
<b>Figura 6-31</b> Alcances da previsão de vazão do evento 1 na bacia do rio Tesouras, utilizando a FO1 .....	91
<b>Figura 6-32</b> Alcances da previsão de vazão do evento 1 na bacia do rio Tesouras, utilizando a FO2 .....	92
<b>Figura 6-33</b> Resultados da previsão de vazão do evento 2 na bacia do rio Tesouras....	93
<b>Figura 6-34</b> Alcances da previsão de vazão do evento 2 na bacia do rio Tesouras, utilizando a FO1 .....	94
<b>Figura 6-35</b> Alcances da previsão de vazão do evento 2 na bacia do rio Tesouras, utilizando a FO2 .....	95
<b>Figura 6-36</b> Resultados da previsão de vazão do evento 1 na bacia do rio Canoas. ....	96
<b>Figura 6-37</b> Alcances da previsão de vazão do evento 1 na bacia do rio Canoas, utilizando a FO1 .....	97
<b>Figura 6-38</b> Alcances da previsão de vazão do evento 1 na bacia do rio Canoas, utilizando a FO2 .....	98
<b>Figura 6-39</b> Resultados da previsão de vazão do evento 2 na bacia do rio Canoas. ....	99
<b>Figura 6-40</b> Alcances da previsão de vazão do evento 2 na bacia do rio Canoas, utilizando a FO1 .....	100
<b>Figura 6-41</b> Alcances da previsão de vazão do evento 2 na bacia do rio Canoas, utilizando a FO2 .....	101
<b>Figura 10-1</b> Fluxograma do acoplamento da metodologia de atualização.....	111
<b>Figura 10-2</b> Fluxograma do método de atualização de dados utilizando a FO1. ....	112
<b>Figura 10-3</b> Fluxograma do método de atualização de dados utilizando a FO2. ....	113
<b>Figura A-1</b> Acompanhamento da influencia das perturbações inseridas em duas series sintéticas sobre as vazões de saída.....	115
<b>Figura B-1</b> Acompanhamento da influência do tempo de concentração no processo de atualização.....	117
<b>Figura C-1</b> Hidrograma simulado superficial e subterrâneo, na bacia do rio Ijuí.....	119
<b>Figura C-2</b> Hidrograma simulado superficial e subterrâneo, na bacia do rio Tesouras. ....	120
<b>Figura C-3</b> Hidrograma simulado superficial e subterrâneo, na bacia do rio Canoas.	121

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b>	Classificação temporal de previsão hidrológica. ....	8
<b>Tabela 2.2</b>	Resumo das principais técnicas de previsão meteorológica.....	9
<b>Tabela 2.3</b>	Vantagens e desvantagens dos modelos hidrológicos usados em previsão de curto prazo.....	11
<b>Tabela 2.4</b>	Modelos usados em previsão de vazões.....	11
<b>Tabela 2.5</b>	Principais componentes do erro sistemático na medição de precipitação. ..	13
<b>Tabela 2.6</b>	Características dos procedimentos de atualização de modelos de previsão.	17
<b>Tabela 3.1</b>	Informações meteorológicas e hidrológicas para a bacia do rio Ijuí. ....	29
<b>Tabela 3.2</b>	Informações meteorológicas e hidrológicas para a bacia do rio Tesouras...	33
<b>Tabela 3.3</b>	Informações meteorológicas e hidrológicas para a bacia do rio Canoas. ....	37
<b>Tabela 5.1</b>	Valores dos parâmetros do modelo IPH II, utilizados para os testes com vazão real.....	50
<b>Tabela 5.2</b>	Valores dos parâmetros do modelo IPH II, utilizados para os testes com vazão real.....	53
<b>Tabela 5.3</b>	Periodos de dados utilizados para os testes com vazão real.....	54
<b>Tabela 5.4</b>	Características dos eventos escolhidos na bacia rio Ijuí. ....	56
<b>Tabela 5.5</b>	Características dos eventos escolhidos na bacia rio Tesouras.....	58
<b>Tabela 5.6</b>	Características dos eventos escolhidos na bacia do rio Canoas. ....	59
<b>Tabela 6.1</b>	Valores adotados para os critérios de parada. ....	61
<b>Tabela 6.2</b>	Índices de desempenho das séries sintéticas, na bacia do rio Ijuí. ....	65
<b>Tabela 6.3</b>	Índices de desempenho para FO1, na bacia do rio Ijuí. ....	65
<b>Tabela 6.4</b>	Índices de desempenho para FO2, na bacia do rio Ijuí. ....	65
<b>Tabela 6.5</b>	Índices de desempenho das séries sintéticas, na bacia do rio Tesouras.....	70
<b>Tabela 6.6</b>	Índices de desempenho para FO1, na bacia do rio Tesouras.....	70
<b>Tabela 6.7</b>	Índices de desempenho para FO2, na bacia do rio Tesouras.....	70
<b>Tabela 6.8</b>	Índices de desempenho das séries sintéticas, na bacia rio Canoas. ....	74
<b>Tabela 6.9</b>	Índices de desempenho para FO1, na bacia rio Canoas.....	74
<b>Tabela 6.10</b>	Índices de desempenho para FO2, na bacia rio Canoas.....	74
<b>Tabela 6.11</b>	Resumo de resultados obtidos com a FO1. ....	76
<b>Tabela 6.12</b>	Resumo de resultados obtidos com a FO2. ....	76
<b>Tabela 6.13</b>	Índices de desempenho resultantes, para FO1.....	81
<b>Tabela 6.14</b>	Índices de desempenho resultantes, para FO2.....	81
<b>Tabela 6.15</b>	Resumo de resultados relativos às vazões.....	82

<b>Tabela 6.16</b> Erro absoluto na máxima vazão observada. ....	82
<b>Tabela 6.17</b> Erro médio quadrático (EMQ) do evento 1, na bacia do rio Ijuí. ....	83
<b>Tabela 6.18</b> Erro médio quadrático (EMQ) do evento 2, na bacia do rio Ijuí. ....	87
<b>Tabela 6.19</b> Erro médio quadrático (EMQ) do evento 1, na bacia do rio Tesouras. ....	90
<b>Tabela 6.20</b> Erro médio quadrático (EMQ) do evento 2, na bacia do rio Tesouras. ....	93
<b>Tabela 6.21</b> Erro médio quadrático (EMQ) do evento 1, na bacia do rio Canoas. ....	96
<b>Tabela 6.22</b> Erro médio quadrático (EMQ) do evento 2, na bacia do rio Canoas. ....	99

## LISTA DE SIGLAS

PQC	- previsão quantitativa de chuva
PNT	- previsão numérica do tempo
IPH	- Instituto de Pesquisas Hidráulicas
ANA	- Agência Nacional de Águas
OMM	- Organização Meteorológica Mundial
WMO	- World Meteorological Organization
ENSO	- El Niño Southern Oscillation
SCE-UA	- Shuffled Complex Evolution - University of Arizona
MOCOM-UA	- Multiobjective Complex Evolution Method – Universidade de Arizona
GEVAZP	- Gerador de vazões padrão
PREVAZ	- Modelo de previsão de vazões
PREVIVAZH	- Modelo de previsão de vazões diárias
PREVIVAZ	- Modelo de previsão de vazões semanais
PREVIVAZM	- Modelo de previsão de vazões mensais
SAISP	- Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo
CPINS	- Cálculo e Previsão de Vazões Incrementais e Naturais a Sobradinho
SSARR	- Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation
SMAP	- Soil Moisture Accounting Procedure
ESP	- Extended Streamflow Prediction
HFAM	- Hydrocomp Forecast and Analysis Modeling
MLP	- Multi-Layer Perceptron
IPH II	- Modelo matemático precipitação vazão
MGB-IPH	- Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas
UBC	- University of British Columbia
CRM	- Cloud Resolving Model
GAPI	- Gamma Antecedent Precipitation Index
CLS	- Constrained Linear Systems
HBV	- Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning
SRM	- Snowmelt Runoff Model
HFS	- Hydrologic Forecast system
NAMKAL	- Nedbør Afstrømnings Model Kalman

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $t_0$  - instante do início da previsão
- $P_k$  - valor da precipitação ajustada
- $k'$  - fator de correção devido ao vento
- $P_g$  - valor da precipitação medida
- $\Delta P_i$  - componentes do erro sistemático na medição de precipitação
- $Q_0$  - dado de vazão observada
- $P_0$  - dado de precipitação observada
- $M_0$  - dado metrológico observado
- $Q_c$  - dado de vazão simulado
- $t_1$  - intervalo de tempo 1
- $t_2$  - intervalo de tempo 2
- $\text{Erro}_{t_0}$  - Erro no intervalo de tempo  $t_0$
- $P_m$  - precipitação medida
- $Q_m$  - vazão medida
- $Q_{\text{est}}$  - vazão estimada
- $Q_{pi}$  - valor de vazão prevista
- $Q_{oi}$  - valor de vazão observado
- $Q_{t_0}$  - valor observado de vazão no instante  $t_0$
- $Q_{om}$  - valor médio dos valores de vazão observados
- $N$  - número de valores previstos
- $Q_{ai}$  - valor da vazão prevista com atualização
- $Q_{oi}$  - valor da vazão observada
- $Q_{si}$  - valor da vazão prevista sem atualização
- $Q_{om}$  - valor médio dos valores observados
- $Q_{mai}$  - valor médio dos valores atualizados
- $t_c$  - tempo de concentração da bacia
- $M$  - número de intervalos de tempo antes do início da previsão, período de aquecimento
- $k$  - fator que atualiza o valor inicial da chuva.
- $\varepsilon$  - desvio entre a vazão calculada e observada
- $\varepsilon_{\text{min}}$  - desvio mínimo aceitável para decidir aplicar a atualização em um intervalo de tempo de chuva
- $\text{Iter}$  - número de vezes que se aplica a metodologia no período de aquecimento

- $N_{\text{ciclos}}$  - número máximo de vezes que é atualizada da chuva no mesmo intervalo de tempo
- $P_{O_t}$  - chuva observada no intervalo de tempo  $t$
- $P_{A_t}$  - chuva atualizada no intervalo de tempo  $t$
- $P_{\text{real}}$  - precipitação real
- FO1 - função-objetivo um
- FO2 - função-objetivo dois
- $Q_{O_{t_0}}$  - vazão observada no intervalo de tempo  $t_0$
- $Q_{S_{t_0}}$  - vazão simulada no intervalo de tempo  $t_0$
- $Q_{O_t}$  - vazão observada no intervalo de tempo  $t$
- $Q_{S_t}$  - vazão simulada no intervalo de tempo  $t$
- AIMP - percentagem de área impermeável
- $n$  - coeficiente de forma da bacia
- $I_b$  - capacidade de infiltração mínima
- $I_o$  - capacidade de infiltração para  $t=0$
- $H$  - parâmetro da equação de Horton
- $R_{\text{max}}$  - capacidade máxima do reservatório linear simples
- $K_s$  - Parâmetro de amortecimento do reservatório
- $K_{\text{sub}}$  - Constante de recessão do escoamento subterrâneo
- $K_{\text{sup}}$  - Constante de recessão do escoamento superficial

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Aspectos Gerais

O presente trabalho aborda um dos inumeráveis campos da hidrologia, a previsão de vazões, especificamente centrado nas técnicas de atualização de dados de entrada.

As previsões hidrológicas, principalmente as previsões de vazões, constituem uma ferramenta importante na tomada de decisão no âmbito dos sistemas de operação de reservatórios no caso de inundações, geração de energia, abastecimento de água, irrigação para agricultura e navegação. Para os fins desta pesquisa, as previsões de vazão de curto prazo são consideradas aquelas que têm um horizonte de previsão de no máximo uma semana.

A previsão de vazão de curto prazo, também conhecida como previsão em tempo real, é utilizada como alerta hidrológico para áreas ribeirinhas e para melhorar a operação de sistemas hidroelétricos. Esta previsão pode ser realizada com base em dados de um posto fluviométrico no local de interesse, de postos fluviométricos de montante (vazão-vazão), com base nos dados de precipitações e no uso de um modelo hidrológico (chuva-vazão). Estas técnicas de previsão de vazão exigem, por parte do modelo chuva-vazão, um método de contínua correção das condições antecedentes ao início das previsões, em razão dos erros observados na modelagem ou nos dados utilizados (Mandeville et al., 1970).

As fontes desses erros observados, que podem afetar a previsão de vazões, são numerosas (dados de entrada de chuva, evaporação, parâmetros, estado inicial do sistema, dados de saída, o próprio modelo, etc.). Para compensar parcialmente estas incertezas foram elaborados os métodos de atualização ou assimilação de dados, que tentam reduzir a influência das diferentes fontes de erros no sistema.

Nesse sentido, múltiplas metodologias de atualização foram desenvolvidas até o momento (e.g. Serban & Askew, 1991; Refsgaard, 1983 e 1997; Kahl & Nachtnebel, 2008), sendo classificadas em quatro tipos, dependendo da variável modificada durante o processo de atualização:

- a) Atualização das variáveis de entrada.
- b) Atualização das variáveis de estado do modelo.
- c) Atualização dos parâmetros do modelo.

d) Atualização das variáveis de saída do modelo (predição de erros).

Algumas destas metodologias foram detalhadas no presente trabalho, tendo especial ênfase na primeira citada acima: atualização das variáveis de entrada.

Na revisão do estado da arte foram encontradas poucas aplicações de metodologias desenvolvidas na atualização de dados de entrada. Porém, se observou que para os demais casos existem diversas metodologias, desde simples até muito sofisticadas, mas que nem sempre garantem, que com uma melhoria na atualização dos dados, possa se obter uma melhoria na previsão de vazão, devido a certas limitações na aplicação em alguns modelos. Nesse contexto, vislumbrou-se a necessidade do desenvolvimento de uma metodologia com enfoque na atualização de dados de entrada e sua adaptação em um modelo hidrológico chuva-vazão.

## 1.2. Objetivos

O objetivo desta pesquisa é o desenvolvimento e avaliação de uma metodologia de atualização de dados de entrada a ser adaptada em um modelo hidrológico concentrado de previsão de vazões de curto prazo.

Como objetivos específicos desta pesquisa, tem-se:

- Testar a aplicabilidade desta nova metodologia de atualização de dados de entrada em um modelo conceitual de previsão de vazões de curto prazo.
- Avaliar a importância de modificar os dados observados de chuva, antes do início da geração de previsão de vazões pelo modelo conceitual, com o objetivo de minimizar as diferenças das vazões previstas pelo modelo e as vazões observadas.

## 1.3. Organização do trabalho

A presente dissertação compõe-se de sete capítulos, estruturados da seguinte forma:

No capítulo 2, realizou-se uma revisão dos conceitos principais consultados ao longo da execução da dissertação. Foram descritos os conceitos de previsão de vazões, as técnicas conhecidas e algumas aplicações em modelos usados no mundo, fontes de

erro e os problemas observados na geração de previsão de vazões e, finalmente, os processos desenvolvidos para a correção destes erros e as medidas de desempenho para avaliar estes processos.

No capítulo 3, estão apresentados os dados das bacias escolhidas para o ajuste do modelo e a aplicação da metodologia proposta.

No capítulo 4, foi descrita a metodologia de atualização de dados de entrada, uma breve descrição do modelo chuva-vazão escolhido, as características principais do método e seu acoplamento ao modelo.

No capítulo 5, foram explicadas as aplicações para avaliar a metodologia, usando séries sintéticas, dados reais e os eventos escolhidos para fazer a previsão de vazões nas três bacias.

No capítulo 6, foram apresentados e discutidos os resultados alcançados nas aplicações do capítulo 5.

Finalmente, no capítulo 7, foi analisado de forma geral o estudo, quanto à satisfação dos objetivos propostos, e também, algumas sugestões para testes e aprimoramento da metodologia em outras aplicações.

## 2. ATUALIZAÇÃO DE DADOS DE ENTRADA EM PREVISÃO DE VAZÃO

Neste capítulo, fez-se uma descrição dos conceitos principais que serão abordados na presente pesquisa, permitindo ao leitor localizar a que área do campo das previsões de vazões pertence à metodologia desenvolvida. Ainda, é apresentada uma revisão bibliográfica do estado da arte dos tipos de modelos hidrológicos utilizados na previsão de vazões no Brasil, bem como as metodologias de atualização de dados existentes.

### 2.1. Previsão Hidrológica de Vazões

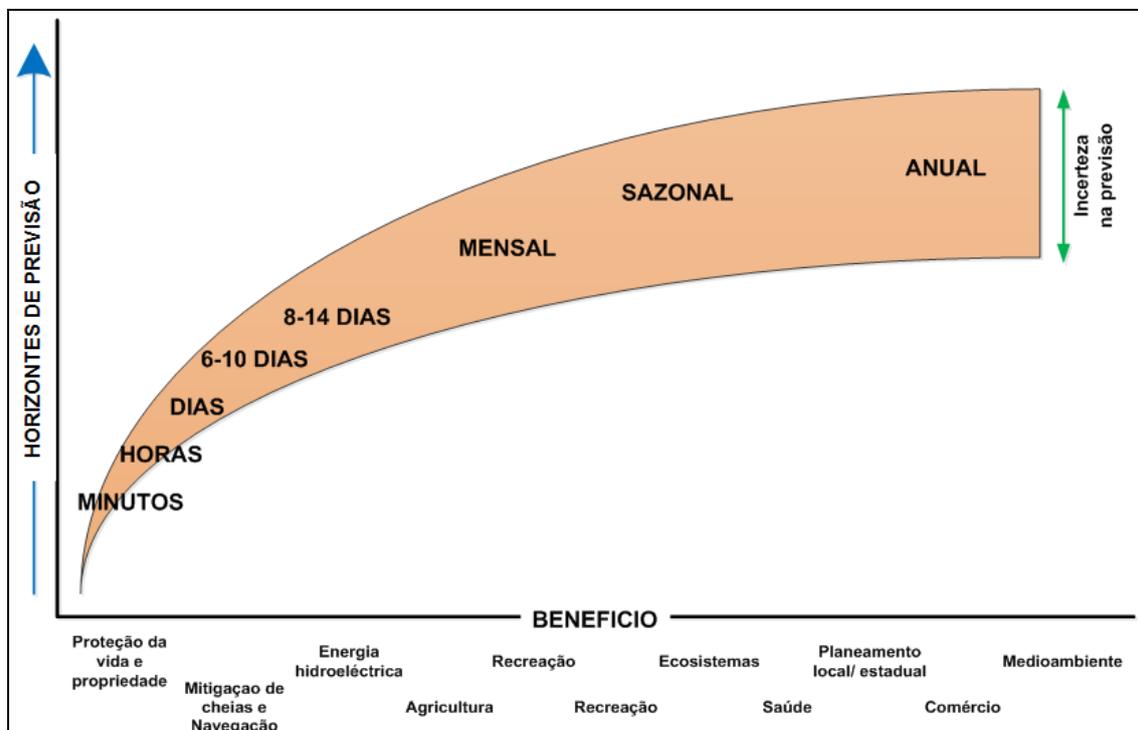
A previsão é a estimativa das condições para um tempo futuro específico, ou durante um determinado intervalo de tempo, por exemplo: o nível ou a vazão em uma seção de um rio para as próximas 1200 horas. A predição, entretanto, não faz referência há um tempo específico e é, geralmente, apresentada em forma estatística, por exemplo: a probabilidade de inundação numa seção de um rio, a probabilidade de períodos úmidos e secos, entre outros (Lettenmaier e Wood, 1993; Tucci et al., 2003).

Um dos tipos de previsão é a previsão hidrológica através da qual são estimados os estados futuros de fenômenos hidrológicos. O conhecimento antecipado de diferentes fenômenos hidrológicos é essencial para o bom funcionamento das obras hidráulicas e mitigação de desastres naturais, como inundações e secas. Além disso, a previsão hidrológica está se tornando cada vez mais uma ferramenta importante no subsídio à tomada de decisão na gestão integrada dos recursos hídricos e na redução de perdas por inundação (WMO, 2009).

A previsão de vazões consiste na estimativa de valores futuros de vazão, em um determinado local de um curso de água em uma bacia hidrográfica, com uma antecedência temporal definida. As previsões de vazões têm duas características importantes:

- 1) A frequência da previsão que define o período de tempo no qual são emitidos novos dados de previsão (Bravo, 2006).
- 2) O horizonte da previsão que define o tempo à frente no qual se estendem as previsões.

Conforme Andreolli (2003), a previsão de vazão é uma das técnicas utilizadas para minimizar as incertezas da variabilidade estocástica das séries hidrológicas. Assim, o conhecimento prévio do hidrograma afluente a um determinado reservatório constitui uma poderosa ferramenta do mesmo. No caso de um evento de cheia, as manobras de comportas podem ser efetuadas horas antes da ascensão do hidrograma, realizando um rebaixamento do reservatório em tempo real. Dessa forma, pode-se evitar a alocação de volume de espera ou rebaixamentos excessivos decorrentes de uma operação conservadora, os quais reduzem temporariamente a queda bruta do aproveitamento hidrelétrico e, conseqüentemente, a capacidade de geração de energia. Por exemplo, a Figura 2-1 ilustra alguns dos usuários beneficiados com um certo tipo de previsão e uma estimativa da magnitude da incerteza de previsão em função do horizonte.



**Figura 2-1** Usuários atendidos para diferentes horizontes de previsão.

Fonte: Adaptado de Sene, 2010.

A previsão de vazões pode ser classificada em função do horizonte, em dois tipos:

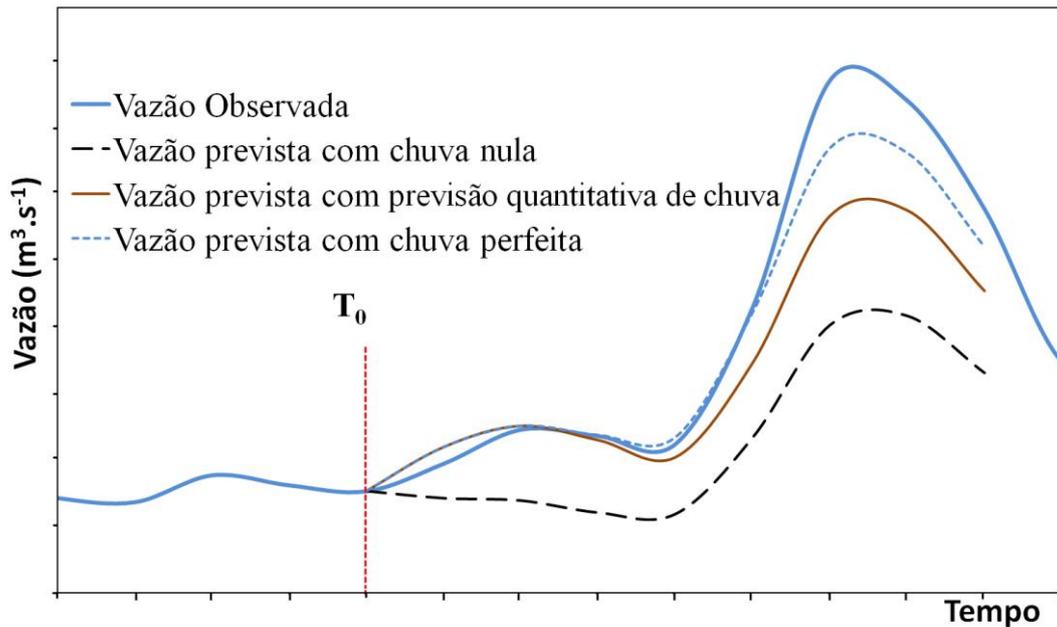
- De curto prazo, também chamada previsão em tempo real, realizada com antecedência de horas ou até alguns dias.
- De longo prazo, também chamada de previsão sazonal, pode ter uma antecedência de semanas ou meses (Collischonn et al., 2005).

De acordo com Tucci (1993), a previsão de vazão em curto prazo permite estabelecer o nível da água com certa antecedência, o qual depende da previsão da precipitação e da propagação da vazão na bacia hidrográfica. Este tipo de previsão é utilizado como subsídio à tomada de decisão para emitir alertas à população ribeirinha ou na adoção de diferentes regras de operação de obras hidráulicas.

A previsão da vazão em curto prazo pode ser realizada através das combinações das variáveis de entrada (Tucci e Collischonn, 2005):

- Vazão no próprio local onde se deseja realizar a previsão: é eficiente para a recessão do escoamento; os modelos mais utilizados são os empíricos do tipo autorregressivo.
- Vazão local e de seção à montante: a antecedência da previsão dependerá do tempo de viagem da onda de cheia no trecho; os modelos empíricos baseados em redes neurais artificiais, estocásticos e de regressão múltipla podem apresentar bons resultados nestes casos.
- Precipitação observada e vazão no rio: neste caso existe uma dependência no monitoramento em tempo real da precipitação observada até o início da previsão.
- Previsão de vazão com base na precipitação prevista: algumas estimativas da precipitação futura são as seguintes: previsão de chuva nula (o valor da chuva é igual a zero nos intervalos de tempo futuro); previsão de chuva conhecida ou perfeita (são utilizados valores observados de chuva como previsão, representa uma situação ideal onde a previsão de chuva não apresenta erros); previsão quantitativa de chuva (PQC) e previsão estatística de chuva.

Na Figura 2-2 observa-se um exemplo da previsão de vazões com base na previsão prevista, onde se espera que o hidrograma previsto com chuva perfeita seja o mais próximo ao hidrograma observado. Já o hidrograma previsto com chuva nula representa um cenário extremo mínimo, e por isso, nenhum dos hidrogramas previstos, com previsão quantitativa de chuva, podem ficar situados abaixo deste.



**Figura 2-2** Previsão de vazão, a partir de um instante  $T_0$ , com base na chuva nula e com base na chuva perfeita.  
 Fonte: Adaptado de Tucci e Collischonn, 2005.

Outra forma de classificar as previsões é como determinística ou probabilística. Uma previsão determinística apresenta uma solução única para a variável prevista, para cada intervalo de tempo da previsão. Por outro lado, a previsão probabilística apresenta para cada intervalo de tempo, a distribuição de probabilidades da variável prevista, obtida a partir de um conjunto de possíveis soluções resultantes da aplicação da técnica de previsão por conjunto (Meller, 2012).

### 2.1.1. Classificação das previsões hidrológicas

Segundo Nemeç (1986), as previsões hidrológicas podem ser classificadas principalmente em três grupos, com características mutuamente independentes:

- a) Pelas variáveis da previsão
  - Níveis (rios, lagos e reservatórios).
  - Quantidade (vazões ou volumes) e qualidade de água.
  - Formação ou ruptura de gelo.
- b) Pelo propósito da previsão
  - Vazões (incluindo eventos de curta duração, como rompimento de barragens).
  - Abastecimento de água para diferentes períodos (diário, semanal, sazonal, incluso para a geração de energia e água para irrigação).

- Navegação.
- Agricultura (principalmente níveis de rios para sementeira, colheita e outros propósitos).
- Controle de poluição (vazões mínimas).
- Operação de reservatórios.

c) Pelo horizonte de previsão, apresentado na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1** Classificação temporal de previsão hidrológica.

<b>Previsão hidrológica</b>	<b>Período de tempo</b>
Curto prazo ou tempo real	Até dois dias.
Médio prazo	Entre 2 e 10 dias.
Longo prazo	Maior que 10 dias.
Sazonal	Para uma estação climática que cobre muitos meses, ou mais.
Risco hidrológico	Informação de emergência sobre um fenômeno hidrológico que se considera perigoso.

Neste trabalho, será abordada a previsão de vazão de curto prazo utilizando previsão de precipitação, um modelo hidrológico conceitual chuva-vazão e técnicas destinadas a reduzir as incertezas das previsões de vazão. Nesse sentido, é apresentado a seguir o estado da arte dos tipos de modelos utilizados, as fontes de incertezas e os problemas observados na modelagem, bem como as técnicas desenvolvidas para solucionar estes problemas.

#### 2.1.2. Previsão de vazão de curto prazo

As previsões de vazões em tempo real com modelos chuva-vazão dependem, basicamente, de dados de precipitação em dois períodos distintos:

- Estimativas de precipitação até o instante do início da previsão ( $t_0$ ) são importantes para a definição das condições iniciais da previsão e tendem a ser de maior importância quando o horizonte de previsão é inferior ao tempo de concentração da bacia hidrográfica.
- Chuvas previstas são usualmente resultado de simulações de modelos de previsão numérica do tempo (PNT), também chamados de modelos de previsão meteorológica. As previsões meteorológicas são geralmente classificadas como de

curto prazo, com até 3 dias de antecedência e, de médio prazo, para intervalos de 3 a 10 dias à frente, enquanto as previsões de longo prazo se estendem para períodos sazonais e mais longos (Organização Meteorológica Mundial, 1992). A Tabela 2.2 apresenta um resumo das principais técnicas de previsão meteorológica.

**Tabela 2.2** Resumo das principais técnicas de previsão meteorológica.

<b>Método</b>	<b>Horizonte</b>	<b>Fundamento do método</b>
Previsão atual	0-6 hr.	A extrapolação do movimento do evento observado por radares meteorológicos e / ou de intensidade de chuva com base em observações por satélite. Além disso, por extrapolação manual ou automatizada de outros parâmetros (por exemplo, nevoeiro, temperatura do ar), e da evolução das tempestades tropicais (furacões, ciclones tropicais, tufões).
Previsão numérica de tempo	0-10 dias (determinísticos), 0-15 dias, sazonal (conjunto)	Modelagem tridimensional da atmosfera sobre uma malha horizontal e camadas verticais, que responde à transferência ou transporte de energia para a terra e (possivelmente) nas superfícies dos oceanos e a assimilação de dados de uma ampla gama de sistemas de observação terrestres, oceânicos, atmosféricos e por satélite.
Estatísticos	Semanal ou sazonal	De regressão múltipla, fazendo uma análise de correlação canônica e outras técnicas que associam o tempo futuro com indicadores ou preditores, tais como a temperatura da superfície do mar e os índices ENSO ( <i>El Niño Southern Oscillation</i> ).
Pos-processamento	Como os de previsão numérica de tempo	Técnicas dinâmicas em que os modelos são aninhados para oferecer uma resolução mais fina em locais de interesse, e técnicas estatísticas, que relacionam as saídas do modelo às condições do terreno baseados em observações históricas ou recentes. Além disso, técnicas de correspondência analógicas ou meteorológicas.
Previsões ou predições de consenso	Tipicamente inter-anual ou sazonal	Previsões aprovadas por especialistas em meteorologia e outras disciplinas com base nos resultados de uma série de modelos de previsão e técnicas.

Fonte: Adaptada de Sene, 2010.

## 2.2. Técnicas empregadas nas previsões hidrológicas

Segundo Bertoni (1989), desde a década de 1970 as pesquisas relacionadas com a previsão de vazões têm como alvo aspectos como:

- Estrutura dos modelos empregados, tanto aqueles baseados na transformação chuva-vazão como aqueles usados para descrever a propagação do escoamento.
- Qualidade dos dados de entrada dos modelos, elemento indispensável para obter previsões com um grau de certeza aceitável.
- Técnicas de atualização dos modelos hidrológicos, classificados como “*on-line*” e “*off-line*”.

- Quantificação das incertezas associadas às previsões, já que isto permite ao tomador de decisões, avaliar melhor os riscos de emitir um alerta falso ou de não produzir um alerta quando a cheia realmente ocorre.

Destes quatro aspectos, a pesquisa abordará o segundo e o terceiro, embora os outros sejam também relevantes.

### 2.3. Modelos de previsão de vazões

Os modelos hidrológicos servem para representar e prever o comportamento das bacias hidrográficas. Pode-se escolher o modelo a ser utilizado com base nos dados existentes de uma determinada bacia. Existem modelos que utilizam como dados somente níveis e vazões, outros, precipitações, e existem também modelos que geram previsão através da relação precipitação-vazão, sendo esta última limitada a períodos de previsão inferiores ao tempo de concentração da bacia (TUCCI, 1998).

Em função do grande número de modelos chuva-vazão que foram desenvolvidos até o momento, surge à questão a respeito de que tipo de modelo é mais aceitável para ser usado na previsão em tempo real. Neste contexto, é útil distinguir entre três tipos de modelos:

#### (1) Modelos conceituais

A essência destes modelos é que eles são quase físicos em natureza. Eles utilizam equações que emulam os processos físicos de uma bacia hidrográfica e, geralmente, possuem dois componentes para fazer isto: precipitação-vazão e propagação em rios ou reservatórios.

#### (2) Modelos empíricos

A atenção é centrada em identificar uma relação matemática entre os valores das variáveis de entrada, chuva ou vazão, e da variável de saída, a vazão futura, sem tentar descrever qualquer um dos mecanismos internos pelo qual essa transformação ocorre. Esta classificação inclui os modelos estatísticos, modelos de regressão simples ou múltiplas, e os modelos baseados em redes neurais artificiais.

#### (3) Modelos empíricos – conceituais

Estes modelos são o resultado do aproveitamento das vantagens de cada um dos modelos descritos anteriormente e compensar suas desvantagens.

O resumo das características gerais de alguns modelos é descrito na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3** Vantagens e desvantagens dos modelos hidrológicos usados em previsão de curto prazo.

Modelo	Vantagens	Desvantagens
Empírico	Estrutura simples, bom ajuste na representação dos dados observados e bom desempenho em prever eventos semelhantes de curto prazo.	Deficiência para representar eventos que extrapolam aos observados.  Limitações quanto ao horizonte longo de previsão.
Conceitual	Por sua capacidade de representar melhor as características físicas da realidade em espaço e tempo, apresentam bom desempenho na extrapolação de eventos não usados em seu ajuste.	Apresentam certas dificuldades no que se refere ao ajuste em tempo real, pela quantidade de parâmetros que eles usam na simulação.  Possuem natureza determinística, operam dados parcialmente aleatórios e seus resultados dificilmente coincidem com as observações.

Fonte: Elaboração própria.

Ferreira (2012) elaborou uma compilação dos principais modelos computacionais usados na previsão de vazões no setor energético do Brasil, e a estes foram incorporados outros modelos também reconhecidos no campo da previsão de vazões. Estes modelos são listados na Tabela 2.4.

**Tabela 2.4** Modelos usados em previsão de vazões.

Tipo de Previsão	Horizonte de previsão	Escala de tempo	Modelo
Longo prazo	Mensal	meses	GEVAZP (Maceira, 1997) PREVAZ (CEPEL, 1997) PREVIVAZM (Costa, 2003) SAISP (FCTH e USP-SP) MGB-IPH (UFRGS-IPH, 2005)
Médio prazo	Um mês	semanas	PREVIVAZ (Maceira, 1994) CPINS (Acioli, 2004)
Curto prazo	Duas semanas a frente	diário	SSARR (US ARMY, 1972) SMAP (LOPES et al, 1982) PREVIVAZH (Livino, 2001) ESP - Extended Streamflow Prediction Method (GEORGAKAKOS e YAO, 2001) HFAM - Hydrocomp Forecast and Analysis Modeling (HYDROCOMP, 2002) Hydro Quebec (HYDROSOFT) Multi-Layer Perceptron – MLP (PUC-Rio) Regressão Dinâmica (PUC-Rio) MGB-IPH (Silva et al, 2007)
Tempo atual	Um dia	horas	IPH II (UFRGS-IPH, 1980) SELF (UFRGS-IPH, 2000) MGB-IPH (Meller, 2012)

Fonte: Adaptado de Ferreira, 2012.

No trabalho de Guilhon e Rocha (2007) foram avaliados diversos métodos de previsão de vazão, abrangendo modelagem física, com modelos do tipo conceitual,

concentrado e distribuído, metodologias híbridas combinando tanto técnicas de inteligência artificial e modelos estocásticos diversos, como técnicas de inteligência artificial e mineração de dados. A escala de tempo das previsões foi semanal e a área de estudo desse trabalho envolveu as bacias do rio Paranaíba, rio Iguaçu e rio Paraná. Os resultados não apontaram de forma unânime para um único modelo. Considerou-se a diferença significativa dos resultados favoravelmente ao modelo conceitual distribuído MGB-IPH, modelo Fuzzy Recorrente e o modelo físico concentrado/estocástico SMAP-MEL, em cada bacia, respectivamente.

## 2.4. Fontes de erro nos dados observados

É importante reconhecer a influência da incerteza nos dados observados dentro do processo de modelagem, assim como nos processos de atualização apresentados nesta pesquisa, todos eles baseados nos dados observados de precipitação ou vazão. A seguir são citados dois trabalhos que tentam explicar de forma quantitativa a fonte e magnitude destes erros.

### 2.4.1. Erros nos dados de chuva

A medição feita usualmente com pluviômetro apresenta erros devido aos efeitos do vento, umidade, evaporação, etc., e por isto, a quantidade de precipitação medida é geralmente inferior (de 3% a 30%, aproximadamente) ao valor real.

Segundo WMO (1982), os principais componentes do erro sistemático na medição de precipitação são apresentados na seguinte equação:

$$P_k = k'*(P_g + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4) \quad (2.1)$$

Onde:  $P_k$  é o valor da precipitação ajustada;  $k'$  é o fator de correção;  $P_g$  é o valor da precipitação medida;  $\Delta P_1$  até  $\Delta P_4$  são as correções dos componentes do erro sistemático, definidos na Tabela 2.5.

**Tabela 2.5** Principais componentes do erro sistemático na medição de precipitação.

Símbolo	Componente de erro	Magnitude
k'	Perda devido ao vento	2 – 10%
$\Delta P_1 + \Delta P_2$	Perdas de umedecimento das paredes internas do coletor e do recipiente, quando ele é esvaziado.	2 – 10%
$\Delta P_3$	Perda devido à evaporação no recipiente.	0 – 4%
$\Delta P_4$	Perda por derrames durante a medição.	1 – 2%

Uma segunda definição, com inserção das incertezas na precipitação mostra uma relação exponencial (Krajewski e Georgakakos, 1985):

$$Pa_t = Po_t * 10^\epsilon \quad (2.2)$$

Onde:  $Po_t$  é a chuva observada no tempo t, gerada com base em medições de postos pluviométricos ou com radar na sub-bacia;  $Pa_t$  é a chuva atualizada no tempo t; o termo  $10^\epsilon$  assume conhecida a estrutura dos erros.

#### 2.4.2. Erros nos dados de vazões

É comum o uso de curvas-chave para a obtenção das séries fluviométricas, baseadas no uso de linigramas. Embora as medições feitas para a construção da curva-chave possam ter um erro inferior a 1%, a extrapolação na parte superior da curva pode gerar grandes erros nas estimativas de vazões, principalmente em ocorrência de cheias, onde normalmente se carece de medições precisas.

Di Baldassarre & Montanari (2009) fizeram uma análise das seguintes fontes principais de erro, as quais afetam a determinação da vazão:

- Erro na medição da vazão: obtida pelo método velocidade-área, aproximadamente de 5,3%;
- Erro na incerteza da curva-chave: induzida pela interpolação ou extrapolação da curva-chave, pela presença de condições de fluxo instável e variações sazonais na rugosidade do leito do rio. Estes fatores, em conjunto, variam de 1,8% até 38,4%;

Esses autores realizaram este estudo na bacia do rio Pó, nordeste da Itália, onde os valores das vazões encontraram-se entre 1000 e 6000  $m^3.s^{-1}$ . A curva-chave foi interpolada para a faixa de 1000 até 6000  $m^3.s^{-1}$  e foi extrapolada na faixa de 6500 até 12000  $m^3.s^{-1}$ , sendo esta última correspondente à condições extraordinárias. As funções

de ajuste usadas foram a polinomial e a potencial e os erros percentuais associados a cada função foram estimados na faixa de 1,2 a 11,5% e 1,7 a 13,8%, respectivamente. Pelo apresentado, é necessário tomar maior importância na magnitude do erro nos dados de entrada e saída, que são usados nos modelos hidrológicos.

## 2.5. Problemas na geração de previsão de vazões

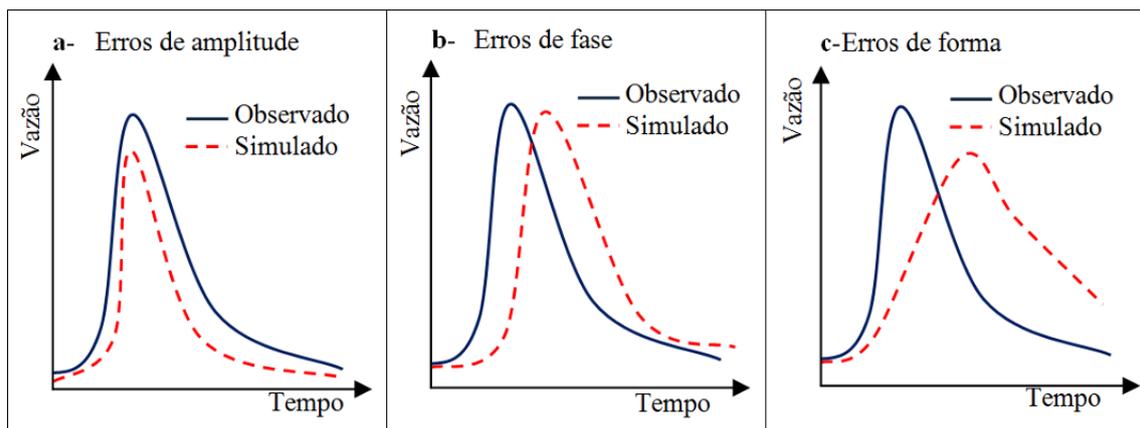
Segundo Serban e Askew (1991) o maior problema que ocorre quando se aplica um modelo hidrológico em tempo real é o fato de que, em geral, o hidrograma simulado é diferente do hidrograma observado antes do início da previsão.

Essa diferença é devido a:

- Erros nos dados de entrada do modelo.
- Limitações no modelo ou em algum de seus módulos (cálculo de derretimento de neve ou chuva efetiva, geração da vazão, etc.).
- Estimativa dos parâmetros do modelo com somente uma quantidade limitada de dados.
- Erros na medição das vazões observadas.

Os erros entre hidrogramas simulados e medidos são, geralmente, de três tipos:

- Erros de volume ou amplitude, geralmente devido à falta de uma adequada representação do processo de infiltração ou pelos erros nos dados de entrada do modelo.
- Erros no tempo ou erros de fase, induzidos principalmente pela componente de propagação do modelo.
- Erros de forma no hidrograma, devido à componente de escoamento superficial do modelo.



**Figura 2-3** Tipos de erro na simulação hidrológica.  
 Fonte: Serban e Askew, 1991.

Esses tipos de erros podem acontecer simultaneamente na prática operacional. Os modelos usados no processo de previsão de vazões e apresentados no item 2.3 necessitam dados de entrada, valores de vazão, precipitação, evaporação, temperatura, derretimento de neve, etc. e, estes dados, podem apresentar erros que influenciam o processo de geração de vazões.

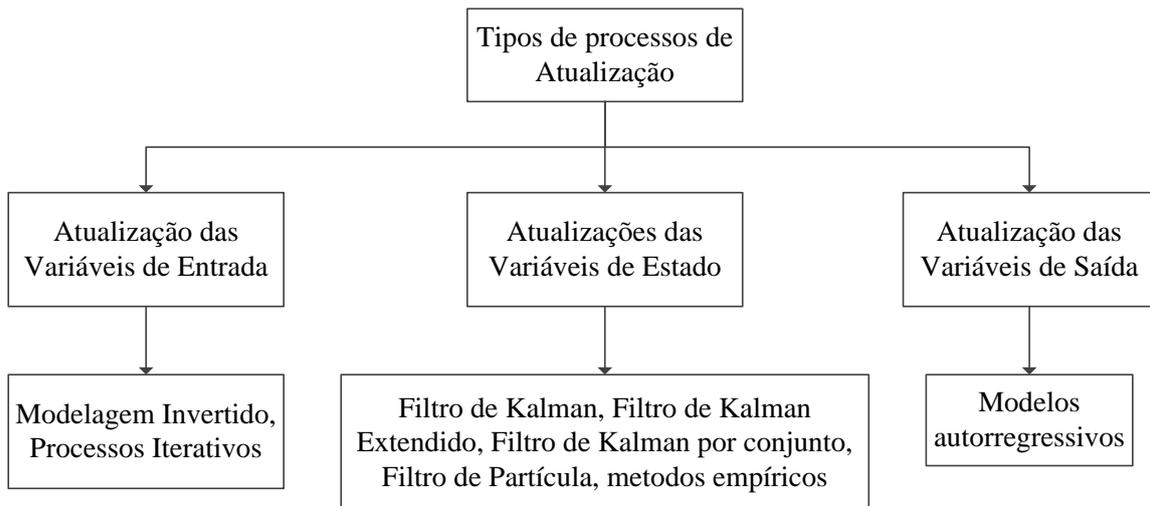
Existindo dados observados em tempo real é possível aproximar o comportamento do modelo à resposta do sistema observado em campo, por meio de procedimentos conhecidos como assimilação de dados ou atualização do modelo.

## 2.6. Processos de atualização do modelo

O processo de atualização referido ao modelo hidrológico de previsão entende-se como um processo de retroalimentação (Madsen & Skotner, 2005), onde as observações no rio são utilizadas para corrigir as condições iniciais do modelo ou as variáveis de entrada do modelo.

Em aplicações de modelos conceituais para a previsão de vazões em tempo real, não são normalmente utilizadas atualizações ou são utilizadas formas de atualização bastante simples. Os modelos empíricos apresentam vantagem sobre os modelos conceituais, devido a sua estrutura simples, que permite que seus parâmetros sejam atualizados facilmente (Pinheiro, 1990).

Segundo Serban (1991), os procedimentos de atualização de previsão diferem dependendo das variáveis que devem ser atualizadas no modelo hidrológico (Tabela 2.6 e Figura 2-4).



**Figura 2-4** Processos de atualização usada em modelos hidrológicos de previsão  
 Fonte: adaptado de Serban (1991)

Um projeto desenvolvido pela OMM, entre os anos 1985 e 1989, sob o título "*Realtime intercomparison of conceptual models*" (WMO, 1990) apresentou uma revisão de um total de 11 modelos conceituais de 11 países utilizados na previsão de vazão. As técnicas de atualização de dados e suas principais variáveis de análise são apresentadas na Tabela 2.6. A conclusão do trabalho foi de que a inclusão do processo de atualização teve um grande impacto na melhoria dos resultados obtidos.

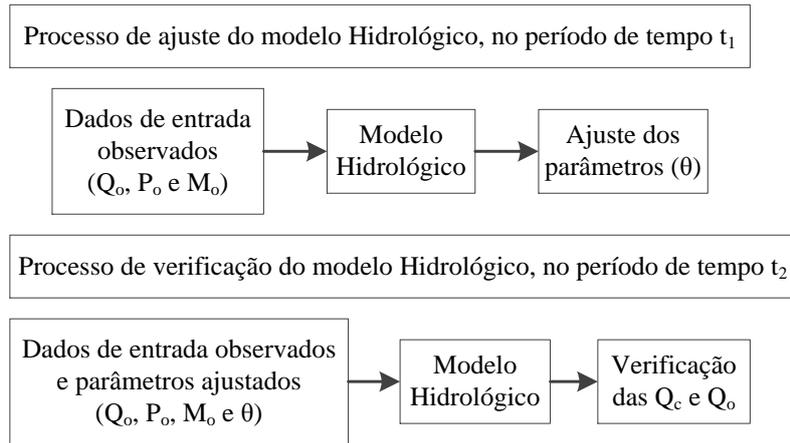
**Tabela 2.6** Características dos procedimentos de atualização de modelos de previsão.

Modelo	Atualização		Variáveis atualizadas diretamente		
	Automático	Manual	Entradas	Estado	Saídas
1. UBC Canadá	X			Equivalente de água de cobertura de neve	Vazão
2. CEQUEAU Canadá		X	Precipitação e derretimento da neve		Descarga
3. CRM Czechoslovakia	X			Indicador de fluxo de base	Descarga
4. GAPI Hungary	X				Vazões e Volume de enchente
5. CLS Italy	X			Hidrograma unitário	
6. HBV Sweden		X	Temperatura do ar e precipitação		
7. SRM Switzerland/USA		X		Área com cobertura de neve	Descarga
8. TANK Japan	X		Precipitação e derretimento da neve		
9. SSARR USA	X		Temperatura do ar e precipitação		
10. HFS USA	X			Quantidade de água nos reservatórios do modelo	
11. NAMKAL Denmark		X		Quantidade de água nos reservatórios do modelo	

Adaptado de OMM, 1990.

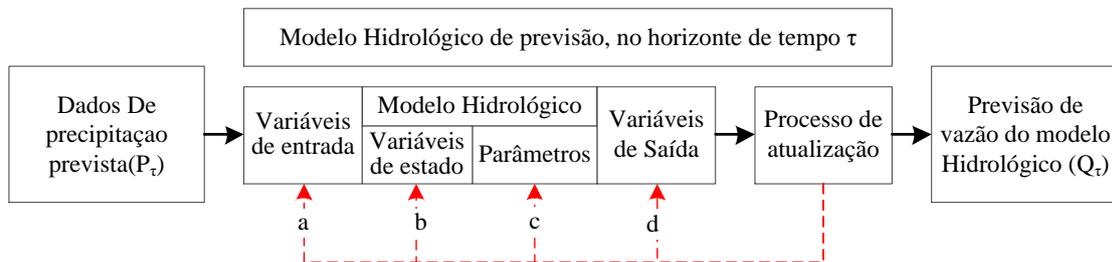
Antes de começar a descrever as técnicas de atualização de dados, devem ser diferenciadas duas etapas do processo de ajuste e utilização de um modelo hidrológico (Andreolli, 2003).

A etapa denominada *Off-Line* é aquela que envolve todos os passos antes da geração da previsão de vazão pelo modelo hidrológico, conforme se apresenta na Figura 2-5. Nesta etapa, dois processos são executados: (1) Calibração, na qual os parâmetros do modelo hidrológico são determinados com base nas séries históricas de chuva, vazão e dados climáticos como evaporação, coletados em um período de tempo  $t_1$ ; (2) Verificação, na qual o modelo é utilizado mantendo os valores dos parâmetros previamente definidos no período  $t_2$ , diferente do utilizado na calibração.



**Figura 2-5** Etapa Off-Line do Modelo Hidrológico.  
Fonte: Andreolli (2003).

A etapa denominada *On-Line* é aquela que envolve todos os passos antes da geração das previsões de vazão pelo modelo hidrológico, conforme se apresenta na Figura 2-6.

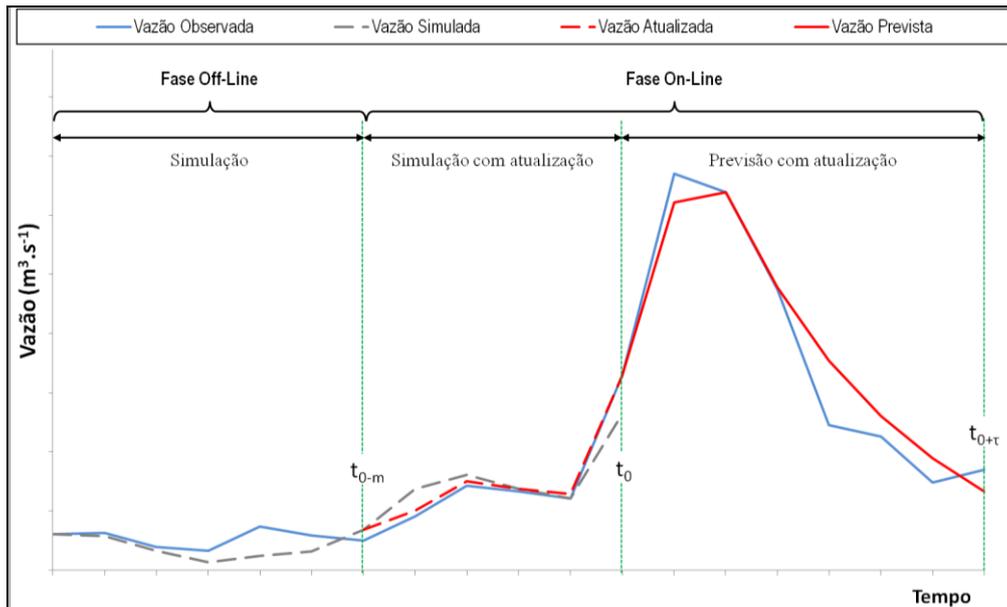


**Figura 2-6** Etapa On-Line do Modelo Hidrológico.  
Fonte: Adaptado de Refsgaard (2007).

Dentro desta etapa são aplicadas as técnicas de atualização do modelo, às quais podem ser agrupadas em quatro principais grupos:

- a) Atualização dos dados de entrada.
- b) Atualização das variáveis de estado.
- c) Atualização dos parâmetros do modelo.
- d) Atualização das variáveis de saída.

Na Figura 2-7 são ilustradas as duas etapas de trabalho citadas acima, dando-se especial ênfase, na melhoria esperada com os métodos de atualização, durante a fase *On-line* e na simulação de previsão de vazão.

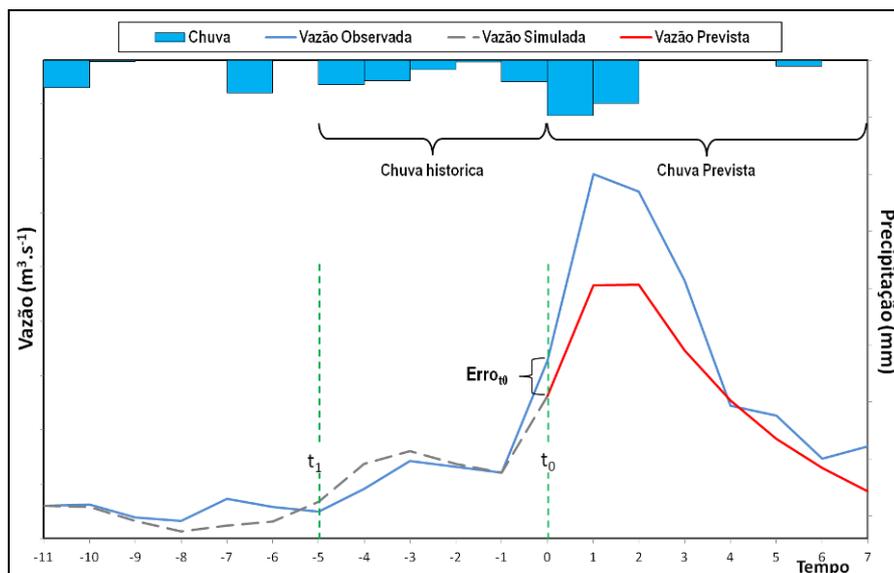


**Figura 2-7** Etapas de trabalho com o modelo hidrológico de previsão de vazão.  
Fonte: Elaboração própria.

A seguir, se apresenta uma descrição destes procedimentos, assim como uma revisão do estado da arte de algumas destas metodologias.

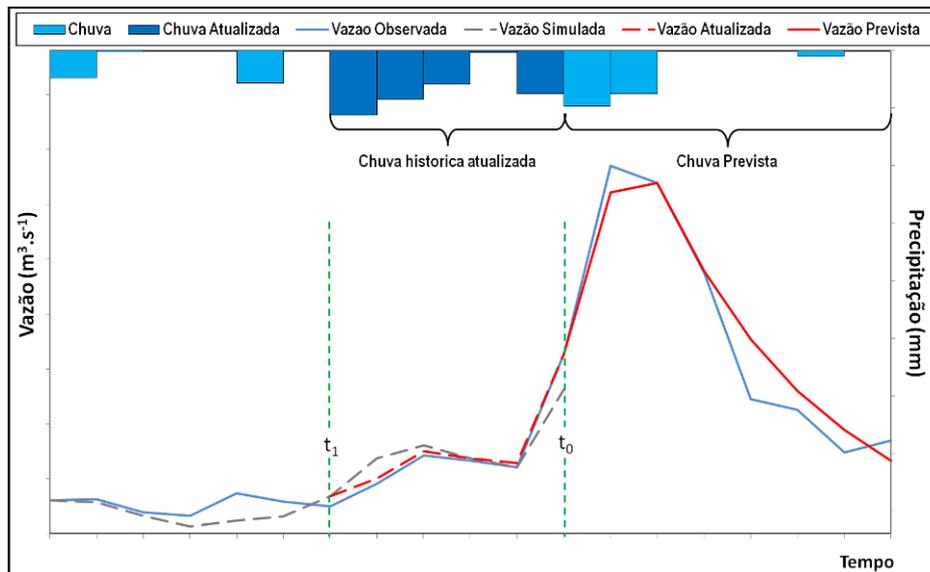
### 2.6.1. Atualização dos dados de entrada

Para ilustrar o resultado da aplicação destas metodologias é mostrado um exemplo na Figura 2-8, onde é apresentado o hidrograma previsto sem a atualização de precipitação, no qual se observa um erro no início da previsão de vazão.



**Figura 2-8** Períodos de tempo usados em uma modelo de previsão hidrológica.  
Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 2-9, observam-se os resultados esperados com a aplicação do processo de atualização de dados de entrada no modelo hidrológico na fase *On-Line*. A metodologia apresentada atualiza as precipitações observadas no intervalo de tempo entre  $t_1$  a  $t_0$ . Com isso, é possível melhorar a simulação do modelo neste intervalo sem mudar ou perturbar os parâmetros do modelo.

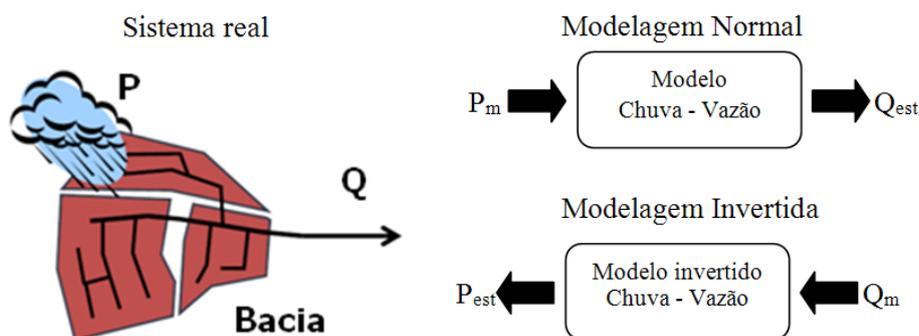


**Figura 2-9** Período de atualização de dados e vazão prevista melhorada.  
Fonte: Elaboração própria.

Os dados de entrada do modelo, frequentemente precipitação ou alguma outra variável climática, são atualizados em um período anterior ao início da previsão para aproximar as vazões geradas pelo modelo às vazões observadas.

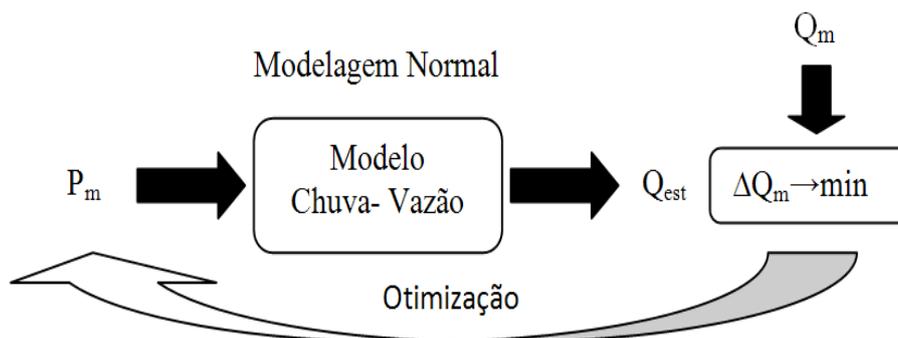
Leonhardt (2014) apresenta duas metodologias básicas aplicadas na melhoria das simulações geradas por um modelo hidrológico aplicado em um estudo de caso de drenagem urbana:

- a) A primeira é chamada de modelagem invertida, o termo refere-se, assim, a inverter a estrutura das equações matemáticas usadas na modelagem. A Figura 2-10 apresenta uma bacia hidrográfica urbana e sua representação através de uma modelagem normal e de uma modelagem invertida. As entradas e saídas medidas e estimadas são identificadas pelos sub-índices “m” e “est”, respectivamente.



**Figura 2-10** Método de modelagem invertida.  
 Fonte: Leonhardt (2014).

b) A segunda metodologia é conhecida como modelo de atualização (Figura 2-11), onde é feita a atualização sequencial do modelo a partir de novas medições do sistema real, a fim de melhorar a estimativa dos resultados do modelo em tempo real.



**Figura 2-11** Método de atualização sequencial.  
 Fonte: Leonhardt (2014).

Estas metodologias se limitam a casos em que a resposta da bacia hidrográfica se observa imediatamente no exutório, por esta razão só pode ser aplicável para pequenas bacias, onde existe monitoramento em tempo real (Leonhardt, 2014).

Estas duas metodologias originalmente tiveram aplicação em modelos de propagação de vazões, representadas por equações lineares. Os resultados para a primeira metodologia, em modo *off-line*, apresentaram problemas na representação de precipitações de entrada intensas, devido a problemas na reformulação das equações do modelo. Enquanto que a segunda, não pôde ser aplicada para a operação do modelo em modo *on-line*.

### 2.6.2. Atualização das variáveis de estado

O termo estado é usado para descrever uma variável do modelo que se situa em um estágio entre a entrada e a saída do modelo, por exemplo, o nível d'água ou volume nos reservatórios conceituais dos modelos chuva-vazão. A atualização das variáveis de estado pode ser feita de duas formas: por métodos baseados no filtro de Kalman ou por procedimentos empíricos.

O filtro de Kalman (Kalman, 1960) foi à primeira solução para o problema de atualização das variáveis de estado. Este método considera tanto as incertezas das medições e do modelo, dos quais somente são necessárias estimativas iniciais. No entanto, a sua aplicação está limitada aos modelos lineares e distribuições gaussianas de erros (Beven, 2009; Ridler et al., 2014). A abordagem foi evoluindo para superar essas limitações e foram desenvolvidas novas técnicas como o *Extended Kalman Filter* (Welch e Bishop, 2006; Moradkhani et al., 2005.) e o *Ensemble Kalman Filter* (Evensen, 1994, 2003) que podem ser aplicadas em modelos altamente não lineares. Paiva et al. (2013), atualizaram as variáveis de estado do modelo hidrológico MGB-IPH com a aplicação do *Ensemble Kalman Filter*, usando dados de vazões e dados de altimetria de níveis de água por radar. Outros métodos, como o filtro de partículas (Moradkhani et al., 2005 & Smith et al., 2008) também foram utilizados neste processo.

Brun (1999) apresentou um processo de atualização das variáveis de estado do modelo conceitual IPH II, baseado em medições recentes de vazão. Neste sentido, foram atualizadas as vazões de escoamento superficial, subsuperficial e armazenamento da camada superficial. Os indicadores de desempenho usados nos testes apresentaram melhorias significativas com o processo de atualização, em relação à situação sem atualização.

A atualização das variáveis de estado do MGB-IPH é realizada através de um método empírico, proposto originalmente por Collischonn et al. (2005), sendo sua última versão apresentada nos trabalhos de Paz et al. (2007) e Collischonn et al. (2007). O método utiliza as vazões observadas em tempo-real para atualizar as condições iniciais do modelo, representadas pelas vazões calculadas ao longo da rede de drenagem e pelos volumes de água armazenados nos reservatórios conceituais de cada minibacia do modelo hidrológico. Meller (2012) realizou uma modificação na maneira com que são atualizadas as vazões na rede de drenagem, que possuem maior impacto na melhora das previsões dos primeiros intervalos de tempo do horizonte de previsão. No método

proposto, o fator de atualização, definido anteriormente, é ponderado pela distância relativa das minibacias ao exutório da sub-bacia, segundo a rede de drenagem do modelo.

A aplicação desta abordagem em uma modelagem distribuída pode ser mais complexa, porque os erros da previsão precisam ser distribuídos sobre toda a bacia simulada (Sene, 2010). Os erros estruturais do modelo podem representar o componente mais importante da incerteza na previsão (Wagener & Gupta, 2005).

### 2.6.3. Atualização dos parâmetros do modelo

No processo de atualização dos parâmetros do modelo, os dados mais recentes de precipitação, evaporação, vazões ou níveis de água observados são utilizados para iniciar um novo processo de calibração do modelo, usando para este fim alguma técnica de otimização.

Tucci e Clarke (1980) testaram uma metodologia empírica, denominada de método adaptativo, no modelo conceitual IPH II, para a previsão de vazões em tempo real em escala de tempo diária. A metodologia atualiza em tempo real os parâmetros do modelo, para um período de tempo de até 30 dias antes do início da previsão de vazão. As medidas de desempenho usadas nos testes mostraram uma pequena melhoria nos resultados, podendo ser atribuída, conforme os autores, à técnica mono-objetivo usada na atualização dos parâmetros ou ao período de dados utilizado.

Alves et al. (1991) utilizaram o Filtro de Kalman para estimativa e atualização dos parâmetros do modelo de transformação chuva-vazão IPH II. A implementação da metodologia foi melhor nos períodos de recessão e de eventos menores.

Em Alves (1993) foi utilizada a calibração adaptativa para a previsão de vazões, diferenciando um conjunto de parâmetros ótimos para a fase de ascensão e recessão do hidrograma de cheia, nesta última, os resultados foram satisfatórios. No entanto, na fase de ascensão do hidrograma apresentou-se uma instabilidade no conjunto de parâmetros. No geral, o resultado foi bom para previsões de curto prazo.

Este procedimento de atualização dos parâmetros tem sido alvo de muitas críticas, Serban e Askew (1991) comentam o problema de uma interdependência entre os parâmetros do modelo hidrológico. Segundo Moore (2005) um novo ajuste dos parâmetros pode ser feito após cada previsão, mas isto normalmente é aplicado quando

a estrutura do modelo é bastante simples. Devido ao elevado custo computacional requerido, não se recomenda sua aplicação em modelos distribuídos.

#### 2.6.4. Atualização das variáveis de saída

Os métodos utilizados neste grupo têm como principal vantagem o fato de serem aplicados de maneira independente ao modelo hidrológico que gera a previsão de vazão e consistem em prever os erros de previsão do modelo. Nesse sentido, são tipicamente utilizados modelos autorregressivos ajustados à série temporal de diferenças entre os valores observados e previstos (Serban e Askew, 1991).

Cruz (1987) e posteriormente Pinheiro (1990) adaptaram uma metodologia que combina o modelo conceitual IPH II com parâmetros fixos, e um modelo empírico autorregressivo ARIMAX para previsão dos erros. O modelo conjugado revelou um melhor desempenho em relação à aplicação dos dois modelos separadamente, para um alcance de até 6 horas.

Kahl e Nachtnebel (2008) propõe o uso conjunto de dois métodos de atualização dos dados de entrada e de saída. Neste caso, aplicado em um modelo semidistribuído chuva-vazão COSERO, desenvolvido pelo Instituto de Gestão de Água, Hidrologia e Engenharia Hidráulica da Universidade de Recursos Naturais e Ciências Biológicas Aplicadas, Viena, Áustria. Os métodos foram testados na bacia de Traisen, com uma área de cerca de 1000 km<sup>2</sup>. O primeiro método é utilizado para atualizar o estado do sistema no início do período de previsão, alterando a entrada de chuva. O segundo método é um modelo autorregressivo para prever o erro da previsão, que é usado para eliminar os erros sistemáticos na saída do modelo.

Uma das principais características observadas em trabalhos aplicando metodologias de atualização foi que o uso em conjunto dessas técnicas mostra um melhor resultado que a aplicação individual de cada uma delas (Bertoni, 1989; Serban e Askew, 1991; Kahl & Nachtnebel, 2008; Leonhardt, 2014).

## 2.7. Medidas de desempenho

A análise visual dos erros de previsão pode fornecer informações importantes sobre os resultados obtidos. As desvantagens estão no dispêndio de tempo e a falta de objetividade, por estas razões, tem-se preferência pelo uso de coeficientes numéricos para a avaliação da qualidade dos resultados. Portanto, as medidas de desempenho são estatísticas, com as quais se procura verificar as precisões dos resultados obtidos, confrontados com as observações correspondentes de uma série amostral (Pedrollo, 2000).

Devem-se diferenciar as medidas de desempenho usadas no método de atualização (etapa *off-line*) e as usadas para avaliar a previsão do modelo hidrológico na etapa *On-Line*. A seguir são apresentadas algumas das medidas de desempenho tipicamente utilizadas.

### 2.7.1. Medidas de desempenho das previsões de vazões

Para analisar o processo de atualização aplicado no modelo de previsão de vazões, podem ser utilizadas as seguintes estatísticas (Brun, 1999):

$$D_a = \frac{\sum_{i=1}^M (Q_{oi} - Q_{pi})^2}{\sum_{i=1}^M Q_{oi}} * 100 \quad (2.3)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - Q_{pi})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - Q_{om})^2} \quad (2.4)$$

$$CP = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - Q_{pi})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - Q_{t_o})^2} \quad (2.5)$$

$$EMQ = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{pi} - Q_{oi})^2 \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

Onde:  $Q_{pi}$  é o valor previsto;  $Q_{oi}$  é o valor observado;  $Q_{to}$  é o valor observado no instante  $t_0$ , ponto de partida da previsão;  $Q_{om}$  é o valor médio dos valores observados;  $N$  é o número de valores previstos;  $Q_{ai}$  é o valor da vazão prevista com atualização;  $Q_{oi}$  é o valor da vazão observada;  $Q_{si}$  é o valor da vazão prevista sem atualização;  $Q_{om}$  é o valor médio dos valores observados;  $Q_{mai}$  é o valor médio dos valores atualizados;  $M$  é o número de intervalos de tempo atualizados.

O coeficiente  $D_a$  compara o ganho percentual da previsão de vazão entre os cenários com atualização e sem atualização. Quanto maior for este valor, maior será o ganho do cenário com atualização em relação ao sem atualização, a interpretação do resultado é qualitativo.

O coeficiente de Nash Sutcliffe (NS), mede o desempenho do modelo de previsão de vazão sobre o valor médio da observação, variando entre  $[-\infty$  e  $1]$ , com o valor ótimo próximo de um.

O coeficiente de persistência (CP, Kitanidis & Bras, 1980), mede o desempenho do modelo sobre um modelo de persistência e prevê o valor de vazão do início da previsão, variando entre  $[-\infty$  e  $1]$ , com o valor ótimo próximo de um.

O erro médio quadrático (EMQ), avalia a dispersão das previsões em torno das observações, variando entre  $[0$  e  $+\infty]$ , com o valor ótimo próximo de zero.

### 3. ESTUDO DE CASO

Três bacias hidrográficas foram selecionadas como estudo de caso: rio Ijuí, rio Tesouras e rio Canoas (Figura 3-1). Estas bacias hidrográficas foram áreas de estudo de múltiplas pesquisas no IPH, e dispõem de banco de dados, onde o modelo hidrológico IPH-II foi testado anteriormente com bons resultados. Além disso, as bacias apresentam características diferentes quanto à climatologia, tempo de concentração (estimada com a equação de Kirpich), magnitude das vazões máximas, além de apresentarem áreas de diferentes tamanhos, 5.414 km<sup>2</sup>, 1.897 km<sup>2</sup> e 989 km<sup>2</sup>, permitindo a avaliação da metodologia proposta em diferentes situações.

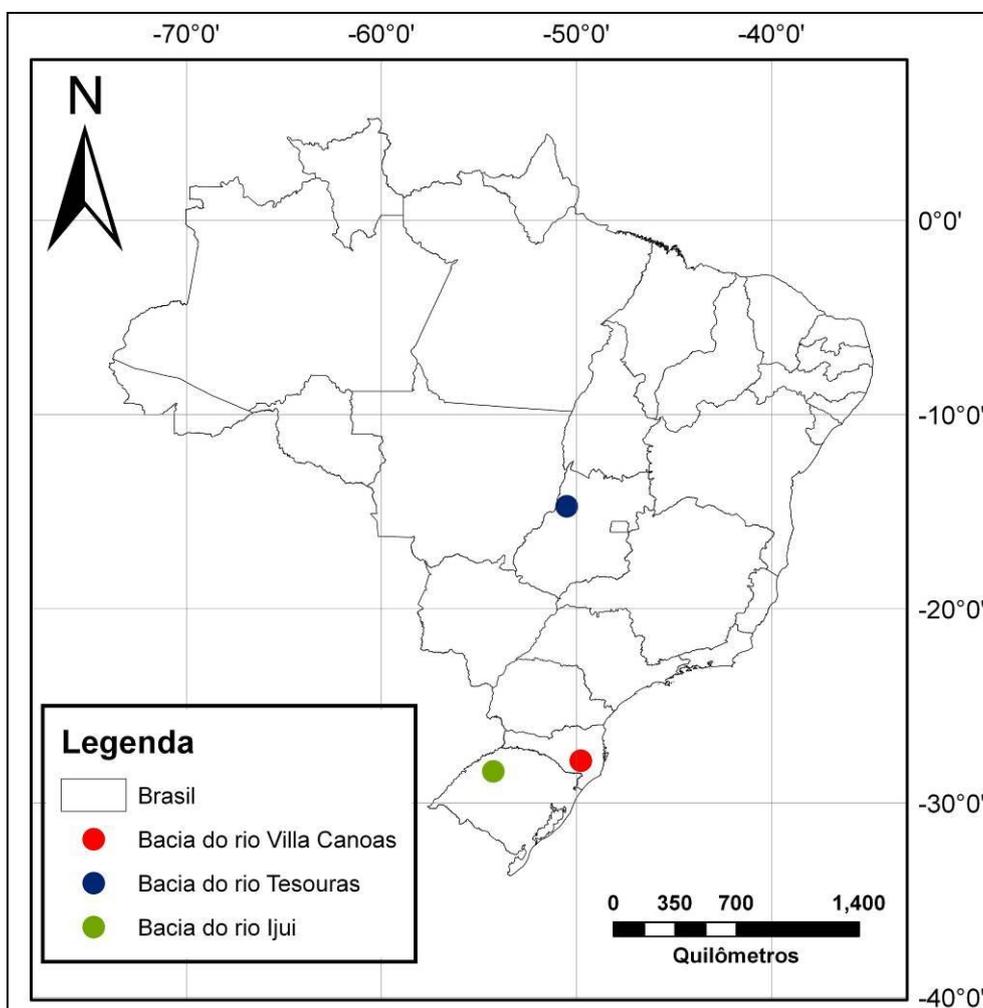


Figura 3-1 Localização das bacias avaliadas.

A seguir é apresentada uma caracterização de cada bacia e os dados pluviométricos, evapotranspiração potencial e fluviométricos utilizados.

### 3.1. Bacia hidrográfica do rio Ijuí

A sub-bacia do rio Ijuí com exutório no posto Santo Ângelo, está localizada na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 28°00' a 28°45' de latitude Sul e 53°10' a 54°20' de longitude oeste, com uma área de abrangência de 5.414 km<sup>2</sup> (Figura 3-2).

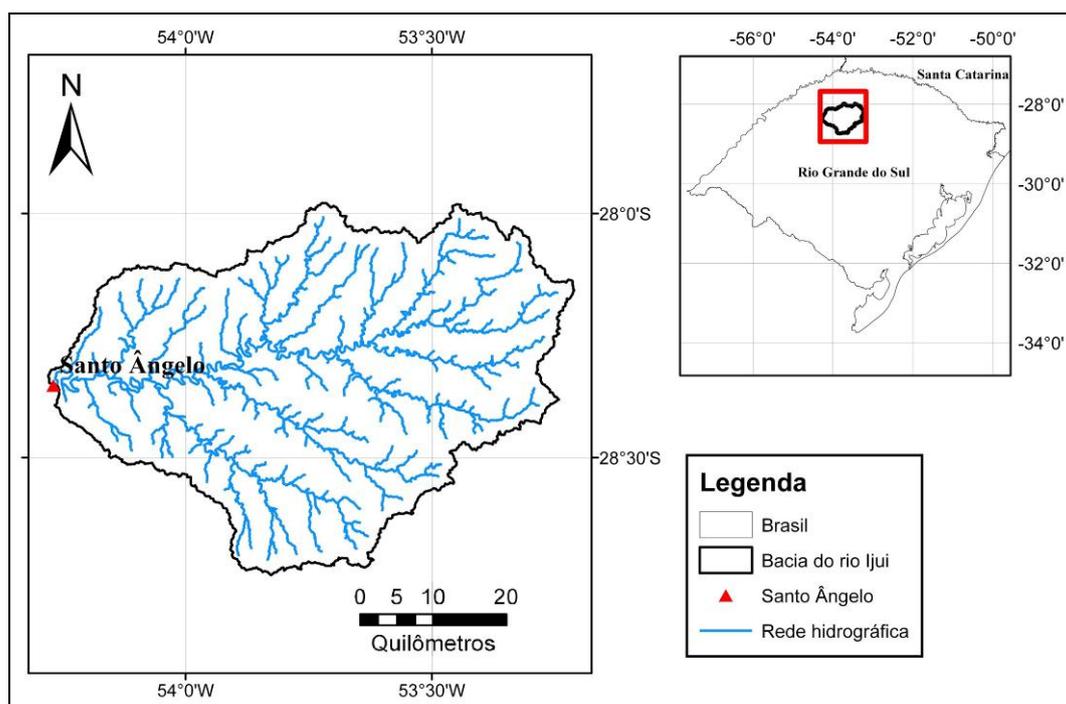


Figura 3-2 Bacia do rio Ijuí, no posto fluviométrico Santo Ângelo.

O relevo é composto de colinas em regiões de campos com declividades suaves que variam entre 3 a 15%. O regime de precipitações é homogêneo durante todo o ano, sendo que no período analisado de 1989 a 1992, apresentou uma precipitação média anual de aproximadamente 1.750 mm.ano<sup>-1</sup>. O tempo de concentração estimado com a equação de Kirpich foi de dois dias.

A bacia hidrográfica do rio Ijuí foi delimitada até a localização do posto fluviométrico Santo Ângelo (75230000), dentro de sua extensão estão localizadas seis estações pluviométricas pertencentes à ANA, mostrados na Figura 3-3. Os períodos das séries históricas de precipitação dos postos pluviométricos e fluviométricos são apresentados na Tabela 3.1, maiores descrições podem ser obtidas em Viana (2011). Assim, os períodos de interesse escolhidos para avaliar o desempenho da metodologia, são descritos a seguir.

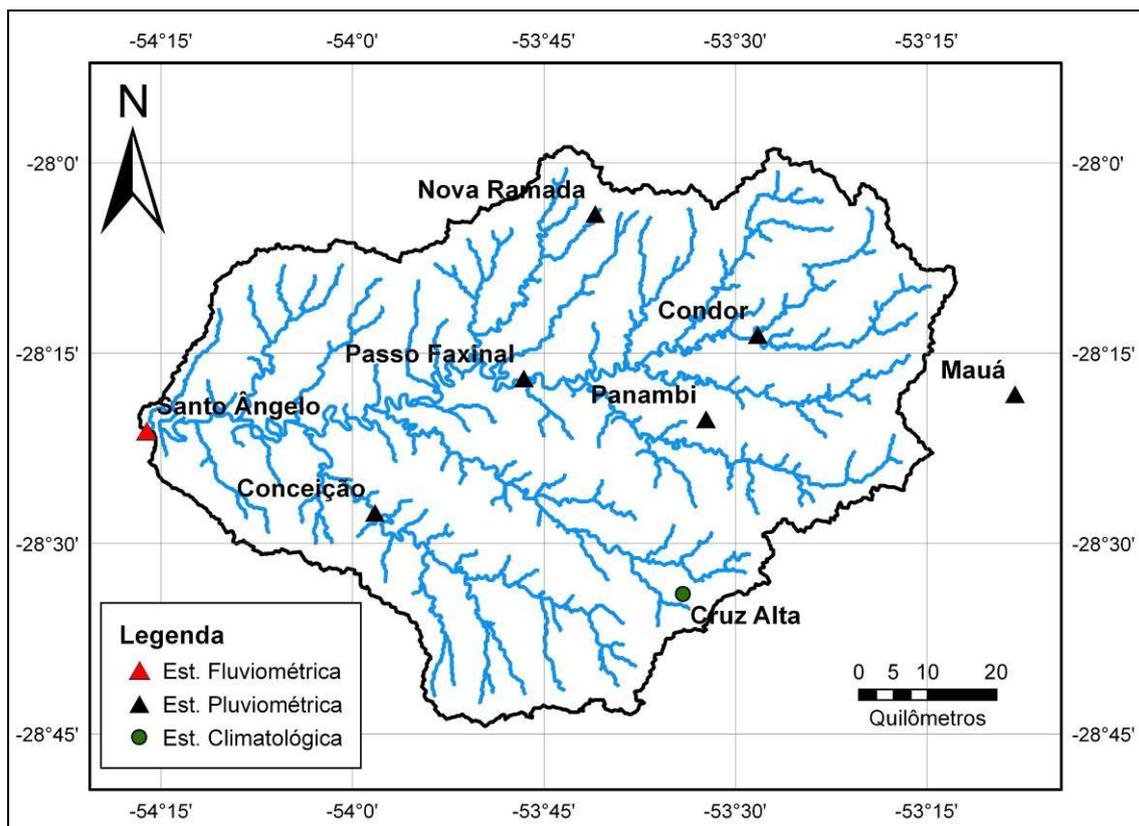
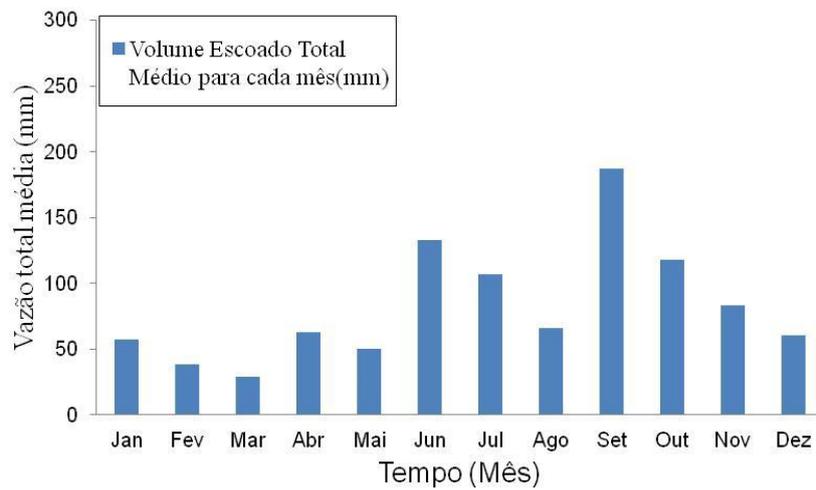
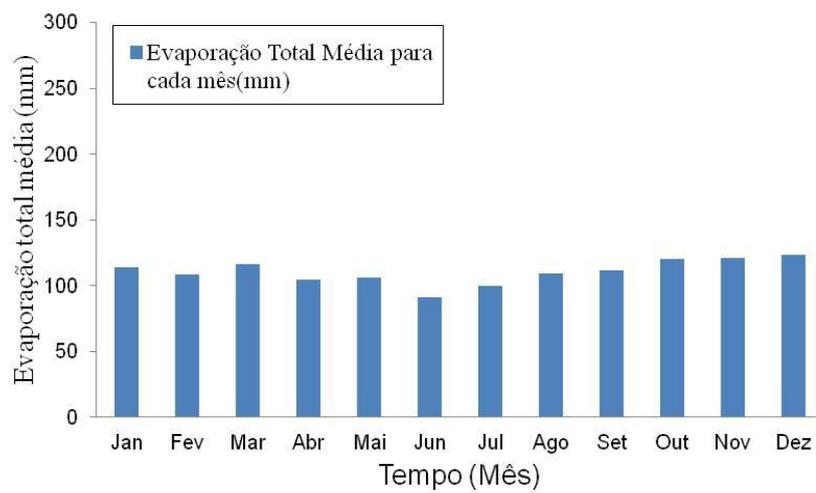
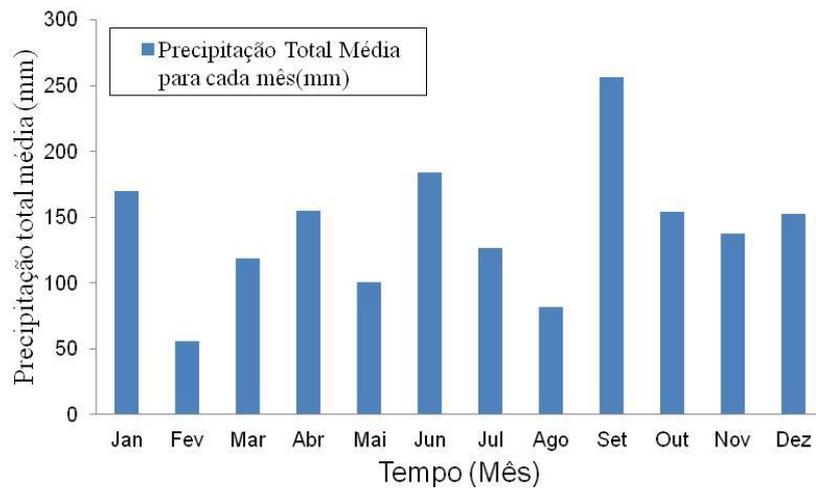


Figura 3-3 Bacia do rio Ijuí, localização de postos pluviométricos.

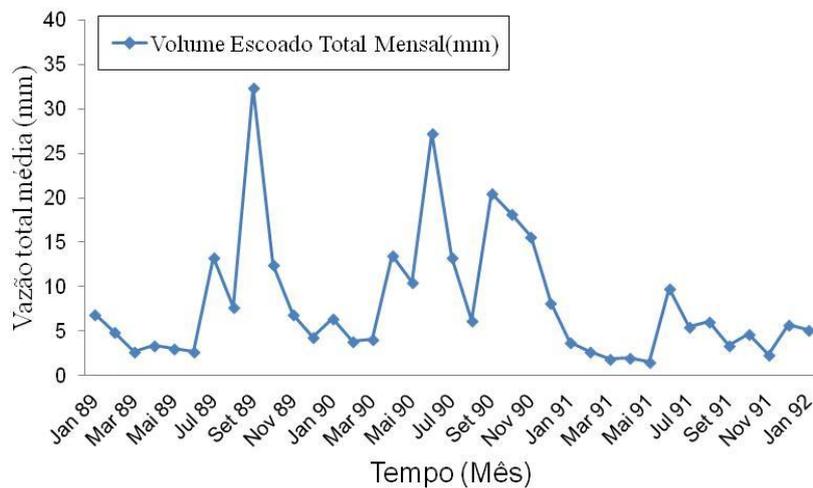
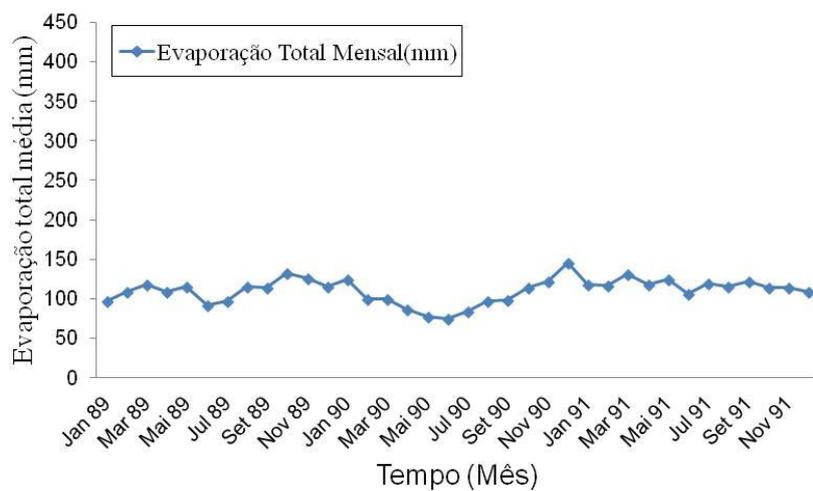
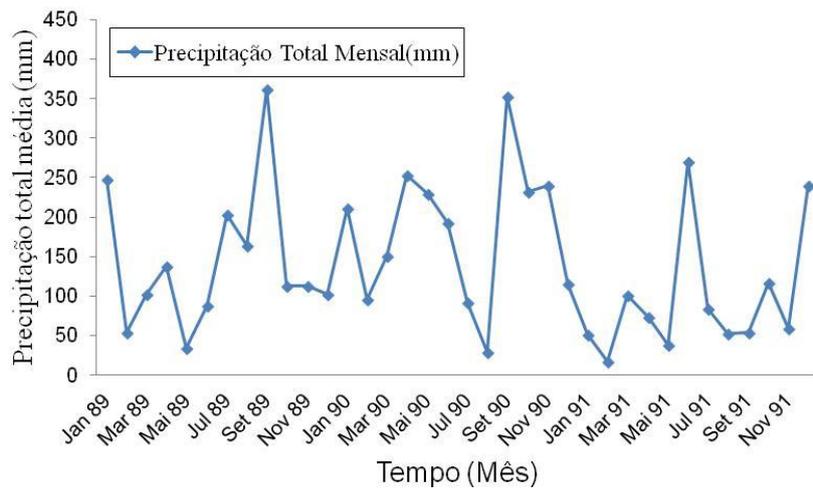
Tabela 3.1 Informações meteorológicas e hidrológicas para a bacia do rio Ijuí.

Código	Tipo	Nome	Estado	Latitude (S)	Longitude (W)	Período Utilizado
75230000	Fluviométrica	Santo Ângelo	Rio Grande do Sul	28°21'19"	54°16'6"	01/01/1989 - 31/12/1991
2853003	Pluviométrica	Conceição		28°27'22"	53°58'18"	
2853010		Passo Faxinal		28°17'22"	53°46'46"	
2853023		Condor		28°13'32"	53°28'13"	
2853034		Panambi		28°20'40"	53°32'30"	
2853035		Nova Ramada		28°4'0"	53°41'0"	
2854019		Mauá		28°18'8"	54°8'3"	
83912	Climatológica	Cruz Alta		28°37'48"	53°36'0"	

A média mensal para este período de dados precipitação, evaporação e vazão são mostradas na Figura 3-4, onde se observa que o comportamento das séries de valores totais médios para cada mês apresenta certa regularidade em relação aos totais precipitados ao longo do ano, tendo um incremento no mês de setembro. Na Figura 3-5, observa-se que o volume escoado tem um notável aumento nos meses próximos a setembro em correspondência com os meses com maior valor de chuva total mensal.



**Figura 3-4** Série de valores totais médios na bacia do rio Ijuí, no período 1989-1991.

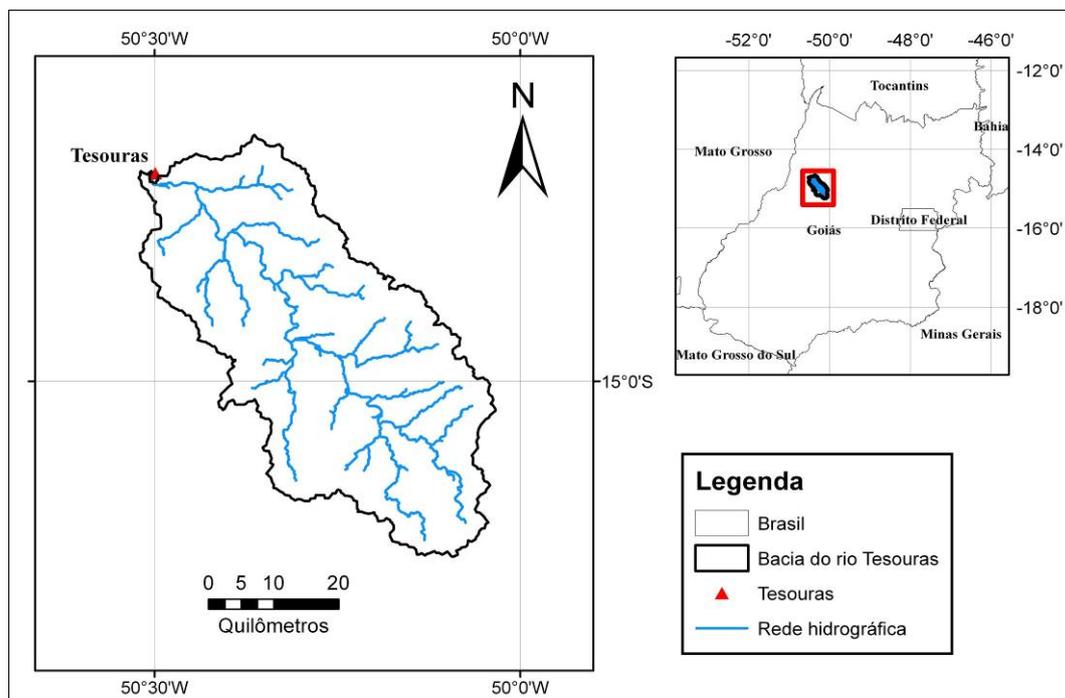


**Figura 3-5** Série de valores totais mensais na bacia do rio Ijuí, no período 1989-1991.

A partir destas considerações climáticas da bacia, escolheu-se o período de dados pluviométricos entre 01/01/1989 e 30/05/1989, para a calibração dos parâmetros do modelo IPH II, e dois eventos de vazão máxima de dois anos diferentes gerados nos meses de setembro de 1989 e 1990.

### 3.2. Bacia hidrográfica do rio Tesouras

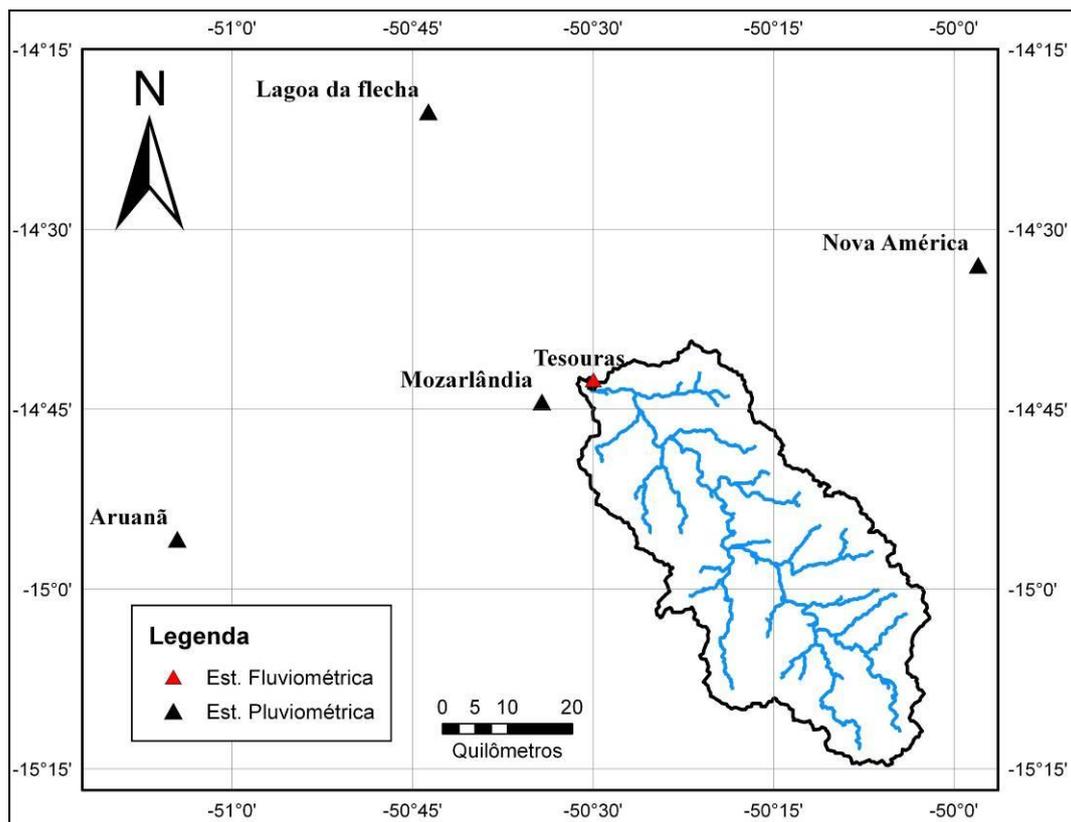
A bacia hidrográfica do rio Tesouras situa-se na região noroeste do estado de Goiás, entre as coordenadas geográficas 14°6' a 15°15' de latitude Sul e 50°0' a 50°53' de longitude oeste. A área da bacia estudada é de 1.897 km<sup>2</sup> (Figura 3-6).



**Figura 3-6** Localização da bacia do rio Tesouras.  
Fonte: Elaboração própria.

A bacia hidrográfica do rio Tesouras foi delimitada até a localização do posto fluviométrico rio Tesouras (25500000), cuja área é de 1.817 km<sup>2</sup>. No período analisado, de 1982 a 1986, a precipitação anual média foi de 1659 mm.ano<sup>-1</sup> e evapotranspiração anual média de 1.613,4 mm.ano<sup>-1</sup>. O tempo de concentração estimado com a equação de Kirpich foi de 4 dias.

Próximo da área da bacia Tesouras se encontraram quatro postos pluviométricos. A descrição e localização destas estações se encontram na Tabela 3.2 e na Figura 3-7. Maiores descrições podem ser obtidas em Bravo et al. (2009).



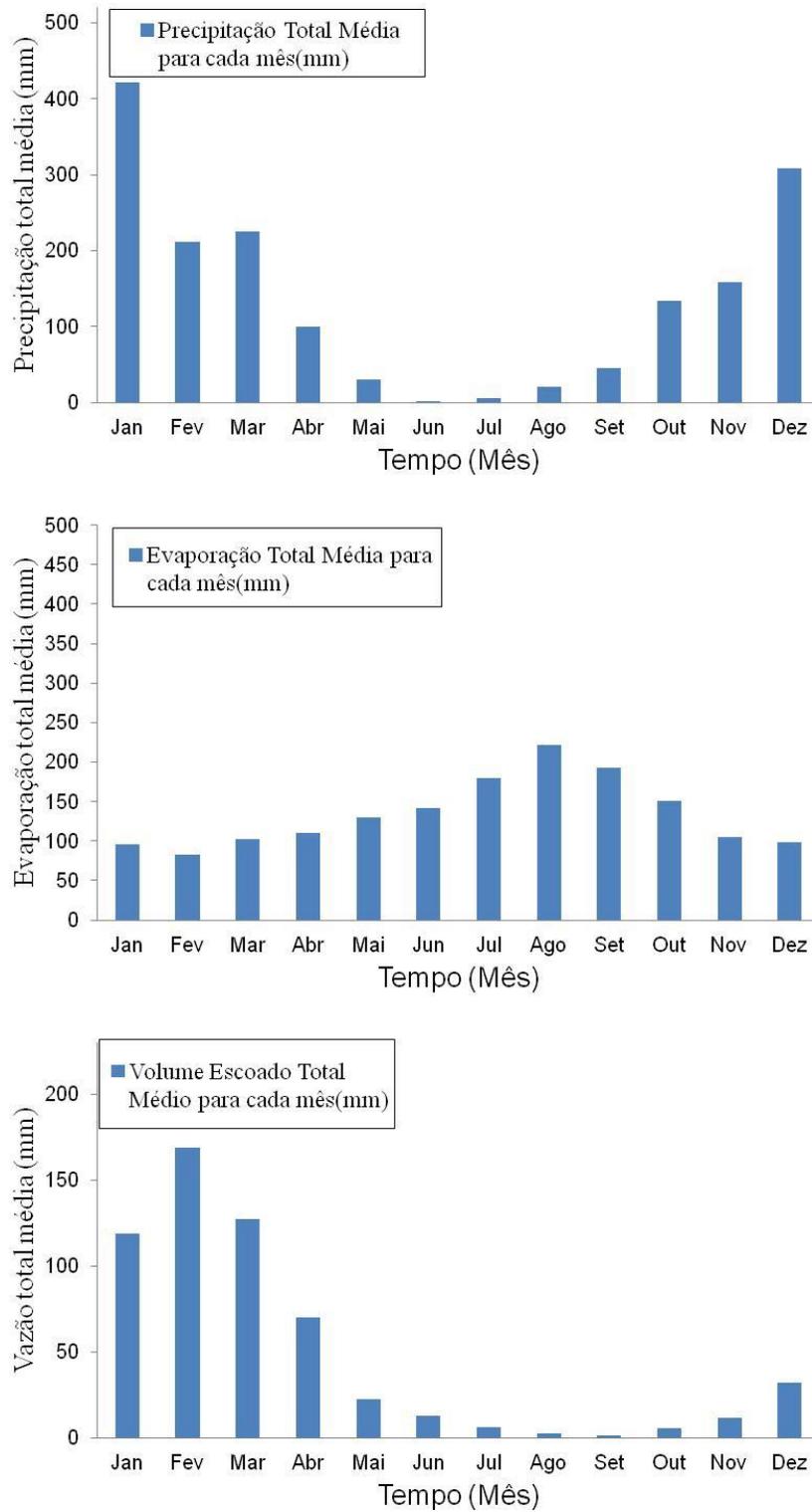
**Figura 3-7** Bacia do rio Tesouras, localização de postos pluviométricos.  
Fonte: Elaboração própria.

**Tabela 3.2** Informações meteorológicas e hidrológicas para a bacia do rio Tesouras.

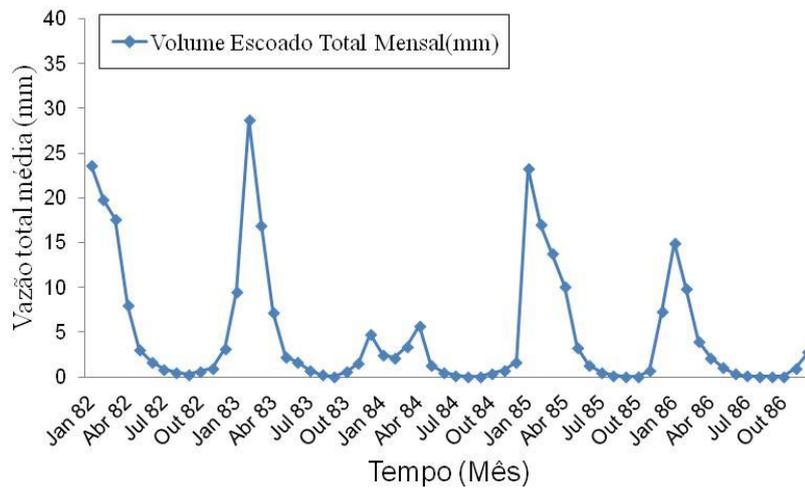
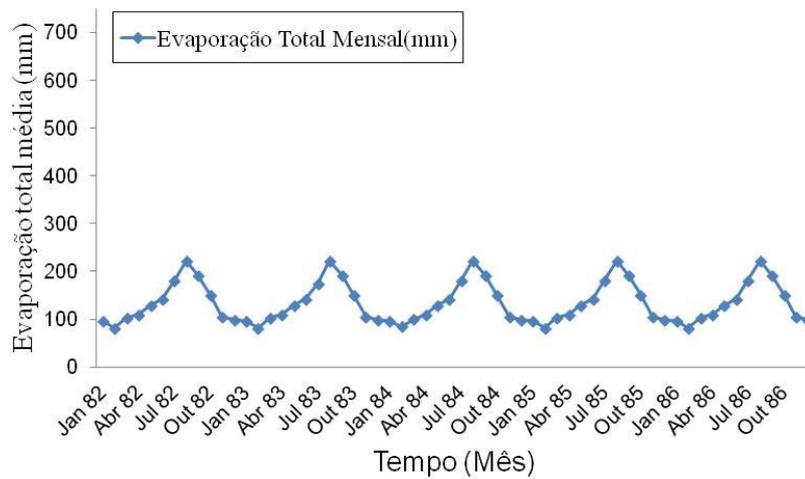
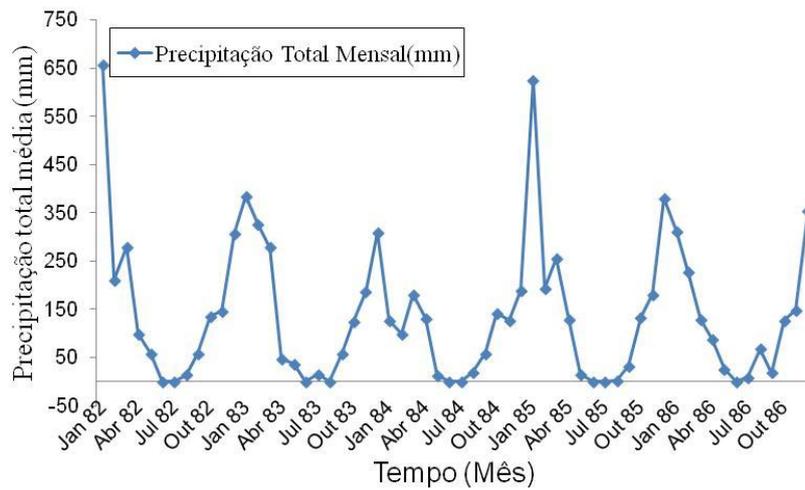
Código	Tipo	Nome	Estado	Latitude (S)	Longitude (W)	Período Utilizado
25500000	Fluviométrica	Tesouras	Goiás	14°43'7"	50°30'00"	1/01/1982 - 31/12/1986
1549004	Pluviométrica	Nova América		15°01'14"	49°53'30"	
1450001		Mozarlândia		14°44'29"	50°34'38"	
1450000		Lagoa da flecha		14°19'58"	50°43'49"	
1451000		Aruanã		14°55'38"	51°04'50"	

Uma análise das estatísticas da série de dados utilizada nesta bacia, similar à anterior, revelou uma maior concentração de chuvas nas séries de valores totais médios para cada mês, nos meses de dezembro e janeiro, como se observa na Figura 3-8. Ademais, houve um incremento do valor médio mensal da evaporação no mês de agosto, tendo como consequência deste comportamento uma tendência de aumento nos volumes escoados no mês de fevereiro. A Figura 3-9 ilustra o comportamento do nível mensal das variáveis analisadas. Em virtude da sazonalidade presente nas séries de precipitação e evaporação, e o exposto anteriormente, pode-se observar uma tendência

de aumento nos volumes mensais escoados no mês de fevereiro. Registrou-se um maior valor de volume escoado mensal no ano de 1983 e um menor, no ano de 1984.



**Figura 3-8** Série de valores totais médios na bacia do rio Tesouras, no período de 1982-1986.

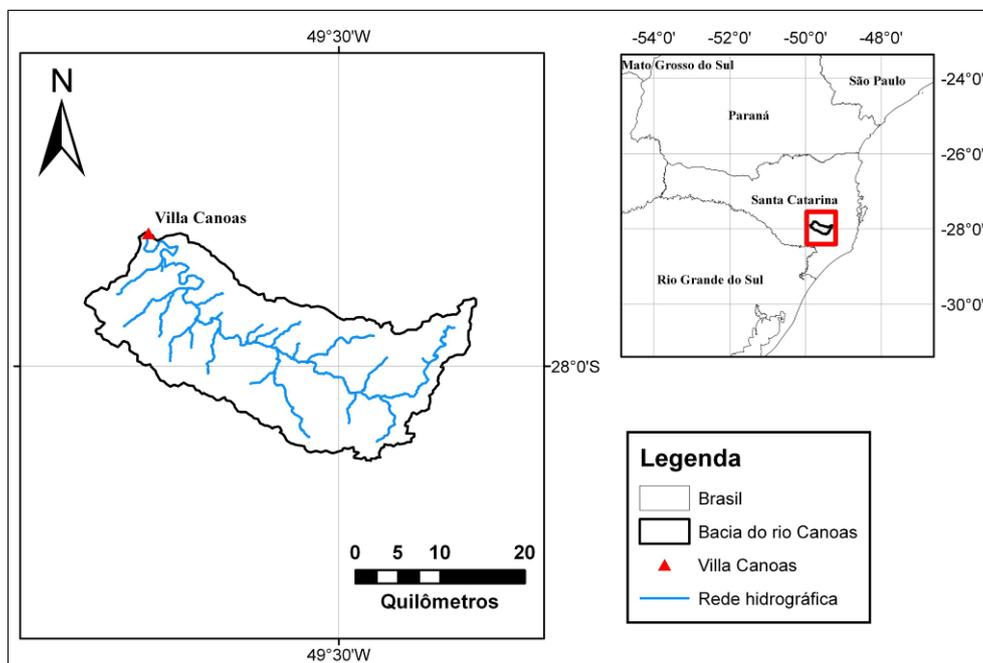


**Figura 3-9** Série de valores totais mensais na bacia do rio Tesouras, no período de 1982-1986.

Desta última figura, pode-se concluir que o período de dados pluviométricos entre 17/11/1982 e 15/05/1983 é apropriado para a calibração dos parâmetros do modelo IPH II. Desse modo, os eventos de vazão máxima escolhidos correspondem aos meses de fevereiro do ano de 1983 e janeiro de 1985.

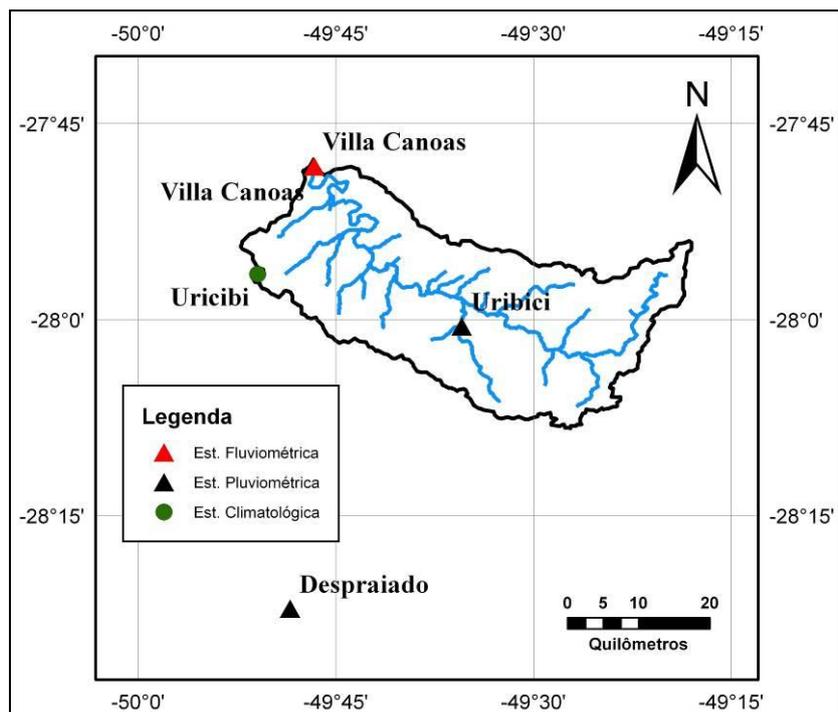
### 3.3. Bacia hidrográfica do rio Canoas

Esta bacia está localizada no estado de Santa Catarina (Figura 3-10), entre as coordenadas geográficas 27°48' a 28°9' de latitude Sul e 49°16' a 49°53' de longitude oeste, em uma região montanhosa, de solos altamente rasos sobre rochas basálticas e porções de arenitos, com predominância de campos, florestas esparsas em áreas de maior declividade, e algumas áreas de cultivo e reflorestamento. O clima é um dos mais frios do país, no período analisado de 1981 a 1984, apresentou uma precipitação média anual de aproximadamente 1.700 mm.ano<sup>-1</sup>, e evapotranspiração real estimada de aproximadamente 500 mm.ano<sup>-1</sup>. O tempo de concentração foi estimado em 2 dias com a equação de Kirpich.



**Figura 3-10** Bacia do rio Canoas, no posto fluviométrico Villa Canoas.  
Fonte: Elaboração própria.

A bacia hidrográfica do rio Canoas foi delimitada até a localização do posto fluviométrico Villa Canoas (71200000), cuja área é de 989 km<sup>2</sup>. No entorno da bacia foram localizados três postos pluviométricos para este estudo (Figura 3-11), cujas localizações se encontram na Tabela 3.3. Maiores descrições podem ser obtidas em Collischonn e Tucci (2003).



**Figura 3-11** Bacia do rio Canoas, localização de postos pluviométricos.  
Fonte: Elaboração própria.

**Tabela 3.3** Informações meteorológicas e hidrológicas para a bacia do rio Canoas.

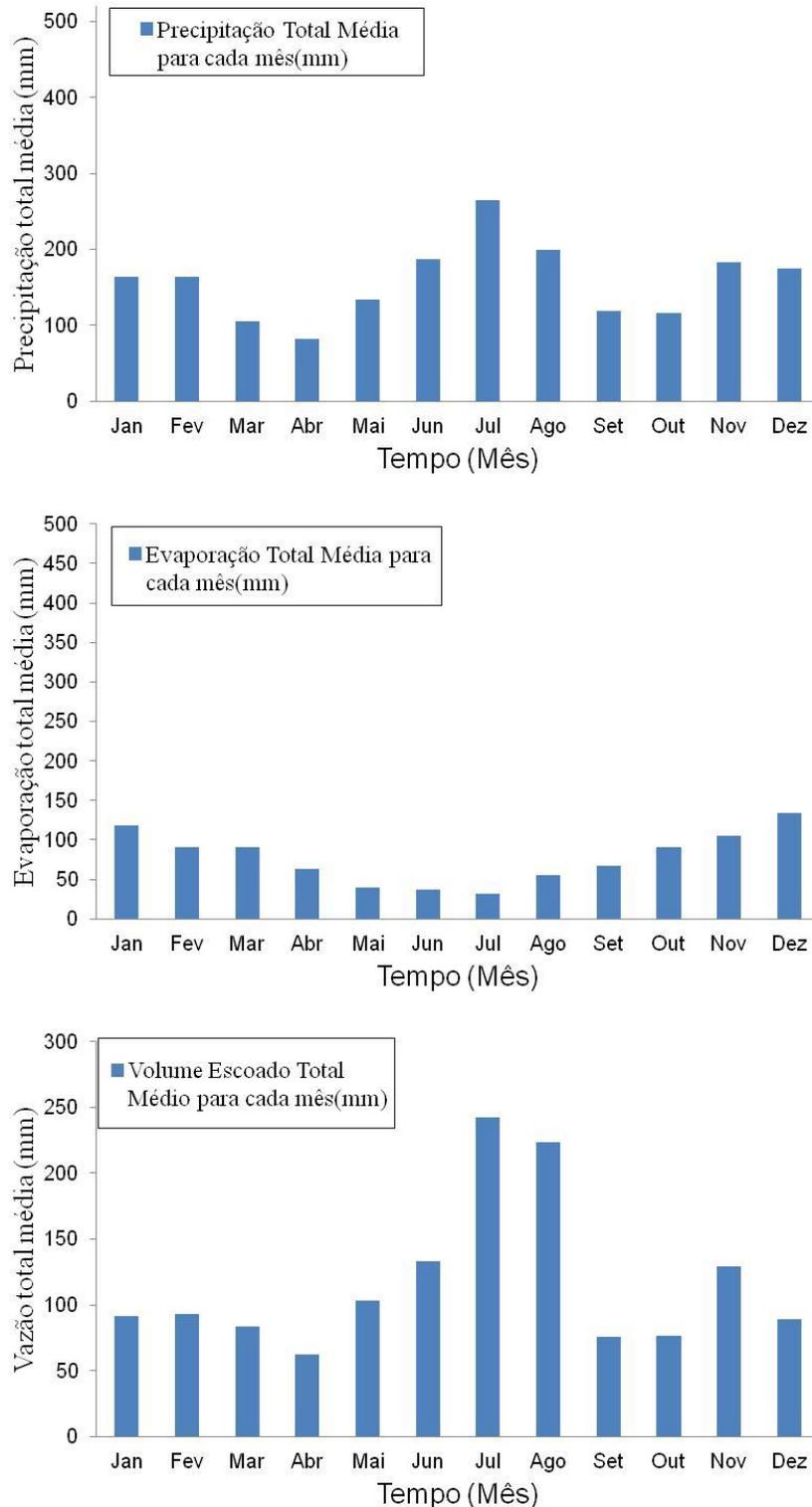
Código	Tipo	Nome	Estado	Latitude (S)	Longitude (W)	Período Utilizado
71200000	Fluviométrica	Villa Canoas	Santa Catarina	27°48'14"	49°46'45"	01/01/1981 - 31/01/1984
02849023	Pluviométrica	Despraiado		28°22'09"	49°48'28"	
02849021		Urubici		28°00'26"	49°35'32"	
02749031		Villa Canoas		27°48'15"	49°46'48"	
83912	Climatológica	Urubici		27°56'25"	49°51'36"	

As estatísticas apresentadas na Figura 3-12 revelaram certa regularidade nas séries de valores totais médios de precipitação para cada mês. No entanto, os valores de evaporação apresentaram uma diminuição no meio do ano. Estes dois fatores fazem com que os valores dos volumes escoados apresentem uma tendência de aumento nos meses de julho e agosto.

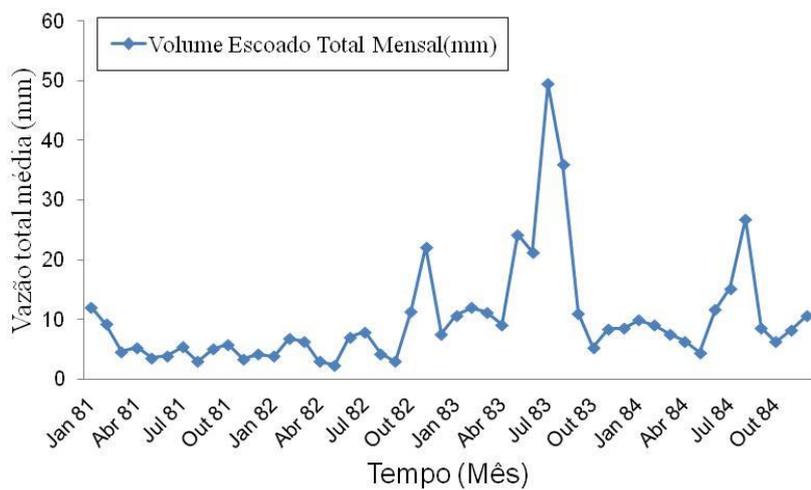
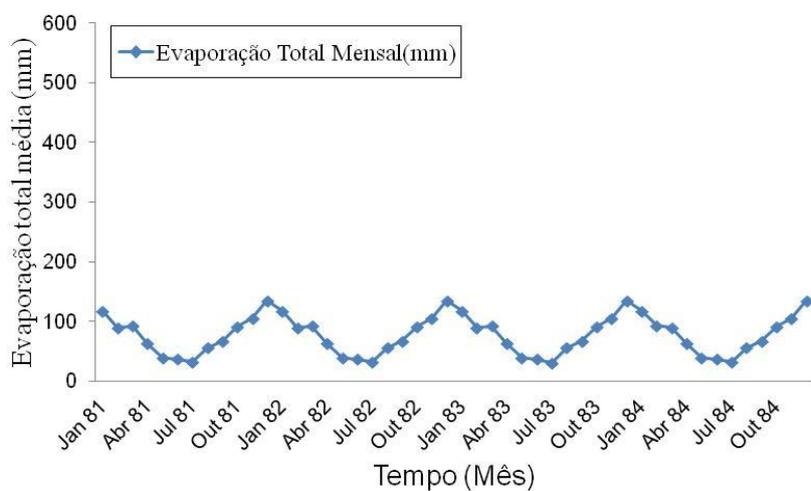
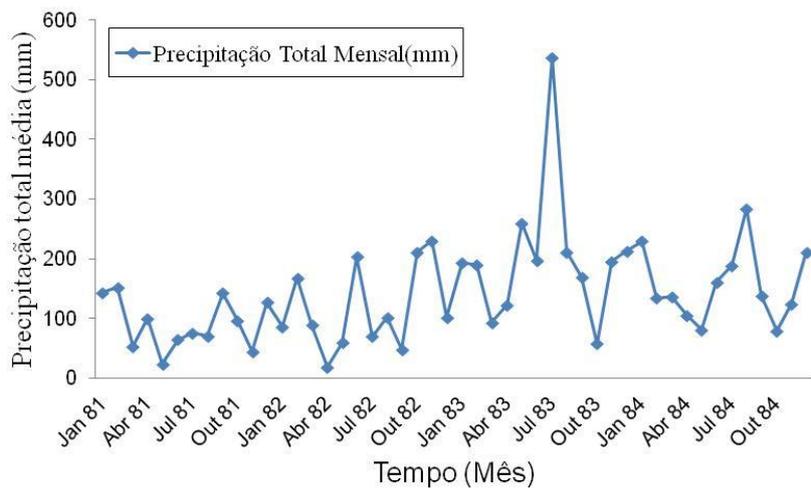
A Figura 3-13 ilustra o comportamento do nível mensal das variáveis analisadas, destacando-se a sazonalidade nas séries de evaporação e as variações marcadas durante o período observado. Entretanto, a precipitação total média mensal apresentou um maior valor durante o ano de 1983, refletido no volume escoado no mesmo ano, com a observação da ocorrência de uma cheia no mês de julho.

Do gráfico de vazão total média pode-se concluir que, o período de dados pluviométricos entre 16/05/1982 e 20/01/1983, é apropriado para a calibração dos

parâmetros do modelo IPH II por conter as vazões máximas observadas da série de vazões utilizada e suas correspondentes chuvas máximas. Assim os eventos de vazão máxima escolhidos, também correspondem aos meses de junho e julho dos anos de 1982 e 1983, respectivamente.



**Figura 3-12** Série de valores totais médios na bacia do rio Canoas, no período de 1981-1984.



**Figura 3-13** Série de valores totais mensais na bacia do rio Canoas, no período de 1981-1984.

## 4. METODOLOGIA

Nesse capítulo, é descrito o método proposto de atualização de dados de entrada de um modelo hidrológico conceitual de previsão de vazões de curto prazo. O método é baseado na relação ente a perturbação dos dados de precipitação e o desvio entre a vazão de saída do modelo hidrológico e a vazão observada, com uma defasagem temporal igual ao tempo de resposta da bacia. O método não pretende melhorar a representação do processo hidrológico do modelo, mas sim atualizar os dados de chuva observada utilizados pelo modelo, a fim de compensar suas limitações.

O procedimento metodológico é apresentado por meio de suas três principais componentes: Método de atualização de dados de entrada; Equação de atualização; Função-objetivo e critério de parada. Posteriormente, é apresentada uma breve descrição do modelo hidrológico utilizado, IPH II.

### 4.1. Método de atualização de dados de entrada

#### 4.1.1. Procedimento

A metodologia proposta é aplicada aos dados de precipitação observados dentro de um período de tempo anterior ao início da previsão.

A metodologia de atualização de dados de chuva segue os seguintes passos, conforme apresentado na Figura 4-1, sendo:

$t_0$ : último intervalo de tempo com dados observados e que coincide com o início da previsão.

$t_c$ : tempo de concentração da bacia, determinado pela equação de Kirpich (1940).

$M$ : número de intervalos de tempo antes do início da previsão.

$k$ : fator que atualiza o valor inicial da chuva.

$\varepsilon$ : desvio entre a vazão calculada e observada, em cada intervalo de tempo no período  $t_{-M}$  a  $t_0$ .

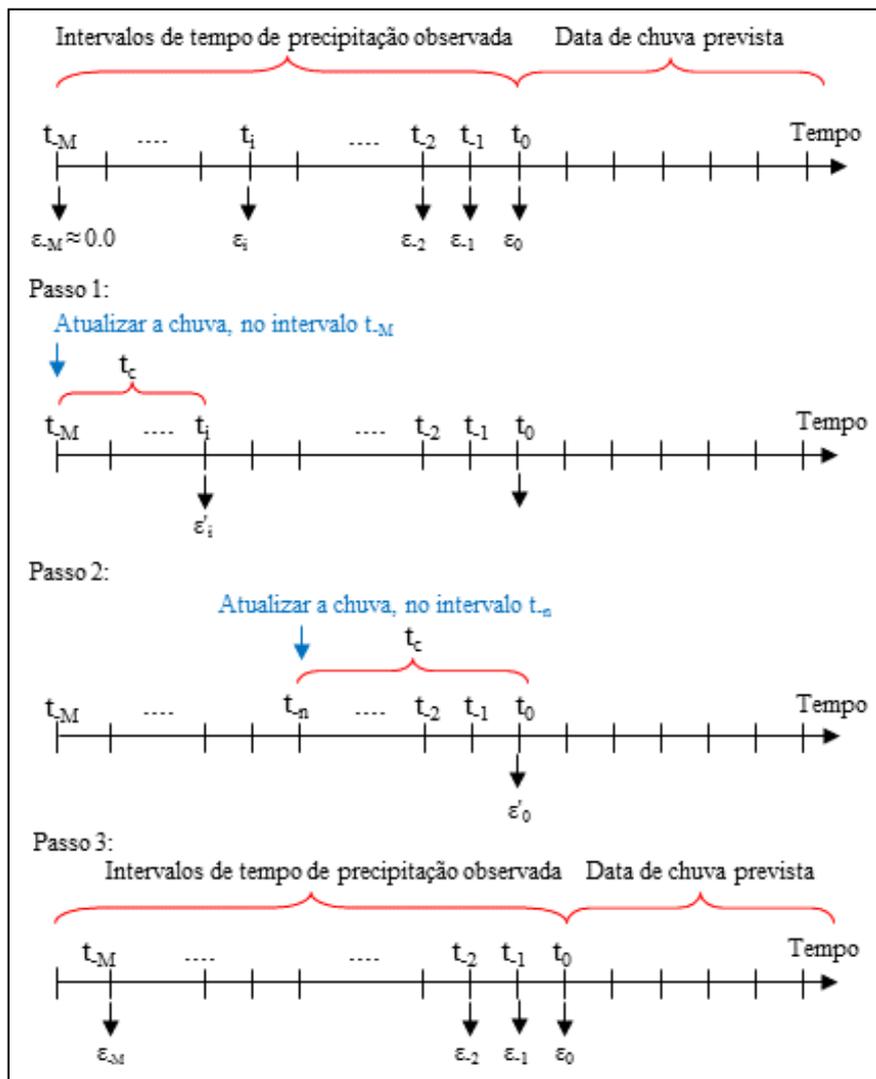
$\varepsilon_{\min}$ : desvio mínimo aceitável para decidir aplicar a atualização em um intervalo de tempo de chuva.

iter: número de vezes que se deve repetir a metodologia, na série compreendida entre  $t_{-M}$  a  $t_0$ .

$N_{\text{ciclos}}$ : número máximo de vezes que pode ser aplicada a atualização da chuva em um intervalo de tempo  $t_i$ .

Antes de iniciar a atualização de dados de chuva devem ser ajustados os estados iniciais do modelo, ( $t_M$ ), para diminuir o desvio entre o valor de vazão observado e o simulado ( $\varepsilon_M \approx 0$ ).

- Passo 1: atualizar o valor observado de chuva no primeiro intervalo de tempo, ( $t_M$ ), a seguir simular o modelo hidrológico gerando novos valores de  $\varepsilon'$ , depois comparar com o valor do  $\varepsilon$  inicial no instante  $t_i$ , ( $t_M + t_c$ ), e atualizar o parâmetro da Equação de Atualização ( $k$ ) até atingir os critérios de parada definidos ( $\varepsilon_{\min}$ ,  $N_{\text{ciclos}}$ ).
- Passo 2: repetir o passo 1 até que  $t_i$  seja igual ao do último intervalo de tempo observado ( $t_0$ ), .
- Passo 3: gerar a previsão de vazão e atualizar o instante de tempo atual ( $t_0$ ). Se  $\varepsilon_0$  não estiver dentro do permissível,  $\varepsilon_{\min}$ , repetir os passos 1 e 2.



**Figura 4-1** Processo de atualização de dados de precipitação em fase *Off-Line*.  
Fonte: Elaboração própria.

## 4.2. Equação de atualização

A equação de atualização utilizada é apresentada a seguir:

$$Pa_t = Po_t \pm k_t \quad (4.1)$$

Onde:  $Po_t$  é a chuva observada, no tempo  $t$ , estimada com base nas medições de postos pluviométricos ou com radar;  $Pa_t$  é a chuva atualizada, no tempo  $t$ ;  $k$  é o fator que atualiza a chuva observada no intervalo de tempo  $t$ .

Dependendo do método de análise do modelo de previsão, a chuva observada pode ser pontual ou uma média representativa da bacia ou sub-bacia.

A seguir, o passo 1 do procedimento metodológico (item 4.1.1) é apresentado com maior detalhamento. Baseado no conceito do tempo de concentração,  $t_c$ , definido como o tempo necessário para que toda a área da bacia contribua para o escoamento superficial num determinado ponto de controle, se idêntica o intervalo de tempo em que o valor de precipitação deve ser mudado. A escolha desta medida está descrita no Apêndice-B.

No exemplo da Figura 4-2, assume-se que a resposta da vazão simulada acontece em um intervalo de tempo futuro igual ao  $t_c$ , a partir do intervalo de tempo de chuva analisada (preto) e considerando como  $t_c = 3$  dias. Na Figura 4-2, observa-se em linhas tracejadas o resultado de três tentativas de atualização do mesmo intervalo de tempo, sem afetar os outros dois intervalos de tempo.

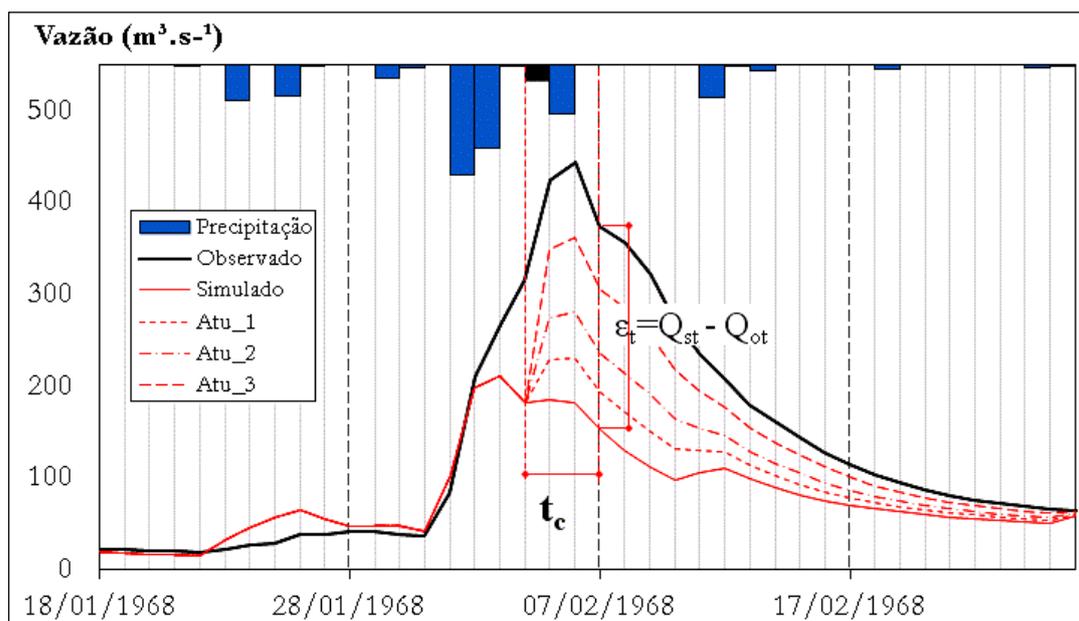


Figura 4-2 Esquema do fundamento operativo da metodologia de atualização.  
Fonte: Elaboração própria.

Sob estas considerações, a precipitação é modificada assumindo que se o modelo superestima a vazão observada ( $\varepsilon_t > 0$ ), a precipitação observada deve ser diminuída, enquanto que se o modelo subestima a vazão observada ( $\varepsilon_t < 0$ ), a precipitação observada deve ser incrementada. Assim, a equação de atualização resulta:

$$\text{Se } \varepsilon_t < 0; \text{ Pa}_t = \text{Po}_t - k_t \quad (4.2)$$

$$\text{Se } \varepsilon_t > 0; \text{ Pa}_t = \text{Po}_t + k_t \quad (4.3)$$

O valor de  $k$  depende da sensibilidade do modelo utilizado para as simulações frente às perturbações na precipitação. Neste caso, foi observado que o valor de  $k$  é 0,0001, e deve ser variado em valores de 0,0001 para cada tentativa de aumento ou diminuição da precipitação. Mas dependendo do desvio  $\varepsilon_t$  na vazão, são necessários um maior ou menor número de ciclos de repetição da atualização no intervalo de chuva. No item a seguir são descritas algumas considerações tomadas para fixar o número de ciclos requeridos para atualizar a precipitação.

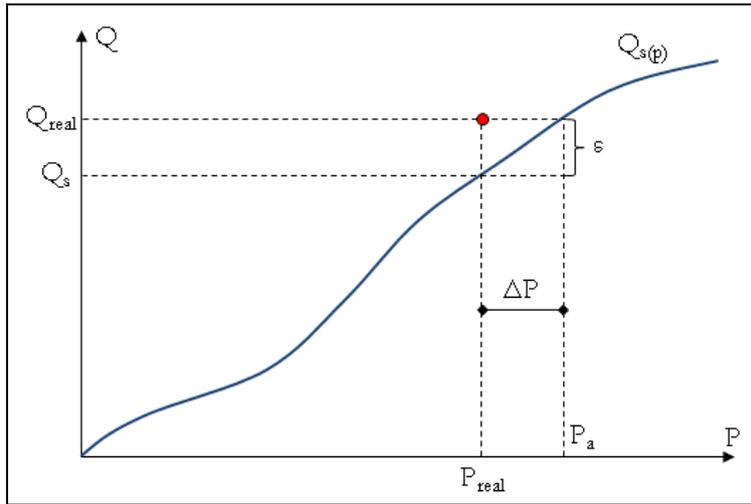
### 4.3. Função-objetivo e critérios de parada

O processo descrito no item anterior, para atualizar um intervalo de precipitação, deve ser entendido como uma pequena analogia ao procedimento simples de encontrar a solução de uma função. Na Figura 4-2, analisou-se as vazões no dia 07/02/1968, e mantendo-se fixo a variável tempo gerou-se um gráfico do modelo como se fosse uma função  $S(p)$ , a qual depende unicamente da precipitação. Na Figura 4-3, Figura 4-4 e Figura 4-5 apresentam-se três possíveis situações, descritas a seguir:

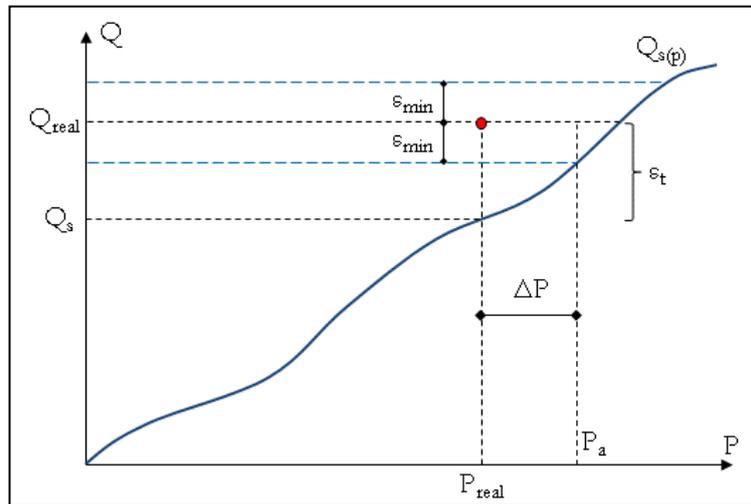
Na Figura 4-3, o método minimiza o desvio  $\varepsilon_t$  na vazão até atingir o  $0,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ; para fazer isto, se atualiza a precipitação real ( $P_{\text{real}}$ ), somando o valor de  $k$  para um determinado número de ciclos ( $N_{\text{ciclos}}$ ).

Na Figura 4-4, o método minimiza o desvio  $\varepsilon_t$  na vazão até atingir um limite  $\varepsilon_{\text{min}}$ . Para fazer isto, se atualiza a precipitação real ( $P_{\text{real}}$ ), somando o valor de  $k$  para um determinado número de ciclos ( $N_{\text{ciclos}}$ ), mas que em teoria, deve ser menor do que o utilizado no caso anterior.

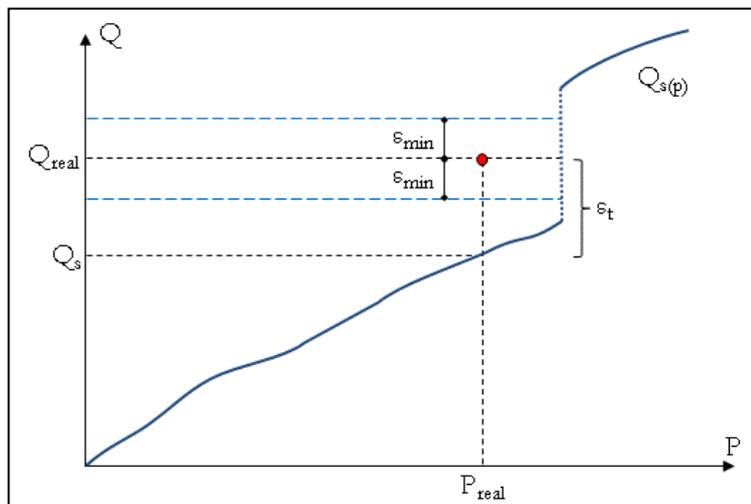
Na Figura 4-5, segue-se o processo do caso anterior, mas como a simulação com o modelo hidrológico pode ter o mesmo comportamento de uma função descontínua. O método não conseguiria atingir o limite e o  $N_{\text{ciclos}}$  não poderia ser determinado.



**Figura 4-3** Atualização de um dado sem critério de parada.  
 Fonte: Elaboração própria.



**Figura 4-4** Atualização de um dado com critério de parada.  
 Fonte: Elaboração própria.



**Figura 4-5** Problema na atualização de dados com critério de parada.  
 Fonte: Elaboração própria.

Das situações descritas, mostradas no exemplo, podem-se distinguir as seguintes limitações no método proposto:

- O valor de  $k$ , que é uma característica do modelo usado, por ser muito pequeno, necessita de muitos ciclos até atingir o valor ótimo,  $\varepsilon_{\min}$ .
- Depois de realizada a atualização em um intervalo de tempo, o método fica limitado e não se podem mudar os valores de precipitação anteriores.
- É preciso adotar um valor apropriado de  $\varepsilon_{\min}$ , para evitar que o processo seja demorado.
- Deve-se usar outro critério de otimização, diferente da redução no desvio da vazão ( $\varepsilon_{\min}$ ), para evitar o problema na descontinuidade do modelo.

Em função destas limitações, foram definidas duas funções-objetivo e três critérios de parada.

A função-objetivo (FO1) é igual ao desvio entre a vazão observada ( $Q_{o,t_0}$ ) e simulada ( $Q_{s,t_0}$ ), para o último intervalo de tempo atualizado  $t_0$ .

$$\text{Mín: FO1} = Q_{o,t_0} - Q_{s,t_0} \quad (4.4)$$

A função-objetivo (FO2) é igual ao desvio máximo entre a vazão observada ( $Q_{o,t}$ ) e simulada ( $Q_{s,t}$ ), calculada por meio de uma iteração.

$$\text{Mín: FO2} = \max(Q_{o,t} - Q_{s,t}) \quad (4.5)$$

Foram três os critérios de parada escolhidos. O primeiro baseado no número máximo de ciclos utilizados para cada intervalo de tempo,  $N_{\text{ciclo}}$ . O segundo baseado no número de iterações utilizadas para a atualização do período de chuva,  $N_{\text{iter}}$ . O terceiro baseado no valor  $\varepsilon_{\min}$ , o qual, dependendo de sua tolerância pode demandar menos ciclos ou iterações.

O método de otimização utilizado foi o de busca exaustiva.

#### 4.4. Modelo hidrológico IPH II

O modelo hidrológico chuva-vazão utilizado neste trabalho é o modelo IPH II, descrito por Tucci et al. (1981). O modelo IPH II, versão WIN\_IPH2 (Bravo et al., 2007), é um modelo de transformação de precipitação em vazão, que foi desenvolvido para simular o escoamento em bacias rurais e urbanas, considerando a bacia concentrada.

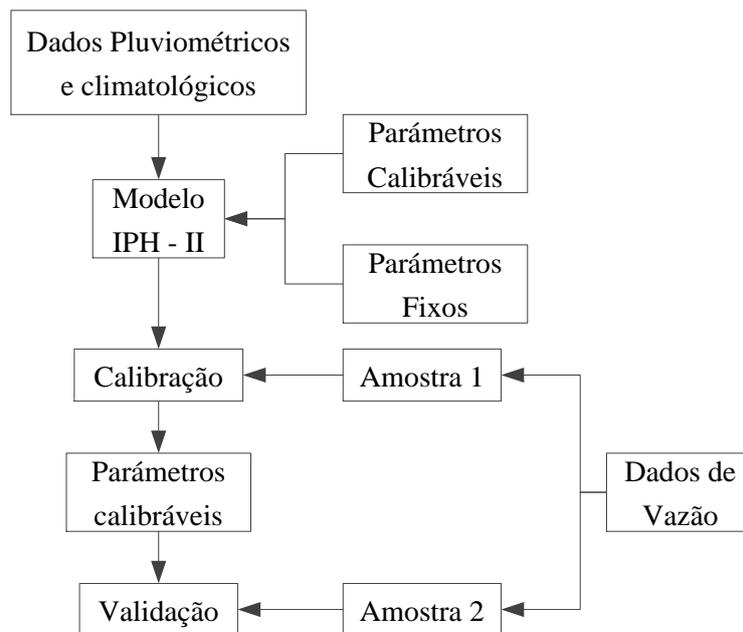
O modelo é tipicamente utilizado na simulação, considerando intervalos de tempo diários ou inferiores. Assim como a maioria dos modelos concentrados, a maior virtude deste modelo está em sua simplicidade e no pequeno número de parâmetros, os quais permitem que rapidamente possa ser realizada a estimativa de vazão de uma bacia hidrográfica.

A representação física do modelo é a seguinte:

- Perdas por interceptação (parâmetro  $R_{max}$ ) e evaporação.
- Separação do escoamento, realizada utilizando o algoritmo de Berthelot, que é uma versão modificada da equação de Horton, resultando em três parâmetros,  $I_o$ ,  $I_b$  e  $h$ .
- A propagação superficial é representada pelo método de Clarck, onde os parâmetros são: o tempo de concentração ( $t_c$ ), o histograma tempo-área e  $K_{sup}$ , parâmetro de amortecimento.
- A propagação subterrânea é composta por um reservatório linear simples, que possui o parâmetro  $K_{sub}$ .

O modelo apresenta dois tipos de parâmetros no processo de simulação: fixos e calibráveis. Os “parâmetros fixos”, que caracterizam a bacia são a área da bacia ( $A$ ), a porcentagem de área impermeável (AIMP), um coeficiente de forma da bacia ( $n$ ) e o tempo de concentração ( $t_c$ ). Os “parâmetros calibráveis” são em sua maioria, de natureza física: a capacidade máxima do reservatório linear simples,  $R_{max}$  (mm); a capacidade de infiltração para  $t=0$ ,  $I_o$  (mm/Dt); a capacidade de infiltração mínima,  $I_b$  (mm/Dt); o parâmetro de decaimento da infiltração do solo,  $h$  (adimensional); o parâmetro Alfa, que afeta a separação dos escoamentos quando a precipitação é menor que a capacidade de infiltração; o parâmetro de propagação do escoamento superficial,  $k_{sup}$  (hr) e; o parâmetro de propagação do escoamento subterrâneo,  $k_{sub}$  (hr).

A versão WIN\_IPH2 do modelo IPH II, possibilita a realização da calibração dos parâmetros do modelo de forma automática ou manual. Os recursos automáticos baseiam-se na otimização de funções mon-objetivo (algoritmo SCE-UA descrito por Duan et al., 1992) ou multiobjetivo (algoritmo MOCOM-UA descrito por Yapo et al., 1998 ). A Figura 4-6 apresenta um diagrama da calibração e validação do modelo.



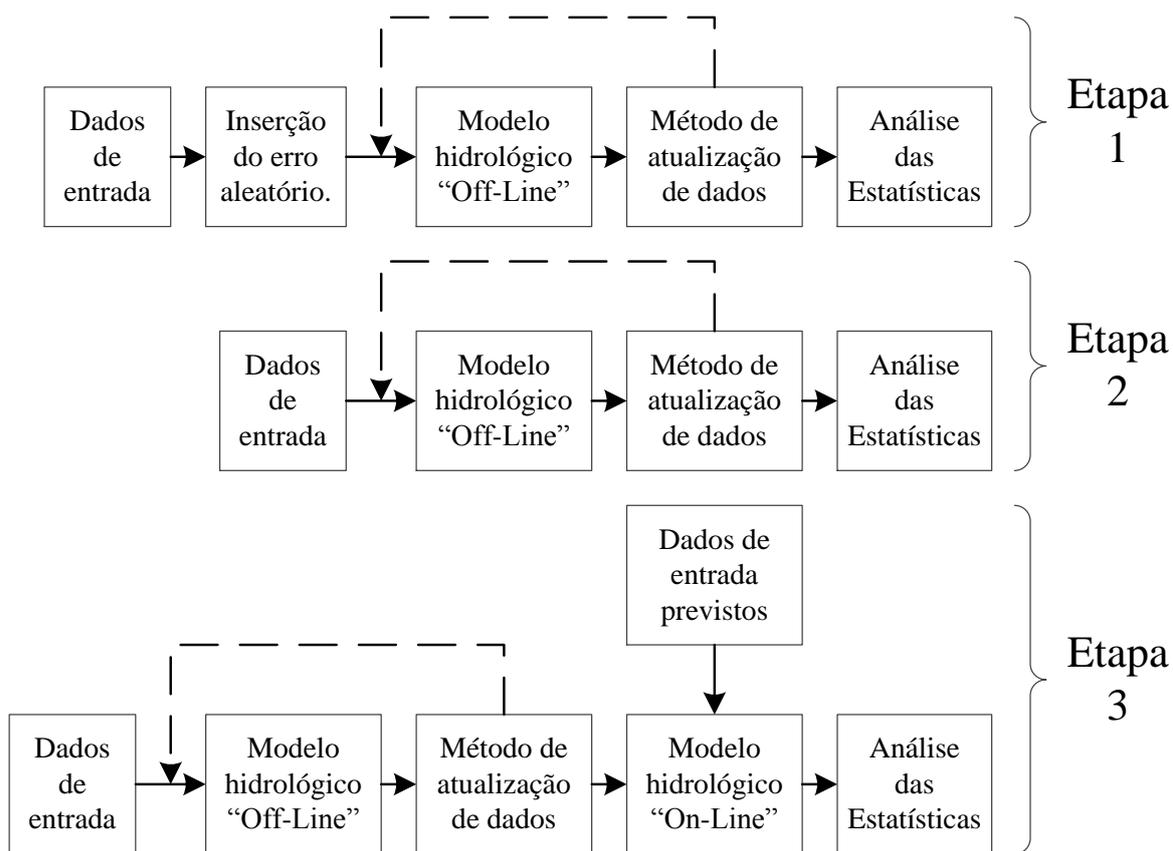
**Figura 4-6** Diagrama esquemático do modelo IPH-II em fase Off-Line.  
Fonte: Elaboração própria.

Maiores informações sobre o modelo IPH II podem ser encontradas em Tucci (1998); Mine (1998) e Bravo et al. (2006).

## 5. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

O método para avaliar a metodologia proposta se divide em três etapas, conforme a Figura 5-1. Na primeira etapa, foi avaliado o método de atualização usando dados sintéticos, adicionando um erro aleatório dentro da série de precipitações. Nesta etapa, são calibrados alguns parâmetros do método. Na segunda etapa, foram adotados parâmetros conhecidos do método e estes foram aplicados para avaliar uma série de precipitações observadas. Estas duas etapas foram aplicadas no modelo hidrológico em modo *Off-line*. Na última etapa, sendo aceito o método aplicado em modo “*off-line*”, foram iniciados os testes com previsão de vazões em modo “*on-line*”.

Para poder entender melhor as incertezas e limitações da metodologia aplicada em um modelo hidrológico, a metodologia foi aplicada em três etapas:

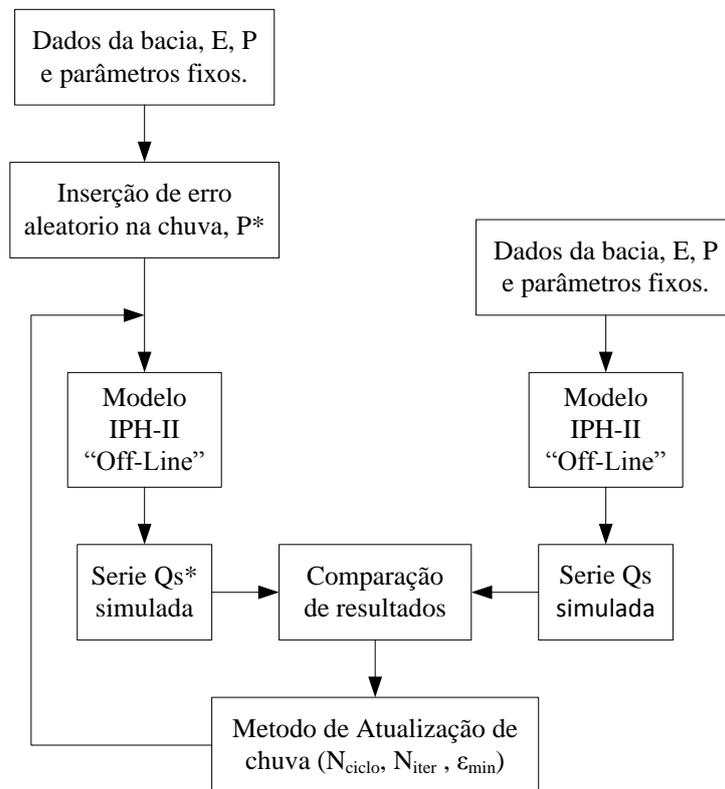


**Figura 5-1** Critérios adotados na aplicação da metodologia proposta.

Fonte: Elaboração própria.

## 5.1. Avaliação da metodologia com dados sintéticos.

Na Figura 5-2, apresenta-se o diagrama para avaliar a metodologia com dados sintéticos. A geração de séries de vazões sintéticas ( $Qs^*$ ) foi obtida a partir de simulações com o modelo IPH-II, usando para isso um conjunto de parâmetros fixos de valores escolhidos (ver Tabela 5.1), séries de dados pluviométricos sintéticos ( $P^*$ ) e de dados de evapotranspiração. As simulações foram comparadas com a série de vazões simuladas ( $Qs$ ) com o modelo, usando as séries de dados pluviométricos observados ( $P$ ).



**Figura 5-2** Diagrama da avaliação da metodologia com dados sintéticos.

Fonte: Elaboração própria.

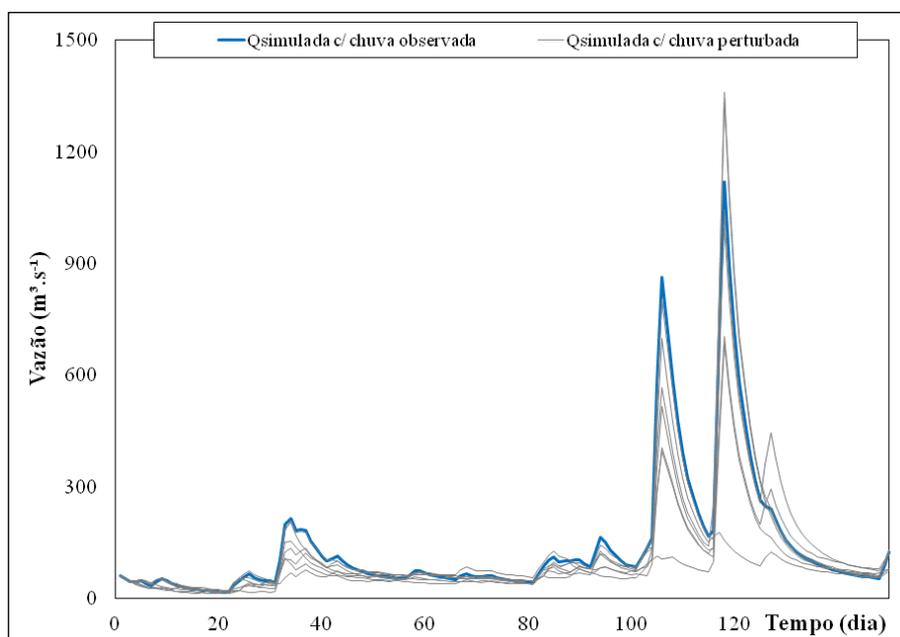
Estas considerações permitem eliminar erros na série de vazões e garantem que a representatividade do modelo seja perfeita. Os critérios de parada do método de atualização, descritos no item 4.3, foram estimados com estes testes, avaliando a convergência das duas funções-objetivo,  $\epsilon_{\min}$ , separadamente. Na Tabela 5.1 são apresentados os parâmetros para cada bacia, escolhidos de calibrações mono-objetivo feitas com a versão WIN\_IPH2 do modelo IPH II, adotado como função objetivo o coeficiente de Kling-Gupta, estes parâmetros são apresentados na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1** Valores dos parâmetros do modelo IPH II, utilizados para os testes com vazão real.

Bacia	Rio Ijuí	Rio Tesouras	Rio Canoas
Kling-Gupta	0,96	0,93	0,89
$l_0$	116,8474	28,8382	16,4712
$l_b$	0,4567	1,8923	8,4568
$h$	0,4567369	0,9161434	0,0100004
$K_s$	4,1472	4,6665	2,8031
$K_{bas}$	10,0001	15,6275	13,5117
$R_{max}$	0,0131	6,3409	3,4991
Alfa	0,0897	1,6849	4,1291
Período	01/01/1989 - 30/05/1989	17/11/1982 - 15/05/1983	16/05/1982 - 20/01/1983

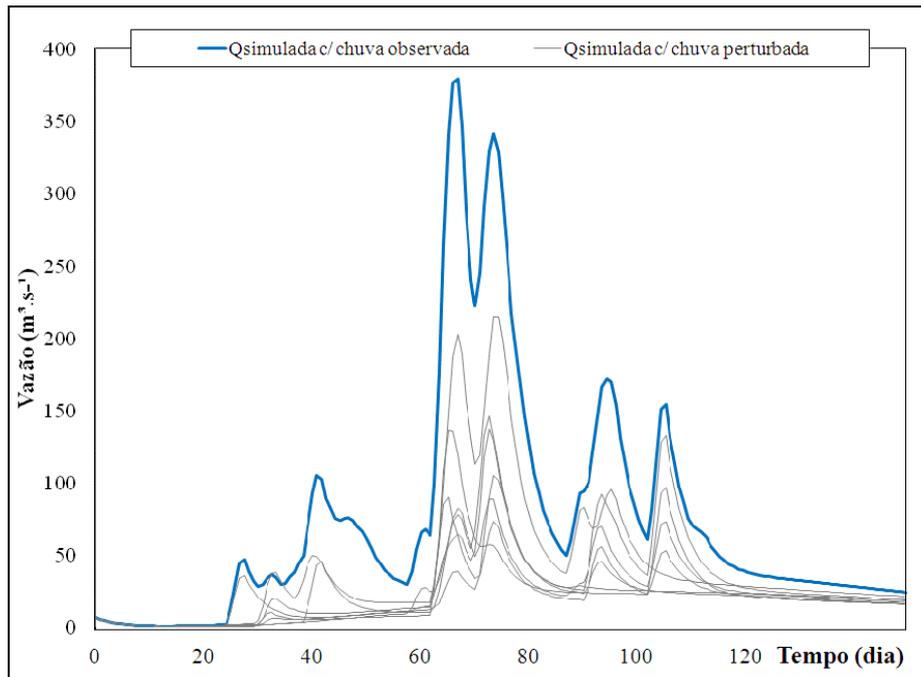
Logo, foram geradas sete séries sintéticas de chuva ( $P^*$ ), inserindo perturbações aleatórias, em cada dado da série observada de chuva. A descrição do método para a inserção das perturbações está descrito no Apêndice - A.

Depois disto, foi realizada simulação (sete vezes), com o modelo hidrológico usando parâmetros fixos (Tabela 5.1), para gerar séries de vazões em cada uma das bacias. Pode-se observar na Figura 5-3, Figura 5-4 e Figura 5-5 que os hidrogramas simulados com as séries sintéticas apresentam uma diferença grande em relação aos hidrogramas simulados com a série observada.

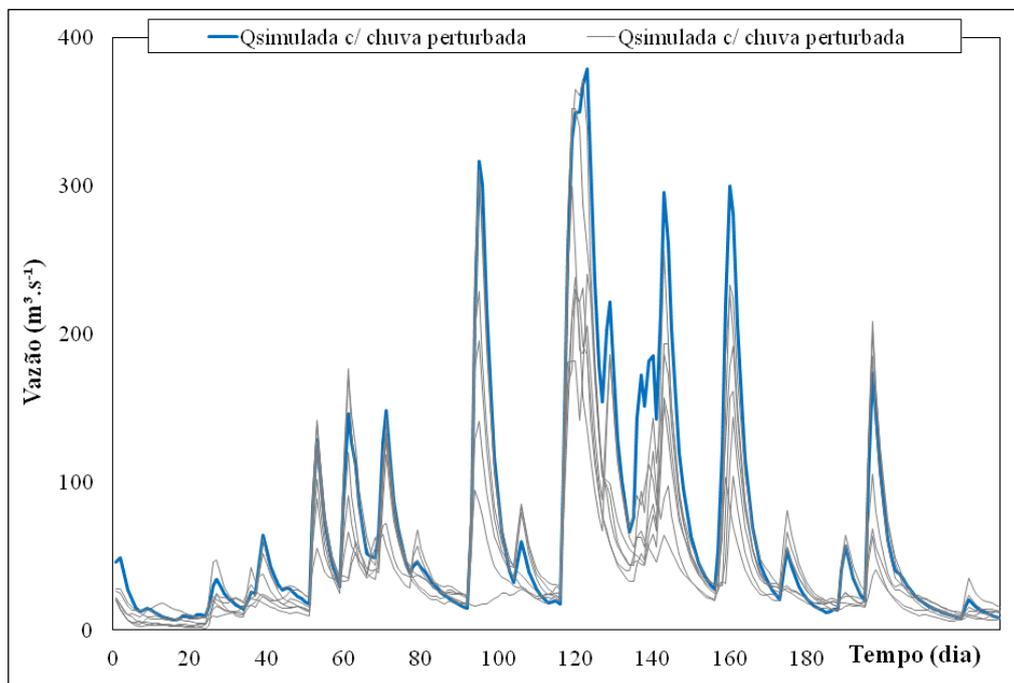


**Figura 5-3** Hidrogramas gerados com séries de chuva sintética e hidrograma gerado com chuva observada, na bacia do rio Ijuí.

Fonte: Elaboração própria.



**Figura 5-4** Hidrogramas gerados com séries de chuva sintética e hidrograma gerado com observada, na bacia do rio Tesouras.  
Fonte: Elaboração própria.

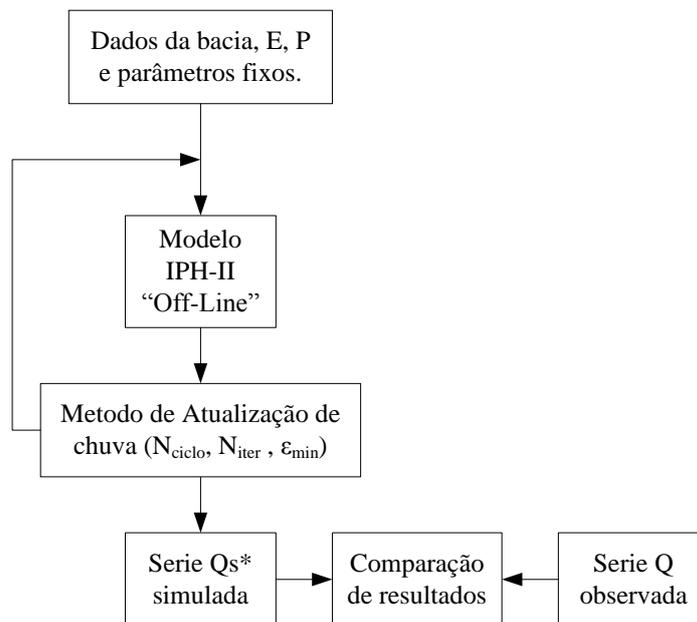


**Figura 5-5** Hidrogramas gerados com séries de chuva sintética e hidrograma gerado com chuva observada, na bacia Do rio Canoas.  
Fonte: Elaboração própria.

O objetivo é testar a capacidade do método para conseguir reproduzir a chuva real, considerando uma vazão observada sem erros. Indiretamente o método aproximará os hidrogramas sintéticos gerados (cinza) até representar o hidrograma simulado com dados reais (azul).

## 5.2. Avaliação da metodologia com dados reais.

Depois de ter efetuado testes em condições ideais, foram fixados os critérios de parada do método de atualização ( $N_{\text{ciclos}}$ ,  $N_{\text{iter}}$ ) para dois valores de funções objetivo,  $\epsilon_{\text{min}} = 0,0 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $\epsilon_{\text{min}} = 2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ . E, então, procedeu-se aos testes com dados observados, como apresentado na Figura 5-6, onde se espera uma maior dificuldade no processo de atualização de dados. Isso, devido ao fato de estar inserindo-se no processo, possíveis erros de medição ou representatividade do modelo hidrológico.

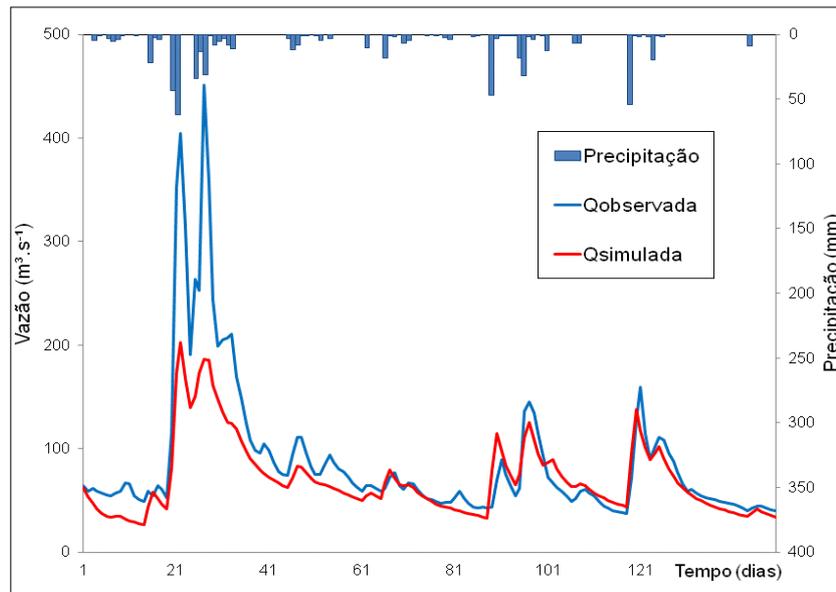


**Figura 5-6** Diagrama da avaliação da metodologia com dados reais.  
Fonte: Elaboração própria.

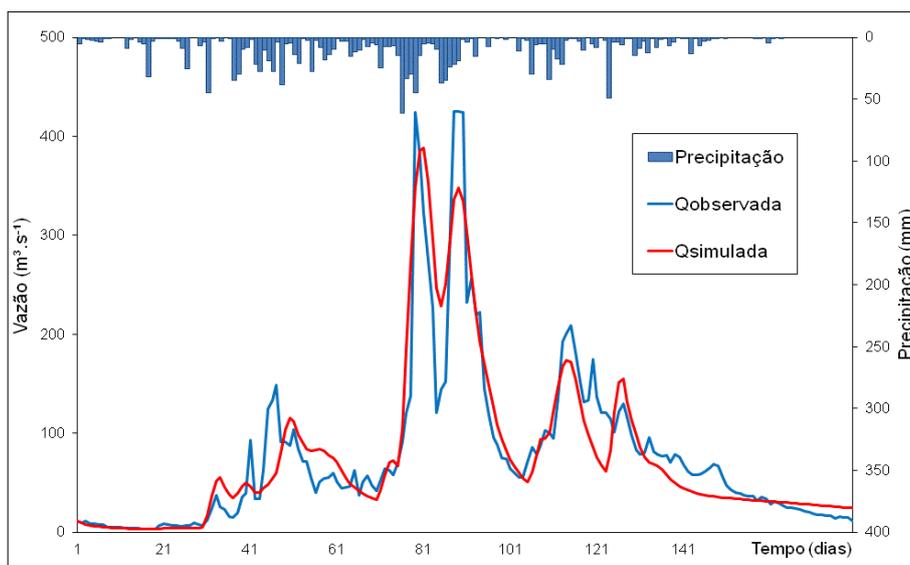
O ajuste obtido entre as vazões observadas e simuladas, nos períodos escolhidos na calibração para cada bacia, é apresentado na Figura 5-7, Figura 5-8 e Figura 5-9. Os hidrogramas simulados foram obtidos a partir dos parâmetros da calibração mono-objetivo, considerando como função-objetivo o coeficiente de Kling-Gupta (ver Tabela 5.2).

**Tabela 5.2** Valores dos parâmetros do modelo IPH II, utilizados para os testes com vazão real.

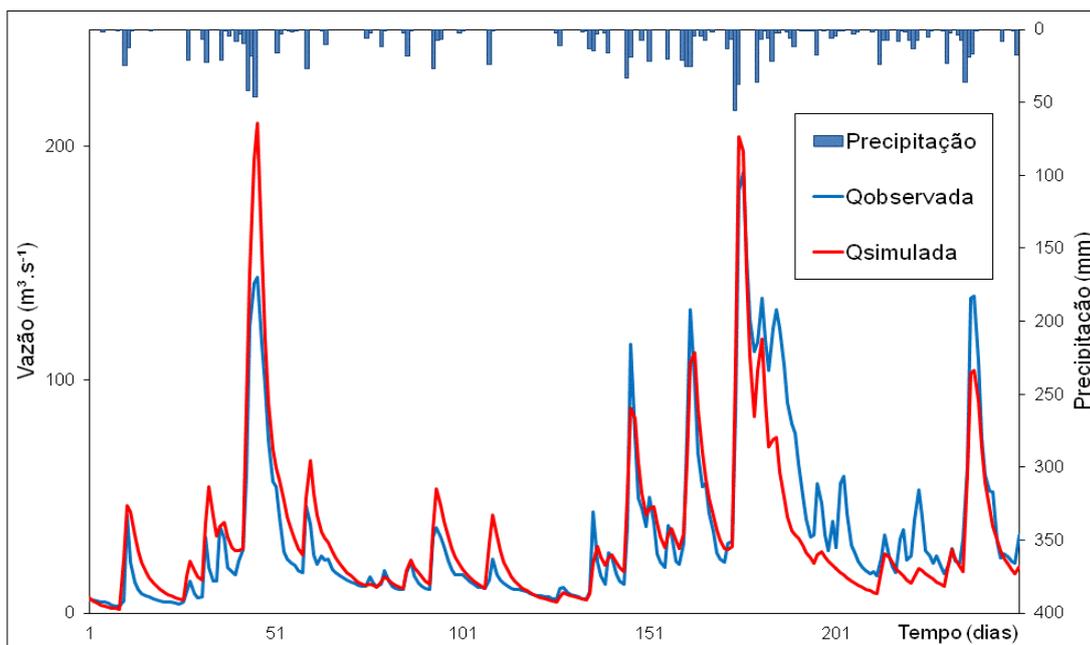
Bacia	Rio Ijuí	Rio Tesouras	Rio Canoas
Kling-Gupta	0,96	0,93	0,89
$l_0$	116,8474	28,8382	16,4712
$l_b$	0,4567	1,8923	8,4568
$h$	0,4567369	0,9161434	0,0100004
$K_s$	4,1472	4,6665	2,8031
$K_{bas}$	10,0001	15,6275	13,5117
$R_{max}$	0,0131	6,3409	3,4991
Alfa	0,0897	1,6849	4,1291
Período	01/01/1989 - 30/05/1989	17/11/1982 - 15/05/1983	16/05/1982 - 20/01/1983



**Figura 5-7** Hidrograma observado e simulado da bacia do rio Ijuí, no período de calibração do modelo (01/01/1989-30/05/1989).



**Figura 5-8** Hidrograma observado e simulado da bacia rio Tesouras, no período de calibração do modelo (17/11/1982- 15/05/1983).



**Figura 5-9** Hidrograma observado e simulado da bacia rio Canoas, no período de calibração do modelo (16/05/1982-20/01/1983).

De acordo com os gráficos, a representatividade do modelo nos períodos escolhidos foi aceitável, embora se observou na Figura 5-7, na bacia do rio Ijuí, a subestimativa das vazões por parte do modelo. Na Figura 5-8, bacia do rio Tesouras, a vazão simulada não consegue reproduzir eficientemente as decidas dos hidrogramas, mas consegue atingir os valores máximos. Finalmente, na Figura 5-9, bacia do rio Canoas, apresenta o mesmo problema que na bacia anterior, além de um trecho pequeno em que não representa bem a descida do hidrograma.

Posteriormente, se escolheram outros períodos de dados diferentes (ver Tabela 5.3) para fazer os testes de atualização com dados reais. O ajuste obtido entre as vazões observadas e simuladas, para estes períodos de dados, apresentam-se na Figura 5-10, Figura 5-11 e Figura 5-12, para cada um das bacias de estudo.

**Tabela 5.3** Períodos de dados utilizados para os testes com vazão real.

Bacia	Período	Dias de atualização
Rio Ijuí	31/05/1989 - 27/10/1989	150
Rio Tesouras	16/12/1984 - 13/06/1985	180
Rio Canoas	12/03/1983 - 27/10/1983	230

Na Figura 5-10, na bacia do rio Ijuí, o modelo não consegue acompanhar o hidrograma observado, subestimando a vazão observada. Assim como, também, se

observou no período de calibração. Embora o modelo calibrado apresente esta limitação, não foi observado nenhum outro problema, como erros de fase. Na Figura 5-11, bacia do rio Tesouras, a vazão simulada consegue reproduzir a forma do hidrograma, mas não consegue atingir os valores eficientemente. Já na Figura 5-12, bacia do rio Canoas, apresenta alguns problemas na representação das descidas dos hidrogramas, mas em termos gerais consegue acompanhar satisfatoriamente ao hidrograma observado. Com tudo, os problemas de amplitude observados, nos períodos escolhidos, podem ser resolvidos pela metodologia.

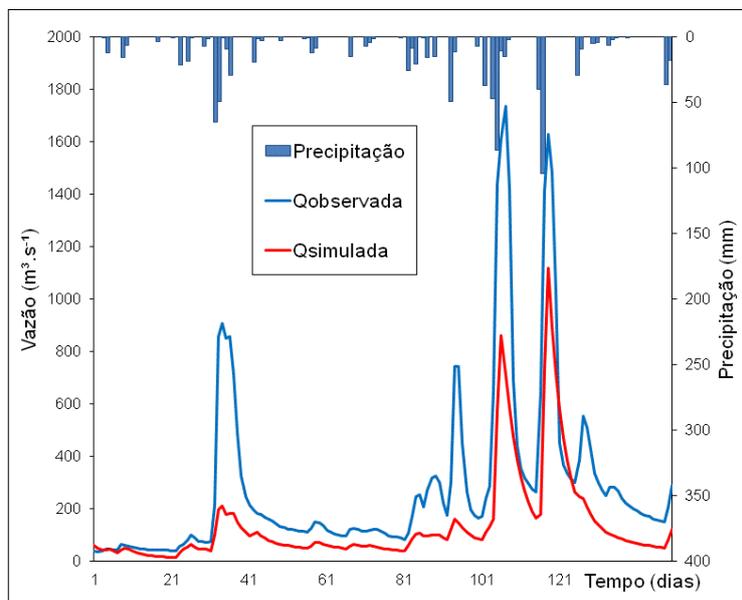


Figura 5-10 Hidrograma observado e simulado da bacia do rio Ijuí, no período 31/05/1989 - 27/10/1989.

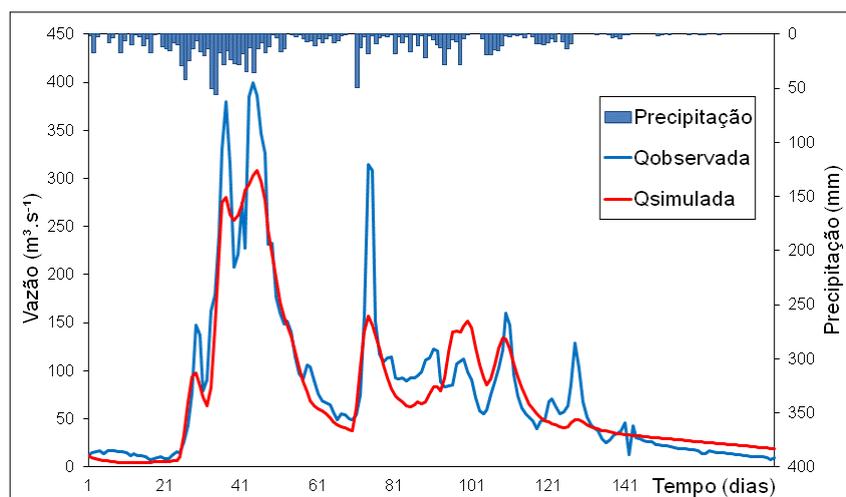


Figura 5-11 Hidrograma observado e simulado da bacia do rio Tesouras, no período 16/12/1984 - 13/06/1985.

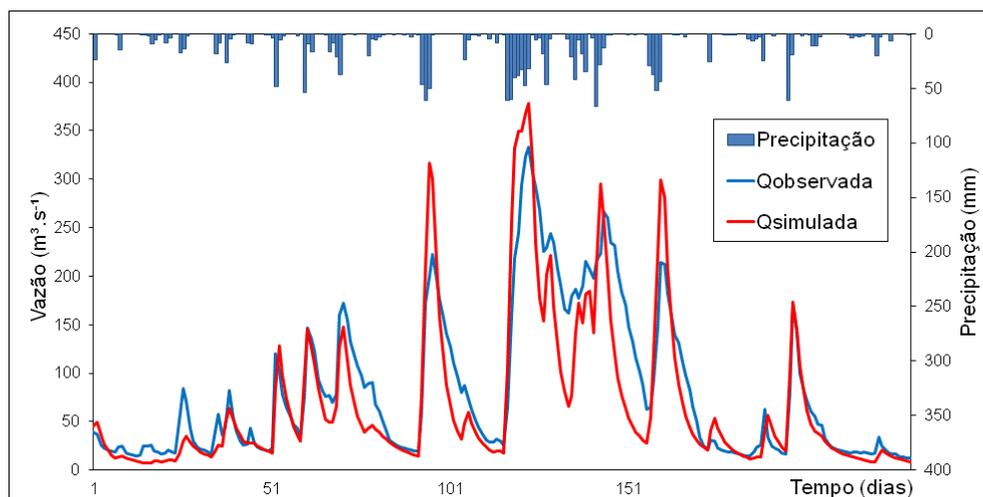


Figura 5-12 Hidrograma observado e simulado da bacia do rio Canoas, no período 12/03/1983 - 27/10/1983.

### 5.3. Previsão de vazões com atualização de dados de entrada.

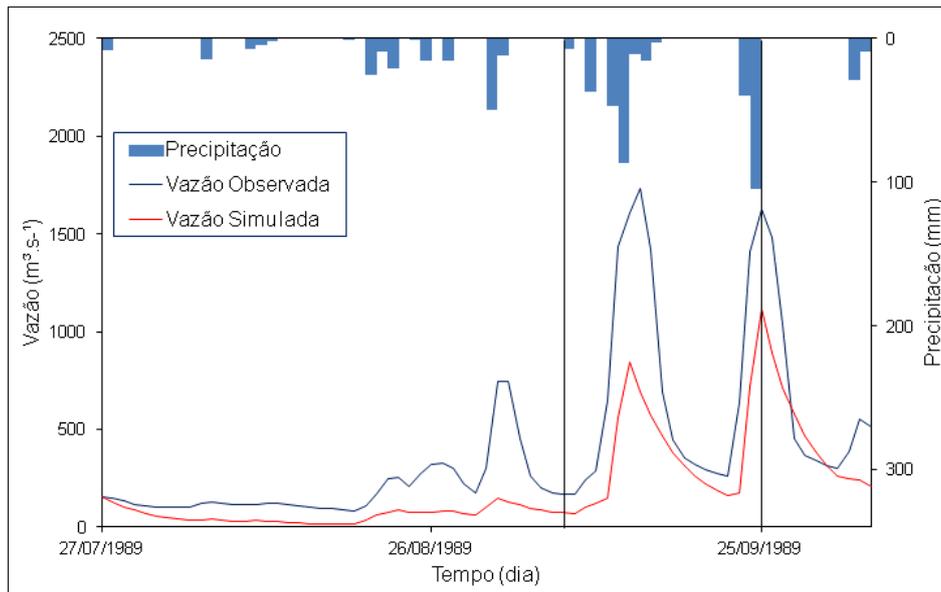
Com base na metodologia proposta, foi desenvolvido o módulo de atualização de dados de entrada automática no programa WIN-IPH II. Nas aplicações, foi considerada como previsão de precipitação, a chuva observada (previsão perfeita de precipitação). Esta aplicação permite avaliar a capacidade do modelo hidrológico e o método de atualização para a previsão de vazão. Em um cenário hipotético, onde a previsão de chuva não possui erros, avaliaram-se eventos isolados na série histórica de vazão de cada bacia (não foram apreciados erros de fase na simulação), sendo que estes não poderiam ser corrigidos pela metodologia proposta.

#### 5.3.1. Eventos analisados na bacia do rio Ijuí

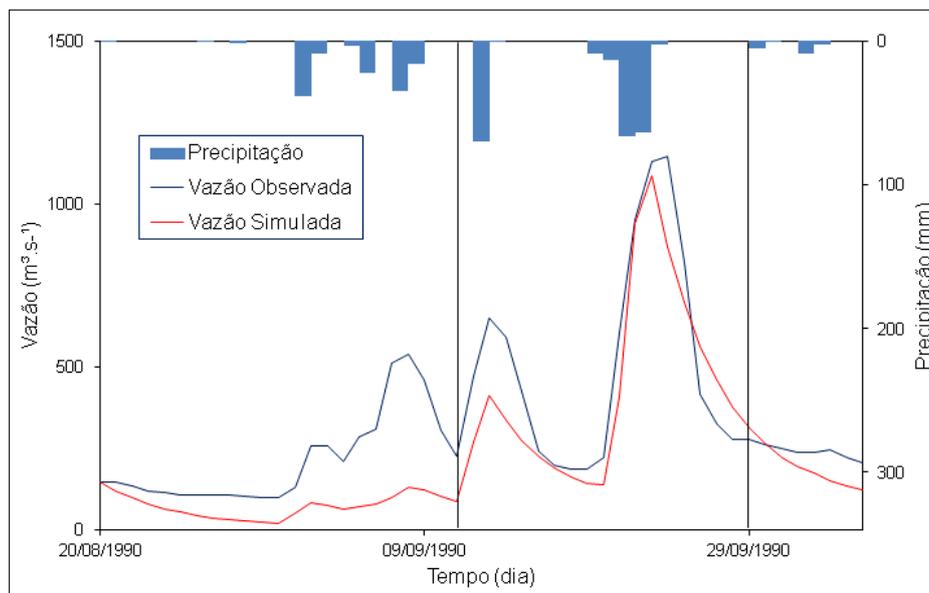
Os eventos escolhidos na bacia do rio Ijuí são apresentados nas Figura 5-13 e Figura 5-14. As características dos eventos estão descritas na Tabela 5.4, assumindo como horizonte de previsão sete dias na frente e até vinte dias de aplicação.

Tabela 5.4 Características dos eventos escolhidos na bacia rio Ijuí.

Evento	Início da atualização	Início da previsão	Período da previsão	Dias de atualização
Primeiro	27/07/1989	07/09/1989	07/09/1989 - 19/09/1989	42
Segundo	20/08/1990	19/09/1990	19/09/1990 - 29/09/1990	22



**Figura 5-13** Evento 1, observado na bacia do rio Ijuí, 07/09/1989 - 05/10/1989.



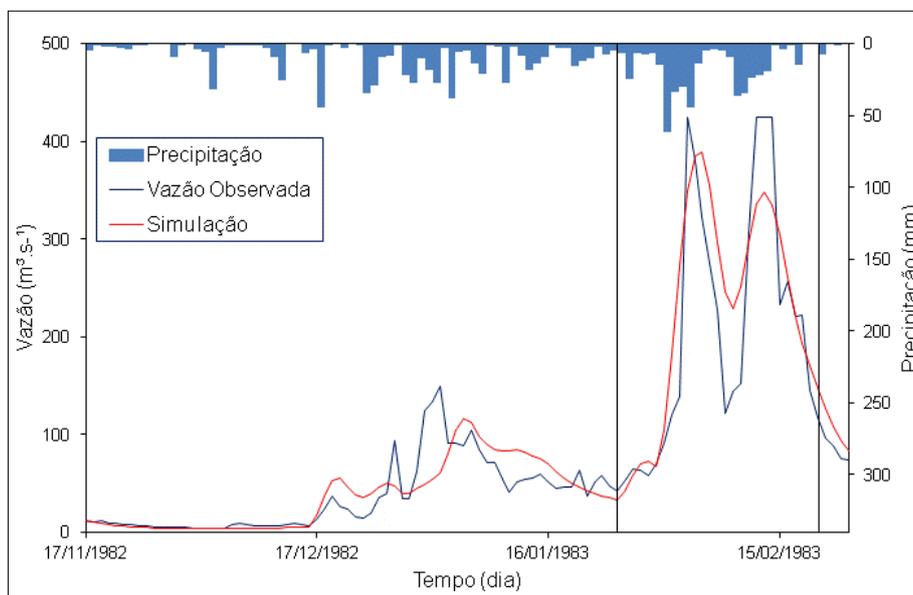
**Figura 5-14** Evento 2, observado na bacia do rio Ijuí, 19/08/1990 - 05/10/1990.

### 5.3.2. Eventos analisados na bacia do rio Tesouras

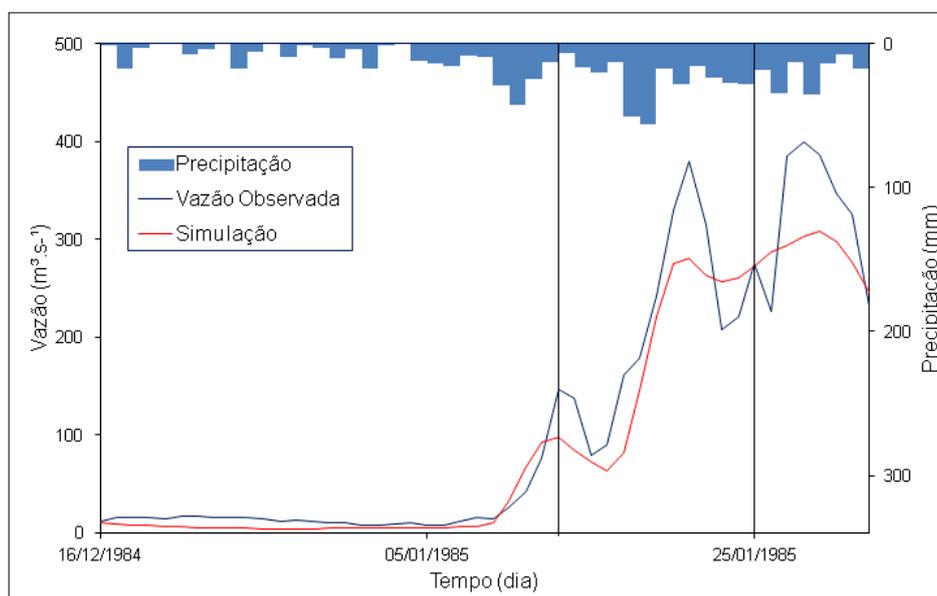
Os eventos escolhidos na bacia do rio Tesouras são apresentados na Figura 5-15 e Figura 5-16. As características dos eventos estão descritas na Tabela 5.5, assumindo como horizonte de previsão sete dias na frente e até vinte dias de aplicação.

**Tabela 5.5** Características dos eventos escolhidos na bacia rio Tesouras.

Evento	Início da atualização	Início da previsão	Período da previsão	Dias de atualização
Primeiro	17/11/1982	03/02/1983	03/02/1983 - 12/02/1983	69
Segundo	16/12/1984	13/01/1985	13/01/1985 - 25/01/1985	22



**Figura 5-15** Evento 1, observado na bacia Tesouras, 03/02/1983 - 19/02/1983.



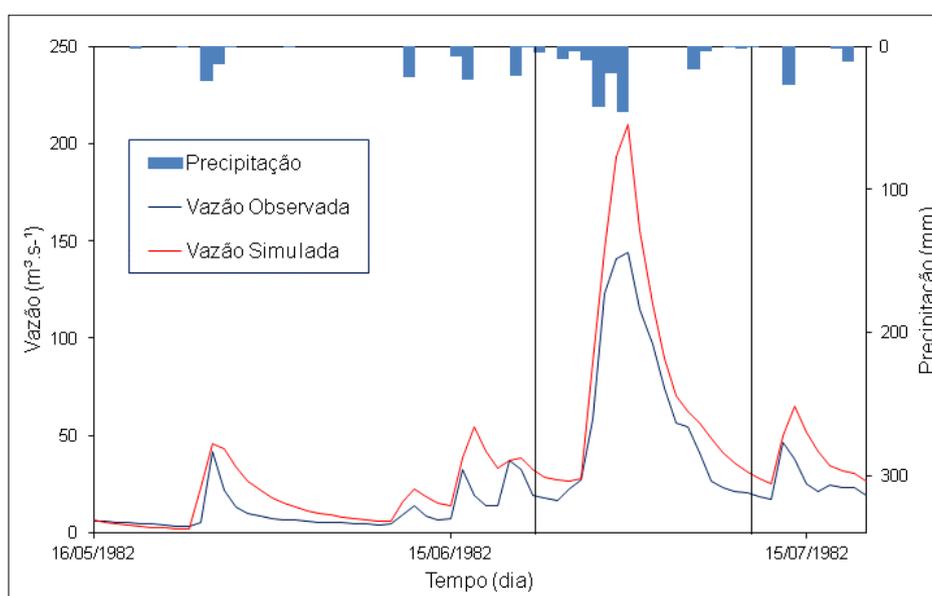
**Figura 5-16** Evento 2, observado na bacia Tesouras, 13/01/1985 - 01/02/1985.

### 5.3.3. Eventos analisados na bacia rio Canoas

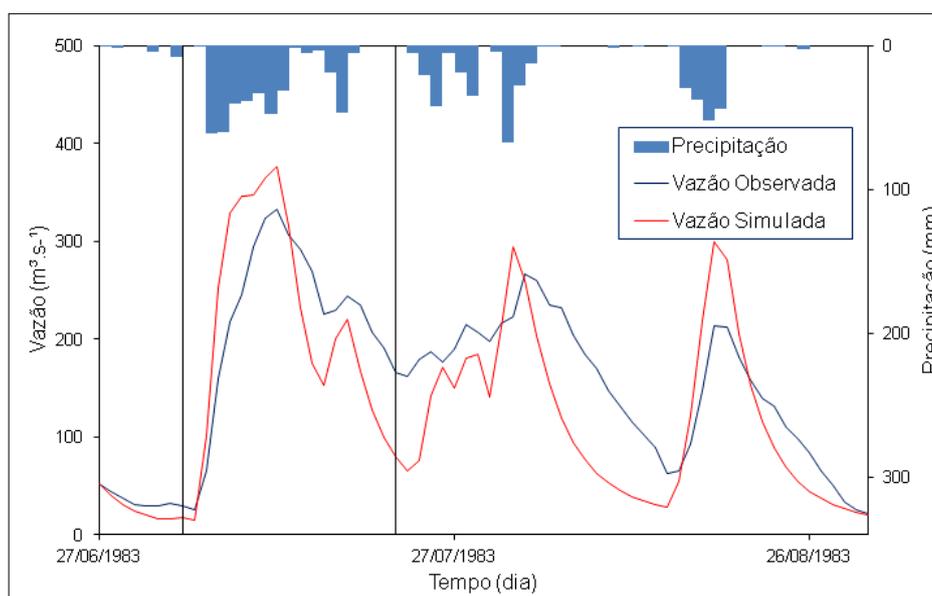
Os eventos escolhidos na bacia rio Canoas são apresentados nas Figura 5-17 e Figura 5-18. As características dos eventos estão descritas na Tabela 5.6, assumindo como horizonte de previsão sete dias na frente e até vinte dias de aplicação.

**Tabela 5.6** Características dos eventos escolhidos na bacia do rio Canoas.

Evento	Início da atualização	Início da previsão	Período da previsão	Dias de atualização
Primeiro	16/05/1982	22/06/1982	22/06/1982 - 08/07/1982	37
Segundo	27/06/1983	04/07/1983	04/07/1983 - 19/07/1983	25



**Figura 5-17** Evento 1, observado na bacia Rio Canoas, 16/05/1982 - 03/08/1982.



**Figura 5-18** Evento 2, observado na bacia Rio Canoas, 27/06/1983 - 09/07/1983.

## 6. RESULTADOS

Neste capítulo, apresentam-se os resultados das três etapas descritas no item anterior, em cada uma das bacias estudadas.

### 6.1. Testes com dados sintéticos

Nesta etapa, o resultado desejado pela metodologia consiste em reproduzir a série de chuva real, a partir da atualização das séries de chuvas sintéticas.

#### 6.1.1. Definição dos parâmetros $N_{Ciclo}$ e $N_{int}$

Primeiramente, foi escolhido o valor de  $k$ , apresentado nas equações 4.2 e 4.3. Este coeficiente deve ser 0,0001, para cada tentativa de aumento ou diminuição da precipitação. O valor de  $k$  foi escolhido após analisar a sensibilidade do modelo IPH-II a pequenas perturbações da precipitação.

Os valores das duas funções-objetivo apresentadas nas equações 4.4 e 4.5, descritos no item 4.3, foram determinados mediante testes preliminares onde foi avaliado um grande número de combinações de  $N_{ciclo}$  e  $N_{iter}$  com a finalidade de obter valores aceitáveis de  $\epsilon_{min}$ . Na Figura 6-1, mostra-se um exemplo de um dos resultados observados nos testes preliminares, considerando uma única iteração para uma série de 150 intervalos de tempo e modificando o número de ciclos usado em cada intervalo de tempo. Observou-se que o aumento do número de ciclos diminuiu erro máximo de 24 para  $7 \text{ m}^3/\text{s}$  e fez variar o erro no último intervalo de tempo da série analisada entre  $5$  e  $14 \text{ m}^3/\text{s}$ . Embora o resultado seja satisfatório, necessita de um elevado tempo de processamento para obter um erro final menor do que  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ .

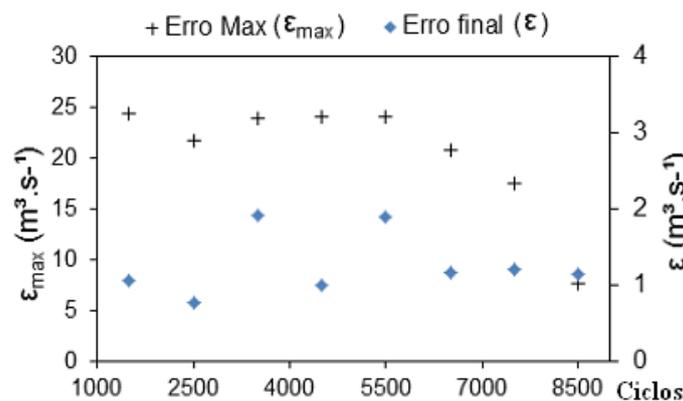
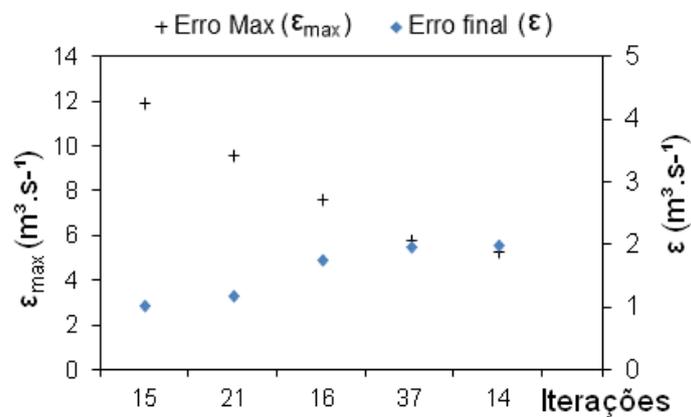


Figura 6-1 Resultados de testes preliminares, variando ciclos.

Fonte: Elaboração própria

Em outros testes preliminares foi considerado fixo o número de ciclos,  $N_{\text{ciclos}} = 3500$ , assim verificou-se que, se o número de iterações podia diminuir os erros medidos até valores menores que os resultados observados na Figura 6-1. Observou-se na Figura 6-2 que foi necessário um número de iterações menor do que 20 para obter desvios no último intervalo de tempo, aproximadamente de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estes resultados foram obtidos em uma mesma bacia considerando a atualização de seis séries sintéticas de 150 dias. Nesta mesma figura, apresentam-se os erros máximos das séries atualizadas, onde o aumento do número de iterações não garante uma diminuição dos erros máximos.



**Figura 6-2** Resultados de testes preliminares, variando iterações.  
Fonte: Elaboração própria

Da Figura 6-2 se escolhe um valor ótimo de erro máximo ( $\epsilon_{\text{max}}$ ) igual a  $0,0 \text{ m}^3/\text{s}$  esperando-se que possa ser possível obter resultados no erro final ( $\epsilon$ ), menores ou iguais a  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Dos resultados mostrados acima, escolheram-se os seguintes valores para os critérios de parada, conforme mostrado na Tabela 6.1.

**Tabela 6.1** Valores adotados para os critérios de parada.

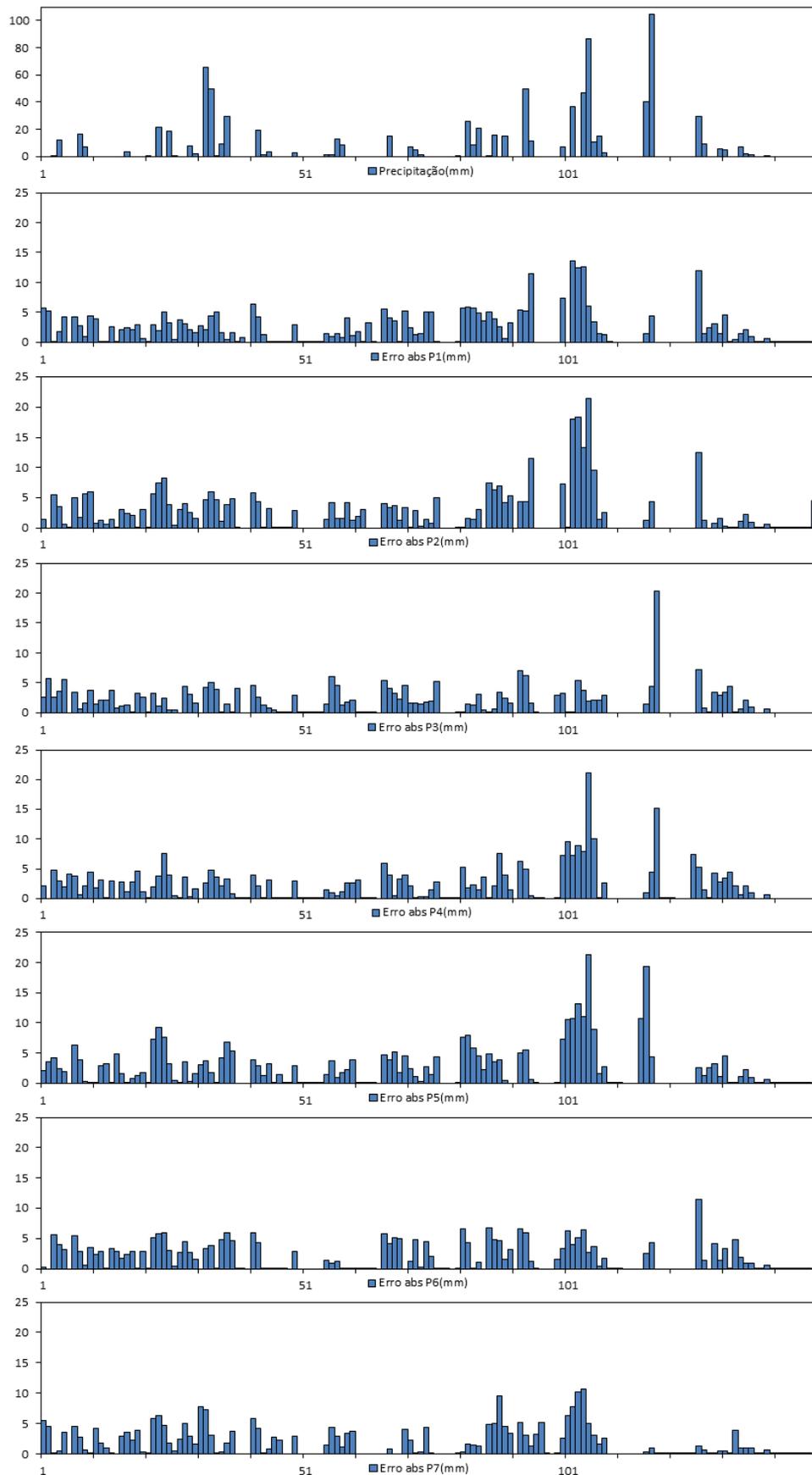
Equação	FO	Descrição	Ótimo [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	$N_{\text{ciclos}}$	$N_{\text{iter}}$
4.4	FO1	Último desvio da série	2,0	2500	10
4.5	FO2	Desvio máximo da série	0,0	2500	20

Para poder medir o grau de desempenho da metodologia usada, avaliaram-se os resultados de forma visual e mediante índices de desempenho, em cada bacia.

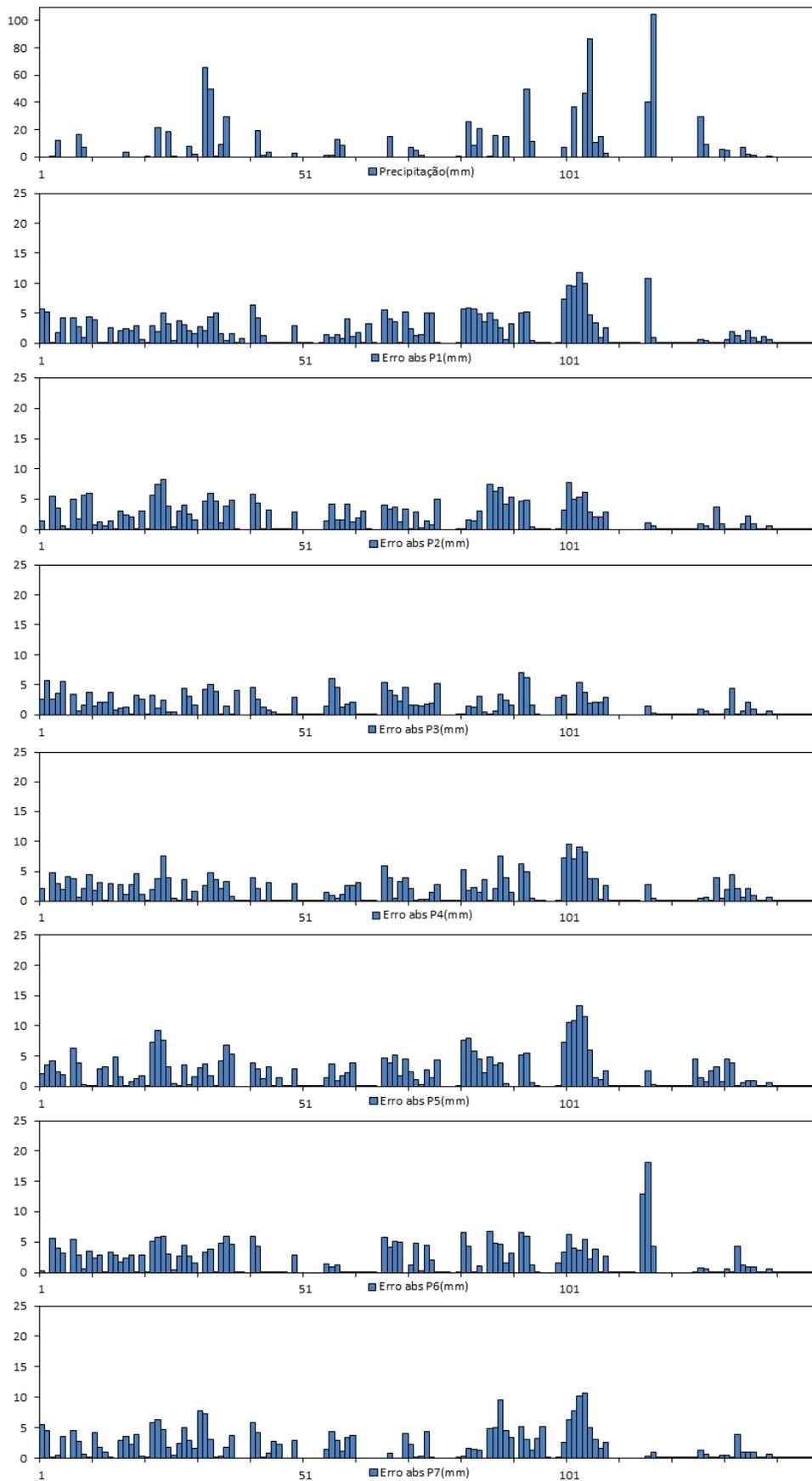
### 6.1.2. Resultados obtidos na bacia do rio Ijuí

Os resultados da atualização das séries sintéticas de precipitações são apresentados a seguir, na Figura 6-3 e na Figura 6-4, onde se observam os desvios entre a precipitação real e cada uma das séries de precipitações atualizadas, para cada um dos intervalos de tempo, utilizando as funções-objetivo FO1 e FO2, respectivamente. Nas figuras são mostradas: (1) o primeiro gráfico representa a série de chuva real e (2) os restantes sete gráficos correspondem aos desvios das sete séries de chuva atualizada.

Na Figura 6-3, os maiores desvios são proporcionais a seus correspondentes valores de precipitação, fazendo-se uma comparação em relação aos desvios da Figura 6-4, estes valores máximos conseguem ser reduzidos, devido ao critério de função-objetivo utilizado, desvio máximo da série.



**Figura 6-3** Desvio nas precipitações atualizadas, na bacia do rio Ijuí para a FO1.  
 Fonte: Elaboração própria



**Figura 6-4** Desvio nas precipitações atualizadas, na bacia do rio Ijuí para a FO2.  
 Fonte: Elaboração própria

Outro fato que deve ser observado dos desvios apresentados nas figuras, é que todas as séries deveriam convergir a uma mesma série atualizada e, neste estudo de caso, não foi observada essa tendência.

Para comparar o ganho com o uso do processo de atualização da precipitação nas vazões foram estimadas medidas de desempenho, mostradas nas tabelas 6.2 a 6.4. Na Tabela 6.2, apresentam-se os índices de desempenho para as vazões das séries sintéticas iniciais na bacia do rio Ijuí. Os índices de desempenho das séries de vazões, após aplicar a atualização das precipitações, são apresentados a seguir, na Tabela 6.3, considerando a função-objetivo desvio último da série, e na Tabela 6.4, considerando a função-objetivo desvio máximo da série.

**Tabela 6.2** Índices de desempenho das séries sintéticas, na bacia do rio Ijuí.

Sem atualização	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7
1. Coef. Kling-Gupta	0,86	0,33	0,83	0,50	0,87	0,72	0,36
2. Desv. Abs. Médio	25,63	59,60	30,40	47,38	30,69	29,71	47,30
3. Desv. Quad. Rel. Médio	7,31	33,11	11,25	19,41	9,01	10,90	28,25
4. Desv. Quad. Inverso	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
5. Coef. Nash-Sutcliffe	0,94	0,49	0,90	0,73	0,88	0,85	0,41
6. Desv. Rel. Médio (%)	0,19	0,33	0,19	0,25	0,18	0,20	0,21
7. Erro de volume(%)	-5,13	-42,31	-5,76	-28,23	-11,81	-19,44	-29,21

**Tabela 6.3** Índices de desempenho para FO1, na bacia do rio Ijuí.

Com atualização	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7
1. Coef. Kling-Gupta	0,86	0,85	0,98	0,98	0,98	0,88	0,99
2. Desv. Abs. Médio	11,37	12,97	3,11	3,51	3,05	8,07	2,22
3. Desv. Quad. Rel. Médio	3,19	3,47	0,13	0,30	0,25	1,24	0,09
4. Desv. Quad. Inverso	1,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5. Coef. Nash-Sutcliffe	0,97	0,97	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00
6. Desv. Rel. Médio (%)	0,06	0,07	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
7. Erro de volume(%)	7,67	8,91	1,50	1,66	1,56	5,29	0,62

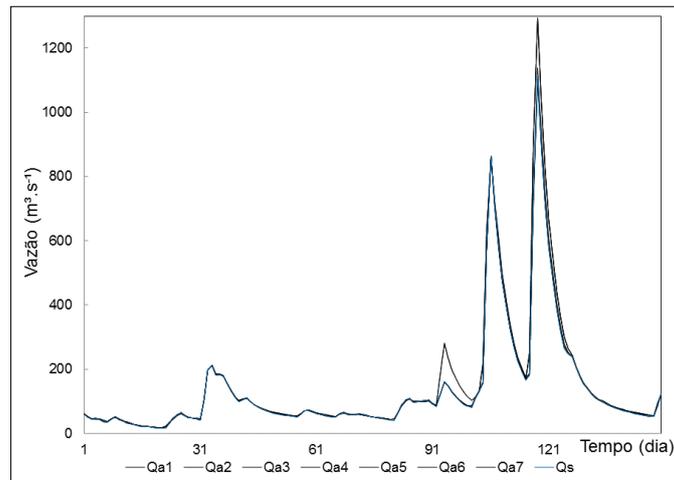
**Tabela 6.4** Índices de desempenho para FO2, na bacia do rio Ijuí.

Com atualização	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7
1. Coef. Kling-Gupta	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99
2. Desv. Abs. Médio	1,42	1,59	1,50	1,27	1,55	1,71	1,74
3. Desv. Quad. Rel. Médio	0,04	0,06	0,04	0,04	0,07	0,07	0,07
4. Desv. Quad. Inverso	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5. Coef. Nash-Sutcliffe	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6. Desv. Rel. Médio (%)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03
7. Erro de volume(%)	0,25	0,30	0,38	0,16	0,42	0,62	0,56

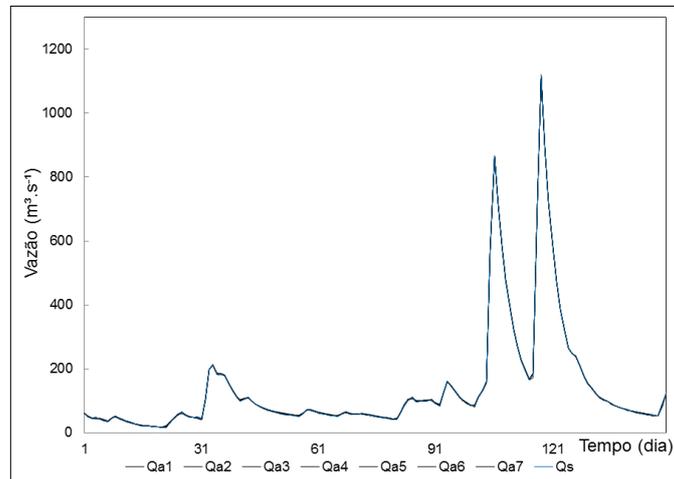
Na Tabela 6.3 os piores resultados são observados nos testes 1 e 2, na Tabela 6.4 os índices mostraram quase os mesmos resultados para cada uma das séries atualizadas.

Para ter um melhor entendimento da eficiência do método nas séries analisadas, são mostrados os respectivos hidrogramas atualizados na Figura 6-5 e Figura 6-6.

Os desvios observados na precipitação atualizada com a FO1 influenciaram a representatividade do hidrograma nos picos, mas estes são observados em apenas duas das séries sintéticas avaliadas. A representatividade da série atualizada foi melhor com a FO2 em relação à FO1 e, finalmente, no último intervalo de tempo de cada série conseguiu-se obter valores de  $\epsilon$  próximos de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  para as duas funções objetivo.



**Figura 6-5** Hidrogramas atualizados para FO1, na bacia do rio Ijuí.  
Fonte: Elaboração própria

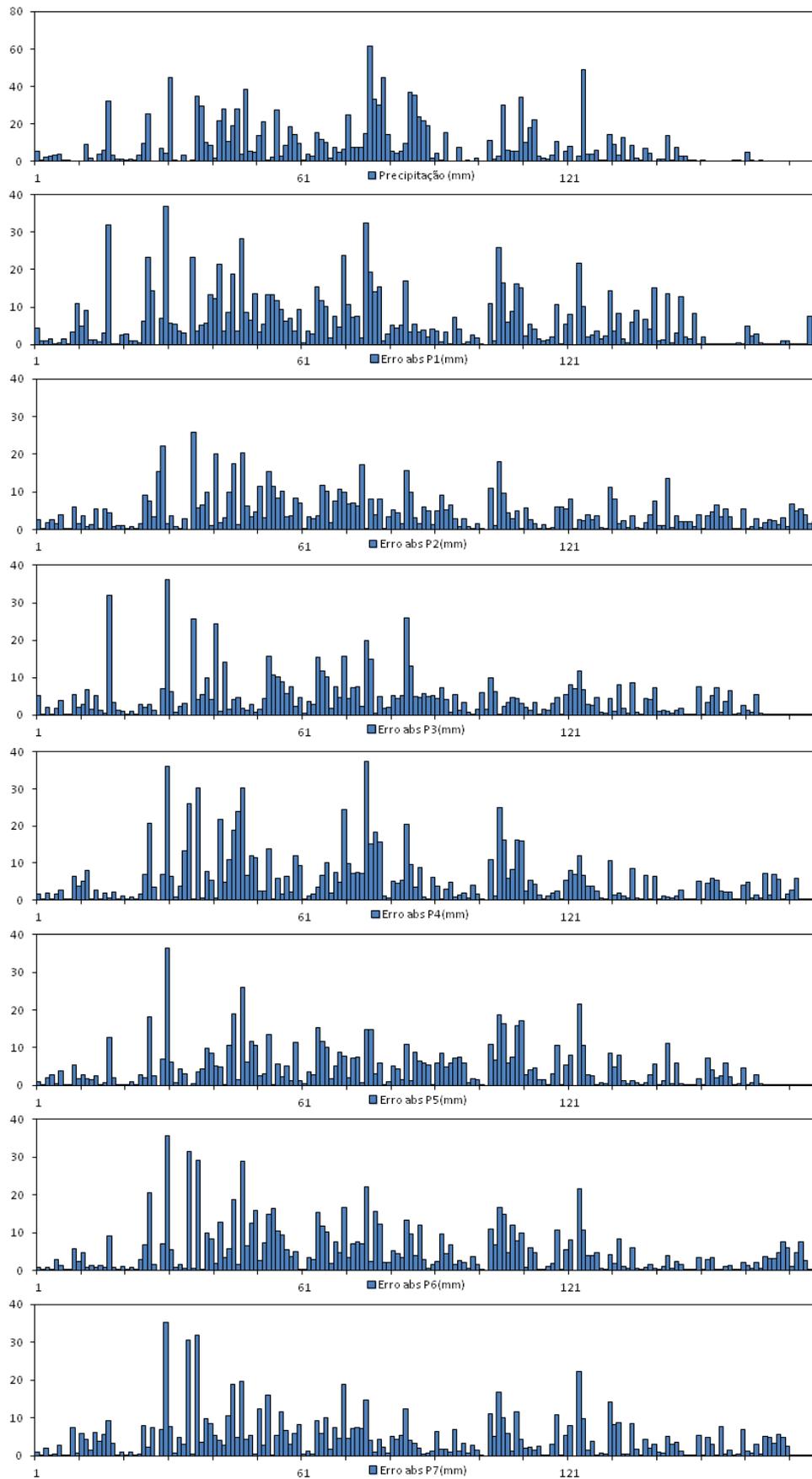


**Figura 6-6** Hidrogramas atualizados para FO2, na bacia do rio Ijuí.  
Fonte: Elaboração própria

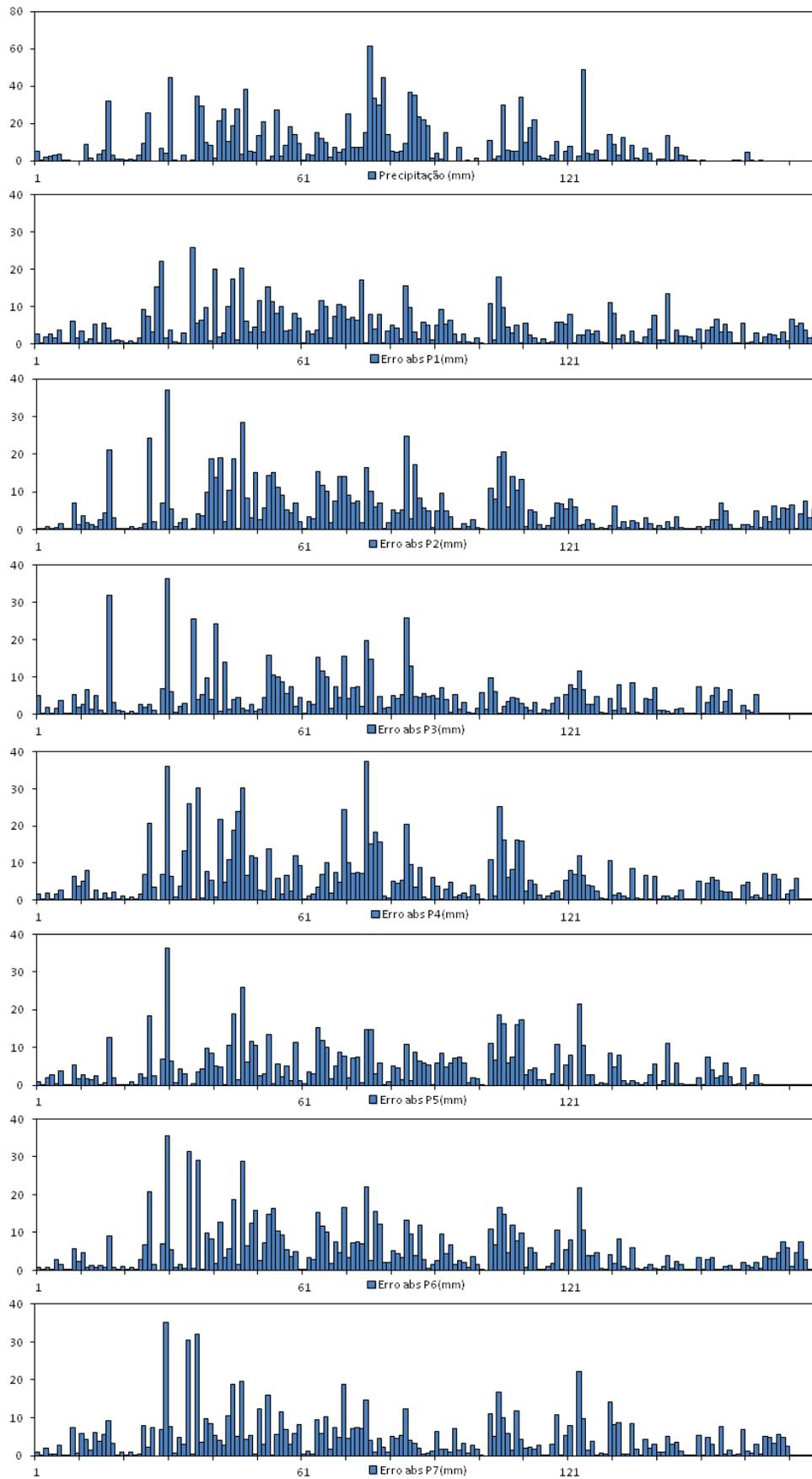
### 6.1.3. Resultados obtidos na bacia do rio Tesouras

A análise gráfica do resultado da atualização das séries sintéticas de precipitações é apresentada a seguir, na Figura 6-7 e Figura 6-8, onde se observam os desvios entre a precipitação real e cada uma das séries de precipitações atualizadas para cada um dos intervalos de tempo, utilizando as funções-objetivo FO1 e FO2, respectivamente.

Como se observa nestas figuras, os resultados do processo de atualização da precipitação demonstram que as séries convergiram, aproximadamente, a uma mesma série atualizada, utilizando cada função-objetivo.



**Figura 6-7** Desvio nas precipitações atualizadas, na bacia do rio Tesouras para a FO1.  
 Fonte: Elaboração própria



**Figura 6-8** Desvio nas precipitações atualizadas, na bacia do rio Tesouras para a FO2.  
 Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 6.5 apresentam-se os índices de desempenho das séries sintéticas iniciais na bacia do rio Tesouras. Os índices de desempenho das séries atualizadas são apresentados a seguir, na Tabela 6.6, considerando a função-objetivo desvio último da série e na Tabela 6.7 e considerando a função-objetivo desvio máximo da série.

**Tabela 6.5** Índices de desempenho das séries sintéticas, na bacia do rio Tesouras.

<b>Sem atualização</b>	<b>Teste 1</b>	<b>Teste 2</b>	<b>Teste 3</b>	<b>Teste 4</b>	<b>Teste 5</b>	<b>Teste 6</b>	<b>Teste 7</b>
1. Coef. Kling-Gupta	0,09	-0,06	-0,01	-0,02	0,00	-0,10	-0,64
2. Desv. Abs. Médio	44,23	53,05	49,99	52,38	52,21	55,09	68,90
3. Desv. Quad. Rel. Médio	30,38	40,19	35,72	38,72	38,84	42,79	64,68
4. Desv. Quad. Inverso	0,05	0,42	0,48	0,12	0,20	0,15	0,59
5. Coef. Nash-Sutcliffe	0,12	-0,08	0,01	-0,01	0,03	-0,15	-0,68
6. Desv. Rel. Médio (%)	0,43	0,58	0,55	0,53	0,55	0,57	0,77
7. Erro de volume(%)	-59,58	-71,45	-67,34	-70,57	-70,32	-74,22	-91,72

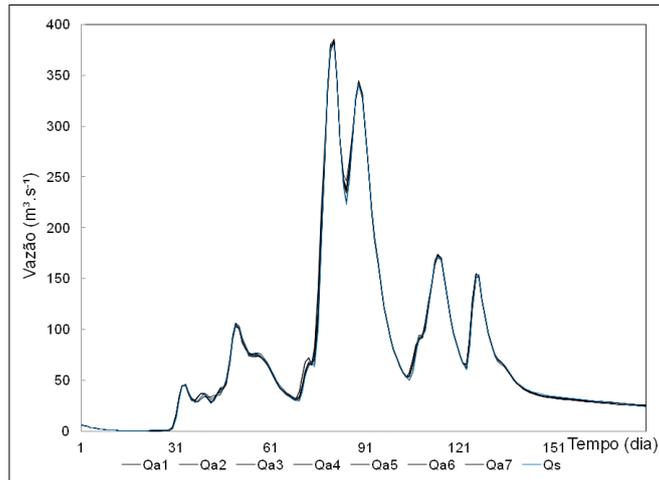
**Tabela 6.6** Índices de desempenho para FO1, na bacia do rio Tesouras.

<b>Com atualização</b>	<b>Teste 1</b>	<b>Teste 2</b>	<b>Teste 3</b>	<b>Teste 4</b>	<b>Teste 5</b>	<b>Teste 6</b>	<b>Teste 7</b>
1. Coef. Kling-Gupta	0,97	0,95	0,98	0,98	1,00	0,98	0,98
2. Desv. Abs. Médio	2,61	3,59	2,53	2,64	1,59	2,86	2,34
3. Desv. Quad. Rel. Médio	0,38	0,39	0,21	0,42	0,11	0,25	0,16
4. Desv. Quad. Inverso	0,30	0,02	0,43	0,03	0,06	0,05	0,06
5. Coef. Nash-Sutcliffe	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00
6. Desv. Rel. Médio (%)	0,08	0,06	0,08	0,05	0,04	0,06	0,06
7. Erro de volume(%)	2,21	-4,18	-1,84	1,89	-0,14	-2,09	-2,05

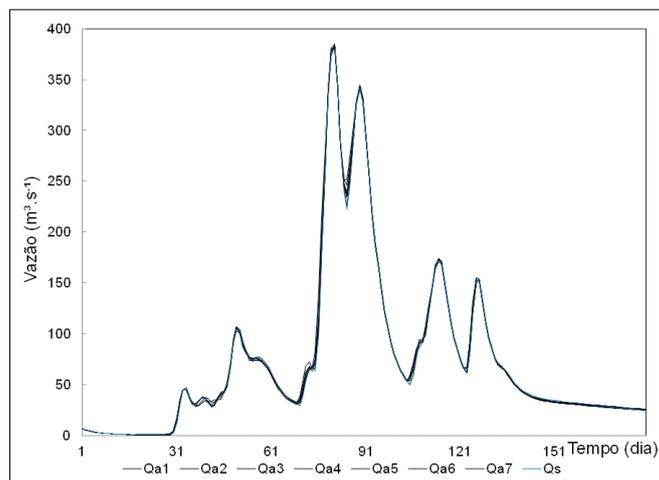
**Tabela 6.7** Índices de desempenho para FO2, na bacia do rio Tesouras.

<b>Com atualização</b>	<b>Teste 1</b>	<b>Teste 2</b>	<b>Teste 3</b>	<b>Teste 4</b>	<b>Teste 5</b>	<b>Teste 6</b>	<b>Teste 7</b>
1. Coef. Kling-Gupta	0,95	0,99	0,98	0,98	1,00	0,98	0,98
2. Desv. Abs. Médio	3,59	2,20	2,53	2,64	1,59	2,86	2,34
3. Desv. Quad. Rel. Médio	0,39	0,21	0,21	0,42	0,11	0,25	0,16
4. Desv. Quad. Inverso	0,02	0,24	0,43	0,03	0,06	0,05	0,06
5. Coef. Nash-Sutcliffe	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00
6. Desv. Rel. Médio (%)	0,06	0,07	0,08	0,05	0,04	0,06	0,06
7. Erro de volume(%)	-4,18	0,42	-1,84	1,89	-0,14	-2,09	-2,05

Na Figura 6-9 e Figura 6-10, são mostrados os respectivos hidrogramas atualizados. Como foi observado nas tabelas anteriores, a representatividade da série atualizada foi igual para as duas funções-objetivo. Para as avaliações conseguiu-se obter valores no último intervalo de tempo que varia entre 0,2 – 1,7 m<sup>3</sup>/s e um erro máximo nas séries atualizadas que varia entre 9,37 – 43,02 m<sup>3</sup>/s.



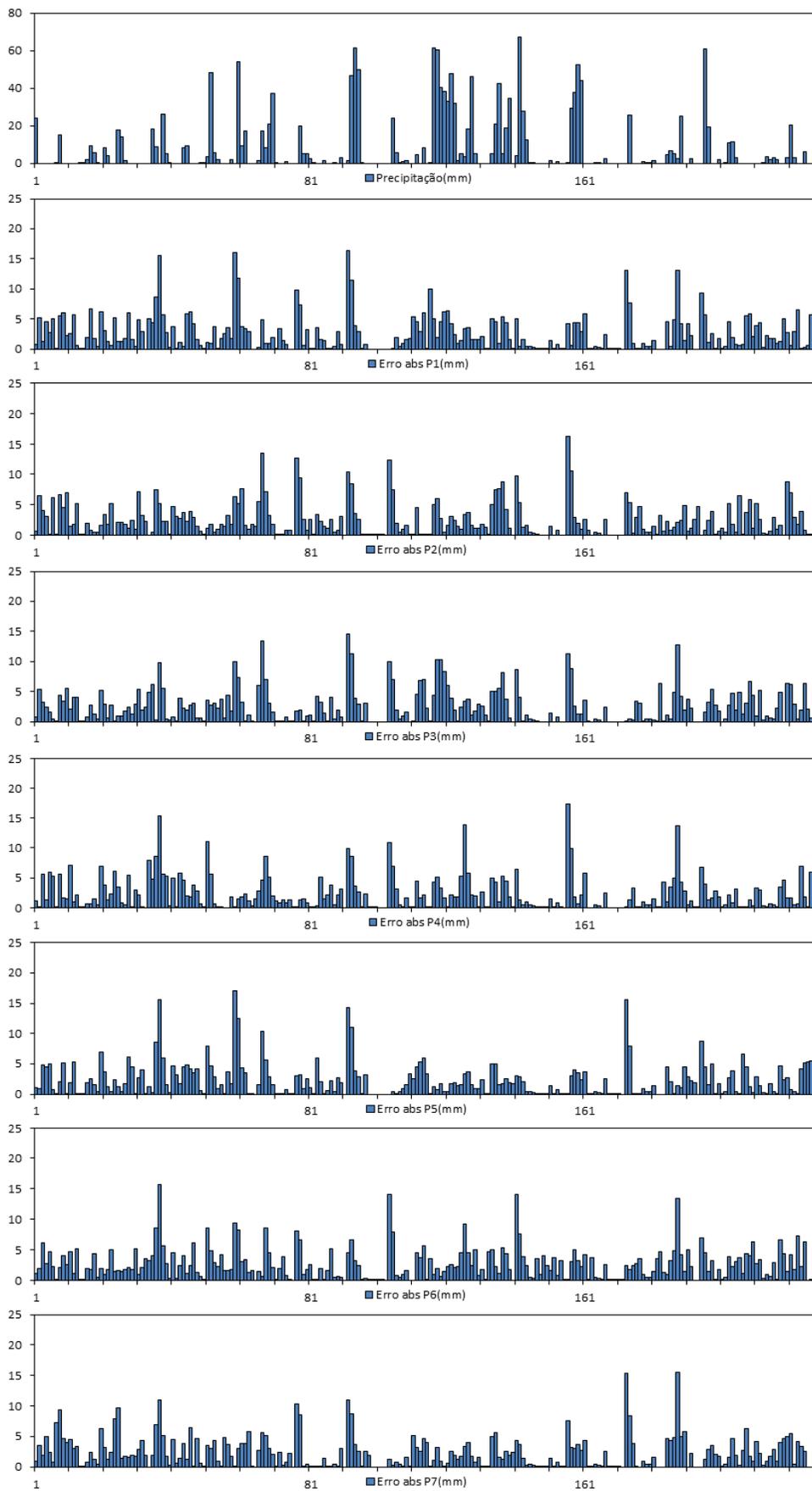
**Figura 6-9** Hidrogramas atualizados para FO1, na bacia Tesouras.  
Fonte: Elaboração própria



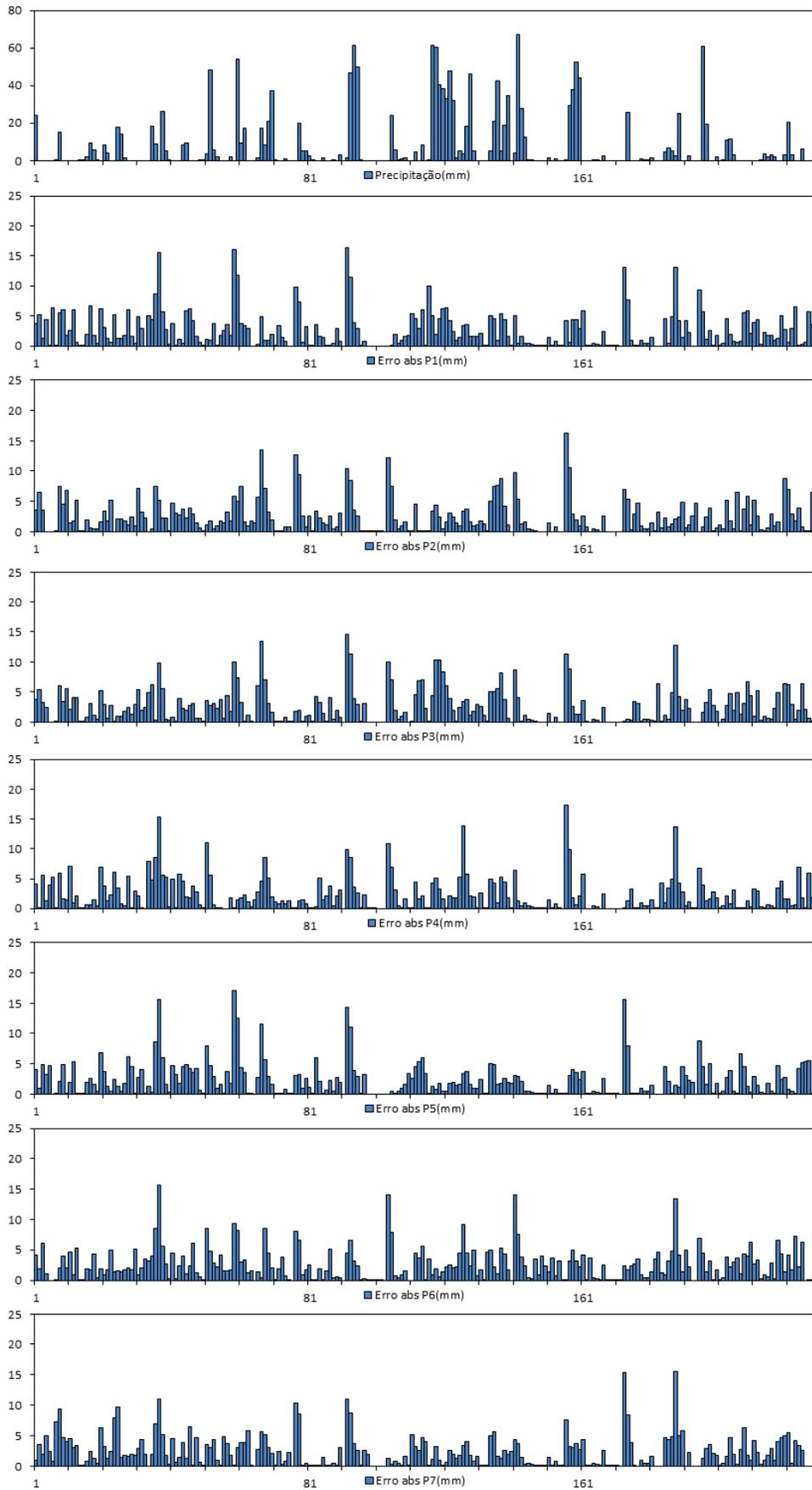
**Figura 6-10** Hidrogramas atualizados para FO2, na bacia Tesouras.  
Fonte: Elaboração própria

#### 6.1.4. Resultados obtidos na bacia rio Canoas

A análise gráfica do resultado da atualização das séries sintéticas de precipitações é apresentada a seguir, na Figura 6-11 e Figura 6-12, onde se observam os desvios entre a precipitação real e cada uma das séries de precipitações atualizadas para cada um dos intervalos de tempo, utilizando as funções-objetivo FO1 e FO2, respectivamente. Observa-se que os erros obtidos da aplicação do método de atualização, utilizando cada uma das funções-objetivo, foram quase os mesmos aos que correspondem aos maiores valores dos intervalos de precipitação maiores de 20 mm. As pequenas diferenças foram observadas para aqueles intervalos de precipitação com valores menores de 20 mm. Em média, os erros finais depois da atualização de precipitação foram de aproximadamente 5 mm.



**Figura 6-11** Desvio nas precipitações atualizadas, na bacia rio Canoas para a FO1.  
 Fonte: Elaboração própria



**Figura 6-12** Desvio nas precipitações atualizadas, na bacia rio Canoas para a FO2.  
 Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 6.8 apresentam-se os índices de desempenho das séries sintéticas iniciais na bacia do rio Canoas. Os índices de desempenho das séries atualizadas são apresentados a seguir, na Tabela 6.9, considerando a função-objetivo desvio último da série e na Tabela 6.10, considerando a função-objetivo desvio máximo da série.

**Tabela 6.8** Índices de desempenho das séries sintéticas, na bacia rio Canoas.

<b>Sem atualização</b>	<b>Teste 1</b>	<b>Teste 2</b>	<b>Teste 3</b>	<b>Teste 4</b>	<b>Teste 5</b>	<b>Teste 6</b>	<b>Teste 7</b>
1. Coef. Kling-Gupta	0,62	0,37	0,66	0,34	0,49	0,52	0,59
2. Desv. Abs. Médio	24,35	28,92	21,32	31,88	25,25	24,03	21,72
3. Desv. Quad. Rel. Médio	12,66	16,57	9,18	17,64	11,64	10,85	9,09
4. Desv. Quad. Inverso	0,02	0,02	0,06	0,05	0,02	0,02	0,10
5. Coef. Nash-Sutcliffe	0,71	0,47	0,77	0,46	0,66	0,69	0,74
6. Desv. Rel. Médio (%)	0,34	0,28	0,31	0,37	0,27	0,31	0,31
7. Erro de volume(%)	-29,52	-38,70	-21,96	-40,46	-30,96	-31,89	-23,72

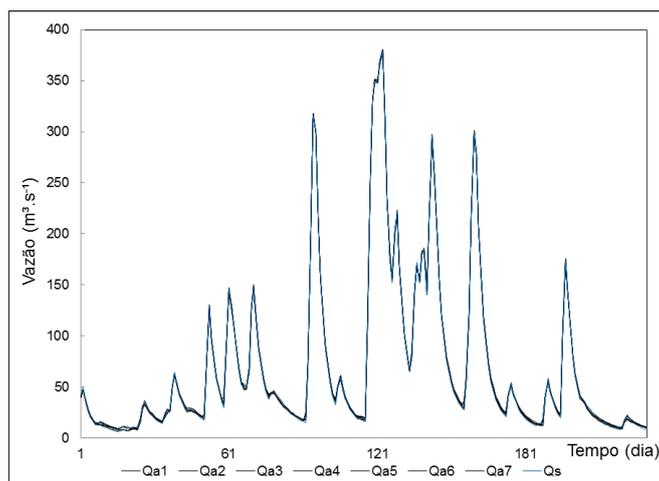
**Tabela 6.9** Índices de desempenho para FO1, na bacia rio Canoas.

<b>Com atualização</b>	<b>Teste 1</b>	<b>Teste 2</b>	<b>Teste 3</b>	<b>Teste 4</b>	<b>Teste 5</b>	<b>Teste 6</b>	<b>Teste 7</b>
1. Coef. Kling-Gupta	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
2. Desv. Abs. Médio	1,59	1,67	1,70	1,48	1,58	1,48	1,56
3. Desv. Quad. Rel. Médio	0,15	0,13	0,15	0,11	0,15	0,11	0,12
4. Desv. Quad. Inverso	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
5. Coef. Nash-Sutcliffe	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6. Desv. Rel. Médio (%)	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,05	0,06
7. Erro de volume(%)	0,97	1,20	1,17	0,70	0,95	0,91	0,75

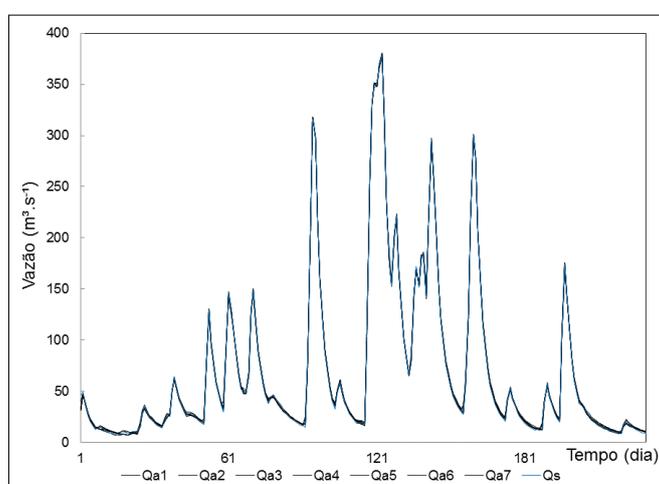
**Tabela 6.10** Índices de desempenho para FO2, na bacia rio Canoas.

<b>Com atualização</b>	<b>Teste 1</b>	<b>Teste 2</b>	<b>Teste 3</b>	<b>Teste 4</b>	<b>Teste 5</b>	<b>Teste 6</b>	<b>Teste 7</b>
1. Coef. Kling-Gupta	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
2. Desv. Abs. Médio	1,73	1,77	1,85	1,65	1,71	1,60	1,70
3. Desv. Quad. Rel. Médio	0,20	0,17	0,19	0,16	0,19	0,14	0,17
4. Desv. Quad. Inverso	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
5. Coef. Nash-Sutcliffe	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6. Desv. Rel. Médio (%)	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
7. Erro de volume(%)	1,18	1,39	1,40	0,91	1,15	1,13	0,94

Os piores resultados destas tabelas foram observados no teste 3. Na Figura 6-13 e na Figura 6-14, são mostrados os respectivos hidrogramas atualizados. A representatividade da série atualizada foi quase a mesma entre a FO2 e a FO1, e as duas conseguiram obter no último intervalo de tempo  $\epsilon$  menores do que  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figura 6-13** Hidrogramas atualizados para FO1, na bacia rio Canoas.  
Fonte: Elaboração própria



**Figura 6-14** Hidrogramas atualizados para FO2, na bacia rio Canoas.  
Fonte: Elaboração própria

#### 6.1.5. Análise geral dos resultados nas bacias com séries sintéticas

Após ser aplicada a metodologia nos diferentes estudos de caso, com séries sintéticas, foi realizada uma comparação, a qual é apresentada a seguir, dos resultados obtidos de precipitação e vazão. Assim, é possível observar o desempenho do método usando as duas funções-objetivo nas tabelas a seguir.

**Tabela 6.11** Resumo de resultados obtidos com a FO1.

Bacia	Erro Máx Absoluto		Erro Absoluto final
	Chuva [mm]	Vazão [m <sup>3</sup> /s]	Vazão [m <sup>3</sup> /s]
Rio Ijuí	10,7 - 21,4	5,8 - 177,0	0,6 - 2,0
Rio Tesouras	25,8 - 37,5	9,37 - 43,0	0,2 - 1,7
Villa Canoas	11,1 - 17,0	5,5 - 10,7	1,4 - 2,0

**Tabela 6.12** Resumo de resultados obtidos com a FO2.

Bacia	Erro Máx Absoluto		Erro Absoluto final
	Chuva [mm]	Vazão [m <sup>3</sup> /s]	Vazão [m <sup>3</sup> /s]
Rio Ijuí	7,1 - 18,2	4,4 - 11,9	1,0 - 2,0
Rio Tesouras	35,5 - 38,0	31,4 - 36,35	0,09 - 0,40
Villa Canoas	13,5 - 62,1	13,7 - 14,6	1,4 - 1,9

O resultado esperado desta etapa da aplicação da metodologia era obter uma chuva atualizada igual à chuva real, e vazões simuladas com a chuva atualizada iguais às vazões com chuva real. Conforme os resultados obtidos, estes valores foram diferentes, mas foram considerados aceitáveis.

Na Tabela 6.11 a função-objetivo 1 tentou reduzir o erro no intervalo final da série sintética, tendo como ótimo 2 m<sup>3</sup>/s, sendo obtido este limite para todos os estudos de caso. Na Tabela 6.12 a função-objetivo 2 tentou reduzir o erro máximo da série sintética, tendo como ótimo 0 m<sup>3</sup>/s, com esta condição, indiretamente conseguiu-se atingir erros absolutos no último intervalo de tempo, próximos aos obtidos com a função-objetivo 1.

Uma observação especial deve-se ter nos resultados da bacia do rio Tesouras, onde as duas funções-objetivo conseguiram obter resultados praticamente iguais e ainda melhores que nas outras duas bacias. Este fato pode estar influenciado pela condição da metodologia apresentada, que só atualiza a precipitação de entrada, sempre que o valor da chuva não tenha que ser diminuído abaixo de zero. A bacia do rio Tesouras é a única das três, onde a série atualizada apresenta pouca frequência de intervalos de tempo sem chuva. Os erros observados nas séries atualizadas de chuva depois de ter aplicado o método de atualização, embora partissem de séries sintéticas de precipitação distintas, apresentaram uma tendência a convergir a uma mesma série.

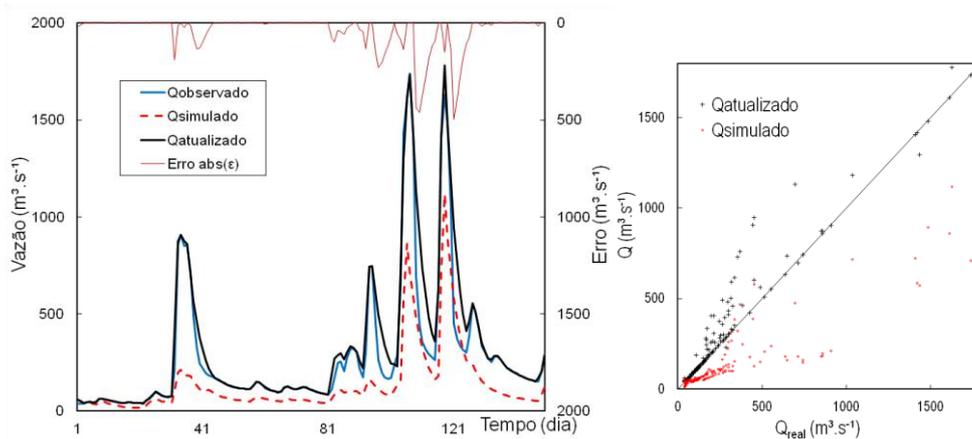
Outro fato que fica claro dos resultados é que as séries de precipitação atualizadas, embora não sejam iguais, simuladas com o modelo IPH-II geraram hidrogramas praticamente iguais aos obtidos com a chuva real. Esta característica vem da sensibilidade do modelo hidrológico dificultando o desempenho esperado pela metodologia proposta.

## 6.2. Testes com dados reais

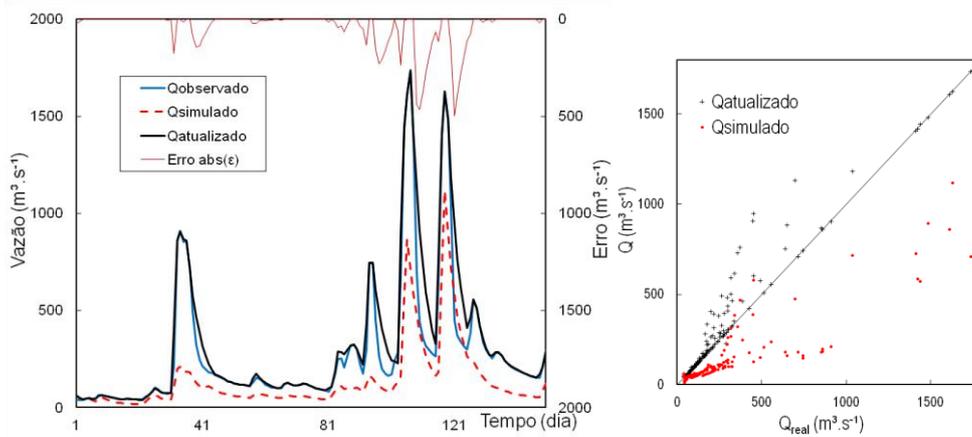
Nestes testes, o resultado esperado consiste em diminuir quantitativamente as diferenças entre as séries de vazões simuladas em relação às séries de vazão observadas. Entende-se que para isto, a metodologia deve perturbar o dado de entrada de chuva. Para poder medir o grau de desempenho da metodologia usada, são apresentados os resultados de forma visual e mediante índices de desempenho das séries geradas com dados reais e suas correspondentes séries atualizadas, em cada bacia.

### 6.2.1. Resultados obtidos na bacia do rio Ijuí

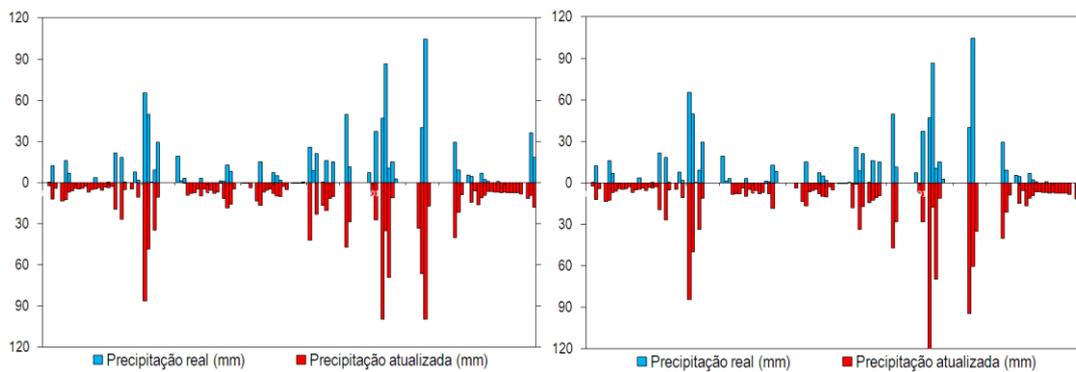
Nas figuras mostradas a seguir, observa-se que os hidrogramas atualizados utilizando cada função-objetivo, tiveram um desempenho similar, com bons resultados em quase todo o período de aplicação. Porém os dois tiveram problemas para minimizar os erros nos períodos de recessão, após uma vazão consideravelmente grande. Isto pode ser explicado do seguinte modo, até o pico dos hidrogramas a metodologia incrementa as precipitações para atingir o valor observado de vazão, mas depois, no começo da recessão tem intervalos de tempo com precipitação igual à zero (ver Figura 6-17). Então a metodologia não consegue reduzir a precipitação real para diminuir as vazões. Em relação à modelagem hidrológica, entende-se que estará na condição solo saturado e fluxo subterrâneo elevado, mantendo valores de vazão embora a precipitação seja nula.



**Figura 6-15** Hidrograma da bacia Ijuí, aplicando a metodologia para FO1. Correlação entre as vazões atualizada e simulada com base na vazão observada.



**Figura 6-16** Hidrograma da bacia Ijuí, aplicando a metodologia para FO2. Correlação entre as vazões atualizada e simulada com base na vazão observada.

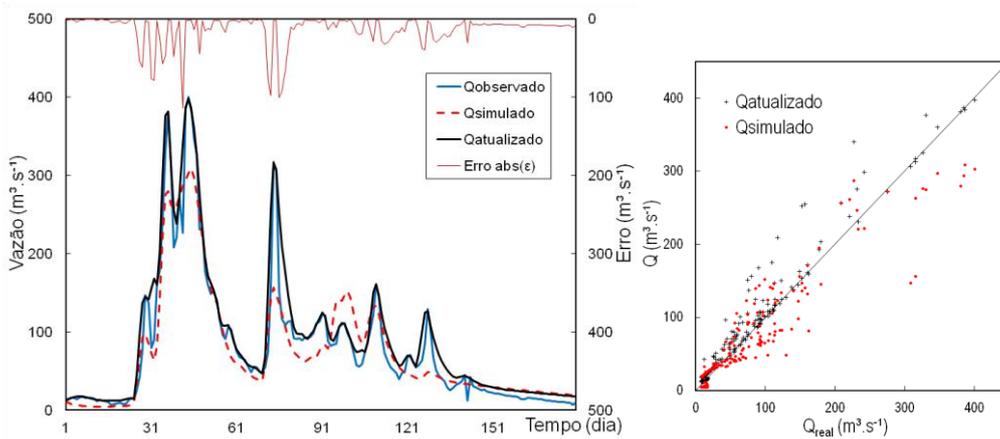


**Figura 6-17** Precipitação atualizada da bacia Ijuí, utilizando a FO1 (esquerda) e a FO2 (direita).

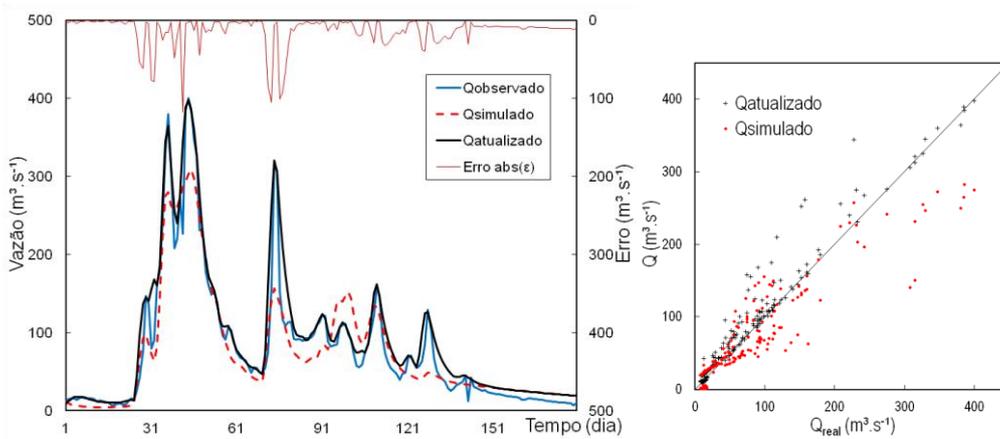
### 6.2.2. Resultados obtidos na bacia do rio Tesouras

Nas figuras mostradas a seguir, observam-se os hidrogramas atualizados utilizando cada função-objetivo. O desempenho observado foi similar. Os dois tiveram

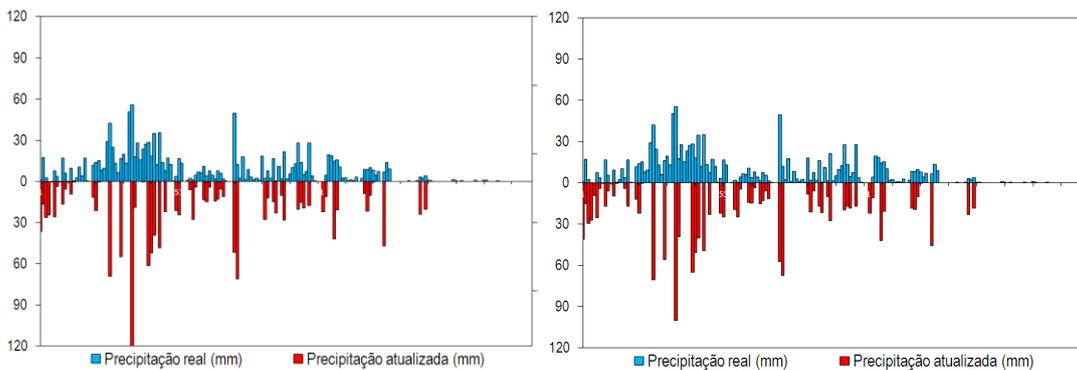
problemas para minimizar os erros nos períodos de recessão observados no final do período selecionado. Uma característica da série de precipitações utilizada na bacia do rio Tesouras, é a frequência de dias com precipitação. Como se pode observar na Figura 6-20, a série de precipitação real apresenta a maior parte do tempo, chuvas maiores que zero e no final do período inicia-se um período de precipitações nulas.



**Figura 6-18** Hidrograma da bacia Tesouras, aplicando a metodologia para FO1. Correlação entre as vazões atualizada e simulada com base na vazão observada.



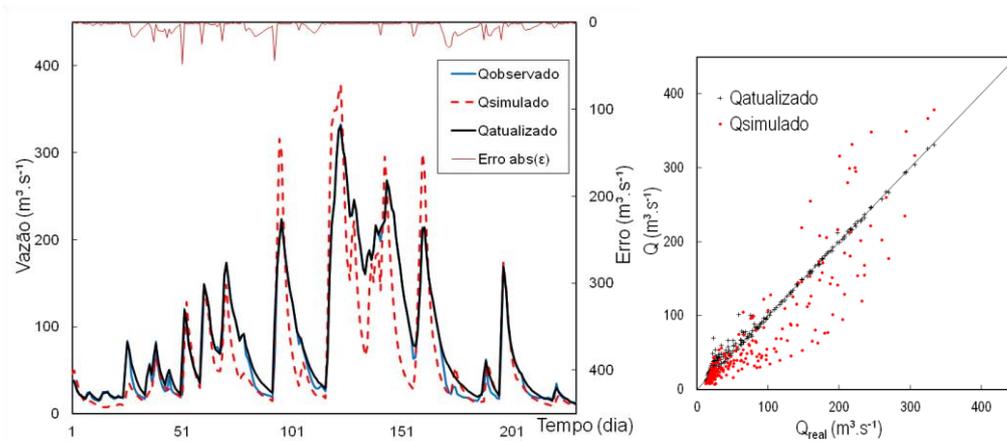
**Figura 6-19** Hidrograma da bacia Tesouras, aplicando a metodologia para FO2. Correlação entre as vazões atualizada e simulada com base na vazão observada.



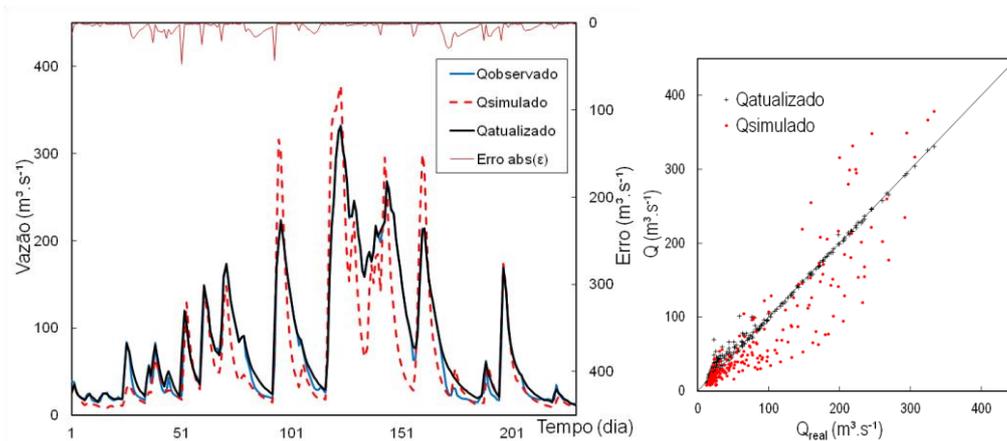
**Figura 6-20** Precipitação atualizada da bacia Tesouras, utilizando a FO1 (esquerda) e a FO2 (direita).

### 6.2.3. Resultados obtidos na bacia do rio Canoas

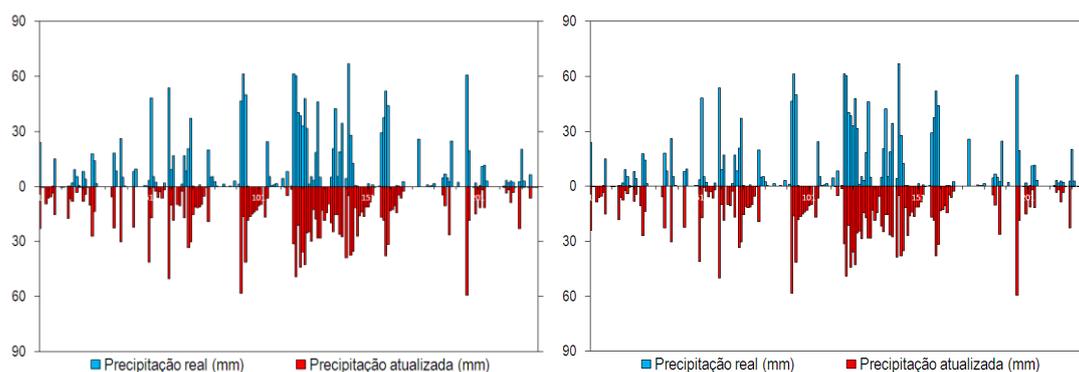
Os hidrogramas atualizados utilizando cada função-objetivo mostraram o mesmo desempenho, ou seja, apresentaram-se os problemas para minimizar os erros nos períodos de recessão. Uma característica da série de precipitações utilizada na bacia do rio Canoas é a ocorrência contínua de dias com presença de precipitação. Devido a esta característica observada, conseguiu-se obter uma melhoria na metodologia de atualização obtendo-se uma melhor representatividade do modelo. Na Figura 6-23, a correlação das vazões atualizadas somente apresentou pequenos desvios para vazões abaixo de  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figura 6-21** Hidrograma da bacia rio Canoas, aplicando a metodologia para FO1. Correlação entre as vazões atualizada e simulada com base na vazão observada.



**Figura 6-22** Hidrograma da bacia rio Canoas, aplicando a metodologia para FO2. Correlação entre as vazões atualizada e simulada com base na vazão observada.



**Figura 6-23** Precipitação atualizada da bacia rio Canoas, utilizando a FO1 (esquerda) e a FO2 (direita).

#### 6.2.4. Análise geral dos resultados nas bacias com séries reais

Na Tabela 6.13 e Tabela 6.14 mostram-se os índices de desempenho da atualização de séries reais considerando a FO1 e FO2, respectivamente, para cada um dos índices de desempenho da série atualizada em relação à série simulada inicial, em todas as bacias.

**Tabela 6.13** Índices de desempenho resultantes, para FO1.

Índice de desempenho	Bacia do rio Ijuí		Bacia do rio Tesouras		Bacia do rio Canoas	
	Simulada	Atualizada	Simulada	Atualizada	Simulada	Atualizada
1. Coef. Kling-Gupta	0,29	0,84	0,82	0,85	0,82	0,94
2. Desv. Abs. Médio	150,97	44,27	20,86	12,80	24,24	5,23
3. Desv. Quad. Rel. Médio	88,47	29,36	8,06	6,58	10,15	2,37
4. Desv. Quad. Inverso	0,01	0,00	0,04	0,02	0,02	0,01
5. Coef. Nash-Sutcliffe	0,47	0,91	0,86	0,93	0,76	0,99
6. Desv. Rel. Médio (%)	0,49	0,15	0,37	0,00	0,30	0,17
7. Erro de volume	-51,38	14,13	-7,50	14,13	-14,23	5,21

**Tabela 6.14** Índices de desempenho resultantes, para FO2.

Índice de desempenho	Bacia do rio Ijuí		Bacia do rio Tesouras		Bacia do rio Canoas	
	Simulada	Atualizada	Simulada	Atualizada	Simulada	Atualizada
1. Coef. Kling-Gupta	0,29	0,83	0,82	0,79	0,82	0,94
2. Desv. Abs. Médio	150,97	43,23	20,86	16,43	24,24	5,33
3. Desv. Quad. Rel. Médio	88,47	29,06	8,06	9,76	10,15	2,38
4. Desv. Quad. Inverso	0,01	0,00	0,04	0,02	0,02	0,01
5. Coef. Nash-Sutcliffe	0,47	0,91	0,86	0,90	0,76	0,99
6. Desv. Rel. Médio (%)	0,49	0,15	0,37	0,41	0,30	0,17
7. Erro de volume	-51,38	14,58	-7,50	19,15	-14,23	5,10

Embora inicialmente o modelo IPH-II não conseguisse uma boa representatividade nas bacias de estudo, após a aplicação do método, observou-se um melhor ajuste no hidrograma atualizado em relação ao simulado originalmente.

Observou-se que, para todas as bacias, no período de recessão, em que a chuva observada foi nula, o método não conseguiu gerar um ajuste perfeito em relação à série de vazões real. Um análise da simulação da vazão superficial e subterrânea aplicando a metodologia de atualização de dados, para cada bacia, foi apresentada no Apêndice C. As estatísticas calculadas mostram que a consideração da FO1 ou FO2 geraram resultados iguais, nas precipitações atualizadas e nos hidrogramas atualizados.

Para os requerimentos da previsão de vazões é necessário analisar outros indicadores. Como se observa na Tabela 6.15, as duas funções-objetivo conseguiram convergir aos mesmos erros absolutos finais e erros máximos absolutos; estes últimos correspondem à períodos de recessão.

**Tabela 6.15** Resumo de resultados relativos às vazões.

Bacia	FO1		FO2	
	Erro Absoluto Máx [m <sup>3</sup> /s]	Erro Absoluto no intervalo final [m <sup>3</sup> /s]	Erro Absoluto Máx [m <sup>3</sup> /s]	Erro Absoluto no intervalo final [m <sup>3</sup> /s]
Rio Ijuí	496,66	1,99	496,44	1,87
Rio Tesouras	113,44	8,4	117,41	9,8
Rio Canoas	47,73	1,21	47,37	1,21

Usando outro indicador de posição da vazão máxima observada, como se apresenta na Tabela 6.16, revelou que os erros absolutos da FO2, na posição da vazão máxima observada, são relativamente menores que os erros da FO1. Esta diferença é devida ao critério usado na FO2 que implica uma redução no erro absoluto máximo do período atualizado.

**Tabela 6.16** Erro absoluto na máxima vazão observada.

Bacia	Vazão Máxima [m <sup>3</sup> /s]	Erro Absoluto [m <sup>3</sup> /s]	
		FO1	FO2
Rio Ijuí	1736,5	1,815	1,457
Rio Tesouras	400,0	1,995	1,976
Rio Canoas	333,0	1,997	1,998

Embora o critério de FO2 tenha se mostrado superior ao FO1 na redução do erro final aplicada para as três bacias, os dois foram aplicados para a última etapa de previsão de vazões, mostrando-se os dois apropriados para o objetivo de um método de atualização de dados de entrada.

### 6.3. Resultados obtidos com o modelo WIN-IPH II em modo previsão

Nesta última etapa, o resultado esperado consiste em obter uma melhoria nas condições iniciais à previsão de vazão. Entende-se que para isto a metodologia deve perturbar o dado de entrada de chuva. No item anterior, observou-se que nem sempre a metodologia obteve resultados ótimos usando dados reais. Todavia, uma evidente melhora foi observada entre as vazões atualizadas e simuladas sem a aplicação da metodologia e, com isto, se espera que as previsões de vazão obtenham melhorias no desempenho. São considerados os dois critérios de função-objetivo aplicados nas etapas anteriores, assim como os critérios de parada respectivos.

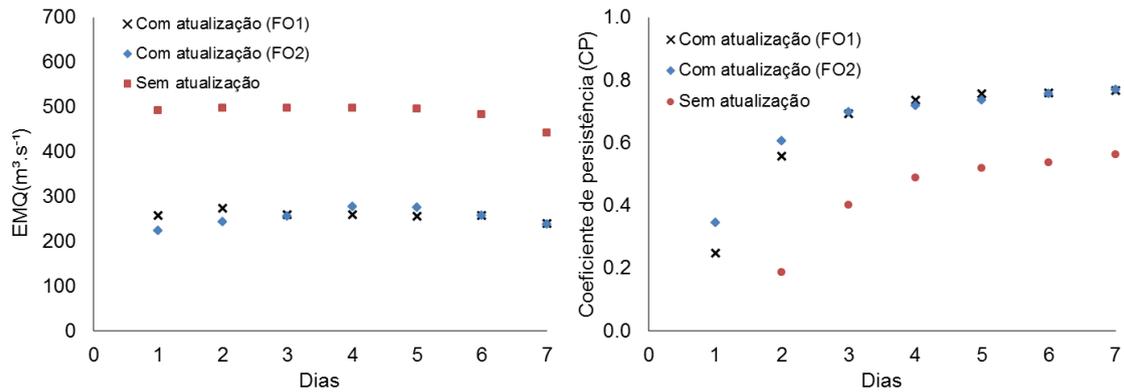
Nos resultados a seguir são apresentados os erros médios quadráticos das vazões e os coeficientes de persistência, considerando três cenários: (1) sem o método de atualização, (2) com o método considerando a primeira função-objetivo e (3) com o método considerando a segunda função-objetivo.

#### 6.3.1. Resultados obtidos na bacia do rio Ijuí

Os resultados dos testes realizados na bacia do rio Ijuí, para o evento 1 são apresentados na Tabela 6.17. Na Figura 6-24, apresentam-se os erros quadráticos médios e os coeficientes de persistência para cada um dos eventos.

**Tabela 6.17** Erro médio quadrático (EMQ) do evento 1, na bacia do rio Ijuí.

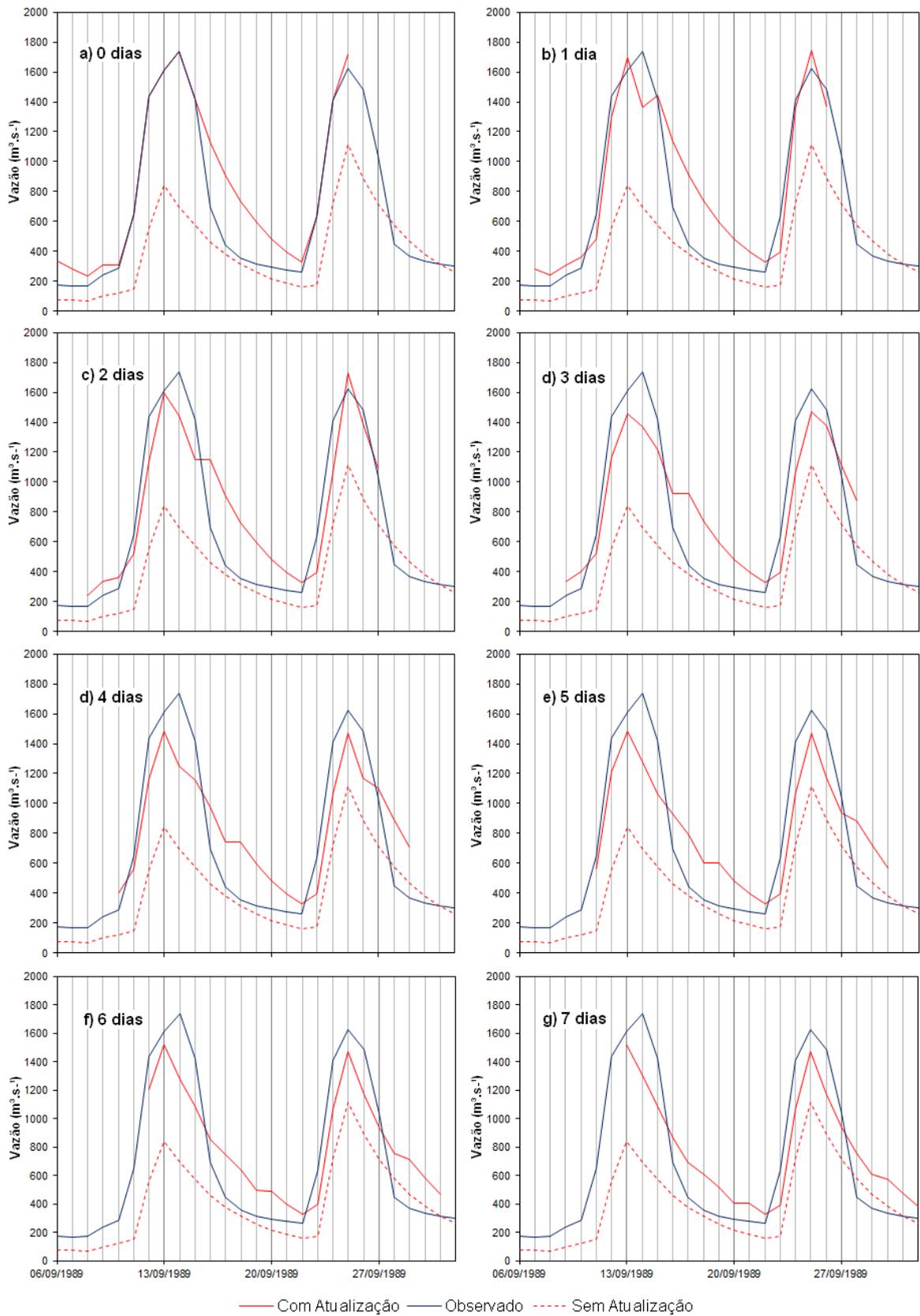
Dias de previsão	Sem atualização [m <sup>3</sup> /s]	Com atualização		Persistência [m <sup>3</sup> /s]
		FO1 [m <sup>3</sup> /s]	FO2 [m <sup>3</sup> /s]	
1	493	223	223	340
2	498	243	242	613
3	498	252	254	834
4	497	272	276	973
5	496	270	274	1033
6	484	252	256	1048
7	442	233	236	1010



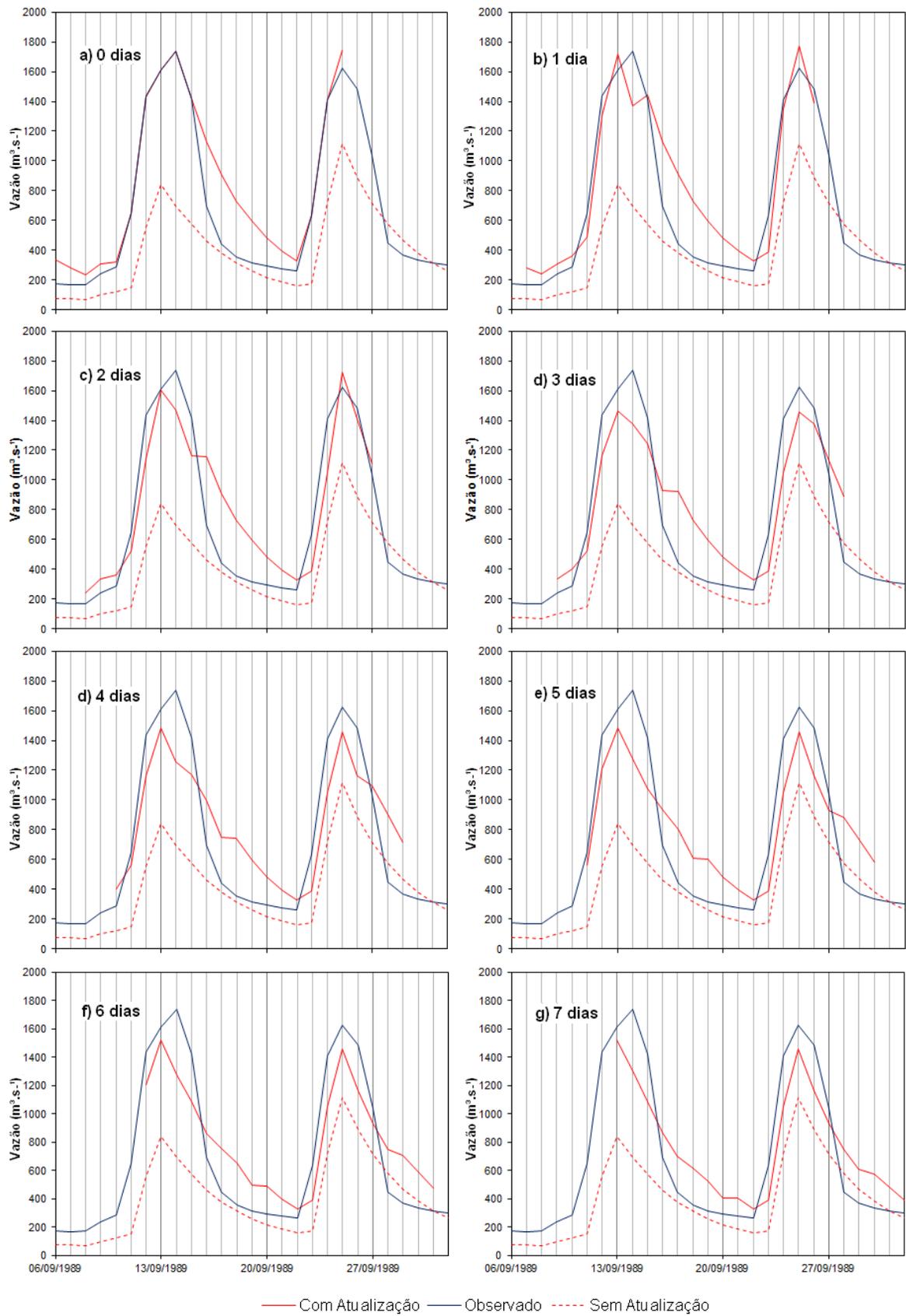
**Figura 6-24** Resultados da previsão de vazão do evento 1 na bacia do rio Ijuí. Esquerda, Erro médio quadrático (EMQ); Direita, Coeficiente de persistência (CP).

Nos resultados do evento 1, observou-se uma redução quantitativa do EMQ inicial na previsão de vazão com atualização de dados, isto ocorreu em virtude de que a simulação no período correspondente ao primeiro evento inicialmente era pouco representativa.

Na Figura 6-25 e Figura 6-26 observa-se que entre as funções-objetivo não existiu uma diferença significativa entre os valores das previsões, para cada um dos sete dias de alcance. No dia prévio ao início da previsão, a) 0 dias, apresentou-se um trecho em que não representa bem a descida do hidrograma, mas nos outros dias consegue aproximar-se bem ao hidrograma observado. Já nas previsões com alcance de 1 até 7 dias (b até g, na Figura 6-25 e Figura 6-26), o método mostrou melhores resultados que no cenário sem atualização.



**Figura 6-25** Alcances da previsão de vazão do evento 1 na bacia do rio Ijuí, utilizando a FO1

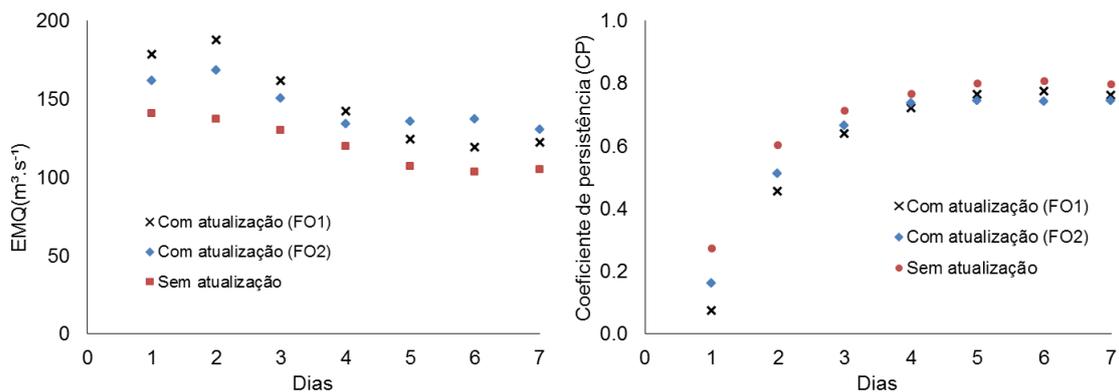


**Figura 6-26** Alcances da previsão de vazão do evento 1 na bacia do rio Ijuí, utilizando a FO2

Um cenário diferente observa-se nos resultados do evento 2, Tabela 6.18, onde não foi observada uma melhora quantitativa do EMQ na previsão de vazão com atualização de dados. Isto ocorreu, principalmente, devido à simulação ser aceitável no período correspondente ao segundo evento. No entanto, os resultados da aplicação da FO1 foram melhores em relação aos da FO2, vide Figura 6-28 e Figura 6-29.

**Tabela 6.18** Erro médio quadrático (EMQ) do evento 2, na bacia do rio Ijuí.

Dias de previsão	Sem atualização [m <sup>3</sup> /s]	Com atualização		Persistência [m <sup>3</sup> /s]
		FO1 [m <sup>3</sup> /s]	FO2 [m <sup>3</sup> /s]	
1	141	152	162	193
2	137	156	168	344
3	130	137	151	450
4	120	122	134	508
5	107	124	136	531
6	103	128	137	530
7	105	124	131	511



**Figura 6-27** Resultados da previsão de vazão do evento 2 na bacia do rio Ijuí. Esquerda, Erro médio quadrático (EMQ); Direita, Coeficiente de persistência (CP).

No dia prévio ao início da previsão, conforme ao gráfico a) da Figura 6-28 e Figura 6-29, observou-se aplicando o método de atualização de dados, que não foi possível reduzir as incertezas nas descidas dos hidrogramas. Mas se observou um ganho com a FO1 em relação a FO2. Este ganho foi positivo para as previsões durante os dias seguintes. Entretanto, o método não mostrou resultados quantitativamente melhores, que no cenário sem atualização, contudo deve ser considerado que a simulação das previsões no cenário sem atualização já podia ser considerada satisfatória.

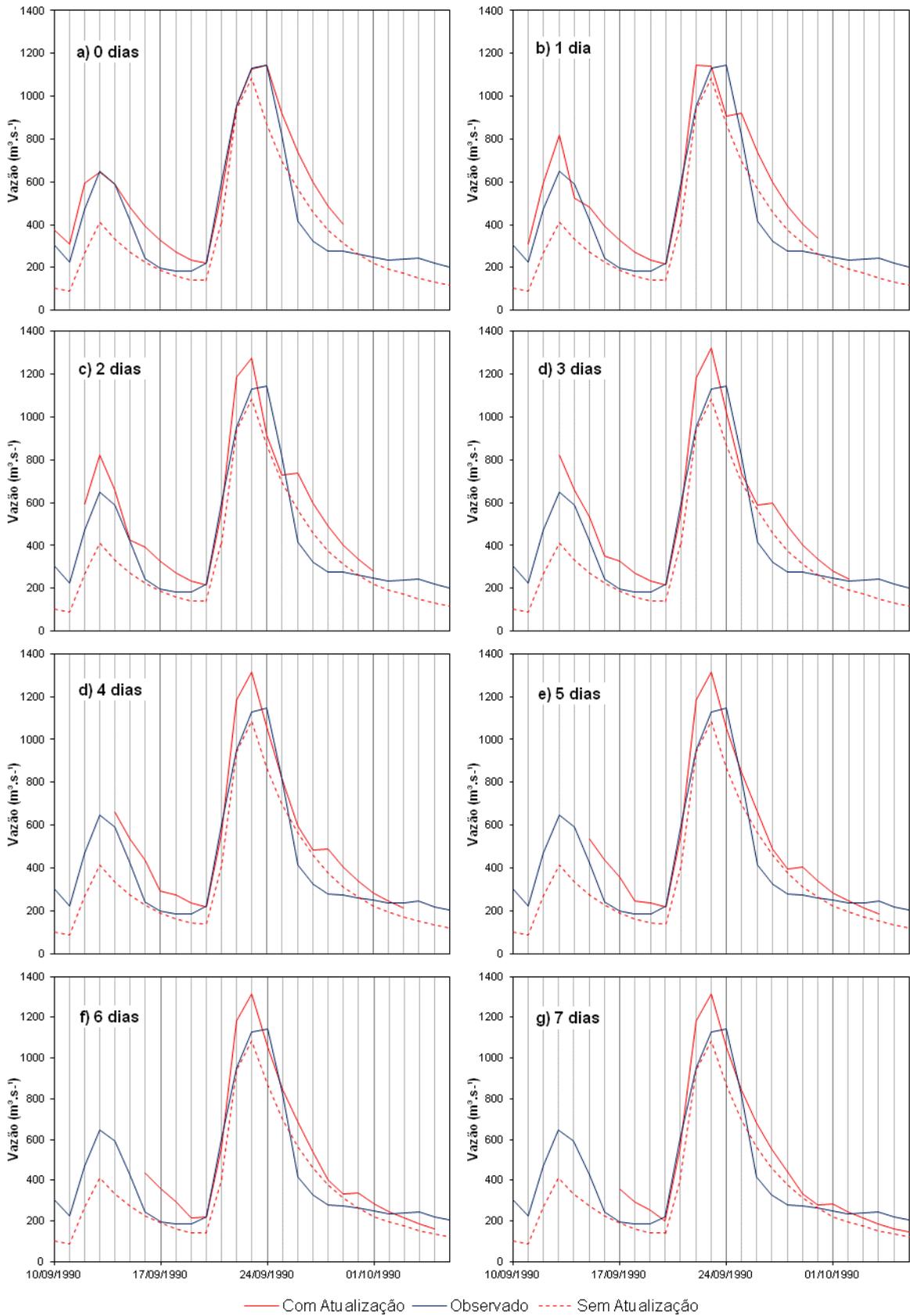
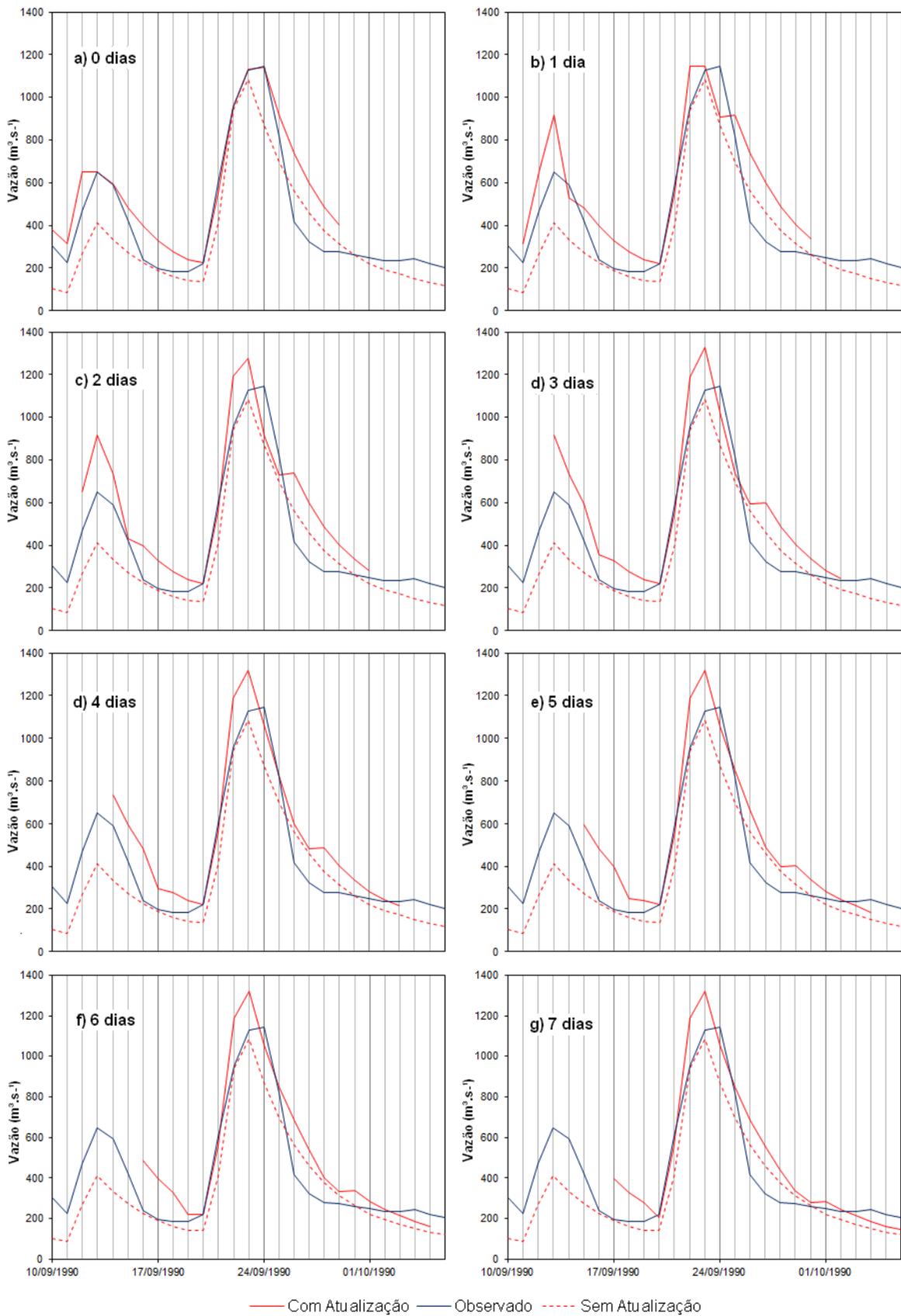


Figura 6-28 Alcances da previsão de vazão do evento 2 na bacia do rio Ijuí, utilizando a FO1



**Figura 6-29** Alcances da previsão de vazão do evento 2 na bacia do rio Ijuí, utilizando a FO2

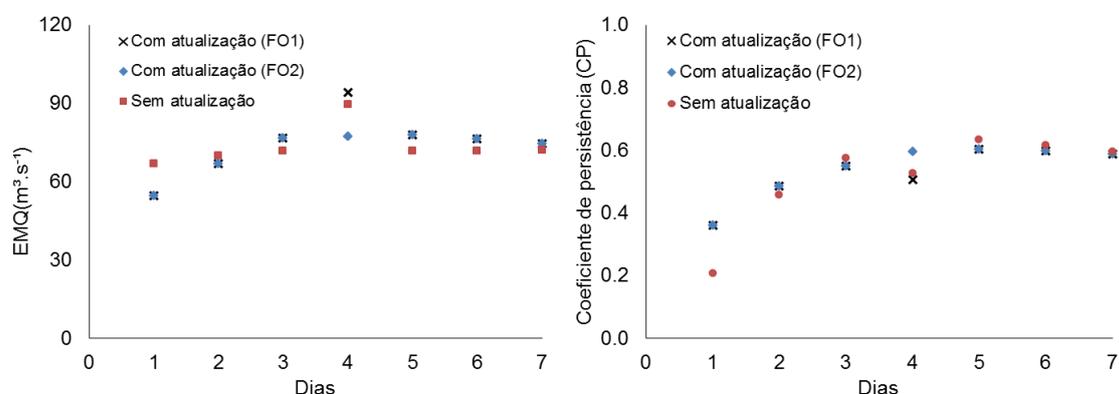
### 6.3.2. Resultados obtidos na bacia do rio Tesouras

Os resultados dos testes realizados na bacia do rio Tesouras, para os eventos escolhidos 1 e 2, são apresentados na Tabela 6.19 e na Tabela 6.20, respectivamente. Na Figura 6-30, apresentam-se os erros quadráticos médios para cada um dos eventos.

A Figura 6-31, Figura 6-32 mostra as previsões de vazões do evento 1, aplicando a FO1 e FO2, respectivamente.

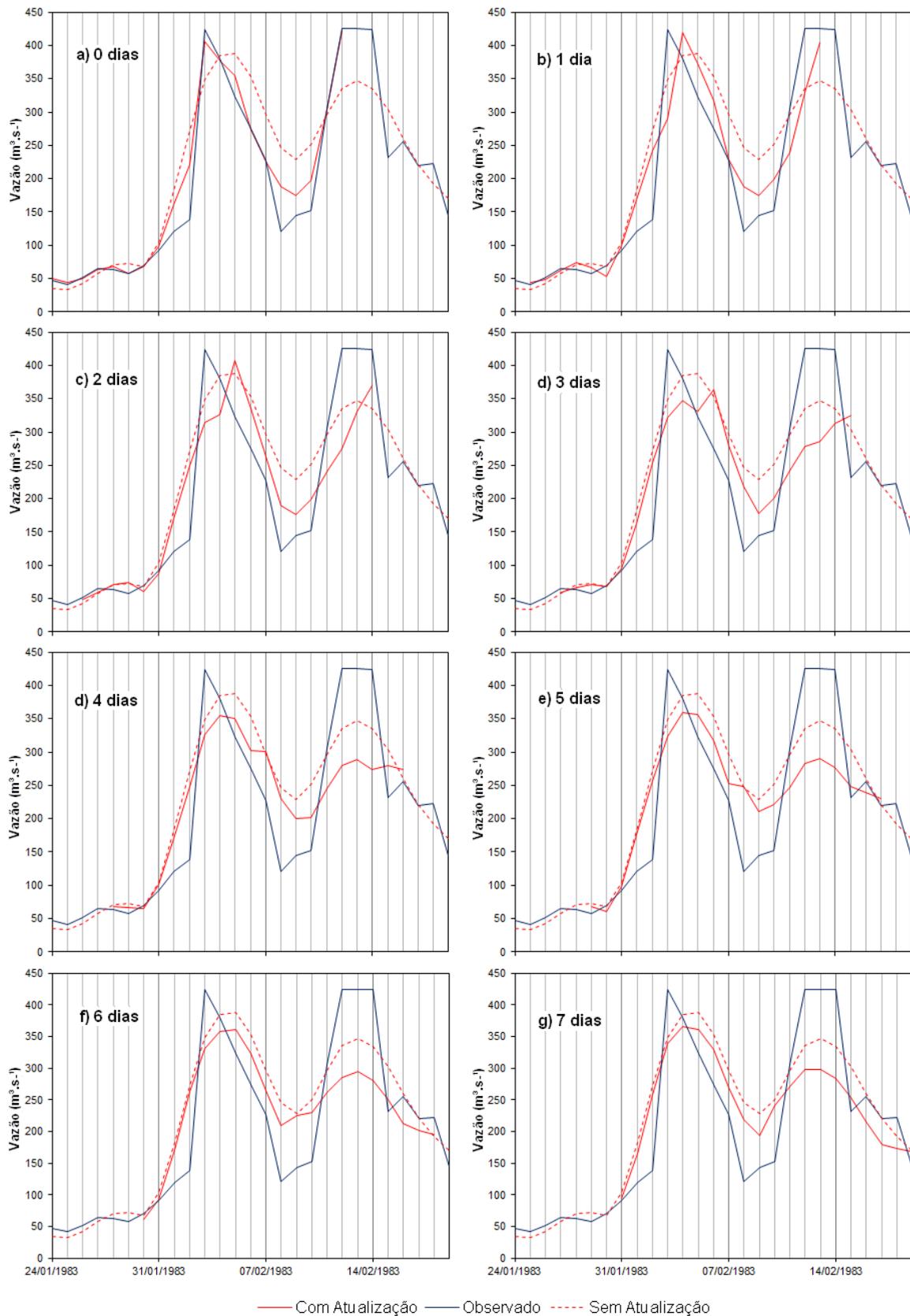
**Tabela 6.19** Erro médio quadrático (EMQ) do evento 1, na bacia do rio Tesouras.

Dias de previsão	Sem atualização [m <sup>3</sup> /s]	Com atualização		Persistência [m <sup>3</sup> /s]
		FO1 [m <sup>3</sup> /s]	FO2 [m <sup>3</sup> /s]	
1	67,1	54,29	54,29	85
2	70,0	66,71	66,71	129
3	71,7	76,41	76,41	169
4	89,8	94,05	77,01	190
5	71,7	77,81	77,81	196
6	71,9	76,14	76,14	188
7	72,1	74,24	74,24	179

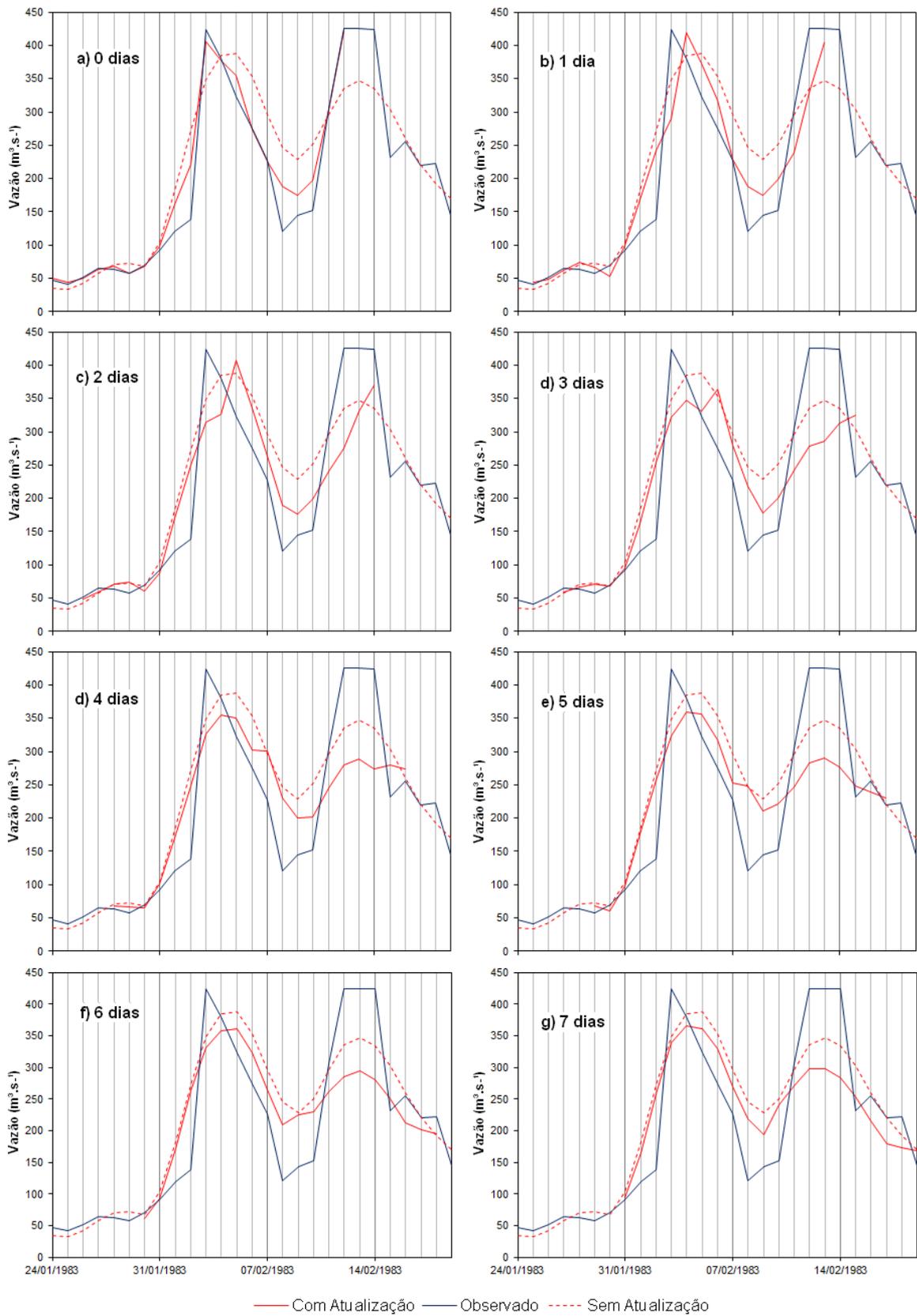


**Figura 6-30** Resultados da previsão de vazão do evento 1 na bacia do rio Tesouras. Esquerda, Erro médio quadrático (EMQ); Direita, Coeficiente de persistência (CP).

Dos resultados observados no evento 1, observou-se uma redução do EMQ na previsão de vazão inicial, até dois dias à frente, nos seguintes dias a atualização piora os resultados, aumentando o erro médio. O evento 1 apresenta uma descida e subida consecutivas e corresponde a um período de recessão, onde a metodologia apresenta mais problemas para diminuir o desvio entre a vazão simulada e observada, como se observa no dia prévio ao início da previsão, a) 0 dias, (ver Figura 6-31 e Figura 6-32). O método de atualização aplicando a FO1 ou a FO2 não apresentou um benefício evidente, entre eles, isto pode ser devido a que ambos geraram, aproximadamente, os mesmos hidrogramas no dia 0.



**Figura 6-31** Alcances da previsão de vazão do evento 1 na bacia do rio Tesouras, utilizando a FO1

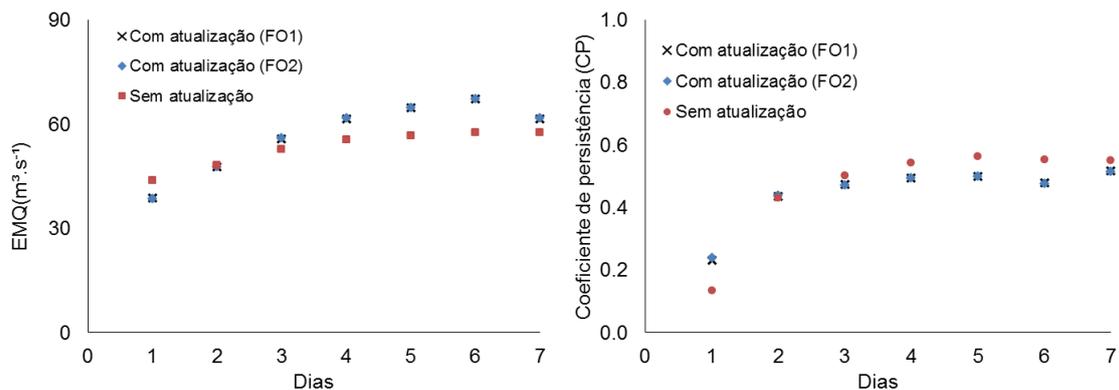


**Figura 6-32** Alcances da previsão de vazão do evento 1 na bacia do rio Tesouras, utilizando a FO2

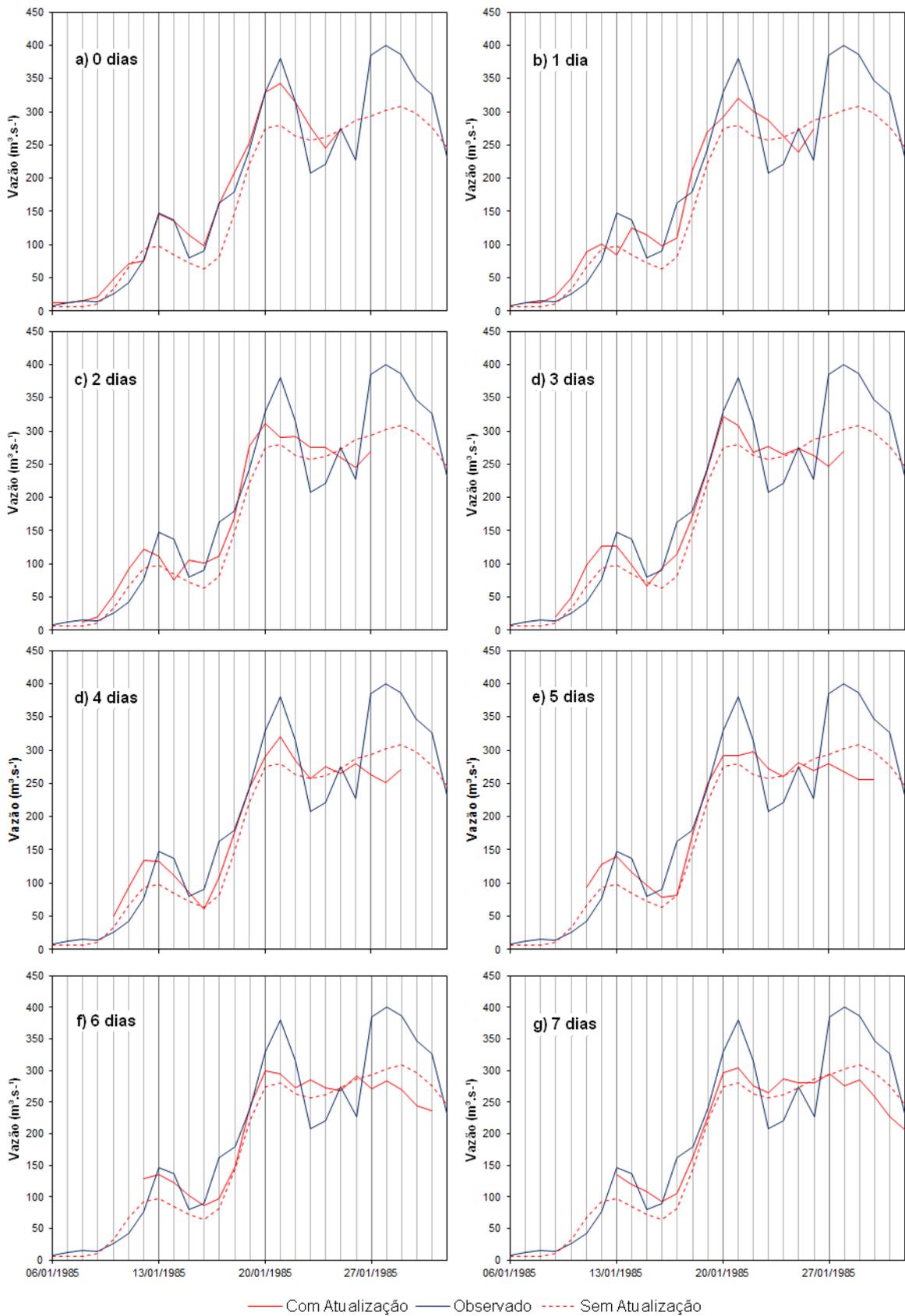
O mesmo cenário apresenta-se nos resultados observados do evento 2, por ser este um período correspondente à recessão (ver Figura 6-34 e Figura 6-35). Assim como no evento anterior, o desempenho do método de atualização aplicando a FO1 ou a FO2 foi equivalente e só apresentou um pequeno ganho até dois dias de antecedência, do 3º ao 7º dia, o método piora os resultados aumentando o erro médio. No evento 2 apresenta uma maior frequência descidas e subidas no hidrograma observado, a representatividade do modelo. No cenário sem atualização, não foram muito boas, fazendo com que a metodologia tenha uma maior dificuldade para diminuir o desvio entre a vazão simulada e observada.

**Tabela 6.20** Erro médio quadrático (EMQ) do evento 2, na bacia do rio Tesouras.

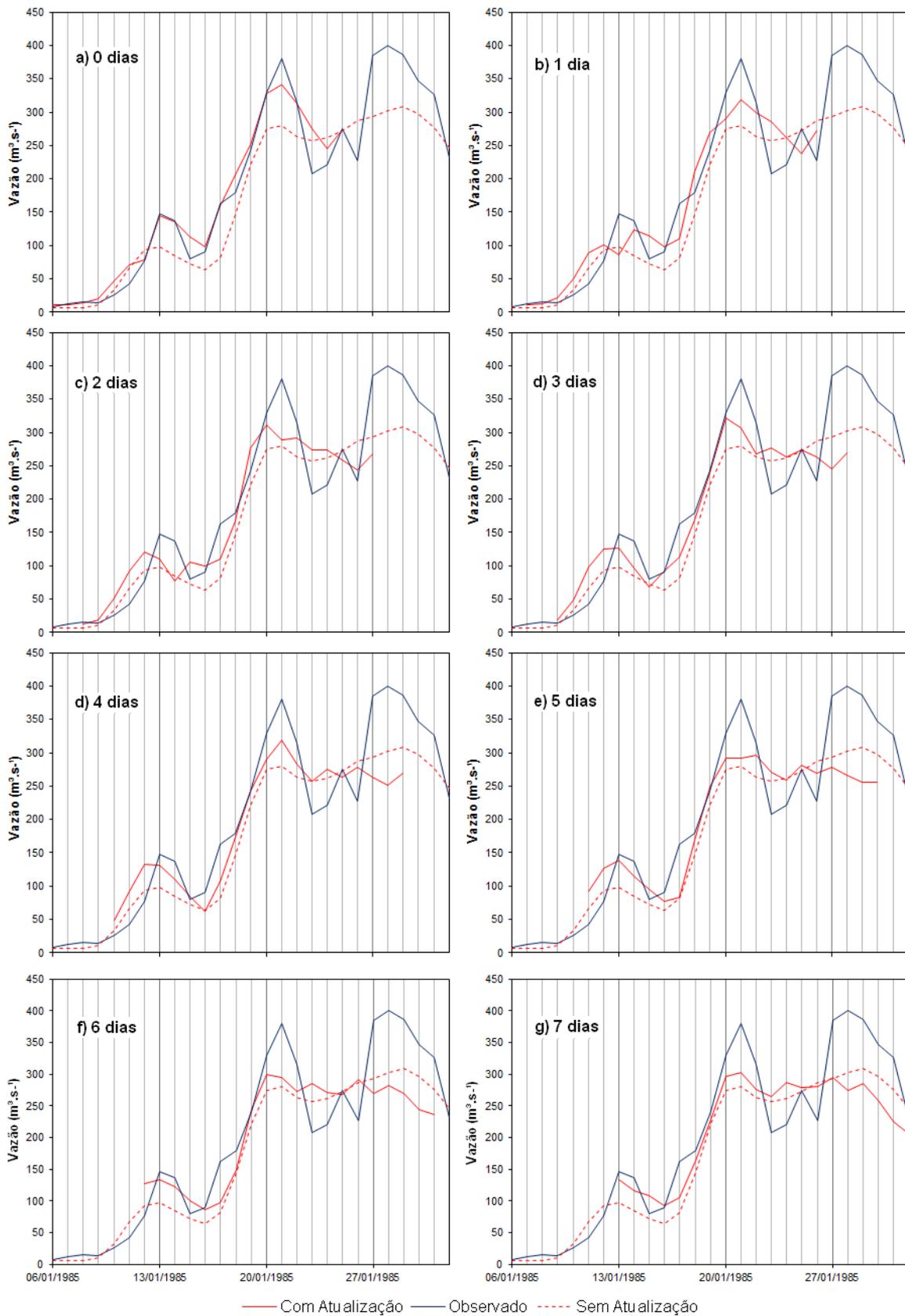
Dias de previsão	Sem atualização [m <sup>3</sup> /s]	Com atualização		Persistência [m <sup>3</sup> /s]
		FO1 [m <sup>3</sup> /s]	FO2 [m <sup>3</sup> /s]	
1	43,7	38,8	38,4	50
2	48,2	47,7	47,6	85
3	52,8	55,8	55,9	106
4	55,6	61,6	61,7	122
5	56,7	64,7	64,7	129
6	57,5	67,1	67,3	129
7	57,4	61,6	61,8	127



**Figura 6-33** Resultados da previsão de vazão do evento 2 na bacia do rio Tesouras. Esquerda, Erro médio quadrático (EMQ); Direita, Coeficiente de persistência (CP).



**Figura 6-34** Alcances da previsão de vazão do evento 2 na bacia do rio Tesouras, utilizando a FO1



**Figura 6-35** Alcances da previsão de vazão do evento 2 na bacia do rio Tesouras, utilizando a FO2

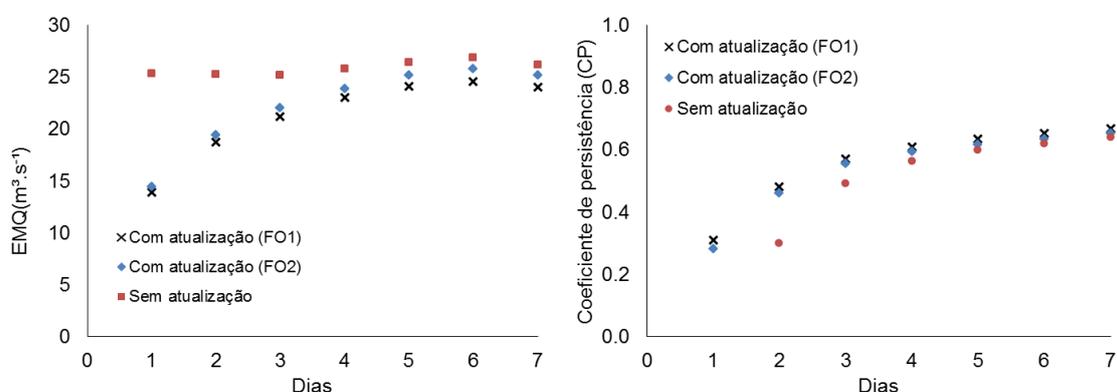
### 6.3.3. Resultados obtidos na bacia do rio Canoas

Os resultados dos testes realizados na bacia do rio Canoas, para os eventos escolhidos 1 e 2, são apresentados na Tabela 6.21 e na Tabela 6.22, respectivamente. Na Figura 6-36 e na Figura 6-39 apresentam-se os erros médios quadráticos e os coeficientes de persistência para cada um dos eventos.

Nos resultados do evento 1, observou-se uma redução quantitativa do EMQ até o 7º dia de antecedência. Observa-se que a atualização utilizando a FO1 apresenta um pequeno ganho em relação à FO2.

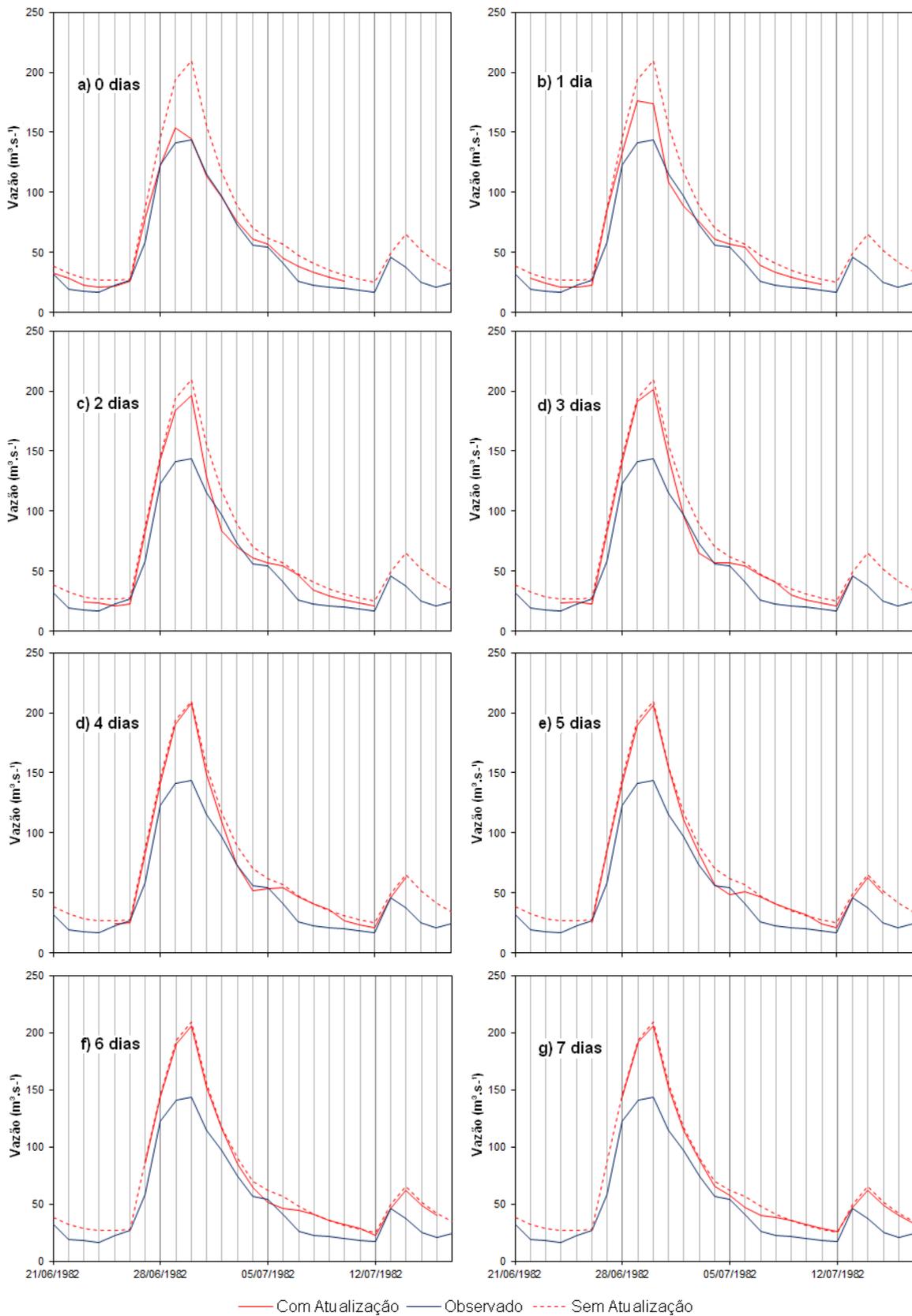
**Tabela 6.21** Erro médio quadrático (EMQ) do evento 1, na bacia do rio Canoas.

Dias de previsão	Sem atualização [m³/s]	Com atualização		Persistência [m³/s]
		FO1 [m³/s]	FO2 [m³/s]	
1	25,3	13,9	14,5	20
2	25,2	18,7	19,4	36
3	25,1	21,2	22,0	49
4	25,8	23,0	23,9	59
5	26,4	24,1	25,2	66
6	26,8	24,6	25,7	70
7	26,1	24,0	25,2	72

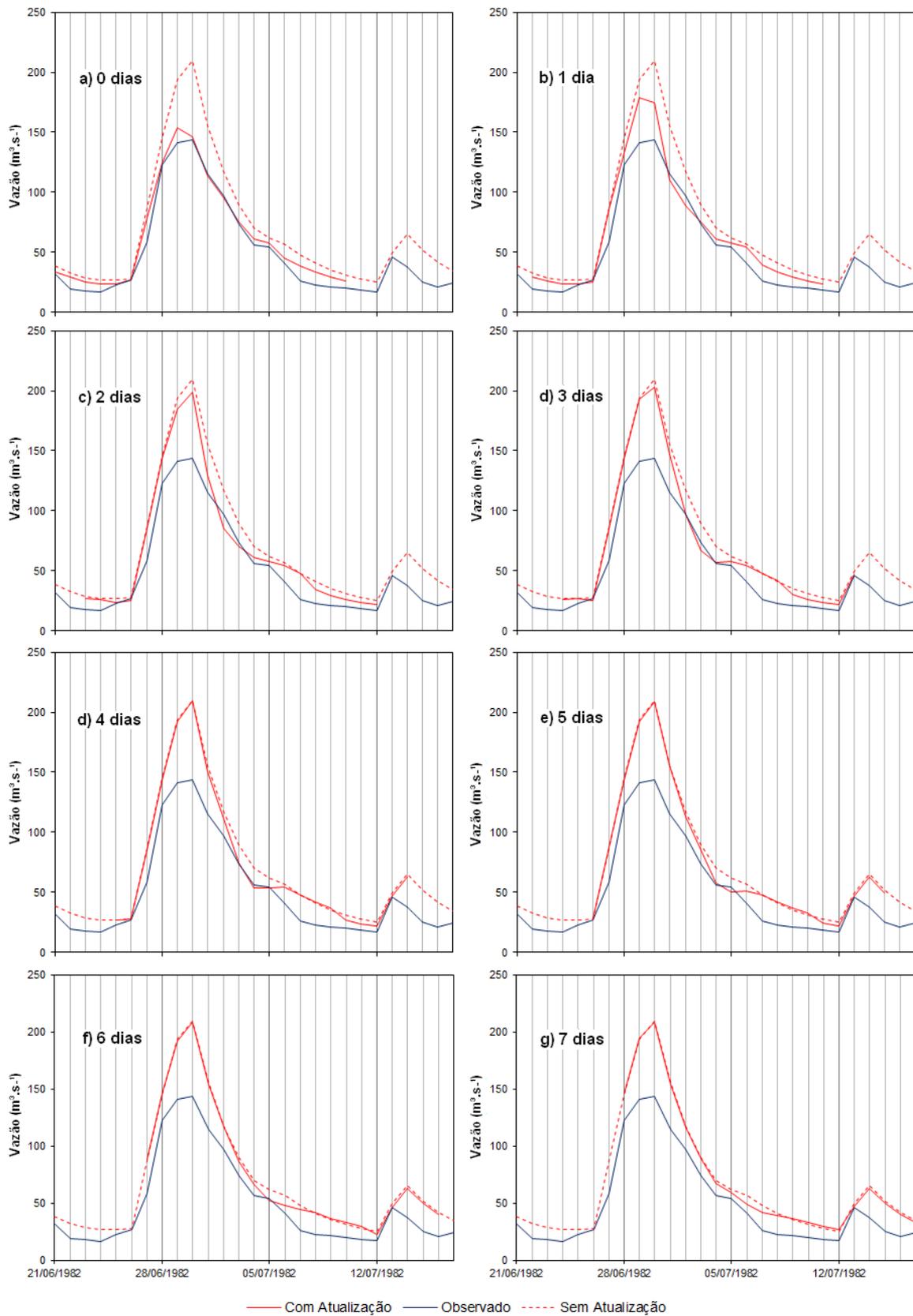


**Figura 6-36** Resultados da previsão de vazão do evento 1 na bacia do rio Canoas. Esquerda, Erro médio quadrático (EMQ); Direita, Coeficiente de persistência (CP).

Na Figura 6-37 e Figura 6-38 se observa que o hidrograma simulado pelo modelo hidrológico, no cenário sem atualização, apresentou problemas de amplitude. Já no cenário com atualização para o dia prévio ao início da previsão, a) 0 dias, a diminuição do desvio entre a vazão simulada e observada, tanto para a FO1 e FO2, foi muito boa, tanto como consequência uma melhoria nas previsões para os dias seguintes.



**Figura 6-37** Alcances da previsão de vazão do evento 1 na bacia do rio Canoas, utilizando a FO1

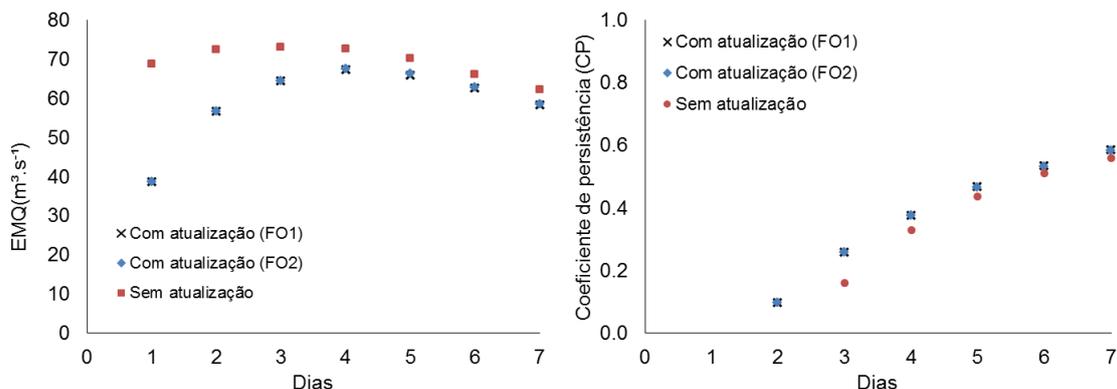


**Figura 6-38** Alcances da previsão de vazão do evento 1 na bacia do rio Canoas, utilizando a FO2

Nos resultados do evento 2, observou-se uma redução quantitativa do EMQ até o 7º dia de antecedência. Observa-se que a atualização utilizando a FO1 ou a FO2 geraram os mesmos resultados.

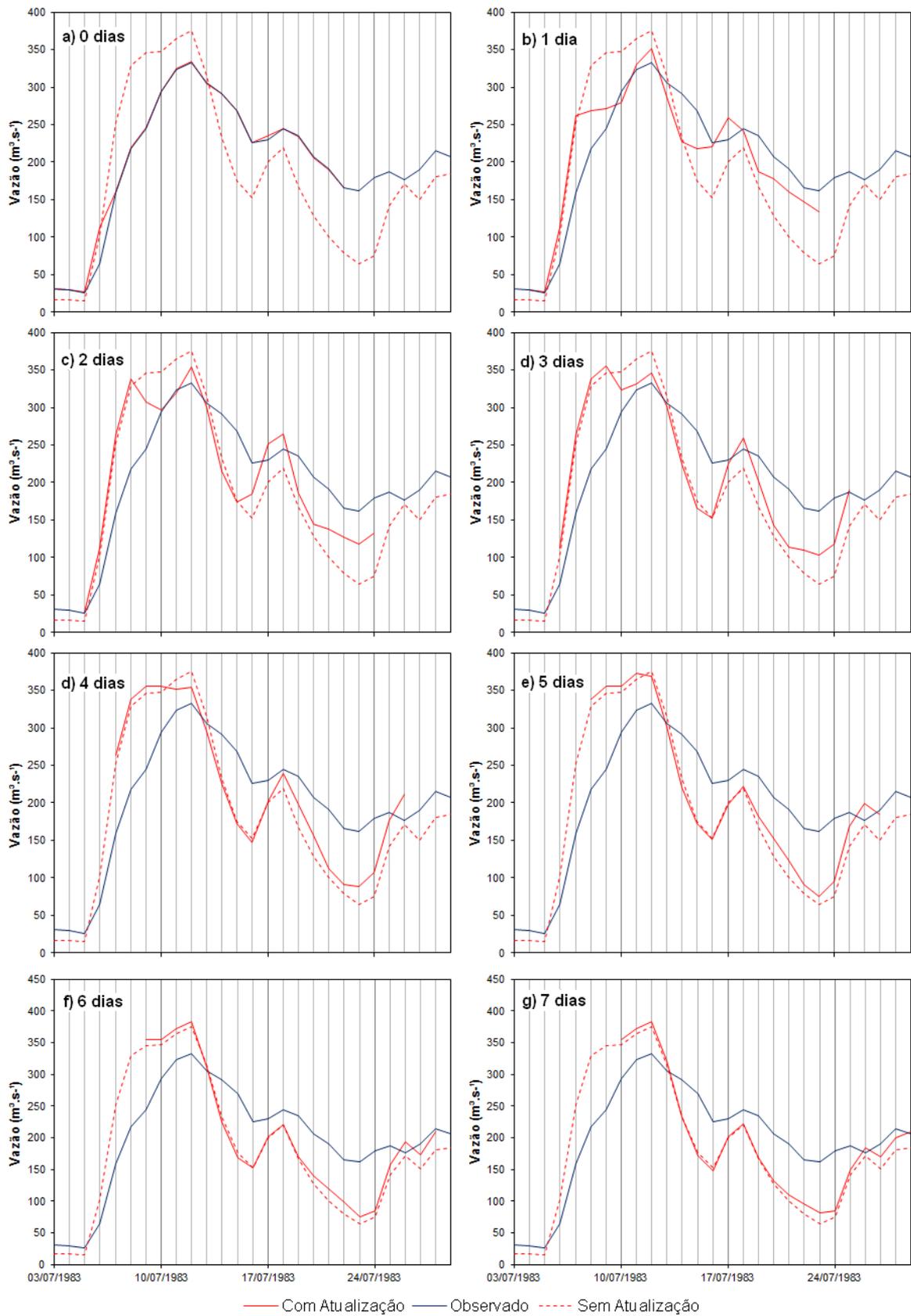
**Tabela 6.22** Erro médio quadrático (EMQ) do evento 2, na bacia do rio Canoas.

Dias de previsão	Sem atualização [m³/s]	Com atualização		Persistência [m³/s]
		FO1 [m³/s]	FO2 [m³/s]	
1	68,7	38,7	38,7	34
2	72,4	56,7	56,6	63
3	73,1	64,5	64,5	87
4	72,6	67,3	67,6	108
5	70,1	65,9	66,2	124
6	66,0	62,6	62,7	134
7	62,3	58,4	58,5	141

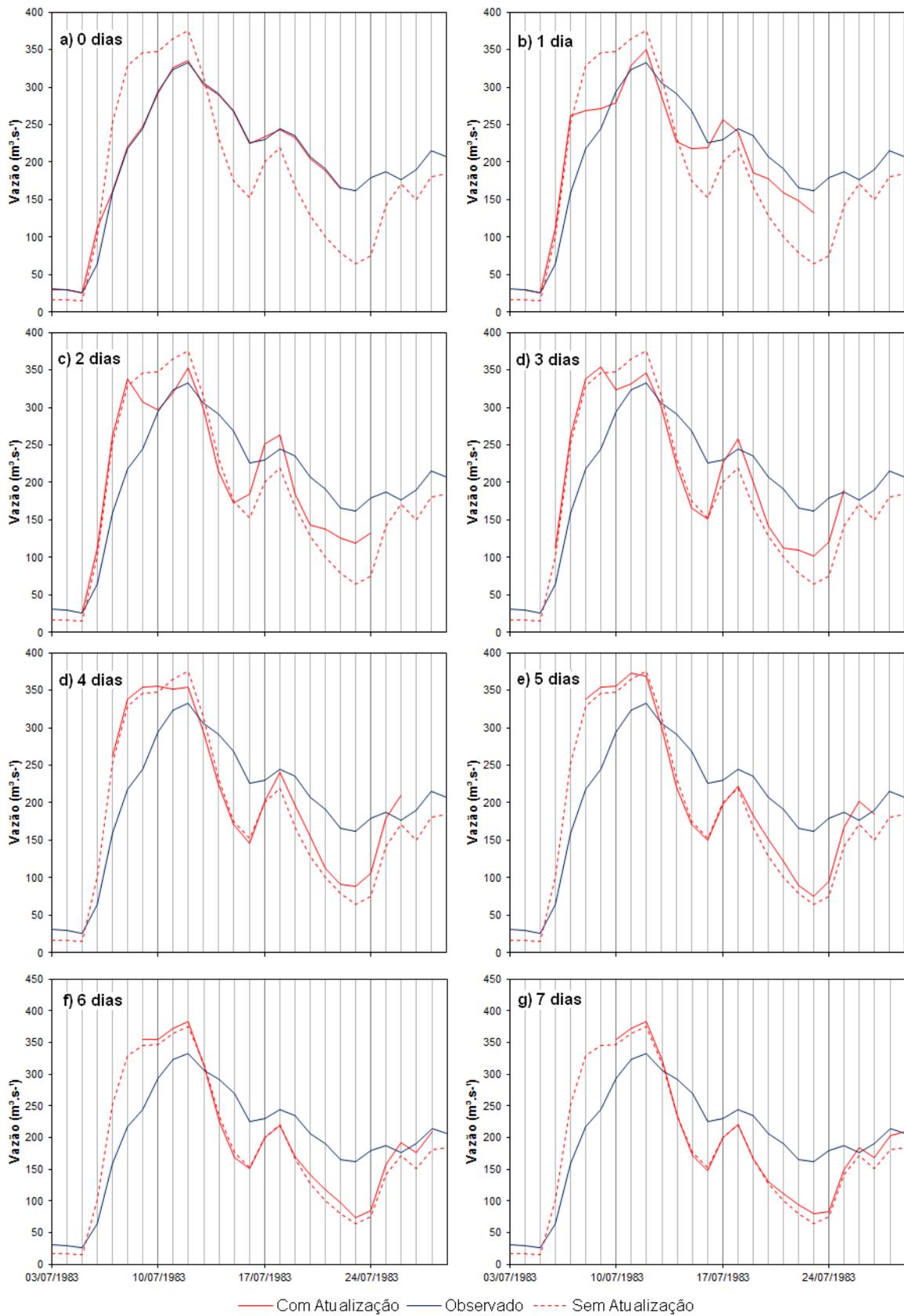


**Figura 6-39** Resultados da previsão de vazão do evento 2 na bacia do rio Canoas. Esquerda, Erro médio quadrático (EMQ); Direita, Coeficiente de persistência (CP).

Na Figura 6-40 e Figura 6-41, deve ser observado que o modelo hidrológico consegue representar bem as vazões observadas no período escolhido, sem apresentar problemas de fase, mas sim de amplitude. Assim como no evento anterior, a aproximação entre a vazão simulada e observada pelo método de atualização de dados, usando tanto a FO1 e FO2, foi muito boa. E teve um impacto positivo nas previsões de vazões, até o segundo dia.



**Figura 6-40** Alcances da previsão de vazão do evento 2 na bacia do rio Canoas, utilizando a FO1



**Figura 6-41** Alcances da previsão de vazão do evento 2 na bacia do rio Canoas, utilizando a FO2

#### 6.3.4. Análise geral dos resultados em modo previsão

Os resultados da aplicação da metodologia nos estudos de caso revelaram aspectos importantes de sua aplicação. Primeiramente, deve-se entender que os erros de fase, presentes em alguns dos eventos, não podem ser corrigidos pela metodologia proposta. Em segundo lugar, não há uma diferença significativa, entre aplicar a metodologia considerando qualquer uma das duas funções objetivo, mas na maioria dos eventos, a FO1 (erro no intervalo final da série atualizada) apresentou melhores benefícios.

Os resultados são melhores na subida do hidrograma e não tiveram maior diferença para pequenas variações da vazão. O pior desempenho acontece nas descidas, conforme a limitação do método de não poder diminuir as vazões quando a existência de chuva nula.

Por último, pode-se observar que em geral há um ganho importante com o procedimento de atualização na previsão de vazão na maioria dos eventos analisados.

## 7. CONCLUSÕES

Após elaboração da pesquisa apresentada no presente trabalho pode-se chegar as seguintes conclusões:

- 1- O método de atualização consegue aproximar as vazões simuladas as observadas no início da previsão.
- 2- As chuvas atualizadas não necessariamente foram às mesmas esperadas no caso do teste sintético, onde diferentes chuvas geraram praticamente as mesmas vazões, sendo esta característica do tipo de modelo hidrológico utilizado.
- 3- O método tem limitação nos períodos de estiagem em que precisa diminuir as vazões em períodos que não tem chuva, e em consequência, apresenta desempenhos diferentes quando utilizado na previsão da subida do hidrograma e na descida do hidrograma.
- 4- Na maioria das aplicações, as previsões de vazões, mostraram um desempenho superior com o método que sem a aplicação do método.
- 5- Dadas às limitações do método, o período de subida do hidrograma melhora bastante, piorando nos períodos de estiagens. Isto fez que algumas das medidas de desempenho se mostrassem piores que no caso da previsão sem atualização.
- 6- As duas abordagens de critério de parada utilizado na metodologia, conseguiram ter bons desempenhos com o modelo em modo previsão, mas o segundo requereu um maior número de iterações e ciclos. Conclui-se que para futuras aplicações ou melhoras da metodologia, se deveria estudar a primeira função-objetivo proposta.

## 8. RECOMENDAÇÕES

Entre os possíveis trabalhos futuros a serem realizados, podem ser enumerados os seguintes:

- 1- O desempenho da metodologia apresentada foi avaliado utilizando previsões de chuva perfeita, contudo, seria interessante analisar o desempenho utilizando previsões quantitativas de chuva e intervalo de tempo horário.
- 2- O método descrito utiliza como dados de entrada, precipitações e vazões observadas de postos pluviométricos. Porém, além destes, poderia-se, também, experimentar dados de outras fontes distintas, como por exemplo, de radar ou satélite.
- 3- Atualização dos parâmetros do modelo hidrológico juntamente com o método descrito neste trabalho.
- 4- Para compensar a limitação da metodologia em períodos de recessão, recomenda-se analisar a atualização de outro tipo de dado de entrada, como por exemplo, evapotranspiração potencial ou temperatura, dependendo do modelo onde se precisa implementar essa metodologia de atualização de dados.
- 5- Recomenda-se verificar a aplicabilidade desta metodologia em modelos hidrológicos distribuídos. Neste caso, deve ser analisado cuidadosamente o parâmetro de tempo de concentração adotado na metodologia proposta, pois este define os intervalos de precipitação que serão atualizados em relação ao ponto exutório escolhido.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, M. H.; Magalhães, P. C. de; Kelman, J., 1991. Previsão em tempo real de vazão associada a uma incerteza e utilizando técnica de filtragem de erros. IX simpósio brasileiro de recursos hídricos, ABRH: São Paulo. Anais 3, pp 111-123.
- Alves, M. H., 1993. Previsão de cheias em tempo real associada a uma incerteza e utilizando técnica de filtragem de erros. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Andreolli, I., 2003. Previsão de vazão em tempo real no rio Uruguai com base na previsão meteorológica. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
- Bertoni, J. C., 1989. Modelos de Previsão de Cheia em Tempo Atual com Base na Precipitação. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
- Beven, K., 2009. Environmental Modelling-An Uncertain Future?. Routledge, London.
- Bravo, J. M., 2006. Optimização de um reservatório para controle de cheias com base na previsão de vazão. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
- Bravo, J. M.; Allasia, D.; Collischonn, W.; Tassi, R.; Meller, A.; Tucci, C. E. M., 2007. Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH II com fins educacionais. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo.
- Bravo, J. M.; Collischonn, W.; Tucci, C. E. M., 2009. Verificação da Eficiência e Eficácia de um Algoritmo Evolucionário Multi-objetivo na Calibração Automática do Modelo Hidrológico IPH II. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 14, No 3, pp 37-50.
- Brier, G. W., 1950. Verification of forecasts expressed in terms of probability. Monthly Weather Review, v. 78, No 1.
- Brun, G. W. 1999. Previsão continua em tempo real do volume de afluência do reservatório Ernestina, RS. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
- Chou, S. C., 1996: Regional Eta Model . In Climanálise. Edição Comemorativa de 10 anos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Cachoeira Paulista, SP. Brazil.

- Collischonn, W.; Haas, R.; Andreolli, I.; Tucci, C.E.M., 2005. Forecasting river Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. *Journal of Hydrology*, v. 305, pp. 87-98.
- Collischonn, W.; Tucci, C. E. M.; Clarke, R. T.; Chou, S. C.; Guilhon, L. G.; Cataldi, M.; Allasia, D., 2007. Medium range reservoir inflow predictions based on quantitative precipitation forecasts. *Journal of Hydrology, Amsterdam*, v. 344, n. 1, p. 112-122.
- Cruz, J. C., 1987. Estudo de previsão de cheias em tempo real com modelos empíricos e semi-conceitual. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Baldassarre, G. Di & Montanari, A., 2009. Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 13, pp 913–921.
- Di Baldassarre, G.; Montanari, A., 2009. Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, pp 913–921.
- Duan, Q.; Sorooshian, S.; Gupta, V. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research* Vol. 28 No. 4. pp. 1015-1031.
- Evensen, G., 1994. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C5), 10143-10162. DOI: 10.1029/94JC00572.
- Evensen, G., 2003. The Ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation. *Ocean Dynamics*, 53(4), 343-367. DOI: 10.1007/s10236-003-0036-9.
- Ferreira, C. C., 2012. Previsão de vazões naturais diárias afluentes ao reservatório da UHE Tacuruí utilizando a técnica de Redes Neurais Artificiais. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Goiás. Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia Elétrica. Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás.
- Guilhon, L. G.; Rocha, V. F., 2007. Comparação de Métodos de Previsão de Vazões Naturais Afluentes a Aproveitamentos Hidroelétricos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, No 3, pp 13-20.

- Leonhardt, G., 2014. Development and application of software sensors and reverse models for urban Drainage systems. Ph.D. thesis; University of Innsbruck, Faculty of Technical Sciences.
- Oudin, L.; Perrin, C.; Mathevet, T.; Andréassian, V.; Michel, C., 2006. Impact of biased and randomly corrupted inputs on the efficiency and the parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, v. 320, pp 62-83.
- Kahl, B. & Nachtnebel, H. P., 2008. Online updating procedures for a real-time hydrological forecasting system. XXIVth Conference of the Danubian Countries. IOP Publishing, 8p.
- Kalman, R. E., 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of basic Engineering*, v. 82, pp 35–45.
- Kirpich, Z.P. Time of concentration in small agricultural watersheds, *Civil Engineering*, v. 10, n. 6, p.362, 1940.
- Kitanidis, P. R. & Bras, R. L., 1980. Real time forecasting with a Conceptual Hydrologic model, 2: Application e Results. *Water Resources Research*, v.16, No 6, pp 1034-1044.
- Krajewski, W. F. & K. P. Georgakakos, 1985. Synthesis of radar rainfall data. *Water Resources Research*, v. 21, No 5, pp 764-768.
- Lettenmaier, D. P. & Wood, E. F. 1993. Hydrologic forecasting, handbook of hydrology, D. R. Maidment, ed., McGraw-Hill, New York, 26.
- Mandeville, A. N.; O'connell, P. E.; Sutcliffe, J. V.; Nash, J. E., 1970. River flow forecasting through conceptual models Part III: The Ray Catchment at Grendon Underwood. *Journal of Hydrology*, 11, pp. 109-128.
- McMillan, H.; Freer, J.; Pappenderger, F.; Krueger, T.; Clark, M., 2010. Impacts of uncertain river flow data on rainfall-runoff model calibration and discharge predictions. *Hydrological Processes*, v. 24, pp. 1270–1284.
- Melller, A., 2012. Previsão de cheias por conjunto em curto prazo. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
- Mine, M., R., M., 1998. Método determinístico para minimizar o conflito entre gerar energia e controlar cheias. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
- Moradkhani, H.; Hsu, K. L.; Gupta, H.; Sorooshian, S., 2005. Uncertainty assessment of hydrologic model states and parameters-Sequential data assimilation using the

- particle filter. *Water Resources Research*, v. 41, W05012, doi:10.1029/2004WR003604.
- Moore, R. J.; Bell, V. A.; Jones, D. A., 2005. Forecasting for flood warning. *Comptes Rendus Geoscience*, v. 337, n. 1-2, p. 203-217.
- Nemec, J. & Schaake, J., 1982. Sensitivity of water resource systems to climate variation. *Hydrological Sciences Journal*, v. 27, No 3, pp 327-343.
- Nemec, J., 1986. *Hydrological Forecasting: Design and Operation of Hydrological Forecasting Systems*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- Paiva, R.C.D., 2009. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias. Estudo de caso: Bacia do rio Solimões. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
- Paiva, R. C. D. et al., 2013. Assimilação de dados in situ e altimetria espacial para previsão hidrológica na bacia amazônica. IX simpósio brasileiro de recursos hídricos, ABRH: Bento Gonçalves. Anais 3, pp 132-140.
- Paz, A. R.; Collischonn, W.; Tucci, C. E. M.; Clarke, R. T.; Allasia, D., 2007. Data Assimilation in a Large-scale Distributed Hydrological Model for Medium Range Flow Forecasts. IAHS Press, IAHS Publication, No. 313, pp 471-478.
- Pedrollo, O. C., 2000. Previsão em Tempo Atual de Cheias com uso de Sistema Especialista Difuso. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
- Pinheiro, A., 1990. Avaliação da aplicação e previsão de cheias com modelo distribuído na bacia do rio Itajaí-Açu. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
- Pinheiro, A. & Tucci, C. E. M., 1991. Previsão de cheias em tempo atual, como modelo distribuído: Rio Itajaí - Açu. IX simpósio brasileiro de recursos hídricos, ABRH: Rio de Janeiro. Anais 3, pp 132-140.
- Refsgaard, J.C., 2007. *Hydrological Modelling and River Basin Management*. Doctoral Thesis, University of Copenhagen, Dinamarca.
- Ridler, M. E.; Van Velzen, N.; Hummel, S.; Sandholt, I.; Falk, A. K.; Heemink, A.; Madsen, H., 2014. Data assimilation framework: Linking an open data assimilation library (OpenDA) to a widely adopted model interface (OpenMI). *Environmental modelling & software*, v. 57, pp. 76-89.
- Sene, K., 2010. *Hydro-meteorology forecasting and applications*. Springer, DOI: 10.1007/978-90-481-3403-8

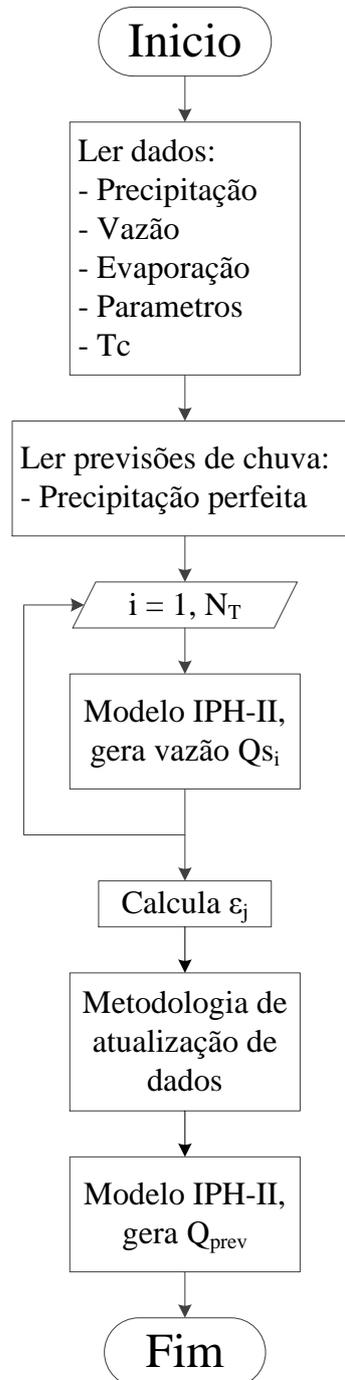
- Serban, P. & Askew, A. J., 1991. Hydrological Forecasting and Updating Procedures. Hydrology for the Water Management of Large River Basins (Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991). IAHS Publ. No. 201, pp. 357-369.
- Silva, V. S. V.; Pedrollo, O. C.; Castro, N. M. R.; Lucchese, L. V., 2013. Estudo de regionalização por transferência de parâmetros do Modelo IPH II na bacia do Rio Ijuí/RS. REGA – Vol. 10, no. 2, pp. 65-75.
- Smith, P. J.; Beven, K. J.; Tawn, J. A., 2008. Detection of structural inadequacy in process-based hydrological models: A particle-filtering approach. *Water Resources Research*, v. 44, W01410, DOI:10.1029/2006WR005205.
- Stanzel, Ph.; Kahl, B.; Haberl, U.; Herrnegger M.; Nachtnebel, H. P., 2008. Continuous hydrological modelling in the context of real time flood forecasting in Alpine Danube tributary catchments. XXIVth Conference of the Danubian Countries. IOP Publishing, 7p.
- Stojanović, B.; Divac, D.; Milivojević, N.; Grujović, N.; Stojanović, Z., 2009. State Variables Updating Algorithm for Open-Channel and Reservoir Flow Simulation Model. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, v. 3, No. 1, pp. 327-346.
- Tucci, C. E. M. & Clarke, R. T., 1980. Adaptive forecasting with a conceptual rainfall-runoff model. *Hydrological Forecasting, Proceedings of the Oxford Symposium*, April 1980, pp.445-454. IAHS-AISH, Publ. no. 129.
- Tucci, C. E. M.; Sanchez, J.; Simoes Lope, M. O., 1981. Modelo IPH-II de simulação precipitação-vazão na bacia: alguns resultados. IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, ABRH: Fortaleza. Anais 2, p. 83-103.
- Tucci, C. E. M., 1998. Modelos hidrológicos, Primeira Edição. ABRH: Porto Alegre. 669 pg.
- Tucci, C. E. M.; Collischonn, W.; Andreolli, I., 2003. Previsão de Vazões de curto e médio prazo na operação de usinas Hidroelétricas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Tractebel Energia S.A., Relatório Técnico, P&D. Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
- Viana, M., 2011. Simulação da dinâmica de carbono em bacias hidrográficas. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas.

- Wagener, T.; Gupta, H. V., 2005. Model identification for hydrological forecasting under uncertainty. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 2005. 19, pp. 378–387. doi:10.1007/s00477-005-0006-5.
- Welch, G. & Bishop, G. , 2006. An Introduction to the Kalman Filter; Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, [http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman\\_intro.pdf](http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf).
- World Meteorological Organization, 1982: Concepts and Techniques in Hydrological Network Design (M.E. Moss). Operational Hydrology Report No. 19, WMO No. 580, Geneva.
- World Meteorological Organization, 1990. Simulated Real-time Intercomparison of Hydrological Models. Operational Hydrology Report - in press, WMO, Geneva, Switzerland.
- World Meteorological Organization, 2009. Guide to Hydrological Practices, Volume II Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices, WMO-No. 168, Geneva.
- Yapo, P. O.; Gupta, H. V.; Sorooshian, S. 1998. Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology*, Vol. 204 pp. 83-97.
- Zamanillo, E. A., 1988. Previsão em tempo real em uma hidrovía controlada por barragens. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas.

## 10.ANEXOS

Anexo 1: Fluxogramas da metodologia de atualização de dados.

O presente tópico apresenta fluxograma do método de atualização de dados, acoplado no modelo hidrológico IPH-II.



**Figura 10-1** Fluxograma do acoplamento da metodologia de atualização.

Anexo 2: Fluxograma do método de atualização de dados utilizando a FO1.

O presente tópico apresenta o diagrama de fluxo da metodologia de atualização de dados utilizando a primeira função-objetivo e seus critérios de parada.

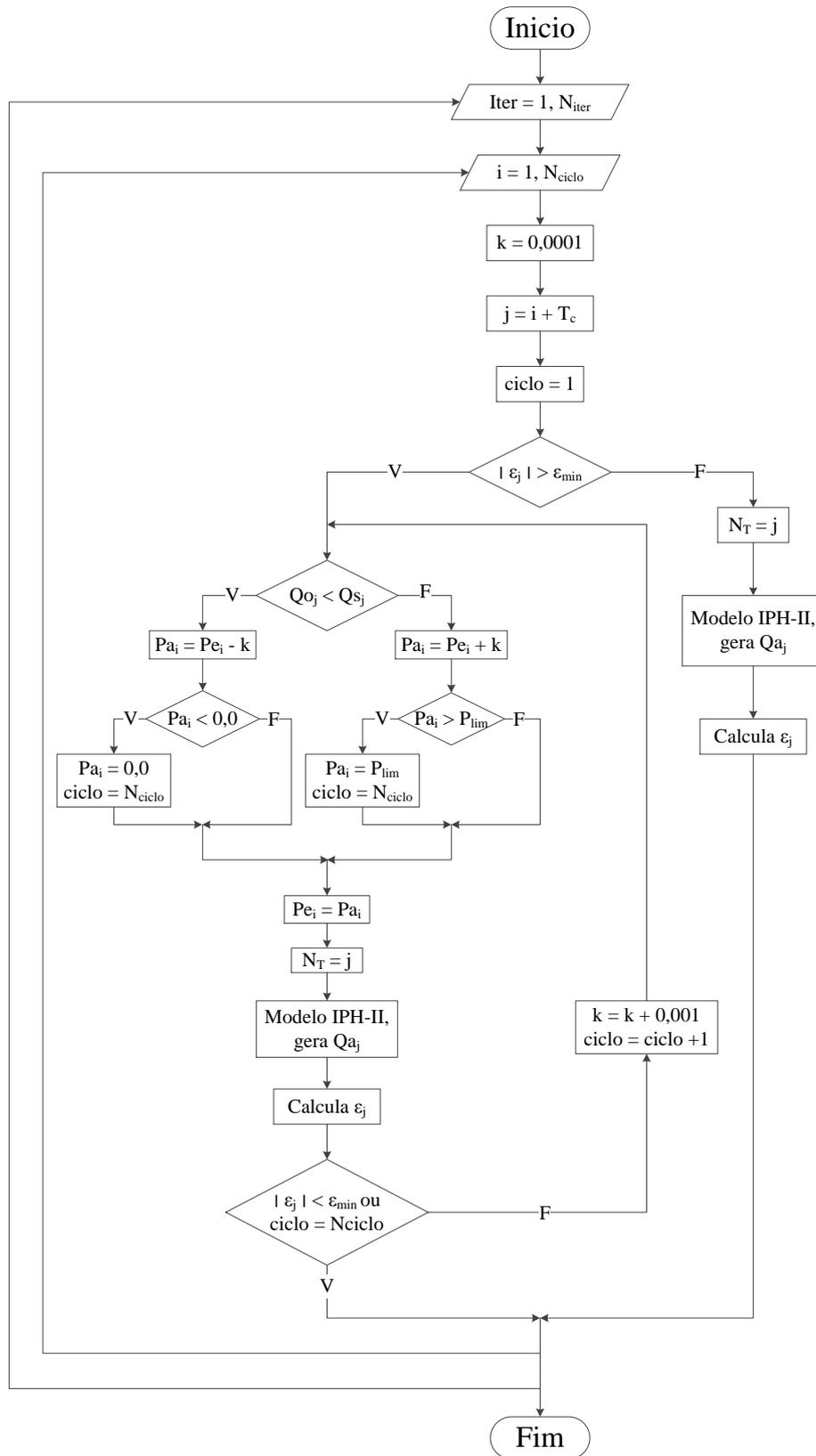


Figura 10-2 Fluxograma do método de atualização de dados utilizando a FO1.

Anexo 3: Fluxograma do método de atualização de dados utilizando a FO2.

O presente tópico apresenta o diagrama de fluxo da metodologia de atualização de dados utilizando a segunda função-objetivo e seus critérios de parada.

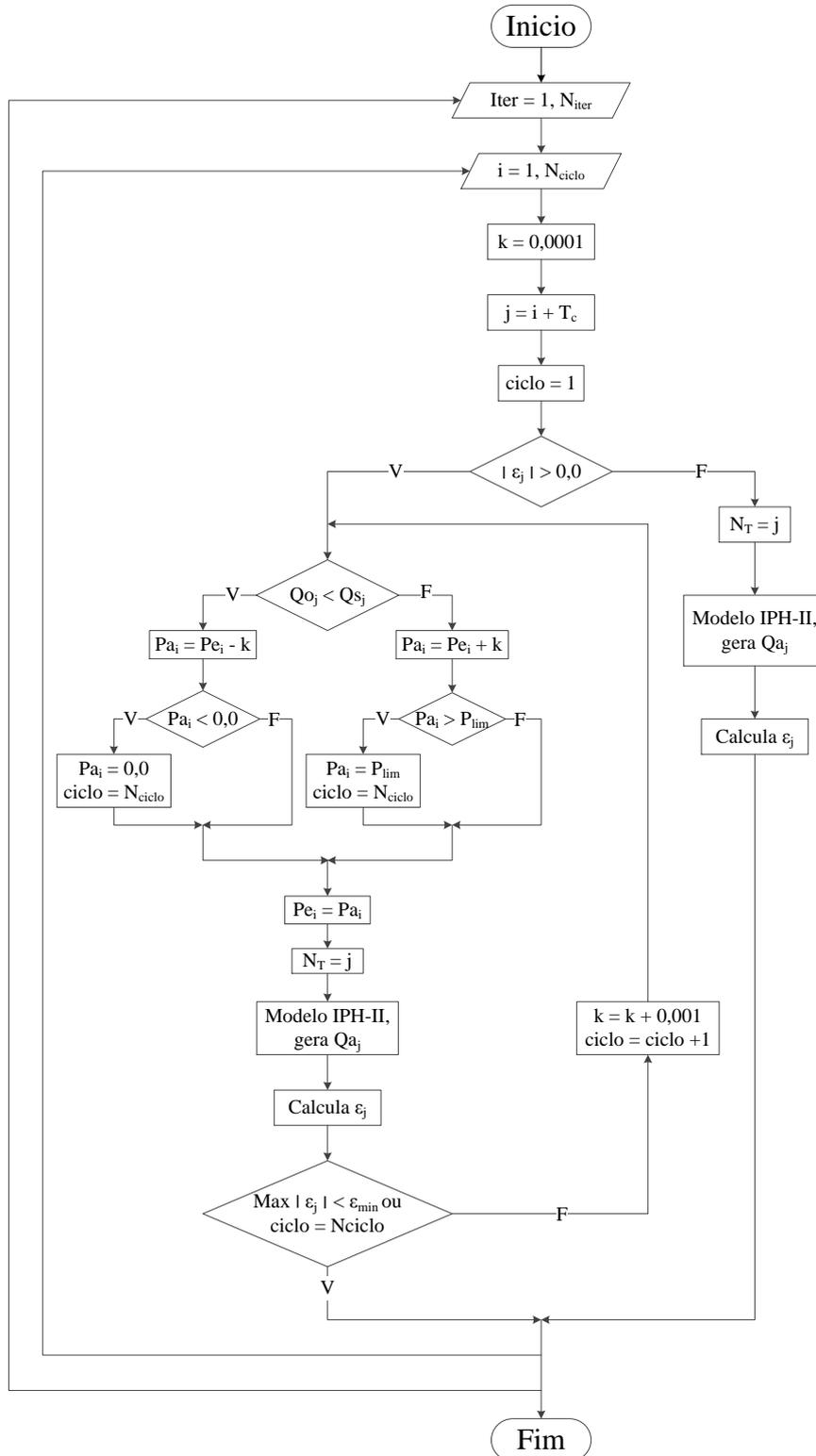


Figura 10-3 Fluxograma do método de atualização de dados utilizando a FO2.

## APÊNDICE A – SÉRIES SINTÉTICAS DE PRECIPITAÇÃO

A perturbação de dados de entrada foi contemplada similarmente a Oudin et al. (2006), de modo a favorecer a análise do impacto de erros aleatórios e sistemáticos nos dados de entrada sobre o desempenho do modelo. No entanto, o presente estudo abordou a geração de séries sintéticas de chuva obtiva de forma diária, com a finalidade de avaliar a eficiência da metodologia de atualização de dados de entrada para a correção destas perturbações.

A inserção das perturbações aleatórias foi feita considerando os seguintes critérios:

$$\text{Se } p_i = 0, \text{ então, aplica-se a equação: } p^*_i = N * \left( \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n} \right) \quad (0.1)$$

$$\text{Se } p_i > 0, \text{ então, aplica-se a equação: } p^*_i = 1,2 * (N * p_i) \quad (0.2)$$

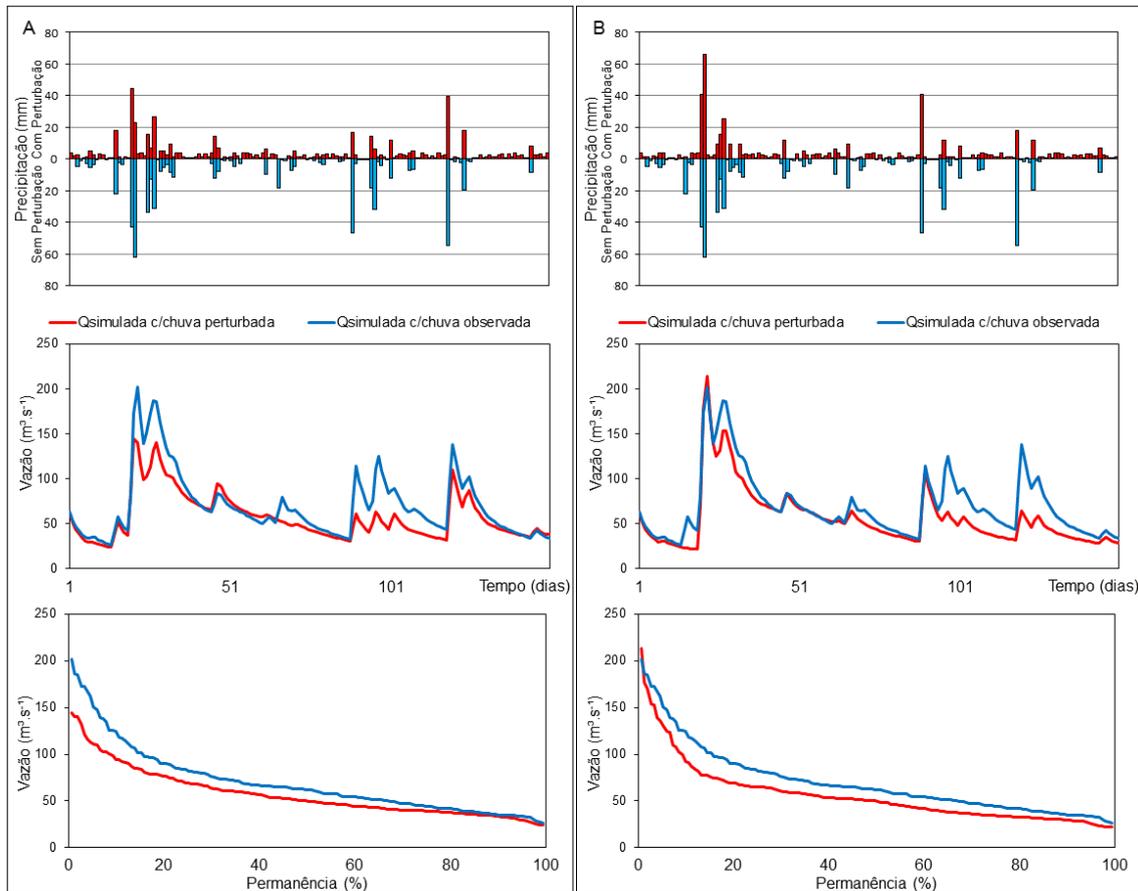
onde:  $n$  é igual ao número de dados de chuva;  $p_i$  é o dado de chuva observada no intervalo  $i$ ;  $p^*_i$  é o dado de chuva perturbada no intervalo  $i$ ;  $N$  é um valor aleatório com distribuição de probabilidade uniforme entre zero e um,  $U[0,1]$ .

Segundo a equação (5.1), quando o valor do evento de precipitação é igual a zero, a precipitação perturbada varia entre zero e o valor médio da série de precipitações observadas, ou seja, caso a média da série de precipitações observadas for 60 mm/dia o valor da precipitação sintética adotada teria como limites mínimo e máximo, zero e 60 mm/dia, respectivamente.

Observa-se também, que na equação (5.2), a precipitação perturbada tem um limite máximo igual a 1,2 vezes o valor da precipitação observada, ou seja, caso em um dia a precipitação observada ( $p_i$ ) for 100 mm/dia o valor da precipitação sintética adotado teria como limite máximo 120 mm/dia.

A abordagem dessas perturbações tem por finalidade avaliar a capacidade do método de atualização em corrigir, caso seja possível, as perturbações inseridas na série de precipitação observada comparando unicamente as vazões simuladas. Para ilustrar o impacto das perturbações inseridas na série de precipitação observada, a Figura A-1

apresenta o resultado de simular duas séries sintéticas de precipitação, assim pode ser observada o resultado nas vazões de saída.



**Figura A-1** Acompanhamento da influencia das perturbações inseridas em duas series sintéticas sobre as vazões de saída.

Fonte: Elaboração própria.

Na primeira série sintética (A), a perturbação teve um efeito de diminuição dos valores máximos da precipitação observada, tendo como impacto uma diminuição nos picos das vazões de saída.

Já a perturbação na segunda série sintética (B) teve um efeito de aumento no valor das precipitações máximas observadas, porém, em geral, o efeito nas vazões de saída foi de uma diminuição. Também se observa que nas duas séries sintéticas de precipitação, os valores das precipitações mínimas sofreram um aumento quase sempre. No entanto, tanto nos hidrogramas de saída como nas curvas de permanência o efeito não foi quantitativamente significativo.

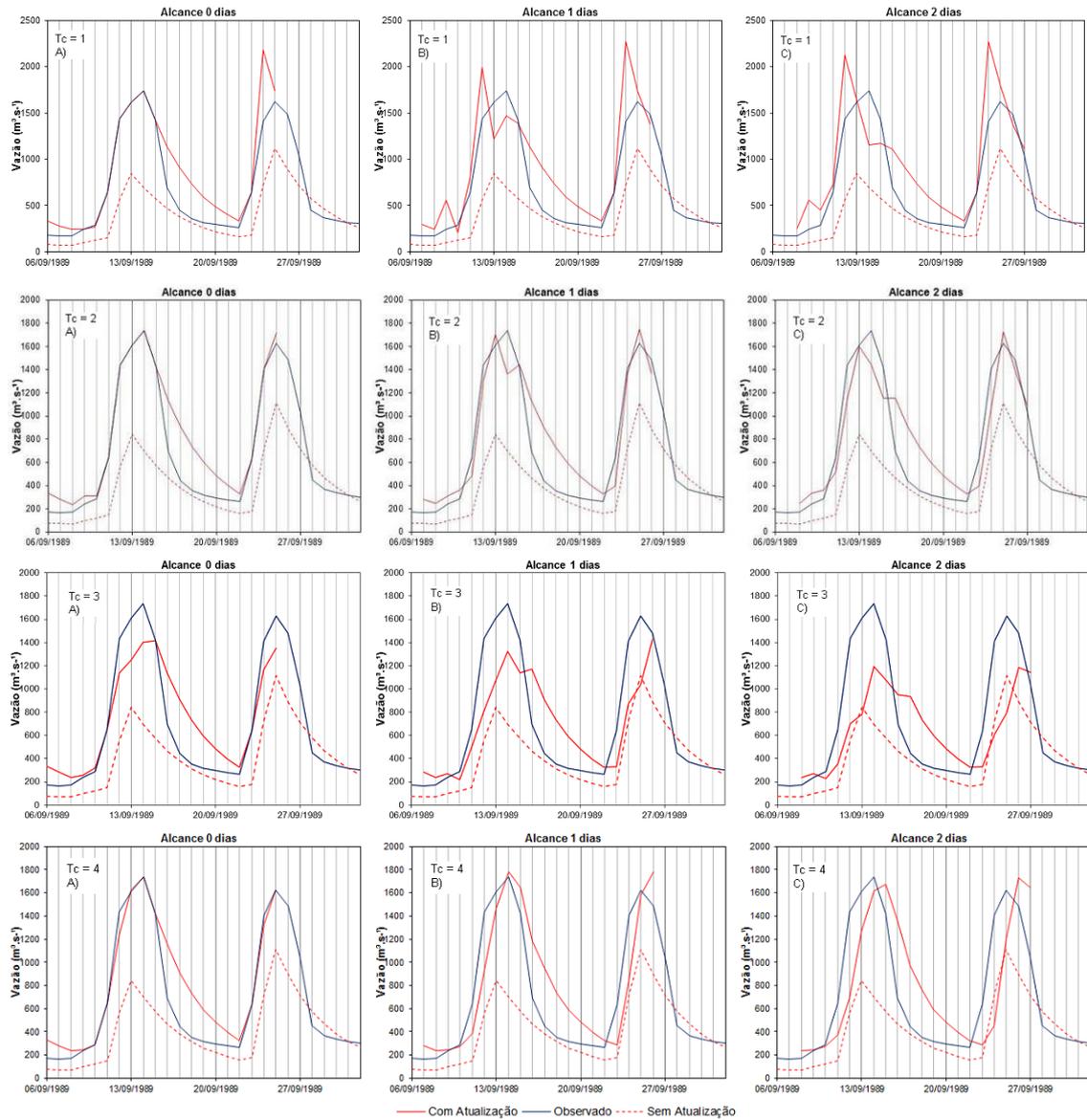
## APÊNDICE B – INFLUÊNCIA DO VALOR DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO NO MÉTODO DE ATUALIZAÇÃO DE DADOS

No método descrito no presente trabalho foi escolhido o tempo de concentração (Kirpich, 1940), como medida para aplicar os critérios de atualização descritos no item 4.2 e apresentado na Figura 4-2. A continuação se descreve o efeito que tem escolher outras medidas diferentes ao tempo de concentração e a justificativa de ter escolhido o valor do tempo de concentração ( $T_c$ ).

O seguinte teste foi desenvolvido mudando unicamente o tempo de concentração ( $T_c$ ), como referência se escolheu bacia do rio Ijuí, o valor determinado com a equação de Kirpich (1940),  $T_c = 2$  dias, e como todas as séries de dados foram medidas em escala de tempo diário, para as comparações foram usados os seguintes valores  $T_c = 1, 3$  e  $4$  dias.

Para avaliar a influência do tempo de concentração no processo de atualização e na geração das previsões, se apresenta na Figura B-1 os hidrogramas atualizados para cada tempo de concentração ( $T_c = 1, 2, 3$  e  $4$  dias). Também, em cada tempo de concentração, se tem uma subdivisão (A, B e C na Figura B-1), onde o alcance de 0 dias corresponde ao dia prévio ao início da previsão e o alcance de 1 e 2 dias corresponde às previsões nos primeiros dois dias.

Nos gráficos apresentadas na Figura B-1 observou-se que no dia prévio ao início da previsão de vazões (alcance 0 dias), o método de atualização usando o  $T_c$  de dois como de quatro dias conseguiram gerar hidrogramas semelhantes, embora não iguais ao hidrograma observado. Mas nos primeiros dias de previsão (alcance 1 e 2 dias) para o método usando o  $T_c = 4$  dias, se observam erros de fase. Já os outros dois resultados, com tempo de concentração de 1 e 3 dias, apresentaram resultados menos satisfatórios. Mesmo que não fossem apresentados, não se observou melhores resultados ao usar valores de  $T_c$  intermediários aos escolhidos nos testes. Como conclusão deste teste, foi escolhido como aceitável o tempo de concentração determinado com a equação de Kirpich (1940).



**Figura B-1** Acompanhamento da influência do tempo de concentração no processo de atualização.  
 Fonte: Elaboração própria.

## APÊNDICE C – INFLUÊNCIA DA ATUALIZAÇÃO DE DADOS NA SIMULAÇÃO DE VAZÕES

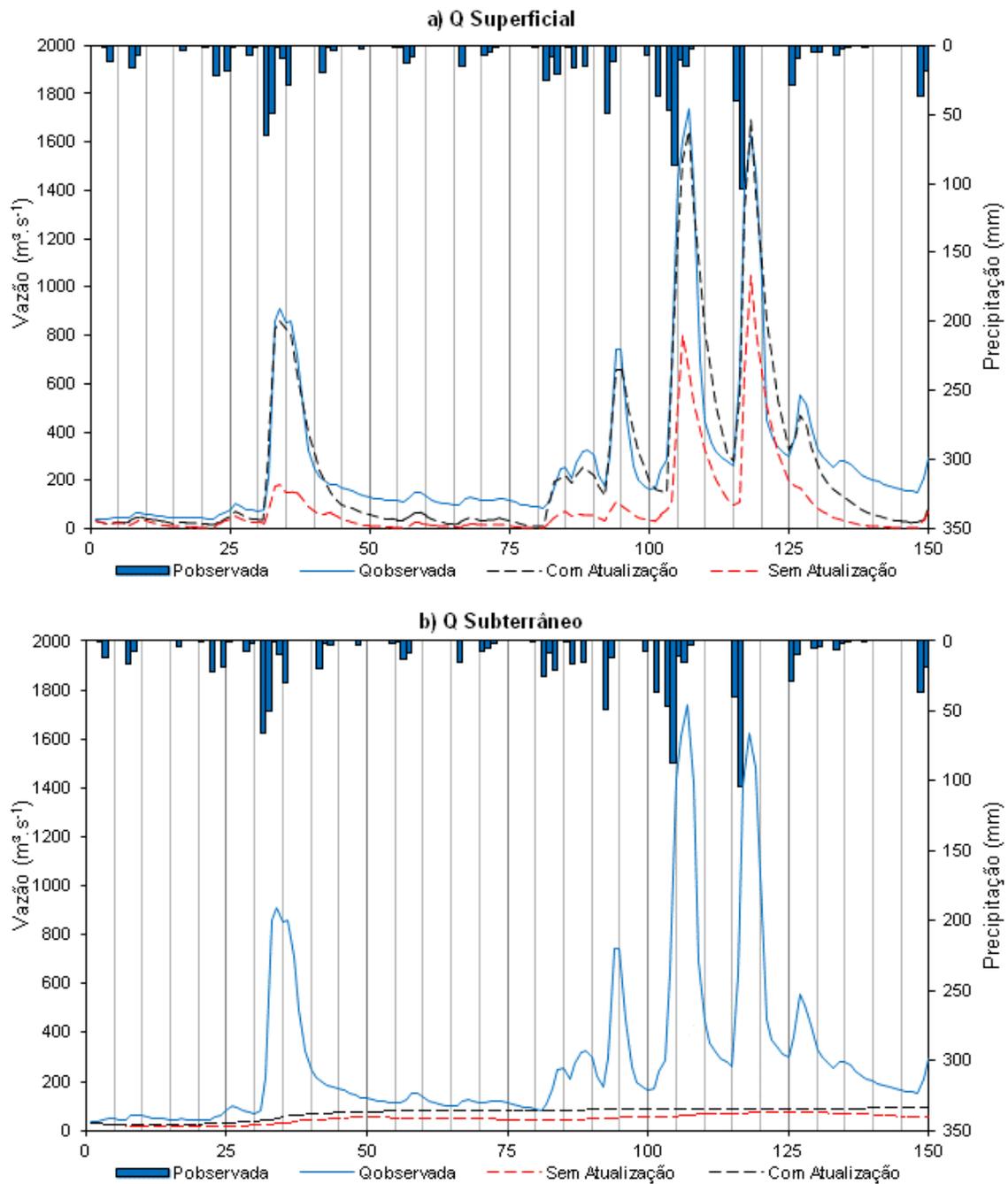
Este apêndice tem o objetivo à compreensão da resposta do modelo hidrológico frente às alterações no dado de entrada de chuva, sendo analisadas visualmente as variações dos componentes da vazão simulada (vazão superficial e subterrânea).

O modelo hidrológico chuva-vazão do tipo concentrado IPH II, descrito por Tucci et al. (1981), permite estimar, em escala de tempo diário ou menor, a vazão de uma bacia hidrográfica. Entre suas principais características se encontra a estimativa da propagação superficial representada pelo método de Clarck e a propagação subterrânea que é composta por um reservatório linear simples.

Como consequência da aplicação do método de atualização, os dados de precipitação são perturbados para diminuir as diferenças entre as vazões simuladas e as observadas, aumentando ou diminuindo o valor da precipitação observada.

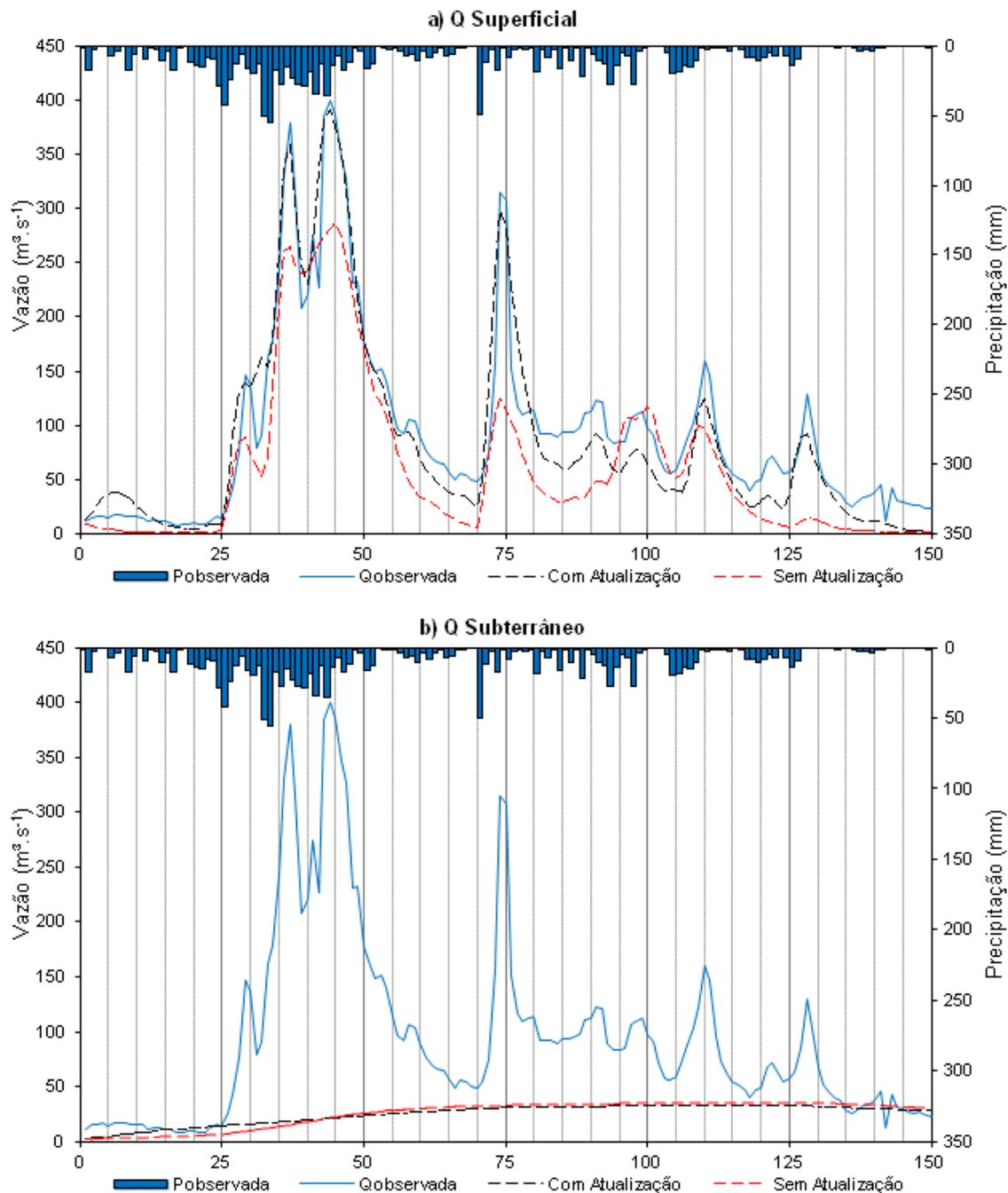
No item 6.2, se apresentaram os resultados nas bacias dos rios Ijuí, Tesouras e Canoas, após aplicar a metodologia para a FO1 e FO2 usando dados de entrada reais, obtendo se resultados muito próximos entre os hidrogramas observados e simulados com atualização (vise Figura 6-15 até Figura 6-22).

A seguir é apresentada, para a bacia do rio Ijuí, uma comparação dos hidrogramas superficiais (Figura C-1, a), onde é observado que o efeito de atualizar a precipitação de entrada incrementou quantitativamente a vazão superficial simulada pelo modelo hidrológico. Já no hidrograma subterrâneo (Figura C-1, b), o efeito foi maior nos períodos de vazões menores.



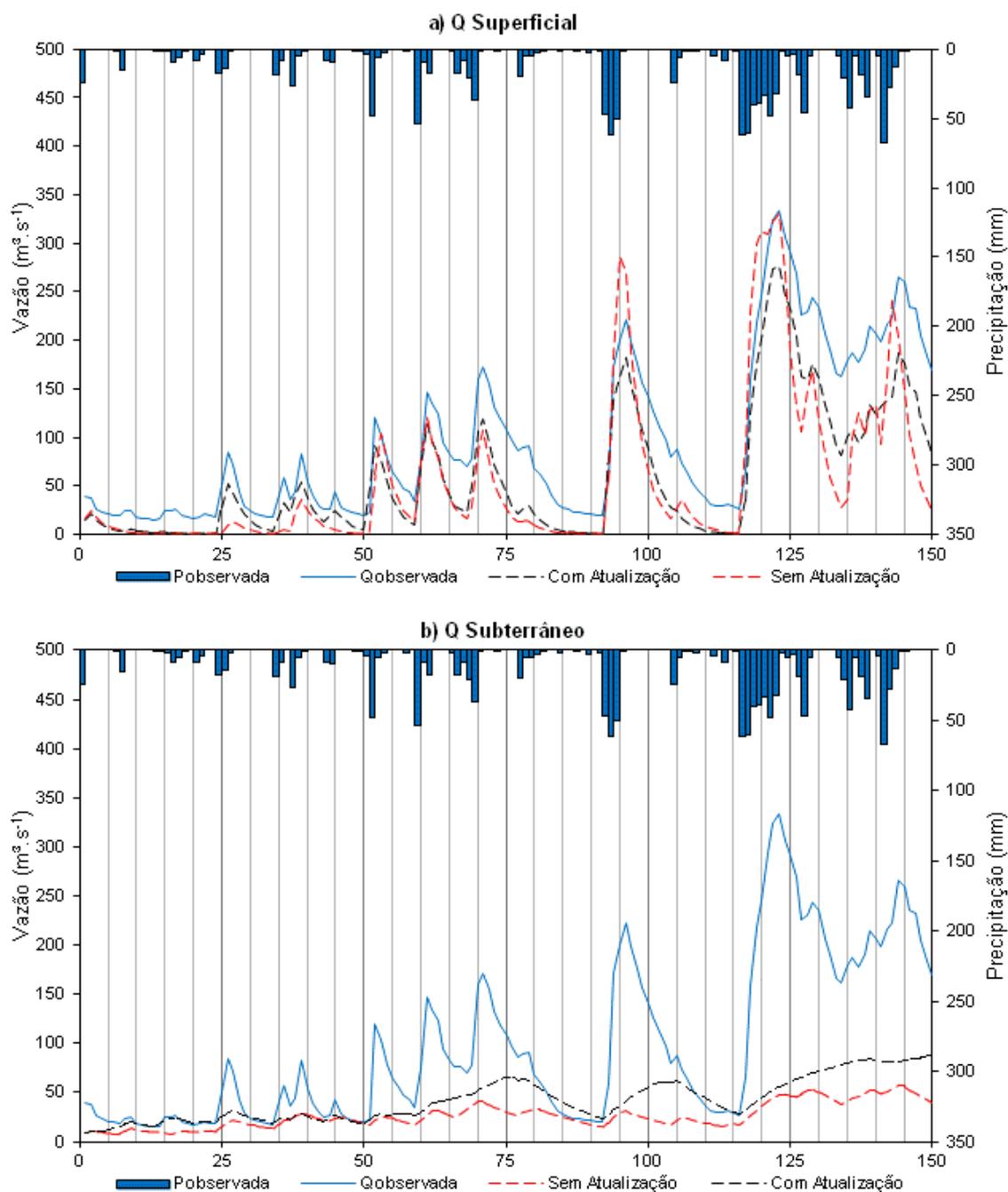
**Figura C-1** Hidrograma simulado superficial e subterrâneo, na bacia do rio Ijuí.  
Fonte: Elaboração própria.

Na bacia do rio Tesouras, se apresentam os hidrogramas superficiais (Figura C-2, a), onde, assim como no caso anterior, o efeito de atualizar a precipitação de entrada incrementou quantitativamente a vazão superficial simulada pelo modelo hidrológico. No hidrograma subterrâneo (Figura C-2, b), a atualização não afetou a vazão subterrânea simulada.



**Figura C-2** Hidrograma simulado superficial e subterrâneo, na bacia do rio Tesouras.  
Fonte: Elaboração própria.

Finalmente na bacia do rio Canoas, os hidrogramas superficiais (Figura C-3, a) apresentaram pouca variação, principalmente nos períodos de recessão dos hidrogramas. Esta deficiência foi compensada no hidrograma subterrâneo (Figura C-3, b), onde se observa um incremento das vazões nesses períodos.



**Figura C-3** Hidrograma simulado superficial e subterrâneo, na bacia do rio Canoas.  
 Fonte: Elaboração própria.