



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/11.09.20.47-TDI

**PREVISÃO DE CHEIAS NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO ITAJAÍ-AÇU, SC, USANDO PREVISÃO
NUMÉRICA DE TEMPO E MODELAGEM
HIDROLÓGICA**

Leandro Casagrande

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Regina Célia dos Santos Alvalá, e Javier Tomasella, aprovada em 26 de novembro de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3KJ2J95>>

INPE
São José dos Campos
2015

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/11.09.20.47-TDI

**PREVISÃO DE CHEIAS NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO ITAJAÍ-AÇU, SC, USANDO PREVISÃO
NUMÉRICA DE TEMPO E MODELAGEM
HIDROLÓGICA**

Leandro Casagrande

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Regina Célia dos Santos Alvalá, e Javier Tomasella, aprovada em 26 de novembro de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3KJ2J95>>

INPE
São José dos Campos
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Casagrande, Leandro.

C261p Previsão de cheias na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, SC, usando previsão numérica de tempo e modelagem hidrológica / Leandro Casagrande. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xxvi + 122 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/11.09.20.47-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientadores : Drs. Regina Célia dos Santos Alvalá, e Javier Tomasella.

1. Desastres naturais. 2. Inundações. 3. MHD-INPE. 5. Itajaí-Açu. I.Título.

CDU 556.51:551.511.61



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

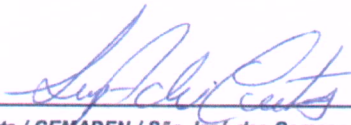
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Leandro Casagrande**

Título: "PREVISÃO DE CHEIAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITAJAÍ - AÇU, SC, USANDO PREVISÃO NUMÉRICA DE TEMPO E MODELAGEM HIDROLÓGICA".

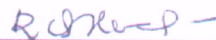
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Ciência do Sistema Terrestre

Dra. Luz Adriana Cuartas Pineda




Presidente / CEMADEN / São José dos Campos - SP

Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá



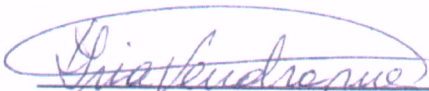
Orientador(a) / CEMADEN / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Javier Tomasella



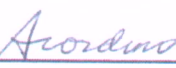
Orientador(a) / CEMADEN / Cachoeira Paulista - SP

Dra. Íria Fernandes Vendrame



Convidado(a) / ITA / São José dos Campos - SP

Dr. Ademar Cordero



Convidado(a) / Furb / Blumenau - SC

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(x) unanimidade

“Nella vita del signor Palomar c’è stata un’epoca in cui la sua regola era questa: primo, costruire nella sua mente un modello, il più perfetto, logico, geometrico possibile; secondo, verificare se il modello s’adatta ai casi pratici osservabili nell’esperienza; terzo, apportare le correzioni necessarie perché il modello e realtà coincidano”.

(I. Calvino em Il modello dei modelli, 1983)

“Dedico este trabalho a meus pais e irmãos pelos anos em que me afastei do vosso convívio, na tarefa de completar esta etapa de minha vida.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha orientadora Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá, que viabilizou a construção do trabalho e soube me conduzir em diversos momentos delicados no decorrer de minha vida acadêmica.

Ao meu orientador Dr. Javier Tomasella, que sempre esteve disponível para me indicar o caminho, em especial quando os problemas eram maiores e exigiam esforço adicional para serem resolvidos.

A meus pais Jaime Campagnolo Casagrande e Zeni de Fátima Nogueira Casagrande, exemplos de perseverança, que sempre acreditaram na minha conduta, e são à base de todas as minhas conquistas.

A minha namorada Madeleine Sánchez Gácita, que sempre esteve ao meu lado nos momentos difíceis, e acreditou no meu propósito.

A minha irmã Fernanda Casagrande pelas dicas de meteorologia e o apoio nos momentos difíceis.

À Rochane de Oliveira Caram e o Anderson Sene, pelo auxílio no processamento dos dados do modelo hidrológico.

Ao Marcus Jorge Bottino, pelo auxílio no processamento dos dados das previsões meteorológicas.

Ao pessoal do grupo de hidrologia do CPTEC, conduzido pelo Dr. Daniel Andrés Rodriguez, pelos auxílios no processamento de dados e por disponibilizar os produtos interpolados de precipitação, utilizados no presente trabalho.

Aos colegas da Operação do CEMADEN pela troca de experiências técnicas e pelos vínculos de amizade que o ambiente de trabalho nos proporcionou.

À Angela Harada, da coordenação do Curso de Pós-graduação em Ciência do Sistema Terrestre, que, sempre muito prestativa, ao longo dos anos tornou-se uma amiga.

À Fundação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelos dois anos de bolsa de doutorado no Brasil.

Ao final dos anos dedicados ao meu doutorado, sinto que a apreciação do percurso foi tão importante quanto vencer o caminho. Neste período, tive a oportunidade de conhecer pessoas que, de forma direta ou indireta, participaram na construção do meu conhecimento, e não há nada mais gratificante do que, no propósito de alcançar uma meta, encontrar aqueles que nos ajudam a contornar as dificuldades. Sendo assim, agradeço imensamente a todos aqueles que estiveram presentes na minha jornada, e mesmo que não tenham sido citados, não foram esquecidos.

Por fim, agradeço a Deus que mostrou sua presença ao contemplar o meu esforço colocando as pessoas certas no meu caminho.

Muito obrigado.

RESUMO

Nas últimas décadas, o crescimento populacional associado à ocupação desordenada das áreas urbanas tem aumentado a vulnerabilidade da população brasileira aos desastres naturais. Neste contexto, a previsão de cheias com maior antecipação é essencial para o gerenciamento de risco nas regiões susceptíveis. Este trabalho apresenta uma metodologia para previsão e alerta de cheias na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, considerada uma das regiões historicamente mais afetadas por estes fenômenos no estado de Santa Catarina, Brasil. Previsões de tempo por conjunto foram utilizadas como entrada no modelo hidrológico MHD-INPE, no intuito de estender a antecipação da emissão de alertas de cheia para os municípios vulneráveis. O desempenho da metodologia foi avaliado utilizando indicadores estatísticos e os resultados sugerem que a antecipação dos alertas pode ser estendida em até 48 horas, com baixo índice de falsos alertas.

**FLOOD FORECASTING AT THE ITAJAÍ-ACU RIVER BASIN, SC,
THROUGH THE USE OF NUMERICAL WEATHER FORECASTING AND
HYDROLOGICAL MODELLING**

ABSTRACT

In recent decades, population growth associated with unplanned urban occupation has increased the vulnerability of the Brazilian population to natural disasters. In susceptible regions, early flood forecasting is essential for risk management. This paper presents a methodology for flood forecasting and warning in the Itajaí-Açu river basin, historically, one of the most affected regions by floods in the state of Santa Catarina, Brazil. Ensemble weather forecastings were used as input to the MHD-INPE hydrological model in order to increasing the lead time for issuing flood warnings for the vulnerable populations. The performance of the methodology was assessed through statistical indicators. Obtained results suggest that flood warnings can be issued up to 48 hours in advance with low rate of false warnings.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 Esquema simplificado dos quatro elementos de um sistema de alerta, ou de aviso prévio, com foco nas pessoas vulneráveis.....	8
Figura 2.2 Horizontes de previsão de cheias dos métodos descritos no trabalho em relação a uma determinada data de início da previsão.	11
Figura 2.3 Exemplo de EPS hidrológico para evento de inundação, a linha azul mostra a descarga predita para cada previsão, as linhas pontilhadas mostram o dado observado (cor preta) e também 4 níveis de alerta (linhas horizontais).	13
Figura 2.4 Classificação das escalas nas ciências atmosféricas, hidrológicas e geográficas.	16
Figura 3.1 Localização da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu em Santa Catarina.....	21
Figura 3.2 Perfil de declividade dos principais rios do Vale do Itajaí. Os valores de declividade são para o rio Itajaí-Açu e do Oeste.	22
Figura 3.3 Barragens de contenção de cheias da bacia do Itajaí, SC.	23
Figura 3.4 Mapa do modelo de elevação com a localização das estações pluviométricas (a), e dos postos de vazão (b), na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu.	25
Figura 3.5 Mapas de solos (a) reclassificado para 4 classes de Potencial de Escoamento Superficial (PES), e mapa de uso e ocupação da terra na resolução espacial de 30 metros (b) reclassificado para 4 classes de uso, na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu.	28
Figura 3.6 Série temporal de vazões diárias observadas no posto de Blumenau, SC, com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.	30
Figura 3.7 Ilustração das etapas de separação de escoamento (esquerda) e da propagação na rede de drenagem (direita) no modelo hidrológico MHD-INPE.....	32
Figura 3.8 Balanço de água vertical no solo.	33
Figura 3.9 Ilustração simplificada do procedimento para correção do viés das vazões simuladas com a Função de Distribuição Acumulada de uma série histórica (a), e curvas de percentagem do Tempo de Permanência para a mesma série histórica (b), em que Q_{sim} é a vazão simulada e Q_{vc} a vazão com viés corrigido.	39
Figura 3.10 Tabela de contingência 2x2 para contagem das categorias possíveis para os pares previsão/observação no caso de um evento dicotômico.....	43
Figura 3.11 Exemplo de diagrama ROC.	44
Figura 4.1 Ilustrativo da linha do tempo referente aos períodos de calibração, verificação e de previsões de vazão. As faixas em cor vermelha representam os 2 primeiros anos desconsiderados.....	45
Figura 4.2 Previsões de vazão para 24 e 48 horas em Rio do Sul, SC, para o período de 4 dias, com início em 19/09/2013. A chuva refere-se ao valor médio diário distribuído na sub-bacia, tanto o valor observado, como previsto. As previsões e a vazão simulada são corrigidas do viés.	50
Figura 4.3 Previsões de vazão para 24 e 48 horas em Rio do Sul, SC, para o período de 4 dias, com início em 20/09/2013. A chuva refere-se ao valor médio diário distribuído na sub-bacia, tanto o valor observado, como previsto. As previsões e a vazão simulada são corrigidas do viés.	51
Figura 4.4 Previsões de vazão para 24 e 48 horas em Rio do Sul, SC, para o período de 4 dias, com início em 21/09/2013. A chuva refere-se ao valor médio diário distribuído na	

	sub-bacia, tanto o valor observado, como previsto. As previsões e a vazão simulada são corrigidas do viés.	51
Figura 4.5	Previsões de vazão para 24 e 48 horas em Rio do Sul, SC, para o período de 4 dias, com início em 22/09/2013. A chuva refere-se ao valor médio diário distribuído na sub-bacia, tanto o valor observado, como previsto. As previsões e a vazão simulada são corrigidas do viés.	52
Figura 4.6	Previsões de vazão para 24 e 48 horas em Blumenau, SC, para o período de 4 dias, com início em 19/09/2013. A chuva refere-se ao valor médio diário distribuído na sub-bacia, tanto o valor observado, como previsto. As previsões e a vazão simulada são corrigidas do viés.	53
Figura 4.7	Previsões de vazão para 24 e 48 horas em Blumenau, SC, para o período de 4 dias, com início em 20/09/2013. A chuva refere-se ao valor médio diário distribuído na sub-bacia, tanto o valor observado, como previsto. As previsões e a vazão simulada são corrigidas do viés.	53
Figura 4.8	Previsões de vazão para 24 e 48 horas em Blumenau, SC, para o período de 4 dias, com início em 21/09/2013. A chuva refere-se ao valor médio diário distribuído na sub-bacia, tanto o valor observado, como previsto. As previsões e a vazão simulada são corrigidas do viés.	54
Figura 4.9	Previsões de vazão para 24 e 48 horas em Blumenau, SC, para o período de 4 dias, com início em 22/09/2013. A chuva refere-se ao valor médio diário distribuído na sub-bacia, tanto o valor observado, como previsto. As previsões e a vazão simulada são corrigidas do viés.	54
Figura 4.10	Precipitação interpolada (mm/dia) nos limites na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, a partir dos dados observados para os dias 20, 21, 22, e 23 de setembro de 2013, coincidindo com os 4 dias do pico do evento mostrado na Figura 4.1.....	55
Figura 4.11	Precipitação prevista nos limites da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, a partir das cinco configurações do modelo numérico de previsão “Eta” (resolução espacial de 5km) para os dias 20, 21, 22, e 23 de setembro de 2013, coincidindo com os 4 dias do pico do evento mostrado na Figura 4.1, com rodadas iniciando as 00 horas (UTC).	56
Figura 4.12	Precipitação prevista nos limites da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, a partir das cinco configurações do modelo numérico de previsão “Eta” (resolução espacial de 5km) para os dias 20, 21, 22, e 23 de setembro de 2013, coincidindo com os 4 dias do pico do evento mostrado na Figura 4.1, com rodadas iniciando as 12 horas (UTC).	57
Figura 4.13	Curva-chave do posto B5, com a inserção de pontos adicionais obtidos das séries históricas da ANA. A linha em preto representa a curva-chave original e a linha em cor vermelha pontilhada, representa a nova curva-chave calculada incluindo os pontos adicionais.	61
Figura 4.14	Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) <i>versus</i> vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os percentis P ₉₀ , P ₉₅ , P ₉₈ , P ₉₉ e P _{99.5} . Os gráficos referem-se à sub-bacia B1, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).	63
Figura 4.15	Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) <i>versus</i> vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os percentis P ₉₀ , P ₉₅ , P ₉₈ , P ₉₉ e P _{99.5} . Os gráficos referem-se à sub-bacia B2, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).	64
Figura 4.16	Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) <i>versus</i> vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para o limiar de atenção, e os percentis P ₉₀ , P ₉₅ , P ₉₈ , P ₉₉ e P _{99.5} . Os	

	gráficos referem-se à sub-bacia B3, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).....	65
Figura 4.17	Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) <i>versus</i> vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os limiares de atenção, alerta, emergência e os percentis P ₉₀ , P ₉₅ , P ₉₈ , P ₉₉ e P _{99.5} . Os gráficos referem-se à sub-bacia B4, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).....	66
Figura 4.18	Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) <i>versus</i> vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os percentis P ₉₀ , P ₉₅ , P ₉₈ , P ₉₉ e P _{99.5} . Os gráficos referem-se à sub-bacia B5, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).....	67
Figura 4.19	Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) <i>versus</i> vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os limiares de atenção, alerta e os percentis P ₉₀ , P ₉₅ , P ₉₈ , P ₉₉ e P _{99.5} . Os gráficos referem-se à sub-bacia B6, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).....	68
Figura 4.20	Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) <i>versus</i> vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os limiares de atenção, alerta, emergência e os percentis P ₉₀ , P ₉₅ , P ₉₈ , P ₉₉ e P _{99.5} . Os gráficos referem-se à sub-bacia B7, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).....	69
Figura 4.21	Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) <i>versus</i> vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os limiares de atenção, alerta e os percentis P ₉₀ , P ₉₅ , P ₉₈ , P ₉₉ e P _{99.5} . Os gráficos referem-se à sub-bacia B8, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).....	70
Figura 4.22	Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) <i>versus</i> vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os limiares de atenção, alerta, emergência e os percentis P ₉₀ , P ₉₅ , P ₉₈ , P ₉₉ e P _{99.5} . Os gráficos referem-se à sub-bacia B9, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).....	71
Figura 4.23	Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) <i>versus</i> vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os limiares de atenção, alerta e os percentis P ₉₀ , P ₉₅ , P ₉₈ , P ₉₉ e P _{99.5} . Os gráficos referem-se à sub-bacia B10, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).....	72
Figura 4.24	Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) <i>versus</i> vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os limiares de atenção, alerta, emergência e os percentis P ₉₀ , P ₉₅ , P ₉₈ , P ₉₉ e P _{99.5} . Os gráficos referem-se à sub-bacia B11, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).....	73
Figura 4.25	Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) <i>versus</i> vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os limiares de atenção, alerta, emergência e os percentis P ₉₀ , P ₉₅ , P ₉₈ , P ₉₉ e P _{99.5} . Os gráficos referem-se à sub-bacia B12, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).....	74
Figura 4.26	Diagramas ROC para os grupos de sub-bacias 1 e 2, para os níveis de atenção, alerta, e emergência, calculados para 24 e 48 horas de antecipação.....	75
Figura A.1	Série temporal das vazões observadas e simuladas para sub-bacia B1, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.....	92

Figura A.2	Série temporal das vazões observadas e simuladas para sub-bacia B2, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.	93
Figura A.3	Série temporal das vazões observadas, simuladas sem correção do viés e simuladas com correção do viés, para sub-bacia B3, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.	94
Figura A.4	Série temporal das vazões observadas, simuladas sem correção do viés e simuladas com correção do viés, para sub-bacia B3, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.	95
Figura A.5	Série temporal das vazões observadas e simuladas para sub-bacia B5, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.	96
Figura A.6	Série temporal das vazões observadas, simuladas sem correção do viés e simuladas com correção do viés, para sub-bacia B6, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.	97
Figura A.7	Série temporal das vazões observadas, simuladas sem correção do viés e simuladas com correção do viés, para sub-bacia B7, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.	98
Figura A.8	Série temporal das vazões observadas, simuladas sem correção do viés e simuladas com correção do viés, para sub-bacia B8, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.	99
Figura A.9	Série temporal das vazões observadas, simuladas sem correção do viés e simuladas com correção do viés, para sub-bacia B9, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.	100
Figura A.10	Série temporal das vazões observadas, simuladas sem correção do viés e simuladas com correção do viés, para sub-bacia B10, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.	101
Figura A.11	Série temporal das vazões observadas, simuladas sem correção do viés e simuladas com correção do viés, para sub-bacia B11, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.	102
Figura A.12	Série temporal das vazões observadas, simuladas sem correção do viés e simuladas com correção do viés, para sub-bacia B12, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.	103
Figura B.1	Curva de percentagem de tempo de permanência do posto de vazão B3.....	105
Figura B.2	Curva de percentagem de tempo de permanência do posto de vazão B4.....	105
Figura B.3	Curva de percentagem de tempo de permanência do posto de vazão B6.....	106
Figura B.4	Curva de percentagem de tempo de permanência do posto de vazão B7.....	106
Figura B.5	Curva de percentagem de tempo de permanência do posto de vazão B8.....	107
Figura B.6	Curva de percentagem de tempo de permanência do posto de vazão B9.....	107
Figura B.7	Curva de percentagem de tempo de permanência do posto de vazão B10.....	108
Figura B.8	Curva de percentagem de tempo de permanência do posto de vazão B11.....	108
Figura B.9	Curva de percentagem de tempo de permanência do posto de vazão B12.....	109
Figura C.1	Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Vila Nova (B1) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.	111
Figura C.2	Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Barragem Taió Montante (B2) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.	111
Figura C.3	Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Botuverá Montante (B3) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.	112

Figura C.4	Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Brusque (B4) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.	112
Figura C.5	Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Barra do Prata (B5) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.	113
Figura C.6	Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Timbó Novo (B6) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.	113
Figura C.7	Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Taió (B7) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.	114
Figura C.8	Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Ituporanga (B8) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.	114
Figura C.9	Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Rio do Sul Novo (B9) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.	115
Figura C.10	Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Apiúna (B10) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.	115
Figura C.11	Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Indaial (B11) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.	116
Figura C.12	Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Blumenau (B12) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.	116
Figura D.1	Curva-chave para o posto de Vila Nova (B1), onde os pontos em vermelho referem-se aos dados até o ano de 1989, a partir de 1989 houve uma mudança na seção do canal.	117
Figura D.2	Curva-chave para o posto de Taió Montante (B2), onde os pontos em vermelho referem-se aos dados até o ano de 2011, a partir de 2011 houve uma mudança na seção do canal.	117
Figura D.3	Curva-chave para o posto de Botuverá Montante (B3).	118
Figura D.4	Curva-chave para o posto de Brusque (B4).	118
Figura D.5	Curva-chave para o posto de Barra do Prata (B5).	119
Figura D.6	Curva-chave para o posto de Timbó Novo (B6).	119
Figura D.7	Curva-chave para o posto de Taió (B7), onde os pontos em vermelho referem-se aos dados até o ano de 1997, a partir de 1997 houve uma mudança na seção do canal.	120
Figura D.8	Curva-chave para o posto de Ituporanga (B8).	120
Figura D.9	Curva-chave para o posto de Rio do Sul (B9).	121
Figura D.10	Curva-chave para o posto de Apiúna Regua Nova (B10).	121
Figura D.11	Curva-chave para o posto de Indaial (B11).	122
Figura D.12	Curva-chave para o posto de Blumenau (B12).	122

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1 Conceitos utilizados para definir as inundações graduais.	5
Tabela 2.2 Conceitos utilizados para definir as inundações bruscas.....	6
Tabela 2.3 Exemplos de instituições que utilizam as técnicas EPS para previsão de cheias.	14
Tabela 3.1 Informações dos 12 postos de vazão utilizados no presente trabalho.	24
Tabela 3.2 Disponibilidade de dados de vazão para cada uma das sub-bacias nas séries históricas do período de 1971 a 2014, em que os valores representam a percentagem de dados diários disponíveis em cada ano.....	26
Tabela 3.3 Configurações dos membros do conjunto de previsão	38
Tabela 4.1 Parâmetros obtidos na calibração de 1973 a 2009, verificação e correção do viés de 2012 a 2014, para as 12 sub-bacias estudadas.....	47
Tabela 4.2 Índice RPS e Índices Brier para as cotas de atenção, alerta, emergência e para diversos percentis em 24 e 48 horas.....	58
Tabela 4.3 Vazões referentes aos níveis de atenção, alerta, emergência e para os percentis 90, 95, 98, 99 e 99,5, das 12 sub-bacias estudadas.	60

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional das Águas
BS	Índice de Brier (<i>Brier Score</i>)
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais
CENAD	Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres
CEOPS	Centro de Operação do Sistema de Alerta
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CPTEC/INPE	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo
DNOS	Departamento Nacional de Obras e Saneamento
ECMWF	Centro Europeu para Previsão de Tempo em Médio Prazo (<i>European Center for Medium-Range Weather Forecast</i>)
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural do Estado de Santa Catarina
EPS	Sistema de Previsão por Conjuntos (<i>Ensemble Prediction System</i>)
FAPESP	Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo
FCTH	Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica
FDA	Função de Distribuição Acumulada
FURD	Universidade Regional de Blumenau
HEPEX	Experimento de Previsão Hidrológica por Conjuntos (<i>Hydrological Ensemble Prediction Experiment</i>)
H-EPS	Sistema de Previsão Hidrológica por Conjuntos (<i>Hydrological Ensemble Prediction System</i>)
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INEA	Instituto Estadual do Ambiente (do Rio de Janeiro)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MHD-INPE	Modelo Hidrológico Distribuído do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MNT	Modelo Numérico do Terreno
NMC	Centro Meteorológico Nacional (<i>National Meteorological Center</i>)
ROC	Característica Operacional relativa (<i>Relative Operating Characteristic</i>)
RPS	Probabilidade por Classes Ordenadas (<i>Ranked Probability Score</i>)
SAISP	Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo
SREP	Sistema de Predição por Conjuntos em Curto Prazo
TP	Tempo de Permanência
UNISDR	Conferência Mundial sobre a Redução de Desastres
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo geral.....	3
1.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Justificativa	3
1.4. Estrutura do documento	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Definições	5
2.2. Sistemas de alerta.....	6
2.3. Previsão de cheias	11
2.4. Limitações dos modelos hidrológicos	15
2.5. O modelo de previsão numérica “Eta”	18
3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1. Área de estudo.....	21
3.2. Dados utilizados na modelagem hidrológica e nas previsões de vazão	23
3.3. Metodologia	29
3.3.1. Modelo Hidrológico Distribuído MHD-INPE, metodologia de calibração e verificação	31
3.3.2. Processamento dos dados meteorológicos	36
3.3.3. Conjunto de previsões do modelo meteorológico “Eta”	37
3.3.4. Correção estatística do viés nas vazões.....	38
3.4. Avaliação do desempenho das previsões de vazão	40
3.4.1. Brier Score (BS).....	40
3.4.2. Índice de Probabilidade por Classes Ordenadas (RPS).....	41
3.4.3. Diagramas de Característica Operacional Relativa (ROC)	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1. Calibração, verificação do modelo hidrológico MHD-INPE e correção do viés	45
4.2. Previsões de vazão e desempenho do Índice de Brier (BS) e Índice de Probabilidade por Classes Ordenadas (RPS).....	49
4.3. Diagramas da Característica Operacional Relativa (ROC) por sub-bacias	62
4.4. Diagramas da Característica Operacional Relativa (ROC) por grupos	74
5 CONCLUSÕES.....	77
6 RECOMENDAÇÕES	79

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
APÊNDICE A - HIDROGRAMAS DO PERÍODO DE VERIFICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO MHD-INPE PARA OS 12 POSTOS DE VAZÃO ESTUDADOS	91
APÊNDICE B – CURVAS DE PERCENTAGEM DE TEMPO DE PERMANÊNCIA DOS POSTOS DE VAZÃO UTILIZADOS NA CORREÇÃO DO VIÉS	105
APÊNDICE C – SÉRIES TEMPORAIS DE VAZÕES DIÁRIAS OBSERVADAS NOS POSTOS DE VAZÃO ESTUDADOS	111
APÊNDICE D – CURVAS-CHAVE PARA OS 12 POSTOS DE VAZÃO OBTIDAS PELOS LEVANTAMENTOS DISPONIBILIZADOS PELA “ANA”	117

1 INTRODUÇÃO

Inundações são desastres naturais que globalmente causam expressivos prejuízos de caráter material, social e ambiental e, frequentemente, resultam na perda de vidas humanas. O quinto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC (IPCC, 2013) e diversos outros estudos sugerem que o número de eventos de precipitações intensas associados com a ocorrência de inundações tem aumentado em várias regiões do planeta, enquanto simulações com modelos numéricos indicam que essa tendência se manterá nas próximas décadas, como resultado das mudanças climáticas (ALFIERI et al., 2015; GROISMAN et al., 2005; IPCC, 2013). Neste contexto, a previsão antecipada e confiável de extremos hidrológicos é essencial para o gerenciamento de risco de desastres, razão pelas quais governos e instituições no Brasil vêm direcionando recursos e esforços aos estudos voltados às previsões do tempo e clima e a sua integração com modelos hidrológicos.

Como parte dos esforços para mitigar as perdas materiais e humanas relacionadas a desastres naturais, o governo brasileiro criou em 2011 o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), com a missão de desenvolver pesquisas e tecnologias para criar um sistema de previsão e monitoramento de desastres naturais no Brasil.

Os desastres naturais estão associados, de modo geral, à vulnerabilidade da população. Neste sentido, países em desenvolvimento, como os da América Latina, são menos resilientes devido à pobreza, o rápido crescimento populacional e a ocupação desordenada de áreas urbanas (BEZADA, 2009; STILLWELL, 1992). No período de 1991 a 2012 foram registradas 38.996 ocorrências de desastres naturais no Brasil, dos quais 4.691 referem-se a desastres causados por inundações severas, representando 12 % do total de eventos registrados (CEPED/UFSC, 2013a).

Na região Sul do Brasil, o Estado de Santa Catarina apresentou 104 registros oficiais de inundações caracterizadas como desastres naturais, no período de 1991 a 2012, representando 23% do total de ocorrências similares registradas no Estado (CEPED/UFSC, 2013b). Grande parte destes eventos ocorreu no Vale do Itajaí, onde as enchentes e inundações são relatadas desde a época de sua colonização, em meados de 1850; e a evolução dos desastres vem acompanhando o desenvolvimento econômico da região, principalmente em função do

crescimento da população. Somente nos últimos 50 anos foram relatados 39 eventos de enchentes que atingiram cidades como Blumenau, Rio do Sul, Gaspar entre outras (FRANK, B.; PINHEIRO, 2003). Cabe ressaltar que o Vale do Itajaí representa uma região de grande importância econômica, abrangendo 16,5% do território e 20 % do total da população do estado de Santa Catarina. Ao longo dos últimos anos, muitas medidas de controle estrutural foram implantadas na tentativa de conter os problemas causados pelas cheias do rio Itajaí-Açu; porém, a partir da grande enchente de 1983, uma série de medidas de controle não-estrutural, como a preservação dos remanescentes florestais, passaram a ser levadas em conta.

Quando se trata de antecipar eventos de desastres desencadeados por processos de origem hidrológica, como as inundações, os produtos disponíveis da previsão meteorológica são uma opção usada para antever acontecimentos, assim como a modelagem hidrológica, para simular as possíveis consequências destes eventos. No Brasil, a hidrologia foi impulsionada inicialmente pelos investimentos associados ao setor de energia; porém, nas duas últimas décadas, com os avanços dos recursos tecnológicos disponíveis de observação da terra e seus fenômenos, o entendimento dos conceitos ligados à hidrologia e os recursos hídricos vem ganhando maior abrangência. Neste contexto, as pesquisas na área de modelagem hidrológica passaram a ter várias aplicações, tanto para o monitoramento ambiental, como também para o planejamento do desenvolvimento urbano, entre outros.

Dada à relevância do tema, e com o intuito de contribuir para minimizar o impacto dos eventos de extremos hidrológicos sobre as comunidades afetadas, no presente trabalho avaliou-se a aplicação de um modelo hidrológico, integrado a um modelo numérico de previsão do tempo, para antecipação na emissão de alertas de cheia na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, uma das regiões do Estado de Santa Catarina historicamente mais afetada por inundações. A estratégia proposta visa antecipar a emissão de alertas de cheias, e, conseqüentemente, ampliar a capacidade de resposta da Defesa Civil, minimizando os possíveis prejuízos à população das comunidades ribeirinhas do rio Itajaí-Açu. Considera-se relevante e necessário multiplicar esforços científicos em cooperação com centros operacionais e defesa civil, com vistas à atuação a curto e longo prazo no sentido de minimizar as perdas e danos causados por desastres naturais.

1.1. Objetivo geral

O estudo objetivou o melhor entendimento sobre o desempenho e habilidade da modelagem hidrológica, integrada a modelo numérico de previsão de tempo, em antecipar os alertas de cheias na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, bem como, contribuir futuramente para a implementação operacional de um sistema de previsão e alerta de cheias capaz de prever esses eventos na área de estudo, no intuito de melhorar a antecedência na emissão de alertas.

1.2. Objetivos específicos

Com o intuito de alcançar o objetivo geral, se propõem os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a capacidade de antecipar alertas de cheias na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, com o Modelo Hidrológico Distribuído do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (MHD-INPE), integrado a um conjunto de previsões numéricas de tempo do modelo meteorológico “Eta”;
- Avaliar a habilidade do modelo hidrológico MHD – INPE em representar as vazões em bacias menores, visto que o modelo foi concebido para grandes bacias.

1.3. Justificativa

A população do Vale do Itajaí, SC, conta com um sistema de alerta baseado em uma rede telemétrica de observação, associada a modelos de correlação estatística, estes definidos a partir de dados de vazão a montante dos municípios historicamente mais afetados. O sistema de alerta implantado, apesar de eficiente, tem capacidade limitada de antecipação no tempo. A previsão de cheias a partir do sistema de previsão por conjunto baseado na integração entre Modelo Hidrológico Distribuído MHD e a previsão numérica de tempo “Eta”, poderá trazer avanços pela ampliação na capacidade de antecipação no tempo de emissão dos alertas, pois este é um fator decisivo para que a Defesa Civil possa tomar as devidas providências no intuito de minimizar os danos causados pelas enchentes e inundações (chamadas de forma geral pelo termo “cheias”, como será visto mais adiante).

A região do Vale do Itajaí não tem estação seca, e os eventos de cheias podem ocorrer em qualquer época do ano, necessitando de monitoramento contínuo. Por este motivo, estudos que possam amenizar os impactos e melhorar a eficiência do trabalho da Defesa Civil têm aplicação direta para a população do vale, o que torna a proposta apresentada neste trabalho bastante motivadora.

Cabe ainda ressaltar que o Brasil carece de pesquisas em sistemas de alerta baseados na estratégia proposta, e os resultados deste trabalho poderão servir de base para a implantação de sistemas de alerta de conceito semelhante, em regiões para as quais existe a necessidade e a disponibilidade de dados.

1.4. Estrutura do documento

A tese está estruturada em seis capítulos, como sejam, no Capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica, que aborda assuntos pertinentes ao enfoque do presente trabalho. Os materiais e dados utilizados são apresentados no Capítulo 3. Os resultados obtidos e as discussões associadas são apresentados no Capítulo 4. As conclusões e recomendações para trabalhos futuros são apresentados nos Capítulos 5 e 6, respectivamente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Definições

A palavra cheia (ou enchente), por definição, refere-se à condição de escoamento do rio dentro da calha normal até o nível de suas margens, sem que haja o seu transbordamento (GOERL; KOBIYAMA, 2005). Geralmente este ponto é considerado em um sistema de alerta como antecedente à condição de inundação, em que as águas ultrapassam as margens, invadindo as áreas adjacentes (planície de inundação). Em função do padrão evolutivo, as inundações podem ser classificadas como graduais, bruscas, alagamentos e inundações litorâneas. A maioria das situações de emergência ou estado de calamidade pública é causada por inundações graduais ou bruscas (CASTRO, 1999). Não existe um consenso bem definido entre cientistas no que concerne à percepção das terminologias relacionadas com inundações. Com vistas a melhor elucidar tal ponto, na Tabela 2.1 e na Tabela 2.2 apresentam-se os conceitos de alguns autores relacionados às inundações graduais e bruscas, respectivamente.

Tabela 2.1 Conceitos utilizados para definir as inundações graduais.

AUTOR	DEFINIÇÃO
Castro	As águas elevam-se de forma paulatina e previsível, mantém em situação de cheia durante algum tempo e, a seguir, escoam gradualmente. Normalmente, as inundações graduais são cíclicas e nitidamente sazonais (inundação gradual ou enchente).
Tucci e Bertoni	Quando a precipitação é intensa e o solo não tem capacidade de infiltrar, grande parte do volume escoam para o sistema de drenagem, superando a capacidade natural de escoamento. O excesso de volume que não consegue ser drenado ocupa a várzea, inundando de acordo com a topografia áreas próximas aos rios (inundação ribeirinha).
NATIONAL DISASTER EDUCATION COALITION	Inundações ocorrem nas chamadas planícies de inundação, quando prolongada precipitação por vários dias, intensa chuva em um curto período de tempo ou um entulhamento de gelo ou de restos, faz com que um rio ou um córrego transbordem e inundem a área circunvizinha.
NWS/NOAA	A inundação de uma área normalmente seca causada pelo aumento do nível das águas em um curso d'água estabelecido, como um rio, um córrego ou um canal de drenagem, ou um dique, perto ou no local onde as chuvas precipitam (inundação).

Fonte: Adaptado de Goerl e Kobiyama (2005).

Tabela 2.2 Conceitos utilizados para definir as inundações bruscas.

AUTOR	DEFINIÇÃO
IAHS-UNESCO-WMO	Súbitas inundações com picos de descarga elevados, produzidos por severas tempestades que são geralmente de limitada área de extensão.
Castro	São provocadas por chuvas intensas e concentradas em regiões de relevo acidentado, caracterizando-se por súbitas e violentas elevações dos caudais, os quais escoam de forma rápida e intensa.
NATIONAL DISASTER EDUCATION COALITION	Inundações bruscas ocorrem dentro de 6 horas após uma chuva ou após a quebra de barreira ou reservatório, ou após uma súbita liberação de água armazenada pelo acúmulo de restos ou gelo.
NWS/NOAA	Uma inundação causada pela excessiva chuva em curto período de tempo, geralmente menos de seis horas. Também, às vezes o rompimento de um reservatório pode causar inundação brusca, dependendo do tipo de estrutura e o período de tempo em que ocorre o escoamento derivado do rompimento.

Fonte: Adaptado de Goerl e Kobiyama (2005).

De acordo com as definições supracitadas, em termos gerais, os eventos de chuvas intensas ocorrentes na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, SC, poderiam ser classificados no presente estudo como inundações bruscas, contemplando as definições de Castro (1999); pois, apesar das divergências conceituais, no Brasil parece mais adequado definir, por exemplo, as bacias da região amazônica como sendo de inundação gradual. Neste caso as inundações são cíclicas e sazonais. Porém, se tomarmos como referência os eventos ocorrentes na bacia do Itajaí-Açu, pode-se dizer que uma inundação mais próxima do seu exutório, como em Blumenau, por exemplo, pode ser classificada como inundação lenta ou gradual, ao passo que uma inundação nas partes altas da bacia, como em Rio do Sul, pode ser classificada como inundação brusca. A lógica conceitual baseada na caracterização de regiões dentro da bacia tem mais sentido para a Defesa Civil.

2.2. Sistemas de alerta

As principais medidas utilizadas para minimizar os danos causados por eventos de chuvas intensas podem ser classificadas em estruturais e não-estruturais. Geralmente, as medidas estruturais envolvem obras como a construção de barragens e a retificação de canais. As

medidas não-estruturais têm caráter preventivo e visam à melhor convivência da população com as enchentes (FILHO; SZÉLIGA; ENOMOTO, 2000). Um sistema de alerta é uma medida de caráter não-estrutural que apresenta vantagens, principalmente pelo reduzido custo, se comparado com os altos investimentos muitas vezes necessários na implantação de obras.

A concepção de um sistema de alerta depende do envolvimento de vários segmentos da sociedade, e tem por objetivo informar com antecedência a existência do risco de desastres, minimizando perdas materiais e humanas (UCAR, 2010). No Plano de Ação de Hyogo, adotado na Conferência Mundial das Nações Unidas sobre a Redução de Desastres, são identificados quatro elementos principais de um Sistema de Alerta (também chamado de “Sistema de Aviso Prévio”) de desastres naturais com foco nas pessoas expostas aos riscos (UNISDR, 2005) (Figura 2.1):

- 1) Conhecimento do risco: é necessário manter uma base de dados e investir em avaliação de riscos. O conhecimento dos perigos e vulnerabilidades são peças chave no dimensionamento da situação.
- 2) Monitoramento e Alerta: base científica e ferramentas tecnológicas que possibilitam fornecer uma estimativa antecipada dos riscos potenciais, associado aos agentes capazes de avaliar dados e emitir alertas.
- 3) Disseminação e comunicação: sistema com capacidade de veicular a informação de forma rápida e clara, garantindo também que os riscos sejam compreendidos.
- 4) Capacidade de resposta: Atuação direta da Defesa Civil mediante estratégias de ação, rotas de evacuação, infraestrutura de abrigos, resgate, entre outros.

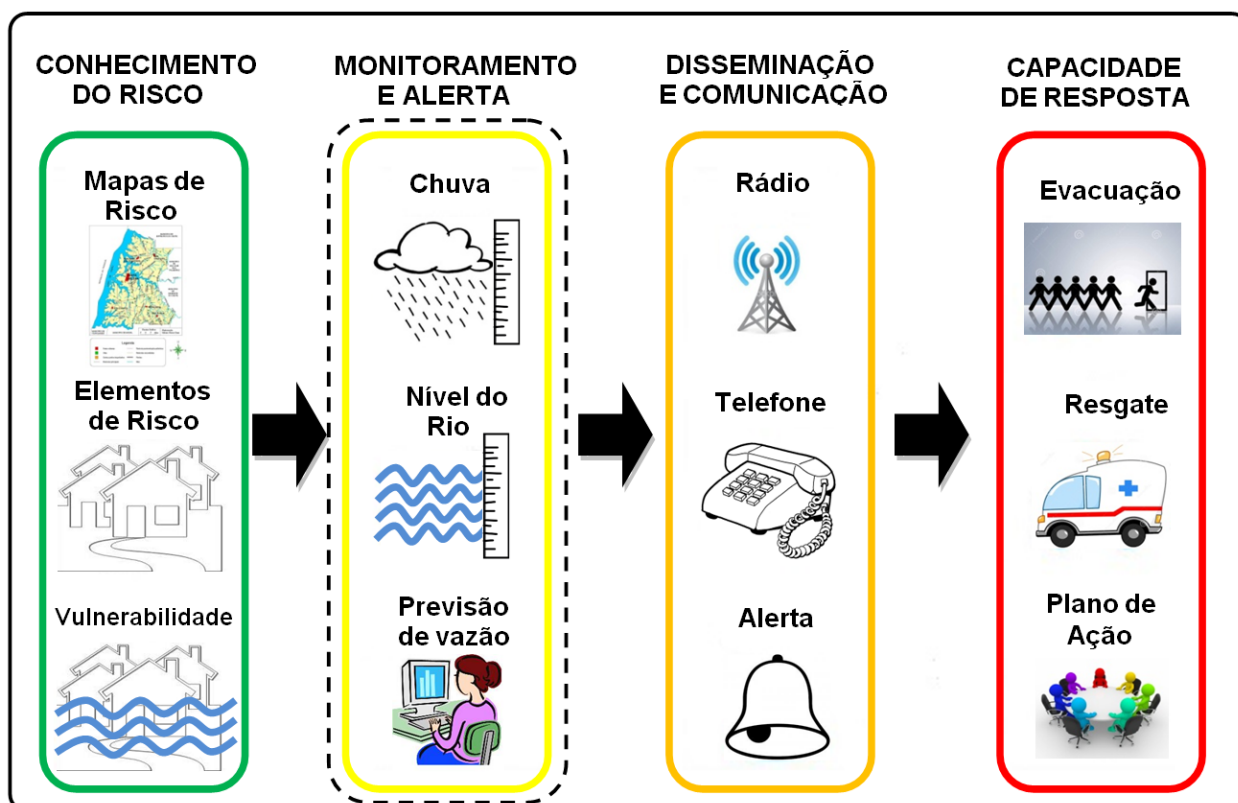


Figura 2.1 Esquema simplificado dos quatro elementos de um sistema de alerta, ou de aviso prévio, com foco nas pessoas vulneráveis.

Fonte: Adaptado de UNISDR (2006)

Dada a abrangência de um Sistema de Alerta propriamente dito, ressalta-se que o presente trabalho visa contribuir unicamente ao “Monitoramento e Alerta”, identificado como o segundo elemento da estrutura apresentada acima (linha pontilhada na Figura 2.1). Porém, os resultados de pesquisas científicas só podem se tornar operacionais em conjunto com uma estrutura organizada de todos os outros elementos que compõe o Sistema de Alerta. No Brasil, iniciativas que se enquadram na estrutura dos elementos de um Sistema de Alerta são escassas, e, na maioria das vezes, foram criadas a partir de eventos extremos históricos, que causaram grandes perdas em regiões específicas do País. Algumas destas iniciativas são mencionadas a seguir.

O Sistema de Alerta de Cheias do Instituto Estadual do Ambiente - INEA (INEA, 2015), iniciado em 2007, mantido pelo governo do Estado do Rio de Janeiro, conta com dois radares meteorológicos adquiridos em 2014, e uma rede telemétrica de estações que enviam dados a cada 15 minutos, da quantidade de chuva e do nível dos rios para o Centro de Controle

Operacional, responsável pelo envio de alertas para os agentes de Defesa Civil. O sistema abrange a Região Serrana e a Baixada Fluminense do Estado do Rio de Janeiro.

O Sistema de Alerta Contra Enchentes do rio Doce, iniciado em 1997, mantido pelo Serviço Geológico do Brasil (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM) em parceria com a Agência Nacional das Águas (ANA) e o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), que abrange os Estados de Minas Gerais e Espírito Santo (CPRM, 2015). Os boletins de alertas da bacia hidrográfica do rio Doce são apoiados em dados hidrometeorológicos e o monitoramento é feito apenas na época chuvosa, que vai de novembro a março de cada ano. A estrutura conta com 34 pontos de monitoramento, incluindo 14 postos de vazão. Os alertas são baseados na propagação da onda de cheia ao longo dos principais trechos do rio.

O Sistema de Alerta e Controle de Enchentes da Bacia do Rio Caí (SACE-CAÍ), Estado do Rio Grande do Sul, iniciado em 2010, também mantido pela CPRM, que conta com uma rede de monitoramento constituída de 7 postos com estações telemétricas que transmitem dados de chuva e níveis dos rios a cada 15 minutos, associada a um sistema de recepção e previsão de níveis, com antecipação de 10 horas para os municípios de São Sebastião do Caí e Montenegro. As informações são divulgadas pelo site da CPRM e através de boletins extraordinários, enviados para a ANA, CEMADEN, Defesas Cíveis municipal e estadual. O sistema funciona 24 horas por dia, mas os boletins com as previsões são enviados apenas durante os eventos críticos.

Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo - SAISP (FCTH, 2015), iniciado em 1977, operado pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH), gera a cada cinco minutos boletins sobre as chuvas na cidade de São Paulo. O monitoramento é feito pela Rede Telemétrica de Hidrologia do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) e pelo Radar Meteorológico de São Paulo, de propriedade do DAEE e adquirido em convênio com a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). A rede telemétrica do SAISP também abrange as regiões do Alto Tietê, Cubatão, Piracicaba, Ribeira do Iguape, Paraíba do Sul, Registro e o Sistema Cantareira.

O Centro de Operação do Sistema de Alerta (CEOPS), iniciado em 1984, mantido pela Universidade Regional de Blumenau (FURB), é responsável pelo monitoramento da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu (FURB, 2015). O CEOPS conta com uma rede de 17 estações

telemétricas que informam o nível dos rios e a precipitação a cada 15 minutos. Com base nos dados das estações a montante, são realizadas previsões para o município de Blumenau com antecedência de 8 horas. O CEOPS mantém o sistema em operação, enquanto as Defesas Civas municipais gerenciam a emissão dos alertas.

Como já citado anteriormente, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), atua considerando abrangência nacional (CEMADEN, 2015a). O Centro, criado em julho de 2011, tem por objetivo desenvolver, testar e implementar um sistema de previsão de ocorrência de desastres naturais em áreas suscetíveis de todo o Brasil. Atualmente, o CEMADEN monitora 957 municípios, com equipes que trabalham 24 horas por dia, 7 dias por semana, emitindo alertas para riscos de movimentos de massa, inundações e enxurradas. Sua infraestrutura conta com uma rede de 3375 pluviômetros automáticos e 9 radares meteorológicos. Os alertas são emitidos para o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD), vinculado ao Ministério da Integração, que é responsável por repassar as informações para os municípios monitorados.

De forma geral, todos estes sistemas utilizam informações de outros centros para ampliar a tomada de decisão, ou até mesmo, mantém a manutenção da infraestrutura de forma compartilhada. Muitos postos de vazão estão sob a responsabilidade da ANA, que mantém o banco de dados das séries históricas (ver, por exemplo, ANA, 2015a); porém, são operados por instituições com sedes regionais. Mesmo que os sistemas citados não tenham produtos integrados com a previsão numérica de tempo, os operadores dos Sistemas de Alerta costumam embasar suas decisões nos prognósticos de tempo, que, no Brasil, são fornecidos por instituições como o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Estas instituições costumam emitir avisos de abrangência regional sobre a previsão de condições severas de tempo.

Cabe salientar que nenhum dos sistemas de alertas mencionados integra de forma oficial previsões por conjuntos em modelos hidrológicos de forma operacional para a emissão de boletins ou alertas. Neste sentido, ainda é necessário um somatório de esforços entre instituições para viabilizar os avanços na emissão de alertas com técnicas que integram modelos numéricos de previsão de tempo com modelos hidrológicos.

2.3. Previsão de cheias

Em termos de aplicação, as previsões de cheias podem ser feitas em curto ou longo prazo. Em curto prazo (tempo real), o objetivo é alertar a população ribeirinha, geralmente com antecedência de algumas horas (TUCCI, 2000). Os métodos de antecipação de um evento de cheia em curto prazo (Figura 2.2) podem ser baseados na propagação da onda de cheia (BOTH; HAETINGER, 2008), na chuva observada (através de modelos hidrológicos chuva-vazão) (BLOSCHL; RESZLER; KOMMA, 2008; RAO et al., 2011; VIOLA et al., 2009) e na previsão da precipitação (modelos chuva-vazão associados a modelos de previsão de tempo) (BAO et al., 2011; HE et al., 2010; SCHAAKE et al., 2007). No longo prazo, os objetivos geralmente estão relacionados ao gerenciamento de recursos hídricos (COLLISCHONN; MORELLI TUCCI; CLARKE, 2005) ou a avaliação de impactos das mudanças do clima (MOHOR et al., 2015; SIQUEIRA-JÚNIOR; TOMASELLA; RODRIGUEZ, 2015). Também, estimativas de longo prazo, quando calculadas a partir de uma série de dados históricos, podem gerar mapas de risco baseados em um conjunto de períodos de retorno (GRACIOSA, 2010). A escolha dos métodos depende de vários fatores, como: a disponibilidade de dados (dados de séries históricas, de radar, de previsões a partir de modelos numéricos), características físicas da bacia hidrográfica e o objetivo da previsão (previsão de curto prazo, análise de risco, cenários de mudanças climáticas, mudanças do uso da terra, entre outros).

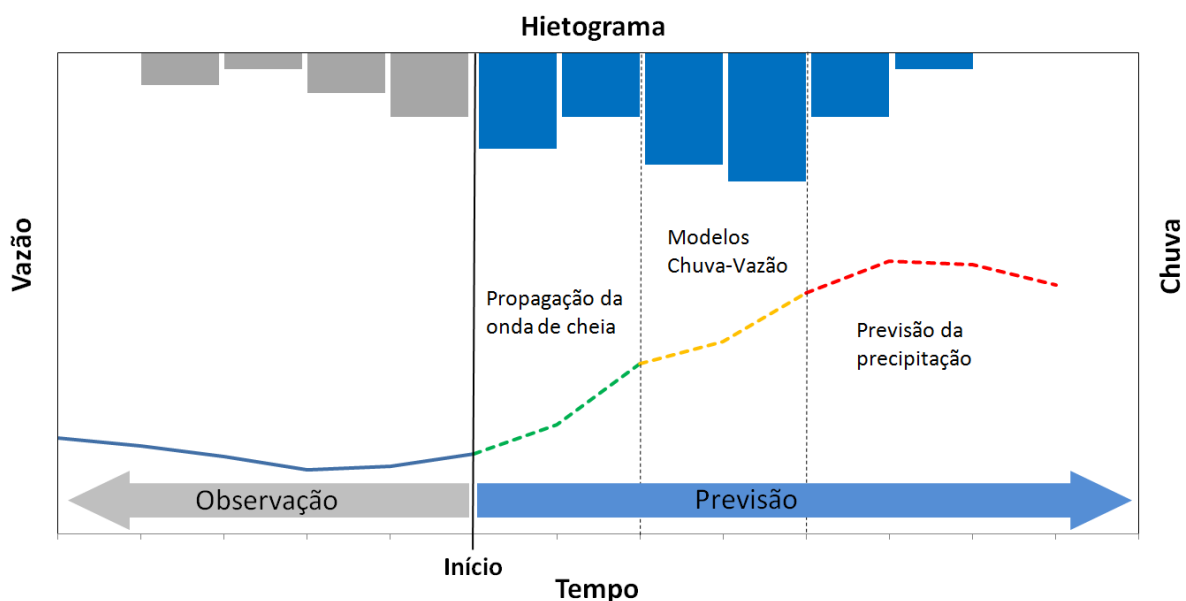


Figura 2.2 Horizontes de previsão de cheias dos métodos descritos no trabalho em relação a uma determinada data de início da previsão.

Os métodos baseados na propagação da onda de cheia geralmente têm resultados mais precisos, porém com antecedência limitada ao tempo de viagem da propagação da onda de cheia no canal, ao passo que os modelos baseados na chuva observada (chuva – vazão), limitam-se ao tempo de resposta da bacia. A utilização da precipitação prevista é uma forma de estender a previsão dos modelos chuva – vazão para além do tempo de resposta da bacia.

De forma geral, a previsão de cheias através de modelos chuva – vazão pode ser feita mediante sistemas que combinam modelos hidrológicos e hidrodinâmicos para simular a propagação de inundações ao longo da rede de drenagem de uma bacia hidrográfica. Dependendo da complexidade do modelo, estas ferramentas dependem de dados meteorológicos de precipitação, evaporação, temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento; os quais podem ser obtidos através de fontes de informação, tais como de: estações meteorológicas, estações pluviométricas, radares meteorológicos, e, também, a partir de resultados de simulações com modelos atmosféricos.

Aplicações hidrológicas para previsão de cheias em curto e longo prazo vêm sendo feitas a partir do uso de modelos hidrológicos de grandes bacias acoplados, sem retroalimentação (também chamado de acoplamento *off-line*), a modelos numéricos de previsão de tempo globais ou regionais. Desta forma, o período de previsão dos modelos hidrológicos é ampliado e, apesar das incertezas dos produtos gerados, muitos trabalhos vêm sendo feitos para viabilizar a previsão de cheias usando estes métodos (DE ROO et al., 2003; GOUWEELEEUW et al., 2005; HE et al., 2009; LU et al., 2008).

A precipitação é a variável meteorológica que mais tem influência em modelagem hidrológica e, embora a incerteza na estimativa da precipitação possa resultar em erros significativos na escala das aplicações hidrológicas e na previsão de cheias (BRAVO et al., 2009; HARRIS; HOSSAIN, 2008; PAPPENBERGER et al., 2005; SANGATI; BORGA, 2009), a incorporação de previsões numéricas meteorológicas por conjunto em modelos hidrológicos (também conhecidas como previsões de vazão por conjuntos ou H-EPS, do inglês *Hydrological Ensemble Prediction System*) é atraente, devido à possibilidade de estender a previsão de vazão de algumas horas até dias, ao mesmo tempo em que introduz uma maneira de levar em consideração a incerteza da previsão de precipitação (CLOKE; PAPPENBERGER, 2009a; OLSSON; LINDSTRÖM, 2008; SCHAAKE et al., 2006a), ampliando a capacidade de gerenciamento de risco.

Geralmente, as previsões numéricas de tempo por conjuntos ou Sistema de Previsão por Conjuntos (*EPS-Ensemble Prediction System*) consistem em uma previsão central ou de controle e um conjunto de previsões obtidas a partir da perturbação das condições iniciais (previsões perturbadas) (CLOKE; PAPPENBERGER, 2009b). A Figura 2.3 ilustra um exemplo de EPS para um evento de inundação.

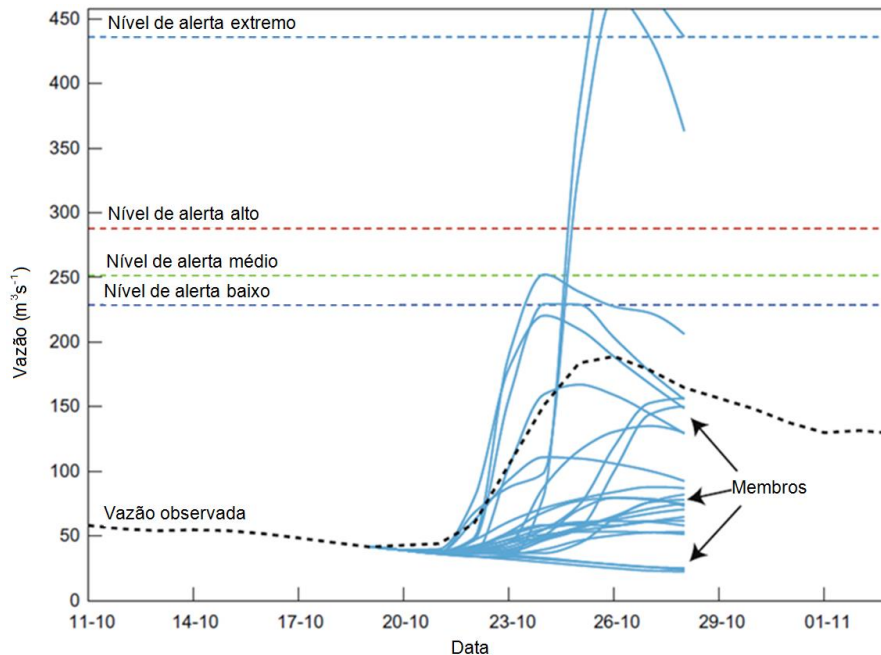


Figura 2.3 Exemplo de EPS hidrológico para evento de inundação, a linha azul mostra a descarga prevista para cada previsão, as linhas pontilhadas mostram o dado observado (cor preta) e também 4 níveis de alerta (linhas horizontais).

Fonte: Adaptado de Cloke e Pappenberger (2009b).

Os EPS podem também ser regionais, usando condições de contorno obtidas de EPS globais. EPS globais são produzidos, por exemplo, no Centro Europeu para Previsão de Tempo em Médio Prazo (*European Center for Medium-Range Weather Forecast - ECMWF*) e no Serviço Nacional de Meteorologia dos Estados Unidos da NOAA (*National Weather Service-NOAA/NWS*). Um exemplo de EPS regional é o Consórcio para Modelagem em Pequena Escala – Sistema de Previsão por Conjunto para área limitada (*Consortium for Small-Scale Modelling – Limited-area Ensemble Prediction System- COSMO-LEPS*). Exemplos de instituições que usam EPS como dados de entrada para melhorar a previsão de cheias são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Exemplos de instituições que utilizam as técnicas EPS para previsão de cheias.

Centro de Previsão	EPS usado
Sistema Europeu de Alerta de Enchente (EFAS)	ECMWF e COSMO-LEPS
Projeto Geogia-Tech/Bangladesh	ECMWF
Serviço Hidrológico Finlandês	ECMWF
Serviço Hidro-Meteorológico Sueco	ECMWF
Serviço de Previsão Hidrológica Avançada (AHPS) da NOAA-USA	NOAA/NWS
MAP Fase D (Região dos Alpes)/Suíça	COSMO-LEPS
Vituki (Hungria)	ECMWF
Rijkswaterstaat (Holanda)	ECMWF, COSMO-LEPS
Instituto Real Meteorológico de Bélgica	ECMWF
Vlaamse Milieumaatschappij (Bélgica)	ECMWF
Météo France	ECMWF e Argepe EPS
Centro de Previsão de Enchente de Bavária	COSMO-LEPS

Fonte: Adaptado de Cloke e Pappenberger (2009b).

Neste contexto, destaca-se o projeto de cooperação internacional denominado Experimento de Previsão Hidrológica por Conjuntos (*Hydrological Ensemble Prediction Experiment - HEPEX*), criado para investigar a melhor forma de produzir, comunicar e utilizar as previsões EPS em modelos hidrológicos (SCHAAKE et al., 2006b). O HEPEX busca responder às seguintes questões: (a) quais as adaptações necessárias para o uso de EPS meteorológicos com EPS hidrológicos; (b) as modificações nos sistemas atuais de previsão hidrológica para atender uma maior quantidade de fontes de incertezas dentro de uma previsão; e (c) qual a melhor maneira de aplicar previsões EPS na gestão de emergência e dos recursos hídricos para tomar decisões relevantes para a saúde, economia e segurança pública (SCHAAKE et al., 2006b).

Assim, previsões de vazão por conjuntos têm sido usadas para antecipar cheias em várias regiões (BAO et al., 2011; BARTHOLMES; TODINI, 2005; FAN et al., 2014; FERNÁNDEZ BOU; DE SÁ; CATALDI, 2015; LU et al., 2008; THIEMIG et al., 2010; YOUNIS; ANQUETIN; THIELEN, 2008). Ainda, H-EPSs são utilizados para a previsão e alerta de cheias de forma operacional e pré-operacional, a maior parte destes em países desenvolvidos, como o sistema de previsão hidrológica avançada AHPS (*Advanced Hydrologic Prediction Service*) nos Estados Unidos (DEMARGNE et al., 2014; MCENERY et al., 2005) e o sistema europeu para alerta de inundação EFAS (*European Flood Awareness System*) (ALFIERI et al., 2014; BARTHOLMES et al., 2009; THIELEN et al., 2009), e sistemas nacionais em

alguns países europeus usados para simular bacias menores com tempos de resposta rápidos (DAUPRAS et al., 2015; ROMANG et al., 2011; WERNER et al., 2009). Na escala global, destaca-se o sistema de alerta de inundação global GloFAS (*Global Flood Awareness System*), que se encontra operacional desde 2011 e tem mostrado resultados promissores para monitoramento de grandes bacias com eventos de inundações graduais (ALFIERI et al., 2013). Uma das questões centrais sobre aplicações hidrológicas em grandes bacias está na dificuldade de representar todos os processos hidrológicos na macroescala (SILVA; EWEN, 2000).

No Brasil, os estudos de previsões de vazão por conjunto focam, na sua maior parte, grandes bacias, e a ênfase dos mesmos está concentrada em duas frentes: aqueles dirigidos ao gerenciamento de reservatórios (BRAVO et al., 2009; COLLISCHONN et al., 2005, 2007a; FAN et al., 2014; MOHOR et al., 2015) e os voltados ao impacto das mudanças climáticas (MOHOR et al., 2015; NÓBREGA et al., 2011; SIQUEIRA-JÚNIOR; TOMASELLA; RODRIGUEZ, 2015). Aplicações de previsão de vazão por conjunto para previsão de cheias com foco no gerenciamento do risco de desastre (ver, por exemplo, DUARTE; CARAM; TOMASELLA, 2014; GONÇALVES et al., 2014; MELLER et al., 2014) são escassas e recentes, sendo que, em geral, os sistemas de previsão e alerta de cheias usados no país são baseados em modelos simplificados de propagação do escoamento na rede de drenagem (onda de cheia) ou modelos estocásticos. Estes modelos, ao não utilizar informações de precipitação prevista, têm capacidade limitada em termos de tempo de antecedência para subsidiar a emissão de alertas (CASTILHO; OLIVEIRA, 2001; CORDERO; MOMO; SEVERO, 2011; GOMES SOARES; GHIZONI TEIVE, 2015; PEDROLLO et al., 2011).

2.4. Limitações dos modelos hidrológicos

De forma geral, a modelagem hidrológica tem por objetivo representar os processos de superfície do ciclo da água, em que a bacia hidrográfica é o objeto que delimita a maioria dos estudos de hidrologia (TUCCI, 2005). Neste contexto, o uso de modelos numéricos de previsão de tempo globais ou regionais como dado de entrada para modelos hidrológicos só é viável numa escala intermediária; por este motivo, grande parte das aplicações integradas são voltadas a modelos hidrológicos de grandes bacias. Segundo Frakes & Yu (1999), o principal desafio neste sentido, está na solução dos problemas de incompatibilidade de unidades, de

escalas temporais e espaciais. A Figura 2.4 ilustra o conceito dimensional de escala nas diferentes disciplinas que envolvem a hidrologia.

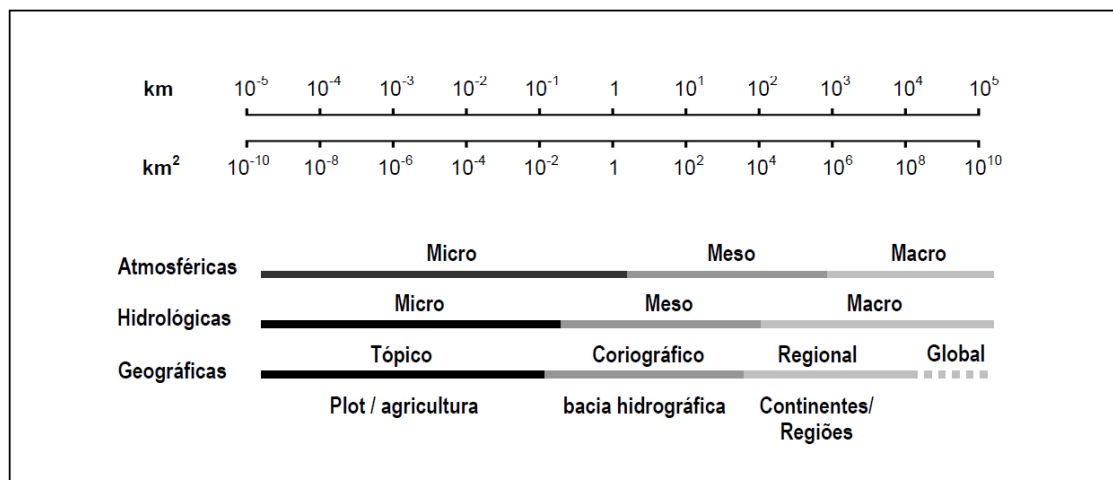


Figura 2.4 Classificação das escalas nas ciências atmosféricas, hidrológicas e geográficas.

Fonte: Silva e Ewen (2000)

Uma das maiores dificuldades no desenvolvimento de modelos hidrológicos de macroescala está relacionada à representação realista dos processos hidrológicos ao longo da bacia hidrográfica (SILVA; EWEN, 2000). Adicionalmente, Beven (2001) levantou a questão sobre até que ponto tais modelos podem representar a realidade com suas aproximações necessárias dos processos e parâmetros na escala de trabalho do modelo. Os principais problemas dos modelos hidrológicos na representação dos processos de superfície podem ser evidenciados abordando as questões específicas a seguir: (a) não-linearidade, (b) o problema da escala, (c) condição inicial de umidade do solo, (d) a singularidade de cada bacia, (e) as incertezas dos parâmetros da modelagem e os dados de entrada.

O comportamento não-linear dos processos hidrológicos torna matematicamente mais complexa a modelagem. Sistemas não-lineares são sensíveis às condições iniciais e de contorno, de forma que os resultados muitas vezes apresentam um comportamento caótico (BEVEN, 2001; ZEHE; BLÖSCHL, 2004). Beven (2001) destacou que um pequeno erro no dado inicial de entrada, faz com que o modelo de um sistema não seja capaz de reproduzir corretamente os extremos da distribuição das variáveis de saída, tanto para a escala de curto quanto de longo prazo.

Há uma inter-relação entre a escala, a não-linearidade e a complexidade de um modelo hidrológico. O termo “escala” pode se referir à escala de observação, escala do processo ou escala de modelação (BLÖSCHL; SIVAPALAN, 1995). A representação dos processos em diferentes escalas apresenta dificuldades como a heterogeneidade espacial, a incerteza nos dados de entrada, a dificuldade de representar os processos relevantes da microescala em outras escalas e a dependência com a escala de várias relações matemáticas, entre outras (MENDIONDO et al., 1997; SILVA; EWEN, 2000).

A condição inicial de umidade do solo exerce grande influência na probabilidade de ocorrência de enchentes, podendo até ser utilizada, em conjunto com a estimativa da precipitação, como critério de estimativa de risco de inundação (NORBIATO et al., 2008). Consequentemente, uma melhor determinação deste parâmetro pelos modelos contribui à diminuição da incerteza da previsão de enchentes (BERTHET et al., 2009). Ainda, o erro dos modelos na determinação da umidade do solo pode ser mais importante nos casos em que a heterogeneidade do solo na escala de sub-grade é significativa, como frequentemente acontece na macroescala (LIANG; XIE, 2001).

Quando um modelo apresenta bons resultados em sua aplicação para uma bacia hidrográfica, isto não significa que ele tenha a mesma eficiência em outra, devido à singularidade de cada bacia. Assim, algumas características particulares de cada bacia hidrográfica não são adequadamente representadas pelos modelos. A questão da singularidade deve ser levada mais em conta no desenvolvimento da hidrologia (BEVEN, 2001).

Incertezas, provenientes tanto dos parâmetros da modelagem quanto dos dados de entrada, podem ter uma grande influência no resultado final do modelo hidrológico (ARDUINO; REGGIANI; TODINI, 2005; YOUNIS; ANQUETIN; THIELEN, 2008). Os parâmetros usados pelos modelos com frequência condensam num único valor as características de uma célula da grade (heterogeneidade espacial na escala sub-grade) e, às vezes, são obtidos de maneira empírica através do uso de dados de outras localidades ou em outras condições. Por outra parte, os dados de entrada são também sujeitos a erros, às vezes pela heterogeneidade espacial na escala sub-grade (como é o caso de muitos dados de superfície) (LIANG; XIE, 2001), ou também, devido à própria natureza não-linear do dado de entrada, como as previsões atmosféricas. Para estimar as incertezas dadas pelo próprio modelo existem técnicas como a estimação generalizada da probabilidade de incerteza, consistente em uma análise baseada na técnica de Monte-Carlo dos possíveis valores que podem possuir os parâmetros

para que o resultado final do modelo se encontre no intervalo esperado pelas observações (ARDUINO; REGGIANI; TODINI, 2005; CLOKE; PAPPENBERGER, 2009b; DEMERITT et al., 2007).

2.5. O modelo de previsão numérica “Eta”

O modelo de previsão numérica “Eta”, operacional no Centro Meteorológico Nacional dos Estados Unidos (*NMC-National Meteorological Center*) desde 1994, mostrou-se, já desde as primeiras versões, capaz de capturar circulações de pequena escala ocasionadas seja por orografia ou pela dinâmica interna da atmosfera (BLACK, 1994). Este modelo foi incorporado à previsão operacional do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – CPTEC/INPE em 1996 com o intuito de prever a curto prazo e com maior detalhamento alguns fenômenos como tempestades severas, frentes, orografia, entre outros (CHOU, 1996) e, posteriormente, passou a ser utilizado também para previsão estendida (CHOU; NUNES, 2000).

O modelo utiliza a chamada coordenada vertical “Eta” (η), desenvolvida por Mesinger (1984), normalizada e baseada na pressão atmosférica em dada altura, a pressão em superfície e no topo do modelo, e a elevação do terreno (topografia) (BLACK, 1994). A vantagem do uso desta coordenada, em comparação com a coordenada “sigma”, é dada pela redução dos erros no cálculo de variáveis obtidas a partir de derivadas horizontais, usualmente significativos em regiões de topografia íngreme (CHOU; NUNES, 2000). A grade horizontal é do tipo Arakawa E, e as versões operacionais no CPTEC para toda América do Sul possuem resolução horizontal de 40 e 15 km, enquanto na vertical, o modelo possui nestas versões 38 camadas, estendendo-se até 50 mb; a espessura da primeira camada (perto da superfície) é 20 metros, aumentando com a altura (CHOU, 1996). A topografia é representada em forma de degraus cujos topos coincidem com a altura das camadas.

O modelo “Eta” inclui uma representação completa dos processos físicos. A convecção pode ser parametrizada, seguindo o esquema de Betts-Miller modificado por Janjic (JANJIC, 1994), ou explícita (ZHAO; CARR, 1997). Os processos turbulentos são equacionados através do esquema de Mellor e Yamada 2.5 (1982) para energia cinética turbulenta e fluxos verticais. A radiação inclui esquemas para radiação de onda curta e de onda longa, segundo Lacis e Hansen (1974) e Fels e Schwarzkopf (1975), respectivamente. A formulação do

escoamento de superfície segue a abordagem hidrológica para a escala sub-grade proposta por Chen et al. (1997). Mais detalhes do modelo podem ser encontrados em Black (1994), Chou (1996) e no apêndice B de Pielke (2002).

Seluchi, Chou e Gramani (2011) mostraram a capacidade do modelo “Eta” em capturar os aspectos mais relevantes na condição da atmosfera para um evento de precipitação intensa na Serra do Mar. Neste estudo abordou-se também a relação da topografia, mostrando diferenças significativas nos totais de precipitação resultantes de uma simplificação da mesma, assim como o padrão de precipitação não é modificado significativamente ao aumentar a resolução de 40 km para 20 km; no entanto, algumas feições são mais bem representadas na versão com melhor resolução.

Resultados de aplicação de uma versão do modelo “Eta” com resolução de 5km, para o ano 2008, mostraram que os totais de precipitação mensal foram bem previstos em vários municípios localizados na região da Serra do Mar pertencente ao Estado de São Paulo; em relação à precipitação diária, foi superestimada a frequência de ocorrência de eventos de chuva, apresentando mesmo assim um índice de acerto de 90% (DERECZYNSKI et al., 2010).

Um Sistema de Predição por Conjuntos em Curto Prazo (*Short-Range Ensemble Prediction - SREP*) para a América do Sul, baseado no modelo “Eta”, foi desenvolvido no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) para melhorar a informação probabilística sobre a previsão oferecida. O SREP baseado no “Eta” usando uma resolução horizontal de 10 km foi aplicado à previsão de quatro casos de ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul), que resultaram em eventos de fortes chuvas, estas destacadas no trabalho de Bustamante e Chou (2009); a comparação entre o uso de condições iniciais e de fronteira obtidas usando o EPS do CPTEC a partir da perturbação dos campos de temperatura e componentes do vento, e aquelas obtidas perturbando adicionalmente as condições de umidade, mostrou que a inclusão da perturbação da umidade no EPS não aumentou o erro médio da previsão e sim representou uma melhoria significativa na qualidade da mesma (BUSTAMANTE; CHOU, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

A área de estudo abrange a bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu (Figura 3.1), considerando como ponto final o encontro do rio com o Oceano Atlântico no município de Itajaí, Estado de Santa Catarina. A bacia, que abrange uma área de drenagem com aproximadamente 15.500 km², situa-se entre as coordenadas 26°22'30" e 27°52'30" de latitude Sul e 48°38'49" e 50°21'22" de longitude Oeste. Atualmente, vivem na região da bacia pouco mais de um milhão de habitantes, distribuídos em 49 municípios (47 com sede dentro da bacia), onde aproximadamente 70% destes municípios têm áreas construídas nas proximidades do curso principal do rio Itajaí-Açu, ou seus afluentes.

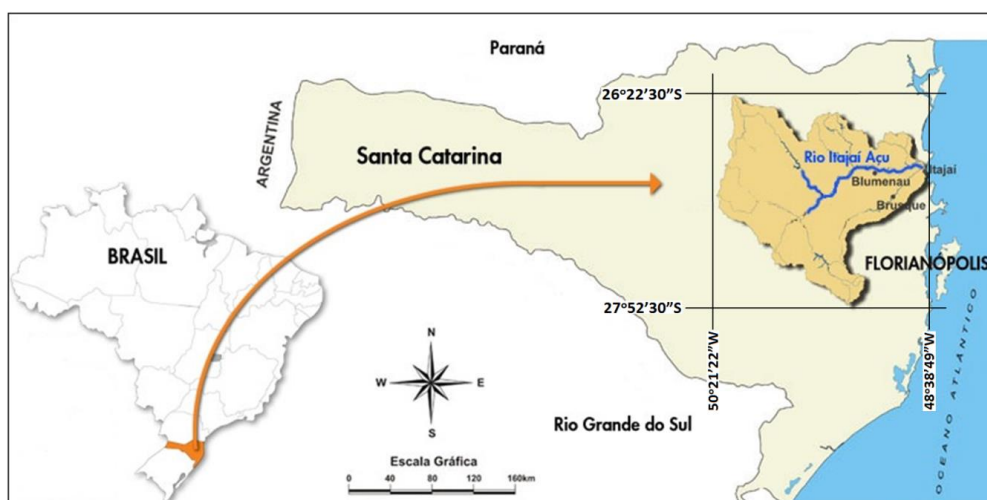


Figura 3.1 Localização da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu em Santa Catarina.

Fonte: Adaptado de www.usinasaltopilao.com.br/obra/obra.asp

O rio Itajaí-Açu é formado pela junção dos rios Itajaí do Oeste e Itajaí do Sul, no município de Rio do Sul, e seus principais afluentes são o rio Itajaí do Norte, em Ibirama, o rio Benedito, em Indaial, o rio Alves, em Ilhota, e o rio Itajaí-Mirim, que aponta na bacia estuária a 9 km da barra, no município de Itajaí. O regime hidrológico do rio Itajaí-Açu é altamente variável, com registros históricos de vazão, no posto de Blumenau, variando de 10 m³s⁻¹ até mais de 5000 m³s⁻¹, e volume médio anual de chuvas de aproximadamente 1500 mm/ano (INMET, 2009). O clima predominante na região é temperado, do tipo “Cfa” segundo a classificação de Köppen (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007), com verões quentes e sem estação seca definida.

A região do Vale do Itajaí apresenta várias condições que a tornam susceptível a desastres naturais associados a extremos hidrológicos, como a presença de vales encaixados com cotas que variam desde mais de 1000 metros de altitude nas cabeceiras até 20 metros em Blumenau (início do Baixo Itajaí), presença de solos CAMBISSOLOS e NEOSSOLOS associados a formações rochosas, e, também, um histórico de urbanização baseada na ocupação das áreas ribeirinhas ao rio Itajaí-Açu e seus afluentes. A Figura 3.2 apresenta o perfil vertical dos principais rios da região, com declividades que variam, em média, entre 1,06% nas cabeceiras e 0,03% na parte mais baixa (SCHETTINI, 2002). As oscilações de nível provocadas pela onda de maré do Oceano Atlântico podem ser sentidas até o município de Blumenau (MEDEIROS, 2003).

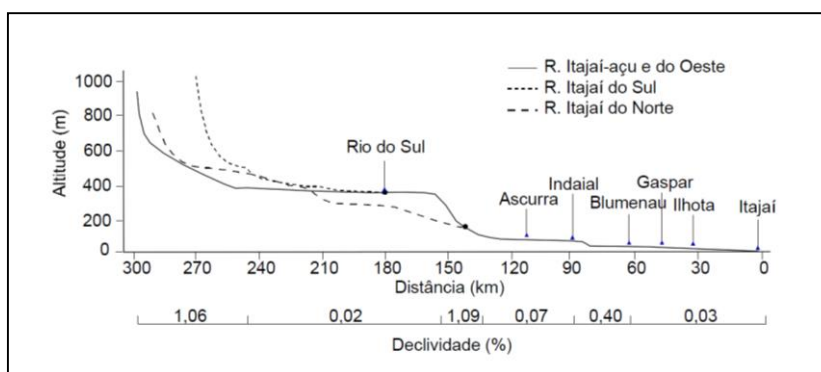


Figura 3.2 Perfil de declividade dos principais rios do Vale do Itajaí. Os valores de declividade são para o rio Itajaí-Açu e do Oeste.

Fonte: Schettini (2002)

Com o intuito de conter as cheias na região, muitas medidas estruturais foram implantadas ao longo dos anos, dentre elas, três barragens foram concebidas na década de 60 pelo governo federal (Figura 3.3), a partir de um plano de contenção de águas executado pelo DNOS (Departamento Nacional de Obras e Saneamento, extinto em 1990). A Barragem Oeste (Taió) foi concluída em 1973 com capacidade de $83 \times 10^6 \text{ m}^3$, enquanto a Barragem Sul (Ituporanga) foi finalizada em 1975 com capacidade de $93,5 \times 10^6 \text{ m}^3$. A construção da Barragem Norte (José Boiteux), com capacidade de armazenamento de $357 \times 10^6 \text{ m}^3$, foi concluída em 1992. As informações de operação das barragens podem ser monitoradas em tempo real pelo site da Defesa Civil do município de Rio do Sul (RIO DO OESTE -SC, 2015). Estas barragens têm mostrado capacidade para atenuar os picos das ondas de cheias em eventos de menor período de retorno, mas não para evitar eventos de grande magnitude. Atualmente, a barragem Oeste (município de Taió) e a barragem Sul (município de Ituporanga) estão em fase de ampliação.



Figura 3.3 Barragens de contenção de cheias da bacia do Itajaí, SC.

Fonte: www.furb.br/site/arquivos/741401-454195/bacia_itajai.jpg

3.2. Dados utilizados na modelagem hidrológica e nas previsões de vazão

Para a aplicação do modelo hidrológico foram utilizados os seguintes dados:

- modelo numérico do terreno (Figura 3.4a), derivado da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução de 90 metros (FARR et al., 2007);
- mapeamento de solos do Estado de Santa Catarina, na escala 1:250.000 (EMBRAPA, 2004);
- mapa de uso e cobertura da terra, obtido do Mapeamento Temático Geral do Estado de SC (GEOAMBIENTE SENSORIAMENTO REMOTO LTDA., 2008; GOVERNO DE SANTA CATARINA, 2005), executado a partir de classificação digital de imagens LANDSAT-TM 5, com resolução espacial de 30 metros;
- séries históricas de dados diários de precipitação de 69 estações pluviométricas (Figura 3.4a) mantidas pela Agência Nacional das Águas (ANA), o Serviço Geológico do Brasil (CPRM), a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural

do Estado de Santa Catarina (EPAGRI), entre outros, obtidos no site do Hidroweb (ANA, 2015a);

- séries históricas de dados diários de vazão e resumo de descarga líquida de 12 postos pluviométricos obtidos, em parte, no Hidroweb (ANA, 2015a) e, a partir do ano de 2005, complementados com dados, média de 24 horas, obtidos a partir do processamento de dados da rede telemétrica, temporal de 15 minutos, disponíveis no site da ANA apenas para os postos de vazão de Brusque, Timbó Novo, Taió, Ituporanga, Rio do Sul Novo, Apiuna Regua Nova e Blumenau (ANA, 2015b);
- séries históricas das variáveis climatológicas da estação de Indaial, mantida pelo portal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET);
- conjunto de previsões meteorológicas obtido com o modelo meteorológico “Eta” com 5 configurações (membros) na resolução espacial de 5 km.

A Tabela 3.1 inclui uma breve descrição dos postos de vazão na área de estudo, enquanto a Figura 3.4 apresenta o mapa de localização das estações pluviométricas e o modelo de elevação na parte superior (a), e o mapa dos postos de vazão na parte inferior (b). A Tabela 3.2 apresenta a disponibilidade anual de dados de vazão em percentagem.

Tabela 3.1 Informações dos 12 postos de vazão utilizados no presente trabalho.

Sub-bacia	Código da ANA	Nome	Lat	Lon	Alt. (m)	Área de drenagem (km ²)
B1	83069900	Vila Nova	-27,311	-49,796	350	397
B2	83029900	Barragem Taio montante	-27,040	-50,124	398	648
B3	83892998	Botuverá- montante	-27,197	-49,088	79	794
B4	83900000	Brusque (PCD)	-27,106	-48,917	21	1210
B5	83345000	Barra do Prata	-26,698	-49,831	450	1430
B6	83677000	Timbó Novo	-26,830	-49,272	64	1600
B7	83050000	Taio	-27,113	-49,994	360	1570
B8	83250000	Ituporanga	-27,399	-49,606	370	1650
B9	83300200	Rio do Sul – Novo	-27,212	-49,632	350	5160
B10	83500000	Apiuna – Regua nova	-27,037	-49,388	93	9070
B11	83690000	Indaial	-26,891	-49,235	60	9850
B12	83800002	Blumenau	-26,919	-49,066	12	12200

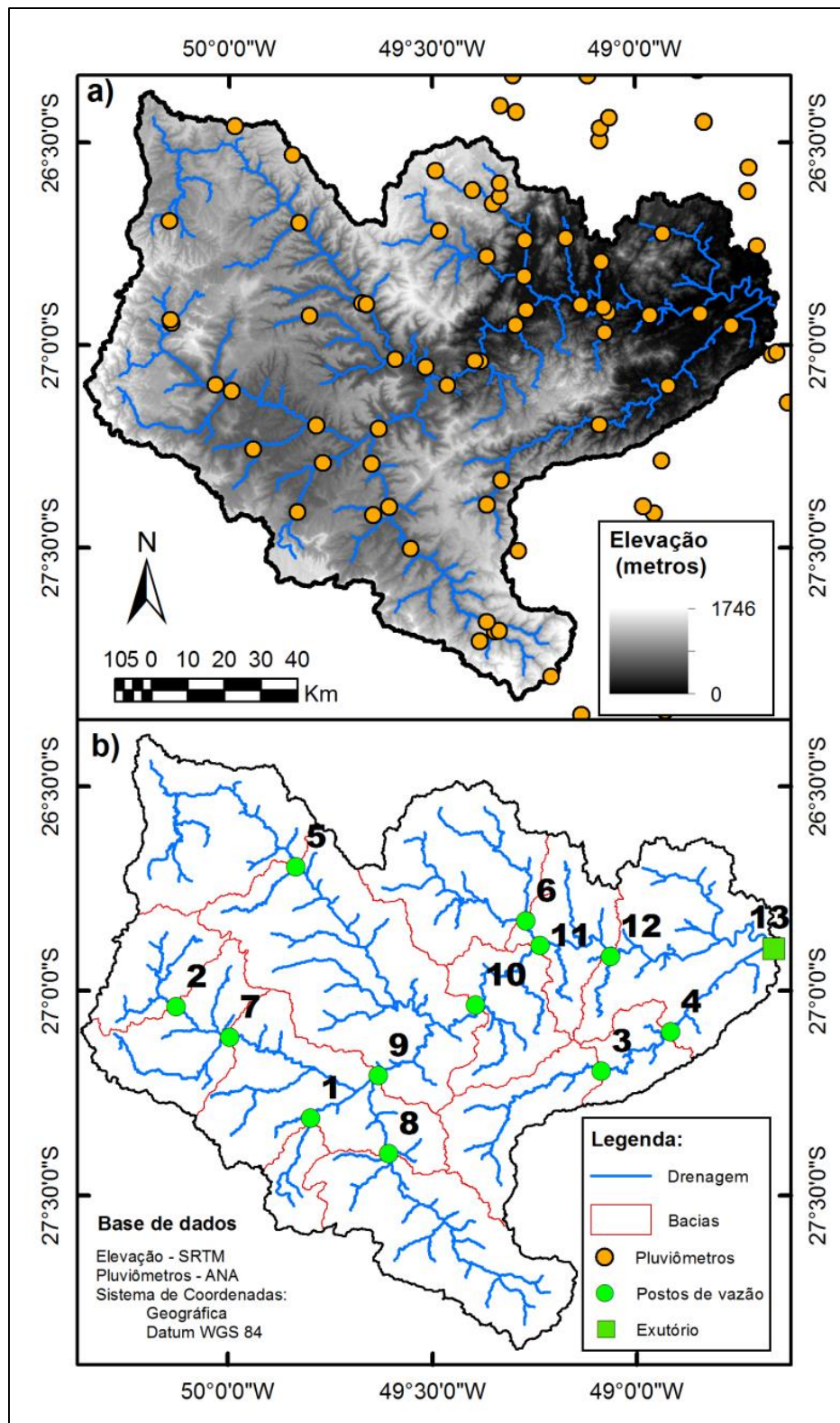


Figura 3.4 Mapa do modelo de elevação com a localização das estações pluviométricas (a), e dos postos de vazão (b), na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu.

Tabela 3.2 Disponibilidade de dados de vazão para cada uma das sub-bacias nas séries históricas do período de 1971 a 2014, em que os valores representam a percentagem de dados diários disponíveis em cada ano.

	Ano	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
Calibração	1971	0	0	0	100	0	0	100	100	0	0	100	100
	1972	0	0	0	100	0	0	100	100	0	0	76	100
	1973	0	0	0	94	0	0	100	100	0	0	100	100
	1974	0	0	0	100	0	0	100	100	0	0	100	100
	1975	0	0	0	100	0	0	100	100	0	0	100	100
	1976	0	0	0	100	0	0	100	100	0	0	100	100
	1977	0	0	0	100	12	0	100	100	0	0	100	99
	1978	0	0	0	100	100	0	100	100	62	0	100	100
	1979	0	0	0	100	100	0	100	100	100	0	100	97
	1980	0	0	0	100	100	0	100	100	100	0	100	67
	1981	0	0	0	100	100	0	100	100	100	0	100	52
	1982	0	0	0	100	100	0	100	100	100	0	100	100
	1983	0	0	0	100	100	0	98	100	87	0	100	67
	1984	22	50	0	69	100	0	100	100	100	0	94	100
	1985	100	100	0	100	100	0	100	100	100	0	100	100
	1986	100	100	62	100	100	0	100	100	100	0	78	100
	1987	100	100	100	100	100	0	100	100	100	0	96	100
	1988	100	100	100	100	100	0	100	100	100	0	100	100
	1989	100	100	100	100	100	33	99	100	100	0	100	100
	1990	100	100	100	0	92	100	100	100	100	0	100	41
	1991	100	100	100	0	100	100	100	100	100	0	100	19
	1992	100	100	89	0	100	100	100	100	100	0	83	62
	1993	100	100	100	0	100	100	100	100	100	0	100	100
	1994	100	100	100	0	100	100	100	100	100	0	100	100
	1995	84	100	81	84	100	100	100	100	67	25	100	97
	1996	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	93
	1997	100	100	100	96	100	100	92	100	100	100	100	98
	1998	100	92	100	100	100	100	100	92	100	100	100	100
	1999	100	92	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	2000	98	75	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98
2001	100	100	92	100	100	100	92	98	100	100	100	100	
2002	100	92	100	100	100	97	100	99	100	100	100	100	
2003	99	97	99	75	100	91	100	94	100	100	99	96	
2004	98	100	78	8	100	100	100	98	100	100	100	100	
2005	99	100	100	100	100	100	59	100	100	100	100	100	
2006	99	100	100	83	75	74	88	86	100	100	89	99	
2007	97	100	100	92	99	100	100	8	100	100	100	100	
2008	99	67	100	69	100	100	99	83	100	100	100	100	
2009	100	100	100	73	72	89	100	100	100	100	100	98	
Verificação	2010	99	90	100	0	100	99	93	100	100	100	100	100
	2011	100	71	92	44	92	88	98	99	100	100	92	100
	2012	100	100	95	100	84	100	100	100	100	100	0	100
	2013	99	93	100	100	87	100	100	100	100	100	42	100
	2014	88	91	83	100	59	75	98	92	100	75	75	99

Segundo o mapeamento de solos do Estado de Santa Catarina (EMBRAPA, 2004), a bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu apresenta uma grande variedade de tipos de solos, classificados para fins de planejamento agrônômico. Desta forma, os tipos de solos foram reagrupados de acordo com o potencial para gerar escoamento superficial de cada tipo de solo, considerando quatro categorias de escoamento (Figura 3.5a):

- Alto potencial de escoamento superficial: solos CAMBISSOLOS, CAMBISSOLO GLEICO, PODZOL e afloramentos rochosos;
- Médio potencial de escoamento superficial: solos LITOLICOS, PODZOLICO VERMELHO-AMARELO e SOLOS ALUVIAIS;
- Baixo potencial de escoamento superficial: LATOSSOLO BRUNO-VERMELHO, TERRA BRUNA ESTRUTURADA, AREIAS QUARTZOSAS MARINHAS, SOLOS ORGÂNICOS, TERRA BRUNA/ROXA ESTRUTURADA e DUNAS E AREIAS DAS PRAIAS;
- Solos de várzea: GLEI HÚMICO e GLEI POUCO HÚMICO.

O mapeamento de uso e cobertura da terra, obtido do Mapeamento Temático Geral do Estado de SC, também foi reagrupado para quatro categorias em função do potencial de gerar evapotranspiração e infiltração da água. A partir das classes originais, o agrupamento inclui as seguintes categorias (Figura 3.5b):

- Água: inclui todos os corpos d'água observados na resolução da imagem;
- Floresta: florestas em estágio inicial (pioneiro), médio ou avançado de regeneração e/ou primárias, reflorestamentos, vegetação de várzea ou restinga e mangues;
- Agricultura: áreas de culturas anuais, pastagens e campos naturais e áreas de solo exposto;
- Urbano: área urbanizada e/ou construída e áreas de mineração.

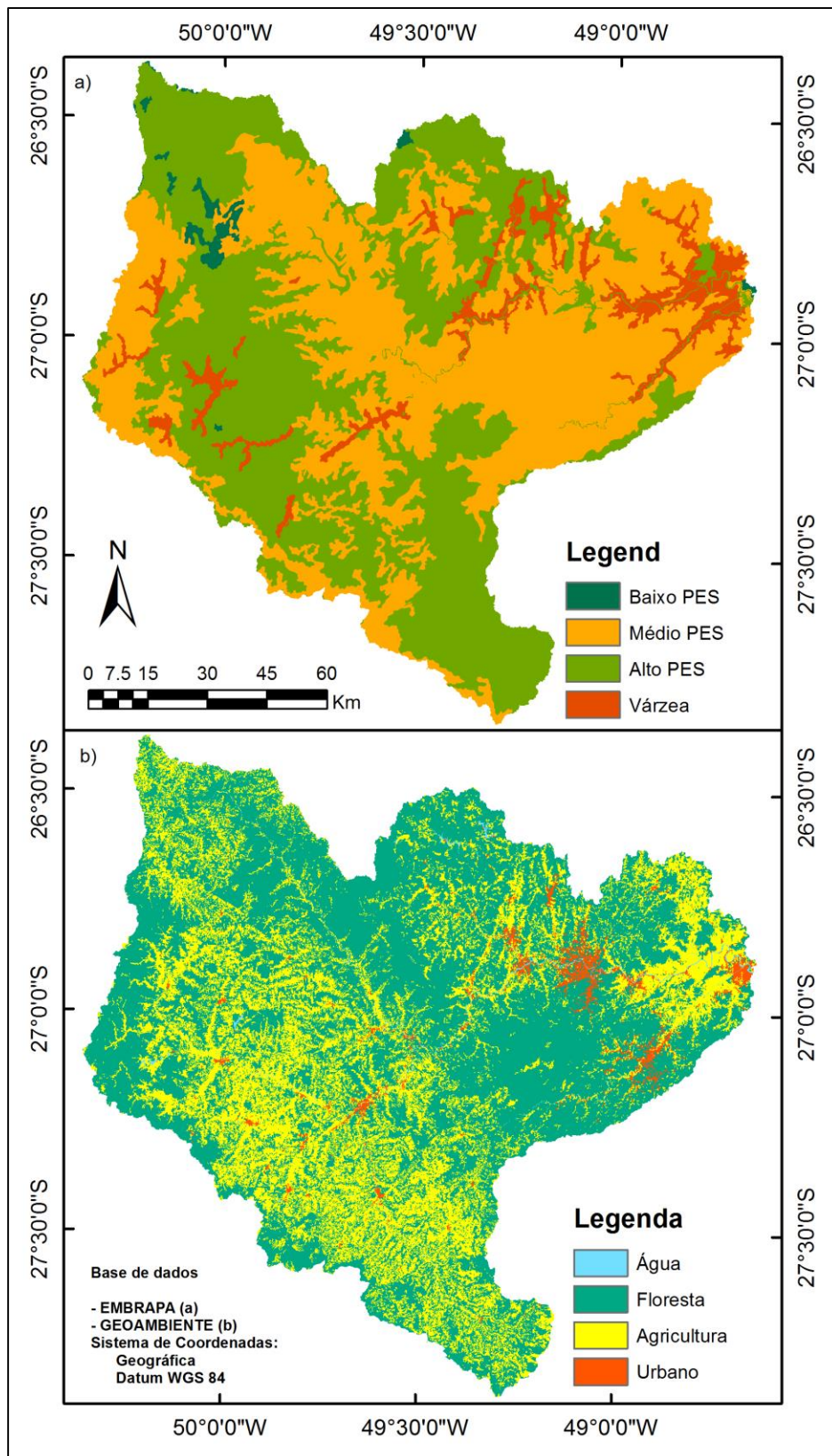


Figura 3.5 Mapas de solos (a) reclassificado para 4 classes de Potencial de Escoamento Superficial (PES), e mapa de uso e ocupação da terra na resolução espacial de 30 metros (b) reclassificado para 4 classes de uso, na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu.

Na escala de trabalho proposta, o agrupamento de classes por semelhanças nas características de importância hidrológica torna possível o processamento dos dados devido ao menor número de Unidades de Resposta Hidrológica (URH), que são o produto da combinação das diferentes categorias de solos e uso e cobertura da terra. Desta forma, o processamento de dados na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu teria 16 URHs, mas alguns grupos não existem, como por exemplo, as classes de solos combinadas com a categoria “água” ou com a categoria “urbano”, em que apenas os usos e ocupação da terra foram considerados. Assim, a modelagem hidrológica foi realizada considerando-se 10 URHs.

3.3. Metodologia

Inicialmente, o modelo hidrológico MHD-INPE, escolhido para este estudo, foi aplicado para a bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, com intervalo de tempo de 1 dia, considerando um período de calibração de 1971 a 2009 (39 anos) para 12 postos de vazão (Figura 3.4b) e verificado no período de 2010 a 2014. Ambos os períodos tiveram os dois primeiros anos descontados da série para os resultados estatísticos. Neste período foram utilizados dados diários de 69 estações pluviométricas com registros históricos de precipitação desde o ano de 1971 (Figura 3.4a). Posteriormente, a estimativa de cheias na bacia do rio Itajaí-Açu através da utilização de um conjunto de previsões numéricas de tempo integrado ao modelo hidrológico, foi avaliada em 12 postos de vazão, considerando-se 10 eventos com ocorrência de chuvas na região, no período compreendido entre o segundo semestre de 2013 até o final de 2014 (período em que o CEMADEN passou a executar rodadas do conjunto de previsões do modelo numérico “Eta” na resolução de 5 km para aplicação em pesquisas na área de hidrologia e áreas afins).

Para abranger todo o período de ascensão e recessão de um evento de cheia, delimitou-se um período com duração de 10 dias em torno de cada evento, com base nos picos de vazão observados no posto de Blumenau (Figura 3.6), indicado como “12” na Figura 3.4 (b). Apesar da escolha dos eventos ter sido baseada nos picos de vazão observados no posto de Blumenau, tais eventos também causaram elevação do nível (com intensidades diferentes) na maioria dos postos definidos para o estudo. No Apêndice C encontram-se os hidrogramas observados de todos os postos de vazão para o período de avaliação das previsões de vazão. Entende-se que um evento de precipitação na bacia hidrográfica, originado pela atuação de um sistema de tempo sobre na região, com período de duração de um ou mais dias, gera hidrogramas com

diferentes tempos de ascensão e recessão em cada posto de vazão estudado, e em momentos diferentes que dependem do tamanho da bacia hidrográfica a montante de cada posto de vazão, entre outros fatores. Por este motivo considerou-se 10 dias para cada evento.

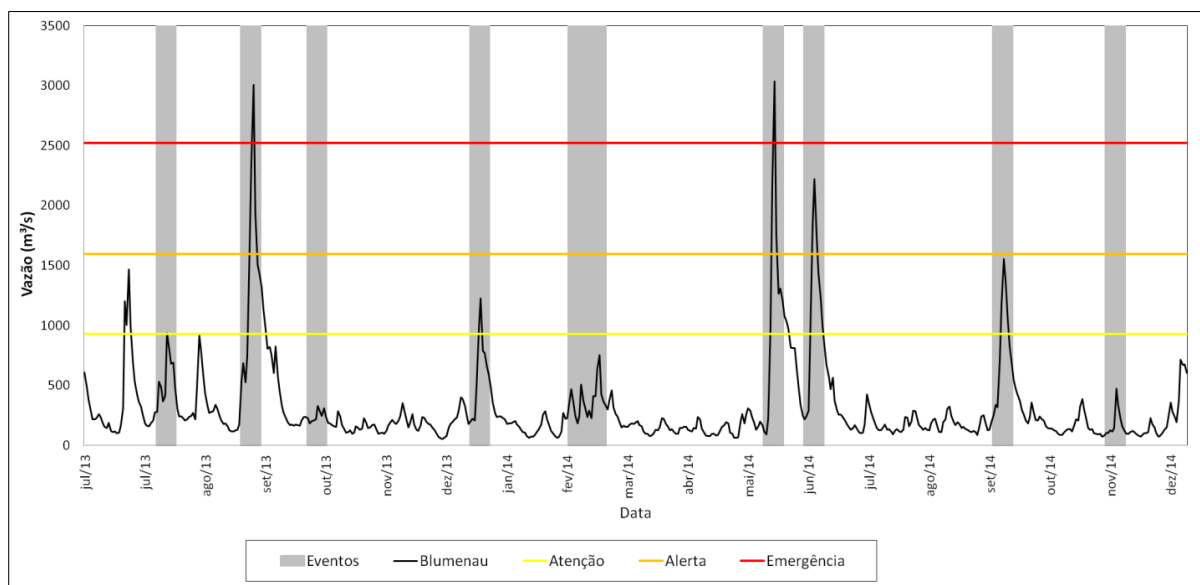


Figura 3.6 Série temporal de vazões diárias observadas no posto de Blumenau, SC, com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.

O conjunto de previsões de precipitação, bem como os dados de outras variáveis meteorológicas (pressão atmosférica, radiação solar, temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho e velocidade do vento) foram obtidos a partir do modelo numérico de previsão de tempo “Eta”, usando cinco diferentes configurações, combinando três esquemas de convecção, dois esquemas de microfísica e duas condições iniciais e de contorno, conforme descrito mais adiante. Para compatibilizar a entrada de dados no MHD-INPE, as saídas horárias do modelo meteorológico foram acumuladas em intervalos de 24 horas para a variável precipitação, enquanto que para as demais variáveis calculou-se as médias no mesmo período. Ambos os modelos foram executados na resolução espacial de 5 km. Os resultados foram avaliados para os 12 postos de vazão, porém somente 9 destes têm a informação de limiares referentes às cotas de atenção, alerta e emergência. A seguir, as etapas são descritas com maiores detalhamentos.

3.3.1. Modelo Hidrológico Distribuído MHD-INPE, metodologia de calibração e verificação

O modelo MHD – INPE (GONÇALVES; TOMASELLA; RODRIGUEZ, 2014; MOHOR et al., 2015; RODRIGUEZ; TOMASELLA, 2015; RODRIGUEZ, 2011) foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a partir de adaptações do Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisa Hidráulicas - MGB-IPH (COLLISCHONN, 2001; COLLISCHONN et al., 2007b). Ambos os modelos apresentam a mesma concepção, porém, as últimas versões do MGB-IPH utilizam uma subdivisão da bacia hidrográfica em pequenas bacias (chamadas de minibacias), enquanto a versão do MHD-INPE mantém a concepção de subdivisão original na forma de células quadradas. Além disso, foram realizadas modificações nas rotinas de estimativa de evaporação e de separação de fluxos no MHD-INPE (RODRIGUEZ; TOMASELLA, 2015; RODRIGUEZ, 2011).

A estrutura do MHD-INPE está dividida nos módulos: balanço de água no solo; evapotranspiração; escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula; e escoamento na rede de drenagem (Figura 3.7). O transporte de água entre células é realizado através de uma rede de canais, calculada seguindo a propagação de vazões de Muskingun – Cunge (CUNGE, 1969) para o escoamento na rede de drenagem até saída da bacia. Por sua vez, cada célula de grade é subdividida em unidades menores, chamadas de unidades de resposta hidrológica (URH), resultantes da combinação das diferentes categorias de solo e ocupação da terra presentes na célula. A equação de balanço hídrico é resolvida para cada unidade de resposta hidrológica e o fluxo total da célula é calculado como uma média ponderada pela área dos fluxos resultantes.

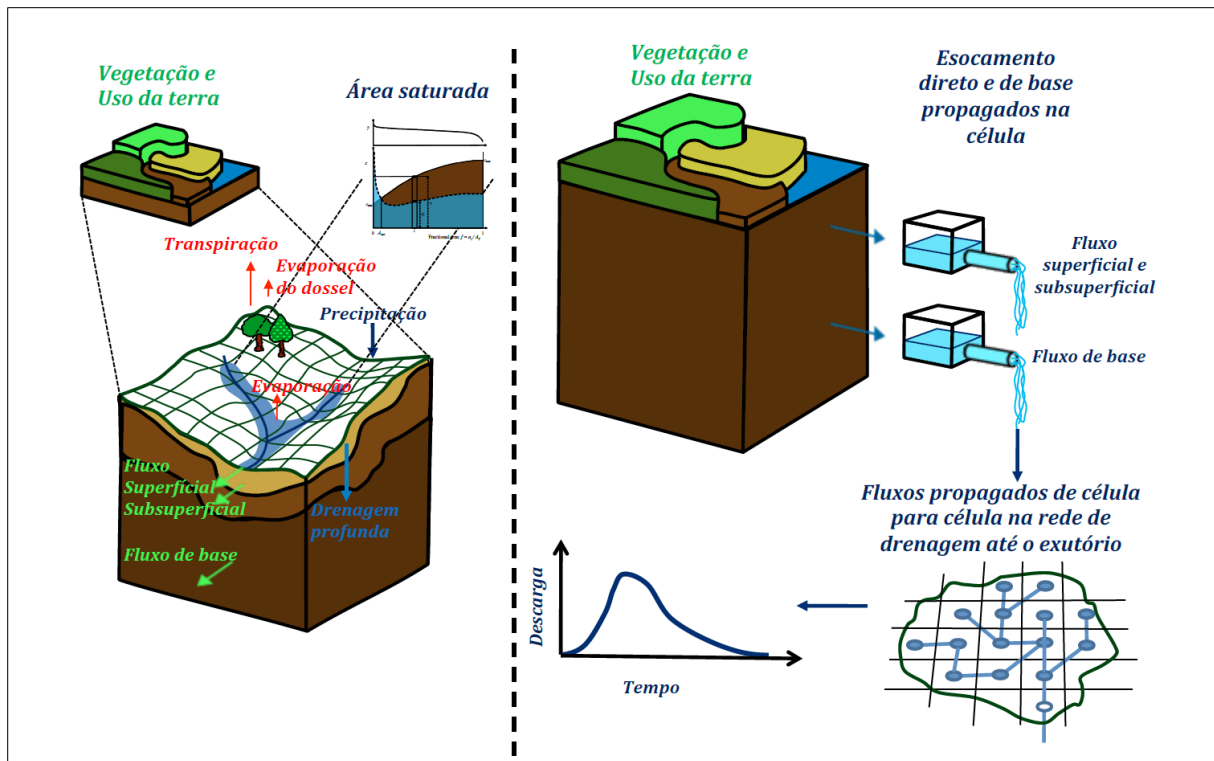


Figura 3.7 Ilustração das etapas de separação de escoamento (esquerda) e da propagação na rede de drenagem (direita) no modelo hidrológico MHD-INPE.

Fonte: Falck (2015)

O MHD-INPE utiliza três camadas verticais para simular a resposta hidrológica, denominadas camada superior, intermediária e inferior, conforme mostrado na Figura 3.8. O fluxo superficial da camada superior drena para a camada intermediária, que faz o fluxo vertical para a camada inferior. A camada intermediária não permite fluxos horizontais, e funciona como um reservatório de água para a vegetação com raízes muito profundas. A camada inferior é responsável pelo fluxo de base e de forma indireta, o fluxo superficial por excesso de saturação. A fim de representar os processos de geração de escoamento, a estimativa de separação dos fluxos combina a abordagem realizada a partir da combinação das formulações do modelo Xinanjiang (ZHAO, 1992; ZHAO; LIU, 1995) e do modelo TopModel (BEVEN; KIRKBY, 1979) (Figura 3.8). A seguir estes processos são discutidos em maior detalhe.

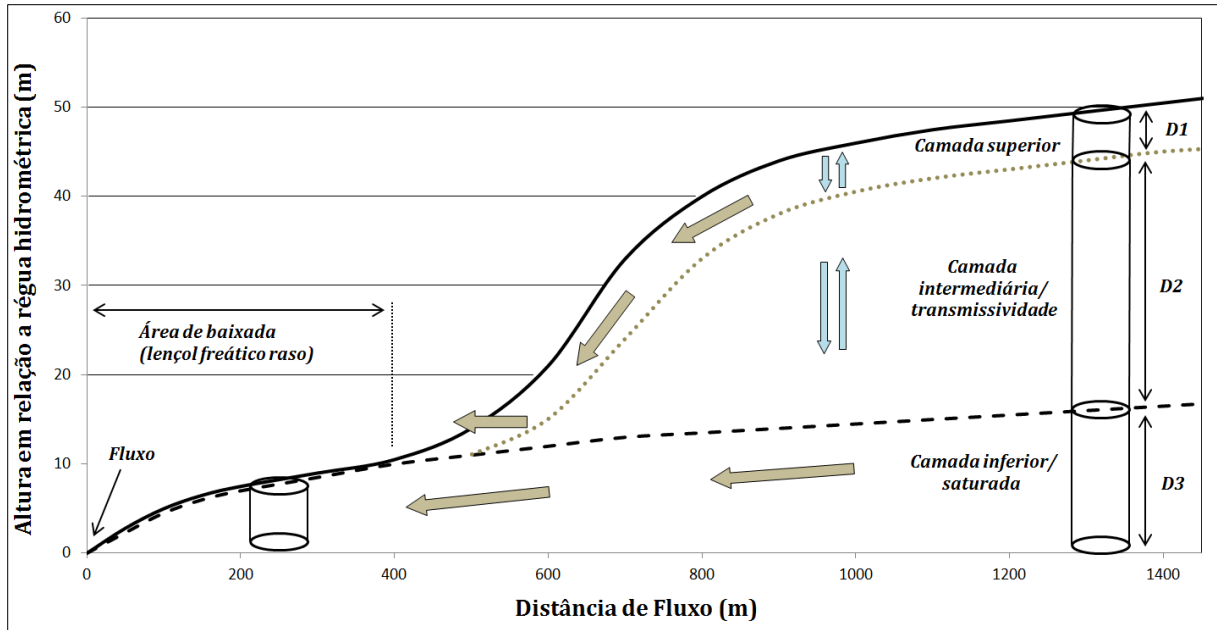


Figura 3.8 Balanço de água vertical no solo.

Fonte: Adaptado de Falck (2015)

O modelo MHD-INPE assume que cada unidade de grade é coberta por uma camada superior de solo espacialmente uniforme para considerar o retardo entre infiltração e recarga (Figura 3.8). Para condições de drenagem livre, o fluxo lateral na camada superior do solo, Q_{ss} , é proporcional à área à montante, e pode ser calculado como:

$$Q_{ss} = \frac{\alpha D_1 K_{ss} \tan \beta}{\lambda_\eta^\eta} \left(\frac{SS_t}{SS_{max}} \right)^\eta \quad (3.1)$$

Em que α é o coeficiente que considera a anisotropia do solo; D_1 a espessura da camada superior do solo; K_{ss} a condutividade hidráulica da camada superior do solo; $\tan \beta$ representa a declividade média na célula; η é o parâmetro de condutividade de Brooks e Corey (1964); λ_η é a área de contribuição o média por unidade de contorno elevada à potência η ; SS_{max} é a capacidade máxima de armazenamento da camada superior do solo, igual ao produto de D_1 e a porosidade do solo ϕ ; e, por fim, SS_t representa o armazenamento médio na célula no tempo t .

O valor médio da área de contribuição à montante por unidade de contorno para um perfil de transmissividade de tipo potência (IORGULESCU; MUSY, 1997), é estimado como uma média ponderada pela área da unidade de contorno A_t das contribuições à montante por unidade de contorno (λ_i), elevada à potência η :

$$\lambda_{\eta} = \frac{1}{A_t} \int_0^{A_t} \lambda_1^{\eta} d a_c \quad (3.2)$$

Uma vez descontado o fluxo lateral dado pela Equação 3.2, pode ser realizada uma estimativa de fluxo entre as duas camadas, Q_v , como:

$$Q_v = \frac{K_{ss}\lambda}{\lambda_{\eta}^{\eta}} \left(\frac{SS_t}{SS_{max}} \right)^{\eta} \left(1 - \frac{\alpha D_1}{\lambda} \right) \quad (3.3)$$

Em que λ representa a contribuição à montante por unidade de contorno.

Nos casos onde o sistema radicular desempenha um papel importante na manutenção da evaporação na estação seca, e para levar em consideração o retardo adicional, devido à recarga do aquífero de grande espessura, o modelo inclui uma camada intermediária, que recebe a drenagem da camada superior. A recarga do aquífero a partir desta camada é calculada segundo:

$$Q_r = K_{ss} \left(\frac{SR_t}{SR_{max}} \right)^{\eta} \quad (3.4)$$

Em que SR_t representa o armazenamento médio da camada intermediária na grade em cada passo de tempo, e SR_{max} a capacidade máxima de armazenamento na camada intermediária, calculada como o produto da espessura da camada intermediária D_2 e a porosidade do solo.

A formulação do modelo assume que a superfície do lençol freático é paralela à superfície, considerando uma variação não linear da transmissividade com a profundidade (BEVEN; KIRKBY, 1979; IORGULESCU; MUSY, 1997). Assim, a estimativa de fluxo de base da camada inferior, Q_{sub} , é calculada como:

$$Q_{sub} = \frac{T_{sub} \tan \beta}{\lambda_{\mu}^{\mu}} \left[1 - \frac{S_{max} - S_t}{S_{max}(1-\xi)} \right]^{\mu} \quad (3.5)$$

Em que foi considerando que o fluxo subterrâneo é máximo quando o armazenamento de água no solo é máximo; T_{sub} representa a transmissividade quando o lençol freático atinge a superfície; λ_{μ} representa a média na grade da área de contribuição à montante por unidade de contorno; μ determina a variação da transmissividade com a profundidade; S_{max} e S_t são, respectivamente, os valores máximo e médio do armazenamento na camada inferior do solo na célula no tempo t ; e por fim, ξ representa a razão do armazenamento na capacidade de campo. O armazenamento máximo na camada, S_{max} , é dado pelo produto da espessura média da camada saturada D_3 e a porosidade do solo.

O fluxo superficial por saturação, Q_{sof} , é calculado a partir da fração da área saturada, calculada a partir de um histograma da área de contribuição à montante da grade em cada passo do tempo.

As equações de fluxo superficial e sub-superficial geram taxas instantâneas que não consideram a transposição da água dentro da célula. A atenuação desses fluxos é realizada a partir do uso de reservatórios lineares semelhantes aos utilizados no modelo MGB-IPH, resultando em dois parâmetros adicionais para o retardo devido aos fluxos superficial (C_{sup}) e sub-superficial (C_{sub}).

A perda de água por interceptação é simulada seguindo a abordagem de Gash (GASH; LLOYD; LACHAUD, 1995). A captura de água das camadas do solo pelas raízes da vegetação é estimada segundo o esquema de distribuição de Jarvis (JARVIS, 1989). A evapotranspiração é calculada pelo método de Penmann-Monteith (MONTEITH, 1965), que combina a resistência aerodinâmica e a resistência ao fluxo de vapor pelas folhas do dossel da vegetação.

As características topográficas da bacia hidrográfica foram processadas no software TerraHidro – INPE (ABREU et al., 2012). Basicamente, o software cria células na resolução espacial escolhida (no caso, 5 km) com vetores que interligam o centroide de cada célula para representar a drenagem da bacia hidrográfica em baixa resolução. Este processo foi executado a partir do Modelo Numérico do Terreno (MNT) na resolução espacial de 90 metros, através de três passos em sequência para gerar as direções de fluxo, acumular as áreas a montante de cada ponto do MNT, e por fim, criar a rede de drenagem em alta resolução, que posteriormente teve a sua escala modificada (*upscaling*) para a baixa resolução (PAZ; COLLISCHONN, 2007).

Os seguintes parâmetros são calibrados, dentro de um intervalo de valores fisicamente plausíveis, para cada sub-bacia: D_1 , D_2 , D_3 , K_{ss} , α , T_{sub} , ξ , η , C_{sup} e C_{sub} . Esta calibração do modelo foi realizada para os 12 postos de vazão (dados diários), com dados referentes ao período de janeiro de 1971 a dezembro de 2009, seguindo o algoritmo genético mono-objetivo *Suffled Complex Evolution* e usando o parâmetro de eficiência de Nash-Sutcliffe das vazões (NASH) como função de avaliação (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992, 1994). Além do NASH, a qualidade da calibração foi avaliada considerando os seguintes parâmetros: o parâmetro de eficiência de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões (LNASH), o erro nos

volumes (ΔV) e a comparação entre a evapotranspiração calculada pelo modelo (ET_{cal}) e a estimada a partir da diferença entre o volume de chuva na bacia e a vazão observada no posto (ET_{obs}). A verificação do modelo, para os 12 postos de vazão utilizados na calibração, foi feita através de uma simulação para o período de janeiro de 2012 a dezembro de 2014, comparando-se os resultados estatísticos do NASH e LNASH.

3.3.2. Processamento dos dados meteorológicos

O valor da chuva diária, para cada célula de grade do modelo, foi obtido a partir da interpolação dos dados das estações pluviométricas disponíveis, atribuindo-se pesos de acordo com o inverso do quadrado da distância do centroide da célula de grade até as estações mais próximas. Todas as outras variáveis foram obtidas a partir da estação meteorológica instalada no município de Indaial (INMET), localizada dentro da bacia hidrográfica de estudo, uma vez que as estações meteorológicas mais próximas ao entorno da bacia, localizadas em Florianópolis, Lajes e Curitiba, apresentam características meteorológicas distintas daquelas da região de estudo, e a interpolação dos dados não representaram a meteorologia da região.

A temperatura do ar, a pressão atmosférica e a temperatura do ponto de orvalho foram extrapoladas de acordo com a altitude do terreno, adaptando-se a metodologia seguida por Dodson e Marks (1997) para regiões montanhosas. O método assume uma atmosfera estável e considera que a temperatura potencial não muda ao longo da bacia, de maneira que mudanças são devidas apenas à elevação do terreno (DODSON; MARKS, 1997).

A altitude média de cada célula do modelo hidrológico foi calculada a partir das cotas mínima e máxima dentro da célula (obtida do MNT), somando-se à cota mínima 0,35 da diferença entre as cotas máxima e mínima, para considerar o fato de que numa célula, em média, a área superficial das cotas menores predomina.

Na extrapolação da temperatura utilizou-se a equação para a variação da temperatura com a altitude, usando como referência a temperatura da estação meteorológica de Indaial (T_0), localizada a 86,13 metros de altitude:

$$T = T_0 - \gamma \Delta Z \quad (3.6)$$

em que T é a temperatura do ar de cada célula de grade, ΔZ é a diferença de altitude de cada célula em relação à estação de Indaial, a qual é negativa em regiões localizadas nas altitudes

abaixo da referência altimétrica de Indaial; e γ é o gradiente adiabático de temperatura, assumido como igual a $6,5 \text{ K km}^{-1}$.

A pressão atmosférica e o conteúdo de vapor de água de cada célula, em relação à estação de Indaial, foram calculados assumindo um perfil médio da atmosfera e uma escala característica de altura (H) de 7,5 km para a pressão atmosférica e 3,75 km para a razão de mistura de vapor de água:

$$p = p_0 e^{-\frac{\Delta Z}{H}} \quad ; \quad r = r_0 e^{-\frac{\Delta Z}{H}} \quad (3.7)$$

em que p e p_0 representam a pressão atmosférica na célula de grade e na estação de Indaial, respectivamente; r e r_0 correspondem à umidade específica na célula de grade e na estação de Indaial, respectivamente.

A temperatura do ponto de orvalho é calculada para cada célula a partir da temperatura e da umidade previamente interpoladas para a célula de grade. A radiação solar e a velocidade do vento foram consideradas iguais às da estação meteorológica de Indaial.

3.3.3. Conjunto de previsões do modelo meteorológico “Eta”

O conjunto de previsões do modelo regional de previsão numérica “Eta” (BLACK, 1994; MESINGER; BLACK, 1992) utilizados no presente trabalho (das variáveis chuva, temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho, pressão atmosférica, radiação solar e velocidade do vento), foi obtido a partir de 5 configurações (Tabela 3.3), combinando os esquemas de convecção de Betts-Miller-Janjic (JANJIC, 1994), Kain-Fritsch (KAIN J. S.; FRITSCH, 1990; KAIN; FRITSCH, 1993; KAIN, 2004) e Kain-Fritsch com fluxo de momentum (KAIN, 2004); os esquemas de microfísica de Zhao (ZHAO; CARR, 1997) e Ferrier (FERRIER et al., 2002); e, finalmente, condições iniciais e de contorno fornecidas pelo modelo “Eta” com resolução de 40 km, inicializado com a análise dos Centros Nacionais para Previsão Ambiental dos Estados Unidos (*National Centers for Environmental Prediction - NCEP*), e condições iniciais e de contorno fornecidas pelo modelo global GFS (*Global Forecast System*) (FIALHO; BOTTINO; CHOU, 2015). A partir destas cinco combinações foram obtidas previsões do modelo “Eta” com resolução de 5 km iniciando às 00 UTC e às 12 UTC, para um total de 8 previsões em cada evento, com duração de 48 horas. Cada previsão possui 10 membros e saídas horárias. Posteriormente, esses dados foram processados para

períodos de 24 horas, compatibilizando a resolução temporal com aquela definida no modelo hidrológico.

Tabela 3.3 Configurações dos membros do conjunto de previsão

Combinação	Esquema de convecção	Esquema de microfísica	Condições iniciais e de contorno
B-F-F	Betts Miller	Ferrier	ETA 40 km Global / NCEP
B-F-G	Betts Miller	Ferrier	GFS
B-Z-Z	Betts Miller	Zhao	ETA 40 km Global / NCEP
K-F-G	Kain-Fritsch	Ferrier	GFS
Kfm-F-G	Kain-Fritsch com fluxo de momento	Ferrier	GFS

Cabe salientar que as rodadas do modelo de previsão numérica “Eta” utilizadas neste trabalho, foram de antecedências de 24 a 48 horas. Os resultados das primeiras 24 horas são eliminados, levando em consideração o período de aquecimento ou *spin-up* do modelo meteorológico. Desta forma, os dados meteorológicos utilizados foram sempre do período de 24 até 48 horas.

3.3.4. Correção estatística do viés nas vazões

Em simulação hidrológica, mesmo com os melhores resultados na calibração, espera-se que haja um viés resultante das diferenças entre as vazões observadas e as calculadas em cada posto de vazão, como resultado das incertezas inerentes nos dados, das simplificações do modelo, os erros dos parâmetros e das condições iniciais. Estas diferenças (viés) se propagam nas previsões de vazão; portanto, as vazões previstas foram corrigidas com base em uma adaptação da metodologia de “mapeamento de quantis” da Função de Distribuição Acumulada (HASHINO; BRADLEY; SCHWARTZ, 2007; SCHAAKE et al., 2006a; WOOD; SCHAAKE, 2008). Esta metodologia é frequentemente usada para correções de viés em variáveis meteorológicas, o que do ponto de vista da modelagem hidrológica constitui um pré-processamento (WOOD; LETTENMAIER, 2006; WOOD et al., 2002). No entanto, pode também ser utilizada no pós-processamento das vazões simuladas com resultados comparáveis aos obtidos usando o pré-processamento (HASHINO; BRADLEY; SCHWARTZ, 2007; KANG; KIM; HONG, 2010). O princípio do método consiste na utilização de Funções de Distribuição Acumuladas (FDA) (Figura 3.9a) de não excedência de vazão para identificar a diferença sistemática entre as vazões observadas e simuladas dentro

de um determinado período no passado, e posteriormente, corrigir estas diferenças em cada um dos membros das vazões previstas. Uma forma de identificar as diferenças sistemáticas geralmente utilizadas na hidrologia são as curvas de percentagem de Tempo de Permanência (TP) das vazões observadas e simuladas (Figura 3.9b). Neste estudo, curvas TP em que um limiar é igualado ou superado foram utilizadas em lugar de Funções de Distribuição Acumuladas de não excedência de vazão, com o objetivo de salientar melhor as vazões altas, que costumam apresentar percentis acima dos 95%, e cujo ajuste das distribuições tem maior incerteza. Assim, para uma determinada vazão simulada, calculou-se uma percentagem de tempo de permanência a partir do ajuste da curva TP das vazões simuladas, e utilizou-se o inverso da equação ajustada à curva TP observada para calcular a vazão corrigida:

$$Q_{vc} = F_{obs}^{-1}(F_{sim}(Q_{sim})) \quad (3.8)$$

em que Q representa vazão, F é a função de ajuste e os subíndices vc , obs e sim referem-se ao viés corrigido, observado e simulado, respectivamente. A Figura 3.9 apresenta uma forma hipotética da correção do viés a partir das curvas de FDA e também pelas curvas TP (método proposto).

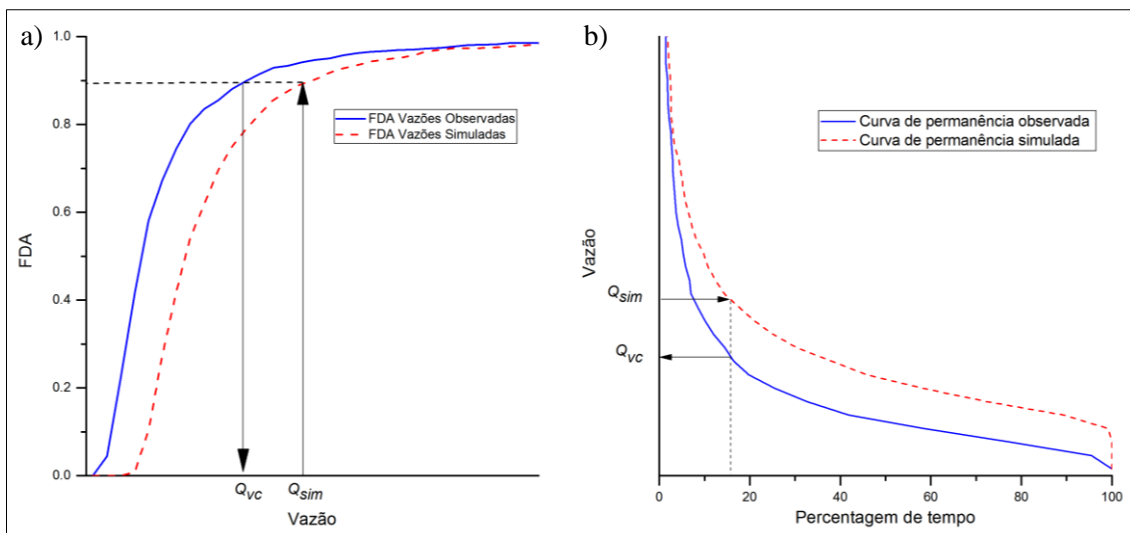


Figura 3.9 Ilustração simplificada do procedimento para correção do viés das vazões simuladas com a Função de Distribuição Acumulada de uma série histórica (a), e curvas de percentagem do Tempo de Permanência para a mesma série histórica (b), em que Q_{sim} é a vazão simulada e Q_{vc} e a vazão com viés corrigido.

Para construção das curvas TP, considerou-se o mesmo período de verificação da modelagem hidrológica, ou seja, de 2012 a 2014. A correção foi aplicada em cada uma das vazões previstas dos 10 eventos estudados para 9 postos de vazão. Considerando que os eventos ocorreram no período considerado entre a segunda metade de 2013 até o fim de 2014 (Figura 3.6), observa-se que as vazões previstas foram corrigidas com base nas curvas TP construídas a partir do histórico de 18 meses anteriores ao primeiro evento, e mais 18 meses ocorridos no mesmo período dos eventos estudados. No caso da utilização de correção do viés de forma operacional, só é possível escolher um período anterior à data de início da simulação.

3.4. Avaliação do desempenho das previsões de vazão

A avaliação da qualidade da previsão para emissão de alertas de cheia foi feita a partir de três indicadores: Índice de Brier-BS (*Brier Score*) (BRIER, 1950), Índice de Probabilidade por Classes Ordenadas-RPS (*Ranked Probability Score*) (EPSTEIN, 1969), e os Diagramas da Característica Operacional Relativa-ROC (*Relative Operating Characteristic*) (FAWCETT, 2006; SWETS; DAWES; MONAHAN, 2000). Os indicadores foram calculados para os níveis de atenção, alerta e emergência, considerando-se dados dos nove postos de vazão para os quais estes limiares estão definidos, e para os percentis de vazão P₉₀, P₉₅, P₉₈, P₉₉ e P_{99,5} em todas as bacias.

3.4.1. Brier Score (BS)

O índice BS (BRIER, 1950), considerado equivalente ao erro quadrático médio (WILKS, 2006), pode ser calculado como:

$$BS = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k)^2 \quad (3.9)$$

em que n é o número de eventos, k representa o evento k -ésimo, neste caso, a superação ou não de um limiar de vazão determinado; o_k representa o valor observado para o evento ($o_k = 0$ quando o limiar não foi superado e $o_k = 1$ em caso contrário), e finalmente y_k representa a probabilidade dada pela previsão, calculada como a média das previsões de superação ou não do limiar. Este índice pode variar entre “0” e “1”, em que o valor “0” indica a previsão perfeita e “1” o pior valor possível.

Considerando, por exemplo, um conjunto de previsões de dez membros em que, para o evento k -ésimo, três dos membros indicam que o limiar considerado será superado, enquanto sete membros indicam que não será superado, e a observação indica que o limiar não foi superado; para este evento $o_k = 0.0$ e $y_k = 0.3$.

3.4.2. Índice de Probabilidade por Classes Ordenadas (RPS)

O índice RPS (EPSTEIN, 1969) permite considerar de forma simultânea as várias categorias (faixas de vazão entre os limiares) de eventos que a previsão pode abranger, tendo em conta o intervalo entre elas. Este índice é basicamente uma generalização do índice BS para múltiplas categorias, e pode ser calculado como:

$$RPS = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^J (Y_m - O_m)^2 \quad (3.10)$$

sendo n o número de eventos, k denota o evento k -ésimo, J é o número de categorias consideradas e m uma categoria dada. Y e O são vetores que representam as probabilidades acumuladas da previsão e da observação, calculadas, respectivamente, como:

$$Y_m = \sum_{j=1}^m y_j \quad ; \quad O_m = \sum_{j=1}^m o_j \quad (3.11)$$

No vetor de probabilidade da observação o , terá valor 1 aquela componente correspondente à categoria na qual encontra-se o valor observado, enquanto as restantes terão valor 0. De maneira similar, o vetor de probabilidade da previsão está composto pela probabilidade prevista para cada categoria de vazão de acordo com a previsão por conjuntos. Por definição de probabilidade, $Y_m = O_m = 1$ para $m = J$, de maneira que a contribuição da última categoria será sempre 0.

Este índice pode variar entre “0” (que indica previsão perfeita) e o número de categorias considerado (J) menos “1”. No presente trabalho são considerados três limiares que, entre os seus intervalos, geram quatro categorias, de maneira que $J = 4$, sendo o pior valor possível de RPS igual a 3. Se o modelo falha em prever corretamente um estado de emergência, e no seu lugar indica, por exemplo, um estado de atenção (duas categorias abaixo), o resultado do índice será pior se comparado à indicação de um estado de alerta, mais próximo do estado de emergência.

Considerando novamente um conjunto de previsões de dez membros, em que para o evento k -ésimo, 1 membro indica que a vazão não superará o nível de atenção, 3 membros indicam que a vazão atingirá o nível de atenção, mas sem atingir o nível de alerta, e 6 membros indicam que a vazão atingirá o nível de alerta, mas sem atingir o nível de emergência, enquanto o valor observado de vazão ficou entre o nível de atenção e o nível de alerta. Para este evento $o = \{0,0; 1,0; 0,0; 0,0\}$, $y = \{0,1; 0,3; 0,6; 0,0\}$, $O = \{0,0; 1,0; 1,0; 1,0\}$, e $Y = \{0,1; 0,4; 1,0; 1,0\}$ e $\sum_{m=1}^J (Y_m - O_m)^2 = (0,1 - 0,0)^2 + (0,4 - 1,0)^2 + (1,0 - 1,0)^2 = 0,37$. Note que se o nível de vazão observado fosse acima do nível de emergência, então $\sum_{m=1}^J (Y_m - O_m)^2 = 1,37$.

3.4.3. Diagramas de Característica Operacional Relativa (ROC)

A capacidade para prever situações de atenção, alerta e emergência também foi avaliada usando diagramas Característica Operacional Relativa - ROC (*Relative Operative Characteristic*) (FAWCETT, 2006; SWETS; DAWES; MONAHAN, 2000). Este tipo de diagrama permite classificar o índice de acertos em relação ao número de falsos alarmes segundo a escolha de diferentes limiares de probabilidade previstos na emissão de alerta do evento (excedência de um determinado valor de vazão). O diagrama ROC é construído a partir de uma tabela de contingência do tipo 2×2 (Figura 3.10), de forma que cada previsão é comparada com o dado observado para cada limiar de probabilidade. Nesse caso, quatro situações podem ocorrer: o sistema prevê a ocorrência do evento (ou seja, a probabilidade prevista pelo conjunto é maior do que o limiar de probabilidade considerado) e o evento é observado (caso a – acerto no alerta), o sistema prevê a ocorrência do evento e o evento não é observado (caso b – falso alerta), o sistema não prevê a ocorrência do evento, porém o evento é observado (caso c – alerta perdido) e, por fim, o sistema não prevê a ocorrência do evento e o evento não é observado (caso d – negativo correto). A partir da tabela de contingência para cada limiar de probabilidade, é calculado um conjunto de pares ordenados (F, H) em que $F = b/(b + d)$ representa a taxa de falso alerta e $H = a/(a + c)$ a taxa de acerto.

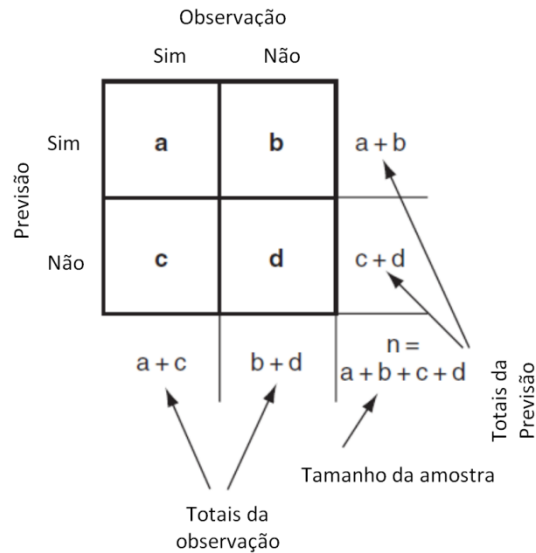


Figura 3.10 Tabela de contingência 2x2 para contagem das categorias possíveis para os pares previsão/observação no caso de um evento dicotômico.

Fonte: Adaptado de WILKS (2006)

A Figura 3.11 mostra um exemplo hipotético de diagrama ROC. Vários pontos relevantes no diagrama ROC são descritos a seguir. O ponto $(x=1, y=1)$ representa o caso no qual é sempre dado o alerta; neste caso o índice de acertos é 1, porém o índice de falso alerta ou erro também é 1. O ponto $(0,0)$ representa o caso no qual nenhum alerta é emitido, e consequentemente o índice de falso alerta é zero, porém o índice de acertos também é zero. Ambos os pontos estão localizados nos extremos da reta $y = x$, que representa os casos em que a taxa de acertos e de falso alerta é igual, o que probabilisticamente é equivalente ao resultado de lançar uma moeda ao ar e, consequentemente, pontos localizados nesta reta não tem informação útil. Finalmente, a classificação perfeita está representada pelo ponto $(0,1)$, no qual a taxa de acerto é 100 % enquanto a taxa de falso alarme é nula.

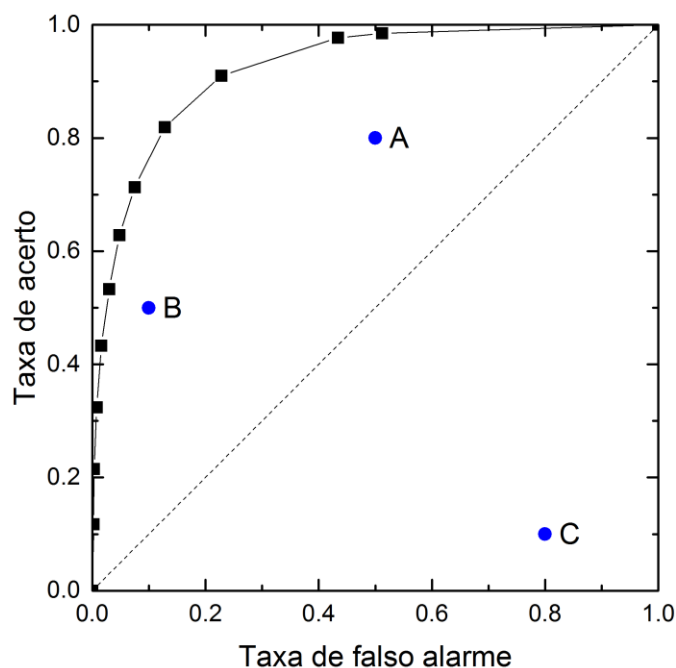


Figura 3.11 Exemplo de diagrama ROC.

Pontos semelhantes ao ponto A representam previsões “liberais”, com taxas de acertos elevadas, porém, com taxas de falso alarme também altas, enquanto pontos semelhantes ao B representam previsões “conservadoras”, com baixa taxa de falso alarme, mas frequentemente com baixa taxa de acertos (FAWCETT, 2006). Por fim, pontos semelhantes ao C, teoricamente, indicariam um resultado muito ruim, mas não se for utilizado de forma invertida. No caso do ponto C, ao ser invertido, indicaria uma previsão melhor do que aquelas correspondentes aos pontos A e B; este tipo de caso não está presente neste trabalho.

Finalmente, o diagrama ROC pode servir de base para a escolha do limiar de probabilidade mais adequado para a emissão de um alerta, por definição aquele que represente um ponto mais próximo de (0,1) no espaço ROC. Neste trabalho foram considerados os limiares de probabilidade seguintes: 0,95; 0,85; 0,75; 0,65; 0,55; 0,45; 0,35; 0,25; 0,15 e 0,05.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Calibração, verificação do modelo hidrológico MHD-INPE e correção do viés

Explicitando com mais detalhes, a calibração do MHD-INPE foi executada considerando dados de uma série histórica de vazão diária de 12 postos (Tabelas 3.1 e 3.2), com início em 01/01/1971 e termino em 31/12/2009, totalizando 39 anos, enquanto o período considerado para verificação iniciou em 01/01/2010 e terminou em 31/12/2014, totalizando 5 anos (Figura 4.1). Para a avaliação dos resultados estatísticos, tanto na calibração, quanto na verificação, os dois primeiros anos foram desconsiderados, em função do tempo necessário para o modelo atingir um estado de equilíbrio (aquecimento do modelo). Desta forma, considerou-se 37 anos de calibração e 3 anos de verificação.

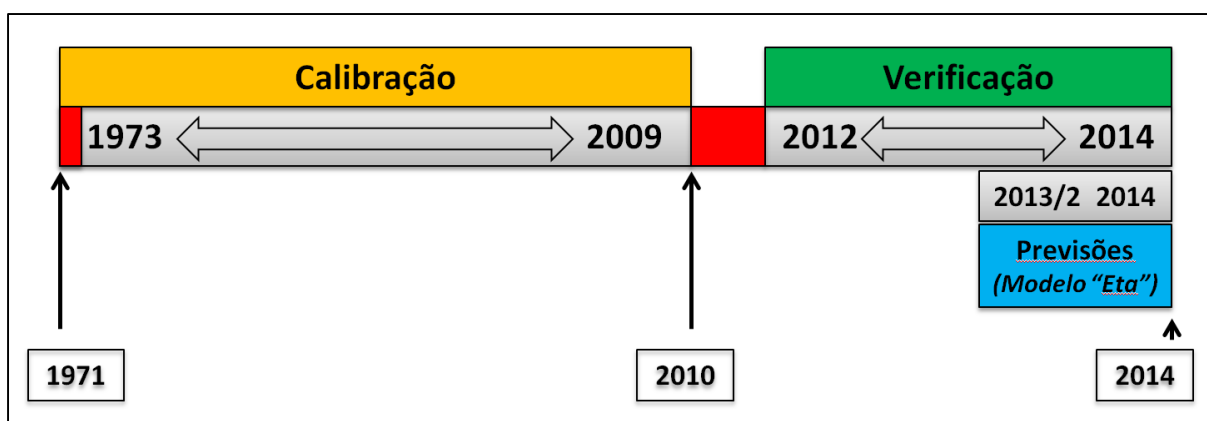


Figura 4.1 Ilustrativo da linha do tempo referente aos períodos de calibração, verificação e de previsões de vazão. As faixas em cor vermelha representam os 2 primeiros anos desconsiderados.

Para efeito de análise dos resultados, considerou-se neste trabalho, dois grupos de sub-bacias em função do seu tamanho, desta forma, as sub-bacias com área de drenagem menor do que 1650 km² formam o grupo 1 e as sub-bacias maiores formam o grupo 2. Assim, o grupo 1 inclui as sub-bacias de cabeceira, com exceção das sub-bacias B4 (Brusque) e B7 (Taió), que apesar de pequenas, têm sub-bacias menores a montante. O grupo 2 inclui as sub-bacias maiores, todas na mesma ordem de rio (Tabela 4.1). Cabe salientar que as sub-bacias B1 (Vila Nova), B2 (Taió Montante) e B5 (Barra do Prata), não foram incluídas nos grupos, pois não

tinham limiares referentes as cotas de atenção, alerta e emergência disponíveis para avaliação dos resultados.

Em conformidade com os resultados apresentados na Tabela 4.1, os maiores valores de NASH e LNASH estão associados com as sub-bacias maiores. Em sub-bacias menores, como nas regiões de cabeceira, foram obtidos resultados menos satisfatórios; nestas localidades, o efeito da baixa densidade de pluviômetros tem maior impacto na modelagem. Contudo, algumas sub-bacias menores apresentaram resultados promissores para os valores estatísticos de NASH e LNASH, como observado nas estatísticas das sub-bacias B3, B6 e B7.

Tabela 4.1 Parâmetros obtidos na calibração de 1973 a 2009, verificação e correção do viés de 2012 a 2014, para as 12 sub-bacias estudadas.

Sub-bacia	Grupo	Área (Km ²)	Calibração						Verificação						Correção do viés
			ΔV	ΔE	ET_{cal}	ET_{obs}	NASH	LNASH	ΔV	ΔE	ET_{cal}	ET_{obs}	NASH	LNASH	NASH
B1	--	397	-0,12	0,00	2,26	2,27	0,27	0,31	0,31	-0,30	1,99	2,84	0,62	0,50	--
B2	--	648	-0,12	0,18	2,22	1,88	0,45	0,53	0,40	-0,40	1,88	3,15	0,62	-0,05	--
B3	1	794	0,00	-0,02	2,42	2,48	0,67	0,65	-0,06	0,06	2,05	1,94	0,75	0,55	0,76
B4	1	1210	-0,06	-0,17	2,07	2,50	0,71	0,69	0,47	-0,32	1,80	2,65	0,63	0,09	0,78
B5	--	1430	0,08	-0,05	2,57	2,71	0,78	0,76	-0,10	0,07	2,27	2,12	0,49	-0,02	--
B6	1	1600	0,00	-0,01	2,38	2,39	0,73	0,72	-0,02	0,13	1,87	1,66	0,58	0,70	0,69
B7	1	1570	-0,08	0,12	1,86	1,66	0,58	0,62	0,12	-0,17	1,64	1,99	0,67	0,46	0,69
B8	1	1650	0,01	-0,04	2,43	2,54	0,59	0,62	0,54	-0,30	2,18	3,12	-0,06	-0,12	0,42
B9	2	5160	0,00	0,01	2,15	2,13	0,84	0,85	0,06	0,05	1,88	1,99	0,78	0,62	0,78
B10	2	9070	0,01	-0,05	2,22	2,32	0,83	0,85	0,05	-0,22	1,88	2,43	0,79	0,70	0,78
B11	2	9850	-0,16	-0,25	1,47	1,97	0,75	0,79	-0,19	0,13	1,25	1,11	0,74	0,65	0,62
B12	2	12200	-0,18	-0,12	1,94	2,20	0,68	0,44	0,21	-0,35	1,68	2,60	0,77	0,63	0,83

Abreviaturas: ΔV = Erro no volume; ΔE = Erro na evaporação; ET_{cal} = Evapotranspiração calculada; ET_{obs} = Evapotranspiração observada.

Cabe salientar que os dados de vazão disponíveis para o período de verificação não foram consistidos, e devido ao número de falhas não foi possível fazer uma consistência dos dados. Isto explica as diferenças encontradas nos resultados do NASH e LNASH entre calibração e verificação. Em alguns casos, como no posto de Indaial (B11), a disponibilidade de dados na verificação foi inferior a um ano, ou seja, dispõe-se de apenas oito meses de dados, no período de três anos considerados para a verificação.

Em função das oscilações das marés no encontro do rio Itajaí-Açu com o Oceano Atlântico, o posto de Blumenau (B12) apresentou um baixo valor do LNASH na calibração, que representa melhor a qualidade do ajuste nas vazões baixas (efeito de remanso). Salienta-se que o MHD-INPE utiliza a propagação de vazões de Muskingun – Cunge (CUNGE, 1969), que não considera os efeitos de remanso. Mesmo assim, visto que o foco deste estudo são os eventos de cheia, priorizou-se bons resultados para os valores de NASH, que representa melhor o desempenho para as vazões altas.

O método proposto para a correção do viés nas vazões previstas baseia-se na observação de um período anterior a previsão (que no caso deste estudo, apresenta uma sobreposição de 50% dentro do período das previsões) e pode-se imaginar que a aplicação das correções sobre o mesmo período em que elas foram geradas, possibilita a averiguação das melhorias nos valores estatísticos de NASH, ou seja, se é possível observar melhorias com a correção dentro de um determinado período escolhido, é provável que os mesmos efeitos sejam propagados nas previsões corrigidas. Desta forma, apenas com o propósito de observar as melhorias da correção do viés, a última coluna da Tabela 4.1 indica o efeito da correção do viés calculado para 9 sub-bacias estudadas, considerando o mesmo período de verificação de 3 anos (2012 a 2014). A correção do viés foi aplicada para as vazões médias e altas dos postos, visto que, objetivou-se corrigir os picos de vazão. Observa-se que houve uma melhora significativa para algumas sub-bacias nos resultados estatísticos de NASH após a correção. Destacam-se os resultados do posto de Ituporanga (B8), que apresentou valores de NASH de 0,59, -0,06 e 0,42 na calibração, verificação e correção do viés, respectivamente; neste caso, os valores mostraram uma piora abrupta nos resultados da verificação que, posteriormente, melhoraram utilizando-se a correção de viés. A estação de Ituporanga (B8) localiza-se logo abaixo da barragem de contenção de cheias (barragem Sul), e as vazões observadas são, em média, sempre mais baixas do que as vazões simuladas (ver Figura A.8 do Apêndice A), provável consequência do efeito de atenuação da barragem.

Nos gráficos apresentados no Apêndice A observa-se, para o período de verificação, os hidrogramas de cada posto de vazão com os resultados da simulação inicial e da simulação com a correção do viés, em comparação com os dados observados; exceto para os postos B1, B2 e B5, para os quais não se aplicou a correção do viés. Os gráficos do Apêndice B apresentam as curvas de percentagem de tempo de permanência de todos os postos de vazão utilizados na correção do viés, calculados com base no período de verificação do modelo hidrológico.

Cabe salientar que a correção do viés não foi necessariamente uma forma de melhorar a verificação, mas sim uma estratégia para melhorar os resultados das previsões de vazão. Portanto, os valores de NASH corrigidos, apresentados na Tabela 4.1, são apenas uma demonstração das melhorias da correção do viés em comparação com os dados não corrigidos. A sua aplicação nas previsões de vazão tende a garantir que as diferenças de cada membro do conjunto sejam resultantes das configurações da previsão numérica escolhidas, diminuindo a influência das incertezas oriundas da modelagem hidrológica.

Ressalta-se que o ano de 2011 foi marcado por uma cheia histórica no rio Itajaí-Açu, cujos eventos desta magnitude costumam alterar as condições do leito dos rios, e, conseqüentemente, as curvas-chave na seção dos postos de vazão. Este efeito pode ser observado na curva-chave do posto de Taió Montante (B2), que teve a curva-chave modificada em 2011 (ver Figura D.2, do Apêndice D). Por este motivo, a correção do viés com base em um período posterior a este evento, como no caso deste estudo (2012 a 2014), possivelmente suavizou as alterações ocorridas em 2011.

4.2. Previsões de vazão e desempenho do Índice de Brier (BS) e Índice de Probabilidade por Classes Ordenadas (RPS)

A avaliação dos resultados das previsões por conjuntos com 10 membros foi executada considerando-se 10 períodos de 8 dias, totalizando 800 rodadas, obtendo-se, portanto, 800 previsões de 24 horas e 800 previsões de 48 horas para cada uma das 9 sub-bacias avaliadas (14400 dados), que iniciaram-se 5 dias antes de cada pico de vazão (posto de Blumenau) e encerraram 4 dias após.

Para ilustrar as previsões de vazão por conjunto, apresentam-se, nas Figuras 4.2 a 4.9, os resultados do EPS do evento de setembro de 2013 para as sub-bacias de Rio do Sul (B9) e Blumenau (B12). De acordo com o boletim Climanálise (INPE/CPTEC, 2013), o mês de setembro de 2013 foi marcado por um período de chuvas intensas no Estado de Santa Catarina. Os episódios mais extremos de precipitação pluviométrica ocorreram entre os dias 20 e 23 de setembro de 2013, quando os volumes chegaram próximos de 300 mm em algumas localidades. Neste período, em Rio do Sul, 75% dos bairros da cidade ficaram completamente alagados, levando a prefeitura a decretar estado de calamidade pública.

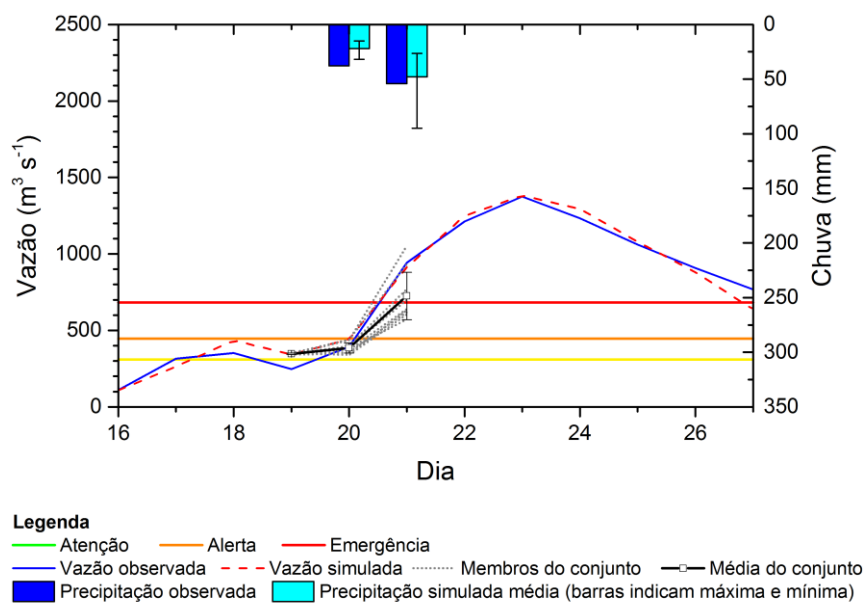


Figura 4.2 Previsões de vazão para 24 e 48 horas em Rio do Sul, SC, para o período de 4 dias, com início em 19/09/2013. A chuva refere-se ao valor médio diário distribuído na sub-bacia, tanto o valor observado, como previsto. As previsões e a vazão simulada são corrigidas do viés.

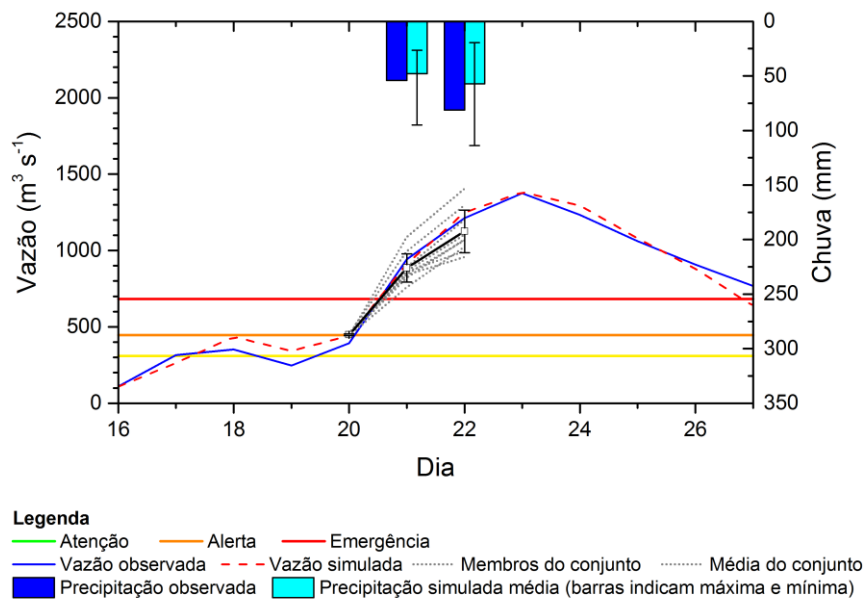


Figura 4.3 Previsões de vazão para 24 e 48 horas em Rio do Sul, SC, para o período de 4 dias, com início em 20/09/2013. A chuva refere-se ao valor médio diário distribuído na sub-bacia, tanto o valor observado, como previsto. As previsões e a vazão simulada são corrigidas do viés.

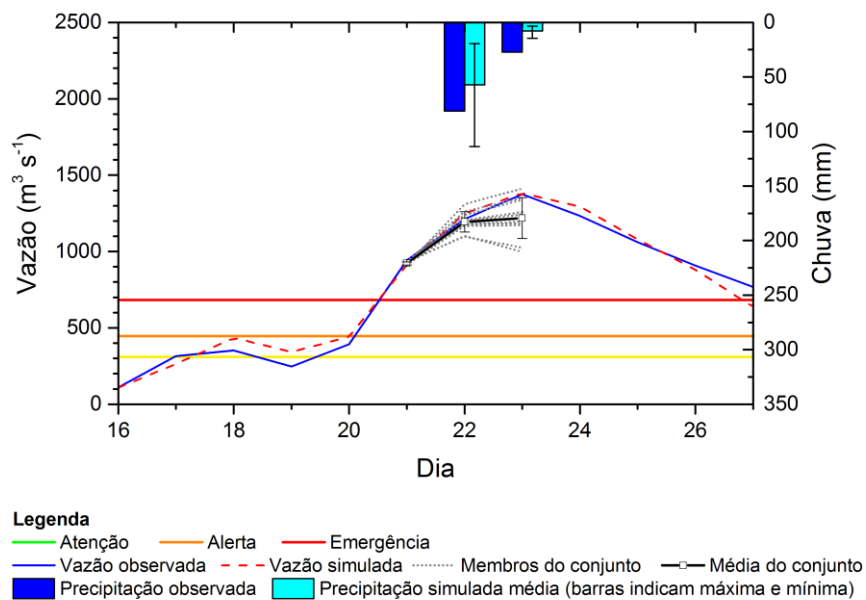


Figura 4.4 Previsões de vazão para 24 e 48 horas em Rio do Sul, SC, para o período de 4 dias, com início em 21/09/2013. A chuva refere-se ao valor médio diário distribuído na sub-bacia, tanto o valor observado, como previsto. As previsões e a vazão simulada são corrigidas do viés.

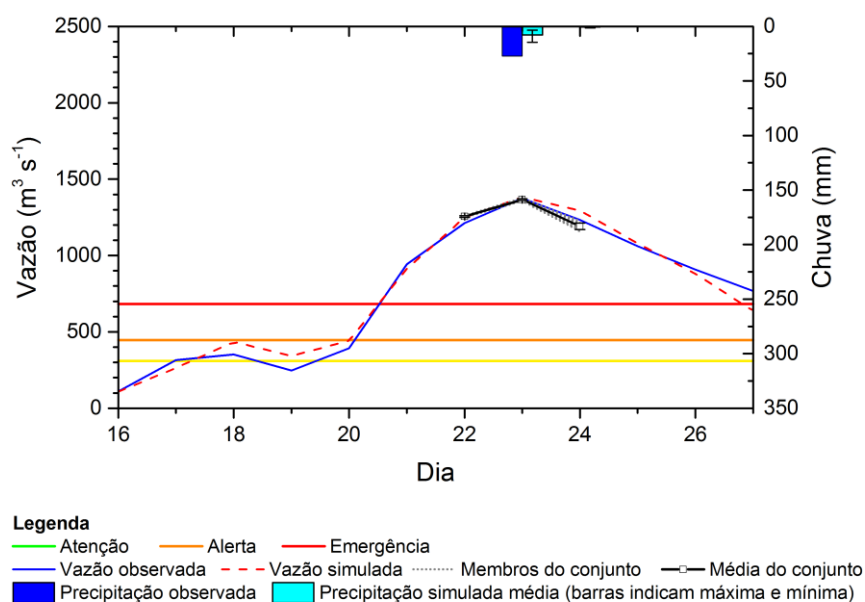


Figura 4.5 Previsões de vazão para 24 e 48 horas em Rio do Sul, SC, para o período de 4 dias, com início em 22/09/2013. A chuva refere-se ao valor médio diário distribuído na sub-bacia, tanto o valor observado, como previsto. As previsões e a vazão simulada são corrigidas do viés.

Observa-se, na Figura 4.2, que a média dos membros da previsão do dia 19/09/2013, um dia antes do início da chuva, já indicava a elevação da vazão em Rio do Sul para um valor acima da cota de emergência com 48 horas de antecedência. Observa-se, ainda, que os membros do conjunto continuaram acompanhando a tendência da vazão observada até o final do evento. No entanto, o espalhamento apresentou tendência a agrupar os membros de 00h e 12 h da mesma configuração do modelo meteorológico. Ainda, a média do conjunto apresenta uma tendência geral a subestimar o valor da vazão, quando comparado com o observado, não sendo um bom indicador por si só.

Situação similar foi observada para Blumenau (Figura 4.6), que no o dia 19/09/2013, o EPS indicava a possível elevação da vazão para níveis acima do limiar de atenção para o dia 21/09/2013, o que foi verificado com os dados observados. No dia 20/09/2013, o EPS já indicava corretamente vazões próximas da cota de emergência para o dia 22, também com 48 horas de antecedência.

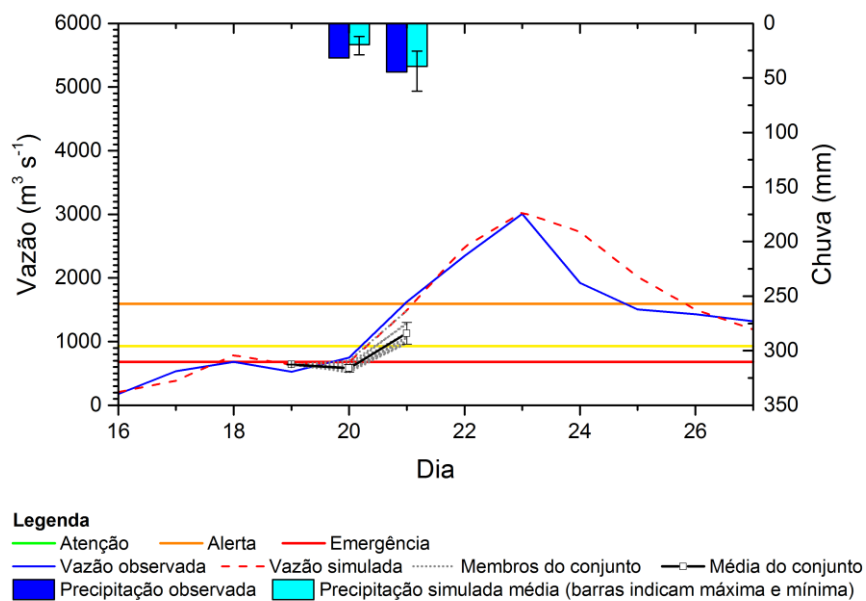


Figura 4.6 Previsões de vazão para 24 e 48 horas em Blumenau, SC, para o período de 4 dias, com início em 19/09/2013. A chuva refere-se ao valor médio diário distribuído na sub-bacia, tanto o valor observado, como previsto. As previsões e a vazão simulada são corrigidas do viés.

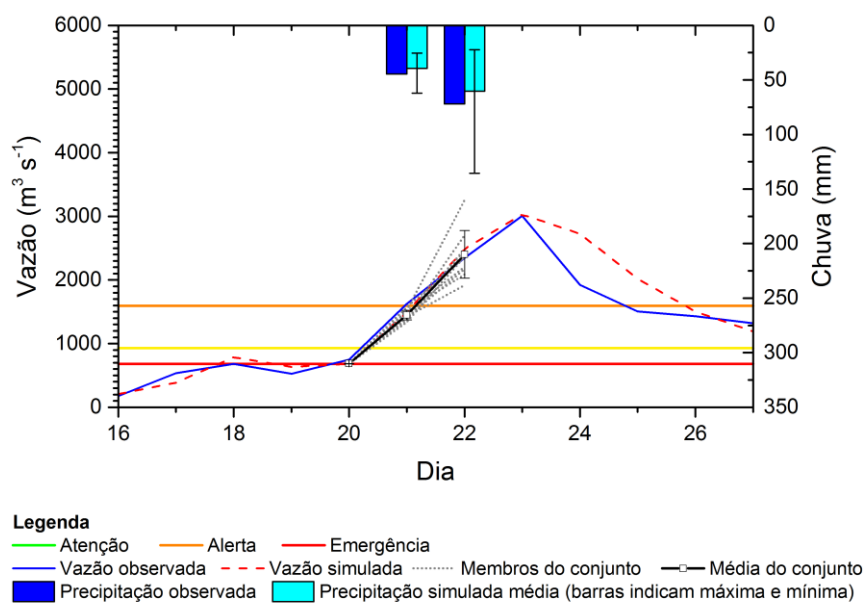


Figura 4.7 Previsões de vazão para 24 e 48 horas em Blumenau, SC, para o período de 4 dias, com início em 20/09/2013. A chuva refere-se ao valor médio diário distribuído na sub-bacia, tanto o valor observado, como previsto. As previsões e a vazão simulada são corrigidas do viés.

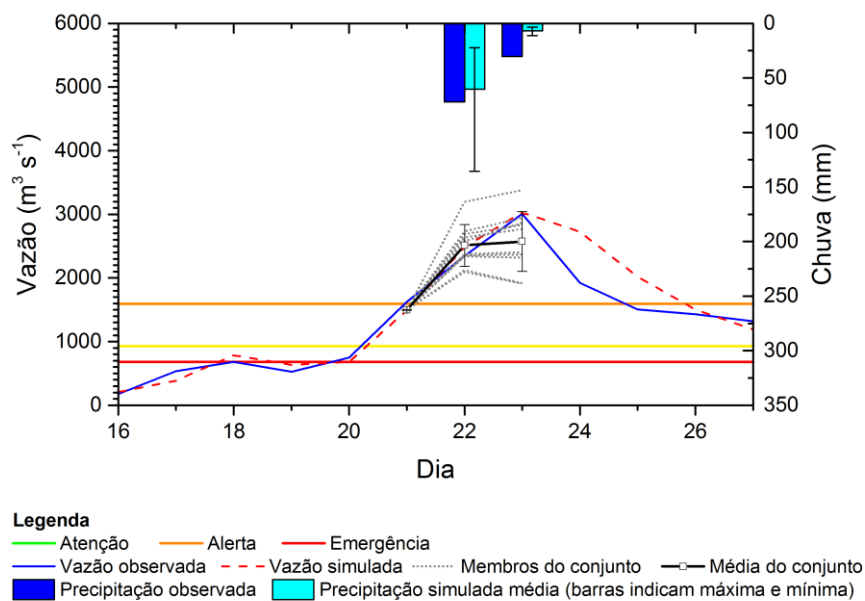


Figura 4.8 Previsões de vazão para 24 e 48 horas em Blumenau, SC, para o período de 4 dias, com início em 21/09/2013. A chuva refere-se ao valor médio diário distribuído na sub-bacia, tanto o valor observado, como previsto. As previsões e a vazão simulada são corrigidas do viés.

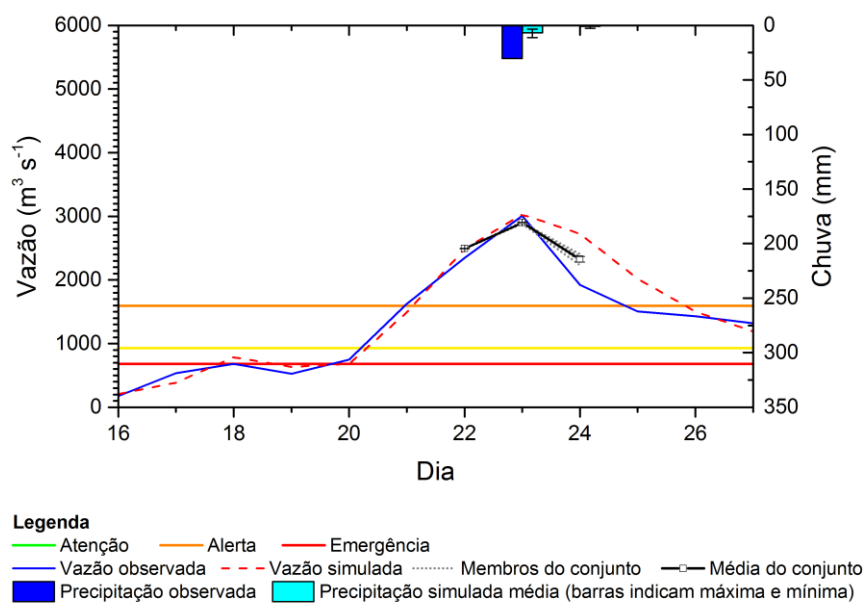


Figura 4.9 Previsões de vazão para 24 e 48 horas em Blumenau, SC, para o período de 4 dias, com início em 22/09/2013. A chuva refere-se ao valor médio diário distribuído na sub-bacia, tanto o valor observado, como previsto. As previsões e a vazão simulada são corrigidas do viés.

A Figura 4.10 mostra a precipitação interpolada a partir das observações, segundo o inverso do quadrado da distância às estações, para os limites da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, nos dias 20, 21, 22 e 23/09/2013, na qual se pode observar a distribuição espacial da precipitação que originou o evento. A precipitação acumulada superou em média os 100 mm nos primeiros dois dias na região das cabeceiras da bacia, com acumulados superiores a 100 mm em algumas regiões no dia 22.

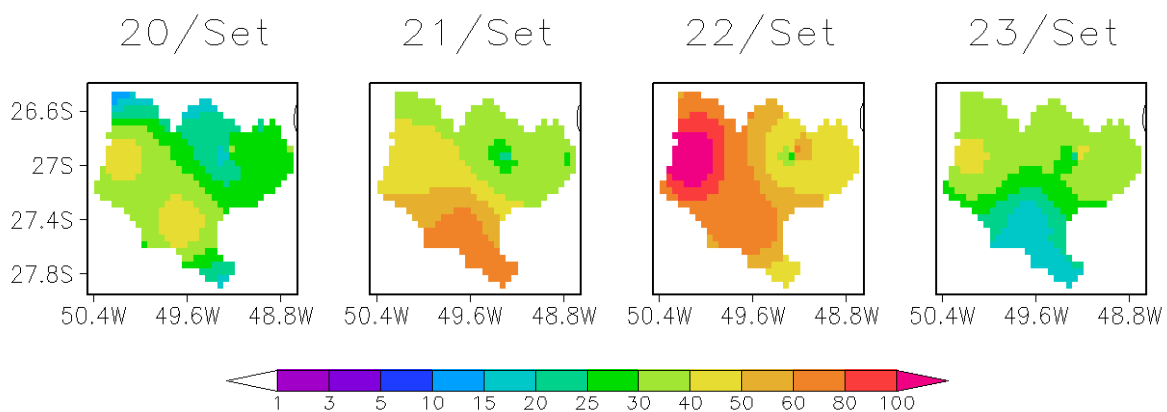


Figura 4.10 Precipitação interpolada (mm/dia) nos limites na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, a partir dos dados observados para os dias 20, 21, 22, e 23 de setembro de 2013, coincidindo com os 4 dias do pico do evento mostrado nas Figuras 4.2 a 4.9.

As Figuras Figura 4.11 e Figura 4.12 apresentam a distribuição espacial da precipitação prevista pelo EPS para os 5 membros com rodadas iniciadas as 00 e 12 horas, respectivamente. Observa-se que o membro “Kfm-F-G” tende a superestimar as precipitações mais intensas, enquanto o “B_F_F” e o “B_Z_Z” tendem a prever valores subestimados (dia 22 de setembro no presente exemplo).

A precipitação do dia 23 de setembro foi subestimada por todos os membros. Este comportamento (valores baixos de precipitação após o pico das chuvas) foi observado de forma sistemática em todos os períodos estudados, o que representa uma antecipação do fim do evento, quando comparado ao observado.

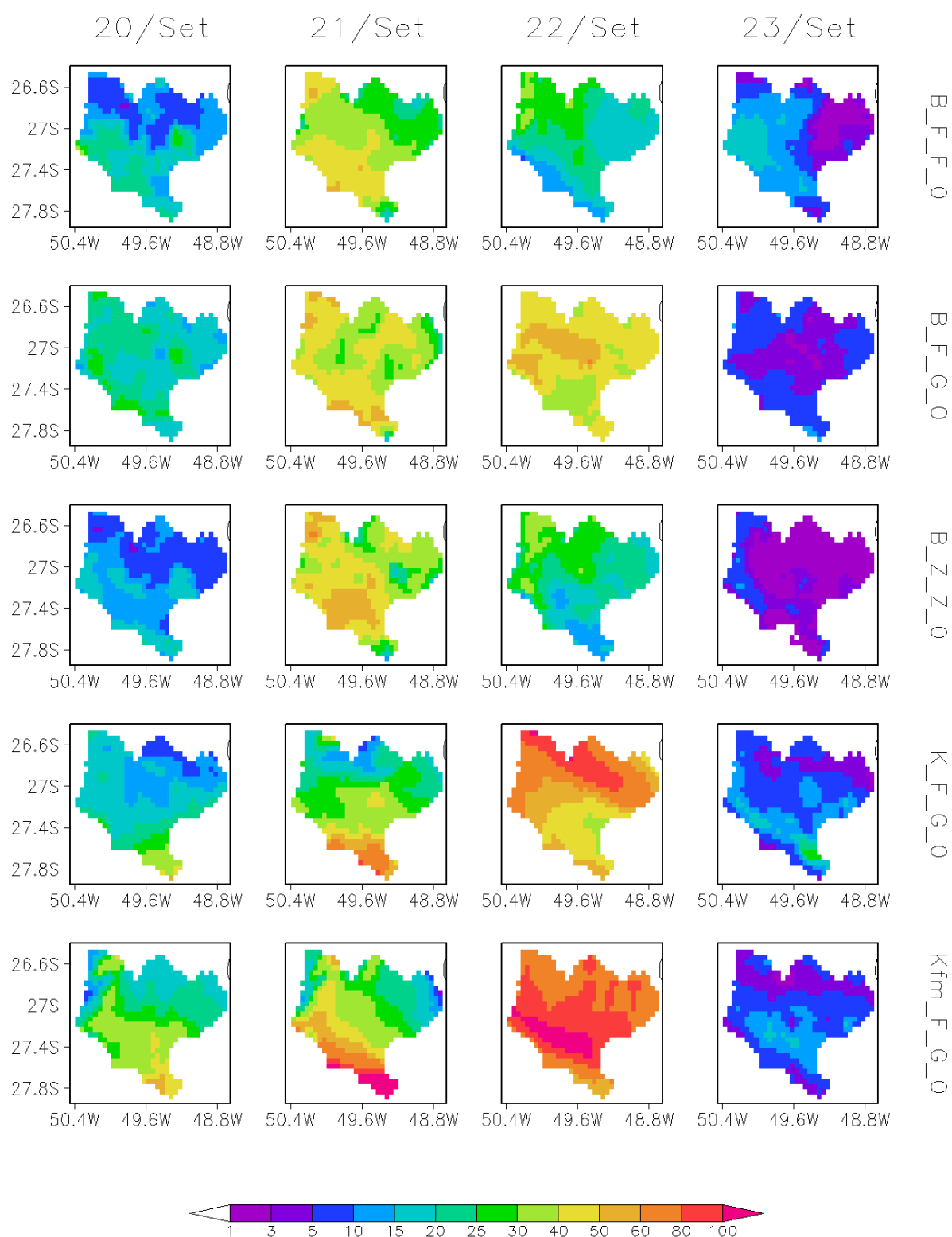


Figura 4.11 Precipitação prevista nos limites da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, a partir das cinco configurações do modelo numérico de previsão “Eta” (resolução espacial de 5km) para os dias 20, 21, 22, e 23 de setembro de 2013, coincidindo com os 4 dias do pico do evento mostrado nas Figuras 4.2 a 4.9, com rodadas iniciando as 00 horas (UTC).

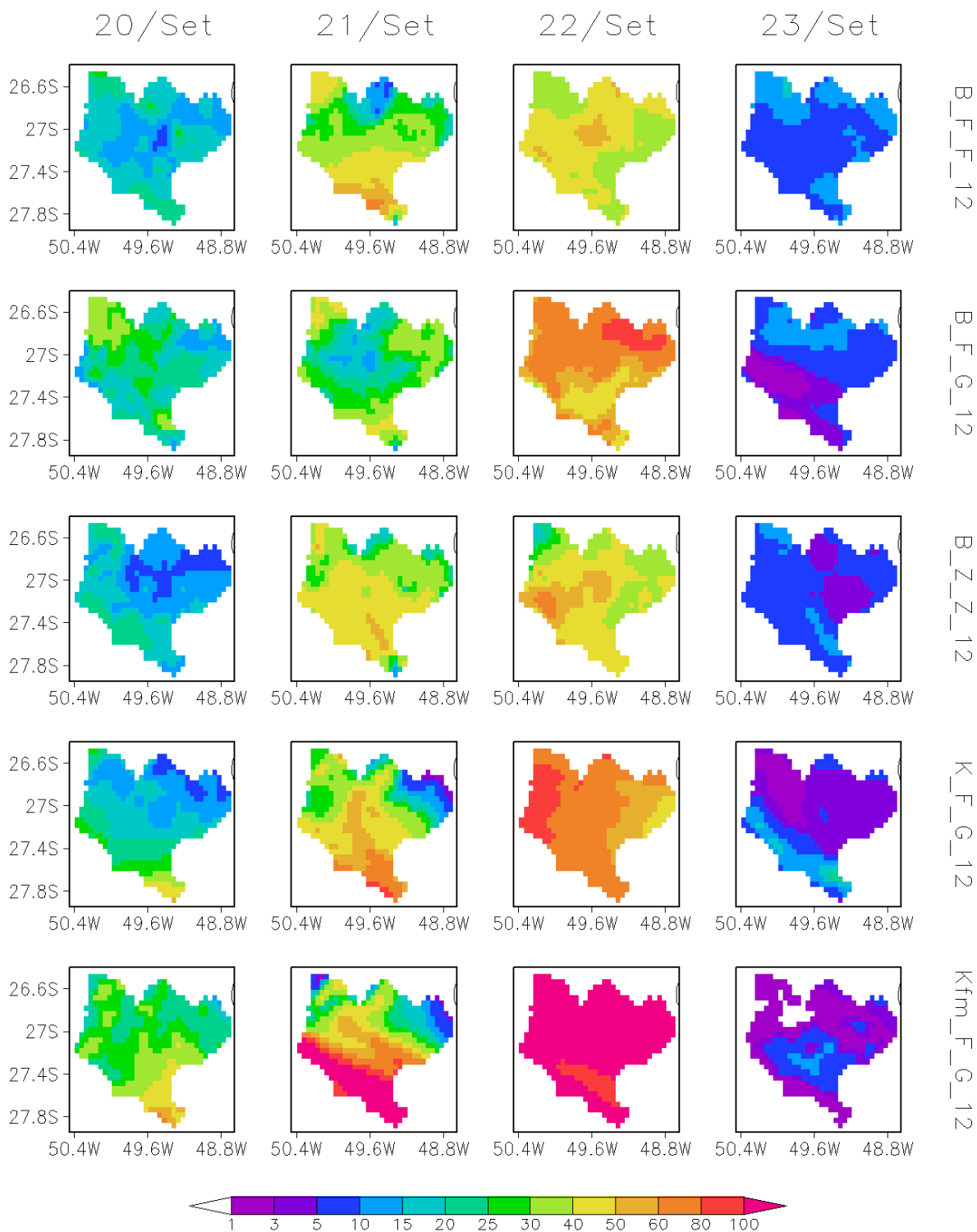


Figura 4.12 Precipitação prevista nos limites da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, a partir das cinco configurações do modelo numérico de previsão “Eta” (resolução espacial de 5km) para os dias 20, 21, 22, e 23 de setembro de 2013, coincidindo com os 4 dias do pico do evento mostrado nas Figuras 4.2 a 4.9, com rodadas iniciando as 12 horas (UTC).

O comportamento das rodadas iniciadas às 00h UTC e às 12h UTC para às mesmas configurações do modelo meteorológico em todos os casos foi muito semelhante, indicando que neste período de tempo as condições iniciais tiveram um menor impacto nos resultados. Observou-se também uma tendência das previsões do EPS em mostrar uma maior variabilidade espacial, quando comparada à interpolação dos dados de precipitação observados, o que pode ser resultado de um baixo número de pluviômetros em funcionamento durante os períodos de eventos. De modo geral, o EPS conseguiu prever a passagem dos sistemas de tempo que afetaram a região nos períodos estudados e permitiu uma simulação adequada das vazões, mesmo com as deficiências supracitadas.

Além da análise visual dos resultados, da qual foi apresentada aqui apenas uma amostra, realizou-se uma análise estatística dos mesmos com o intuito de avaliar o desempenho de forma comparável. Os índices BS (Tabela 4.2) calculados para os limiares de atenção, alerta e emergência, assim como para os diversos percentis, indicam um bom desempenho das previsões, tanto para 24 horas, quanto para 48 horas de antecipação, com valores abaixo de 0,2 para os limiares de atenção, alerta e emergência em todas as bacias analisadas.

Tabela 4.2 Índice RPS e Índices Brier para as cotas de atenção, alerta, emergência e para diversos percentis em 24 e 48 horas.

	Bacia	RPS	Atenção	Alerta	Emerg.	P90	P95	P98	P99	P99.5	
24h	B3	0,0611	0,0550	0,0062	0,0000	0,2675	0,1196	0,1376	0,0965	0,0550	
	B4	0,1181	0,0821	0,0310	0,0050	0,1205	0,0928	0,0968	0,0821	0,0433	
	B6	0,2190	0,1234	0,0515	0,0441	0,1602	0,1678	0,1381	0,0575	0,0513	
	B7	0,2568	0,0650	0,0836	0,1081	0,0628	0,0965	0,0953	0,0638	0,0263	
	B8	0,1685	0,1599	0,0086	0,0000	0,1848	0,2144	0,1599	0,0828	0,0301	
	B9	0,2611	0,0525	0,0603	0,1484	0,0525	0,0616	0,1230	0,1759	0,0833	
	B10	0,1635	0,1452	0,0184	0,0000	0,0982	0,1081	0,1452	0,1453	0,0781	
	B11	0,3469	0,1825	0,1171	0,0474	0,1869	0,2247	0,1677	0,1124	0,1353	
	B12	0,2129	0,1190	0,0658	0,0281	0,1080	0,1314	0,0578	0,0475	0,0460	
	48h	B3	0,0487	0,0373	0,0114	0,0000	0,2355	0,1658	0,0745	0,0655	0,0373
		B4	0,1056	0,0549	0,0390	0,0118	0,1669	0,1066	0,0583	0,0549	0,0500
		B6	0,2275	0,1384	0,0443	0,0448	0,2148	0,1784	0,1272	0,0542	0,0434
B7		0,2958	0,0669	0,1394	0,0895	0,0808	0,1610	0,0888	0,0483	0,0205	
B8		0,1194	0,1000	0,0194	0,0000	0,1986	0,2339	0,0987	0,0500	0,0441	
B9		0,3099	0,0794	0,1194	0,1111	0,0776	0,1118	0,1800	0,1535	0,0680	
B10		0,1864	0,1691	0,0172	0,0001	0,1035	0,1578	0,1824	0,1542	0,0739	
B11		0,3860	0,2099	0,1294	0,0467	0,1533	0,2356	0,1879	0,1218	0,1012	
B12	0,2070	0,1328	0,0634	0,0108	0,1403	0,1485	0,0900	0,0473	0,0348		

Ressalta-se que o índice de BS tem uma tendência a melhores resultados quando, num evento dicotômico, com dois resultados possíveis, um deles é muito mais frequente do que o outro. Neste caso, as previsões desta categoria tendem a acertar. Isto explica em parte o fato de que, por exemplo, o índice BS para a categoria de emergência apresenta uma tendência a ser menor do que para categorias de menor vazão, já que situações de emergências são mais escassas, o que constitui uma limitação deste índice.

No caso do presente estudo, o índice RPS pode ser considerado mais adequado para a avaliação do sistema de alerta como um todo, ao considerar não apenas a probabilidade prevista para o evento observado, mas também as probabilidades previstas para cada categoria, privilegiando aquelas mais próximas ao evento observado. Como explicado anteriormente, o pior valor possível do índice RPS neste caso é 3, e, como pode ser observado na Tabela 4.2, todos os valores obtidos ficaram abaixo de 0,35 para 24 horas e 0,38 para 48 horas. Estes valores, considerados em conjunto com os índices BS, indicam que as previsões dos eventos foram, em geral, boas. Assim, o EPS mostrou-se adequado para a previsão de excedência de vazões elevadas, prevendo os níveis de atenção, alerta e emergência, assim como os percentis altos, com um desempenho adequado.

Na Tabela 4.3 encontram-se os limiares de vazão para cada uma das 12 sub-bacias, referentes às cotas de atenção, alerta, emergência e para os percentis utilizados neste estudo, exceto para as sub-bacias B1, B2 e B5 que, como já citado anteriormente, não tem referências oficiais destes limiares; neste caso, foram calculadas as vazões apenas para os percentis. As vazões referentes aos limiares de alerta, atenção e emergência foram calculadas com base nas cotas sugeridas pelo CEOPS e transformadas em vazão utilizando-se as curvas-chave disponíveis nos resumos de descargas da ANA para os nove postos de vazão.

Tabela 4.3 Vazões referentes aos níveis de atenção, alerta, emergência e para os percentis 90, 95, 98, 99 e 99,5, das 12 sub-bacias estudadas.

Bacia	Atenção	Alerta	Emergência	P90	P95	P98	P99	P99.5
B1	---	---	---	15.49	27.50	50.84	88.74	130.46
B2	---	---	---	43.53	81.06	143.72	185.82	256.44
B3	137.24	223.55	445.43	28.74	41.63	72.60	98.99	137.24
B4	158.30	237.97	324.52	48.72	70.84	109.36	158.95	215.07
B5	---	---	---	73.02	130.25	199.44	268.98	384.98
B6	167.28	345.81	570.58	93.38	140.79	216.83	278.06	361.06
B7	95.60	169.00	235.50	135.50	182.00	239.40	283.61	331.80
B8	179.60	368.00	606.50	87.26	138.50	181.20	212.71	261.16
B9	309.64	447.12	684.01	307.73	435.45	563.12	647.34	771.11
B10	942.27	2129.66	2547.65 ¹	510.04	711.76	932.80	1120.76	1371.34
B11	754.21	1377.20	2547.65	612.76	884.17	1227.74	1562.01	1870.07
B12	929.39	1594.17	2519.56	735.83	1007.82	1390.83	1730.75	2082.88

Os dados de vazão utilizados neste estudo foram obtidos das seguintes formas:

- diretamente das séries históricas da ANA, nos períodos em que os dados foram calculados e estavam disponíveis;
- a partir da transformação das cotas em vazão, para os períodos onde haviam falhas nas séries de vazão, porém, existiam dados nas séries históricas de cotas da ANA. Neste caso, a transformação das cotas em vazão foi calculada a partir da construção das curvas-chave, com dados obtidos nos levantamentos de descarga líquida disponíveis para cada um dos postos de vazão.
- a partir da média diária dos dados de vazão não consistidos (ou de cotas transformadas em vazão pelo método supracitado), obtidos em tempo real no site da ANA, desde 2006. Esta opção foi utilizada em 7 dos 12 postos estudados.

¹ A equação da curva-chave da sub-bacia B10 não teve alcance para estimar a vazão com base na cota de emergência de forma satisfatória; desta forma, optou-se por repetir o valor de vazão da estação mais próxima à jusante.

De forma geral, algumas curvas-chave obtidas com os dados dos levantamentos de descarga líquida disponibilizados pela ANA (para as seções dos canais referentes aos 12 postos que compõe este estudo) não tiveram alcance para calcular satisfatoriamente as vazões muito altas. Desta forma, utilizou-se a estratégia de criar alguns pontos adicionais em algumas curvas-chave, com base nas próprias séries históricas consistidas de dados de cota e vazão, disponibilizados pela ANA. Esta é uma limitação que ocorre em grande parte dos estudos voltados a hidrologia que dependem de curvas-chave, pois levantamentos de descargas líquidas em períodos de cheia são escassos, principalmente em pequenas bacias, onde estes eventos têm períodos de duração muito curtos.

No Apêndice D apresentam-se as curvas-chave originais (sem pontos adicionais) calculadas a partir dos dados da ANA, para os 12 postos de vazão. Observa-se, na Figura 4.13, que há um exagero nas vazões altas da equação original na curva-chave do posto B5. Com os pontos adicionais, a equação da curva-chave alcançou valores de vazão mais coerentes.

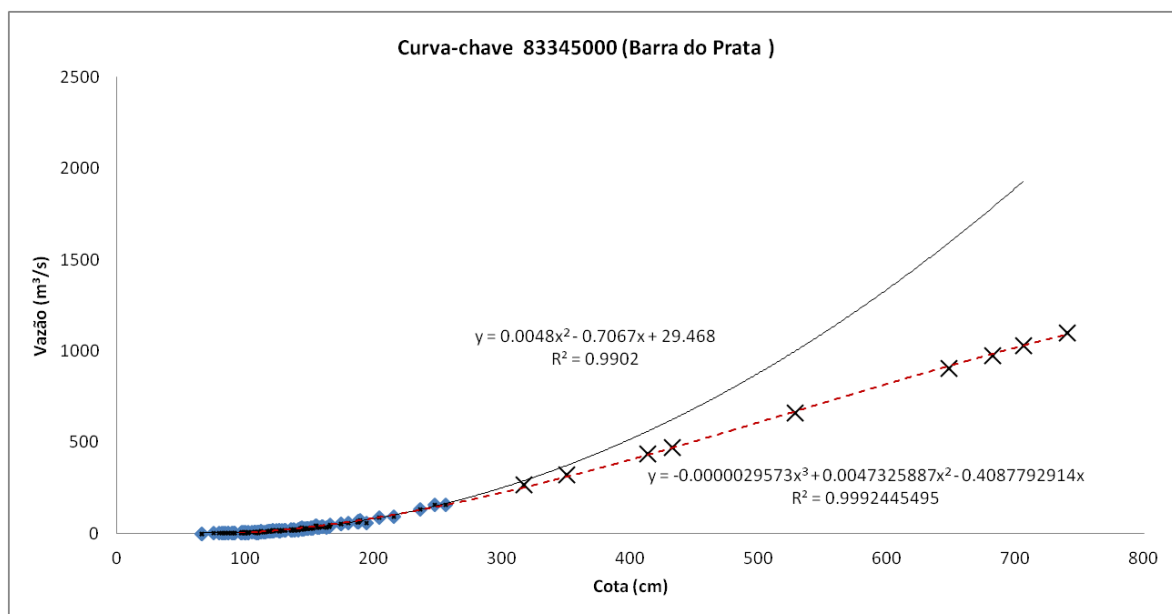


Figura 4.13 Curva-chave do posto B5, com a inserção de pontos adicionais obtidos das séries históricas da ANA. A linha em preto representa a curva-chave original e a linha em cor vermelha pontilhada, representa a nova curva-chave calculada incluindo os pontos adicionais.

4.3. Diagramas da Característica Operacional Relativa (ROC) por sub-bacias

Primeiramente os diagramas ROC foram construídos individualmente para cada uma das 12 sub-bacias, considerando os limiares de atenção, alerta, emergência (quando existentes) e para os percentis P_{90} , P_{95} , P_{98} , P_{99} e $P_{99.5}$. Os resultados foram analisados para as previsões de 24 e 48 horas, em conjunto com os gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado *versus* vazões observadas para os 10 períodos definidos neste estudo.

Cabe salientar que, para algumas sub-bacias (com limiares disponíveis de atenção, alerta e emergência) alguns níveis nunca foram atingidos nos 10 eventos definidos para o estudo, motivo pelo qual os respectivos diagramas ROC não apresentam pontos referentes a alguns limiares. Entretanto, pode-se ter uma visão geral do desempenho do conjunto de previsões através dos pontos referentes aos percentis. Os limiares de emergência para todas as sub-bacias representam vazões que têm uma frequência extremamente baixa, e os percentis referentes a estes limiares, ficariam acima de $P_{99.9}$. Pode-se imaginar que se uma determinada seção de um rio atinge a cota de emergência uma vez ao ano, teríamos uma frequência de $1/365$. Portanto, a avaliação estatística para a cota de emergência sempre poderá ser discutível. Para um melhor entendimento, uma avaliação detalhada sobre estes aspectos de cada sub-bacia é apresentada a seguir.

A Figura 4.14 apresenta as vazões previstas e simuladas *versus* as vazões observadas (acima) e os diagramas ROC (embaixo) para antecedências de 24 horas (esquerda) e 48 horas (direita), nos períodos dos eventos estudados, correspondentes à sub-bacia B1. Esta bacia, de 397 km^2 de área acumulada, apresenta $P_{90}=15,49 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Observa-se, nos gráficos da parte de cima, que o conjunto de previsões superestima um pouco as vazões baixas e subestima bastante as vazões altas (acima do percentil 99,5), tanto para 24, quanto para 48 horas. Este efeito também é observado nas vazões simuladas (pontos em preto), indicando que, em parte, a origem do problema pode ter causa nas incertezas do modelo hidrológico, ou na representatividade espacial da chuva, tanto observada (poucos pluviômetros), quanto prevista para as vazões mais altas, que afeta em particular esta e outras sub-bacias menores.

Entretanto, os diagramas ROC (parte de baixo da Figura 4.14) indicam taxas de acerto maiores do que as taxas de falso alarme, até mesmo para os percentis mais altos, exceto para as previsões de 24 horas do percentil $P_{99.5}$, como consequência da subestimação das vazões

mais altas, como foi mencionado acima, e também do menor número de ocorrência destes eventos.

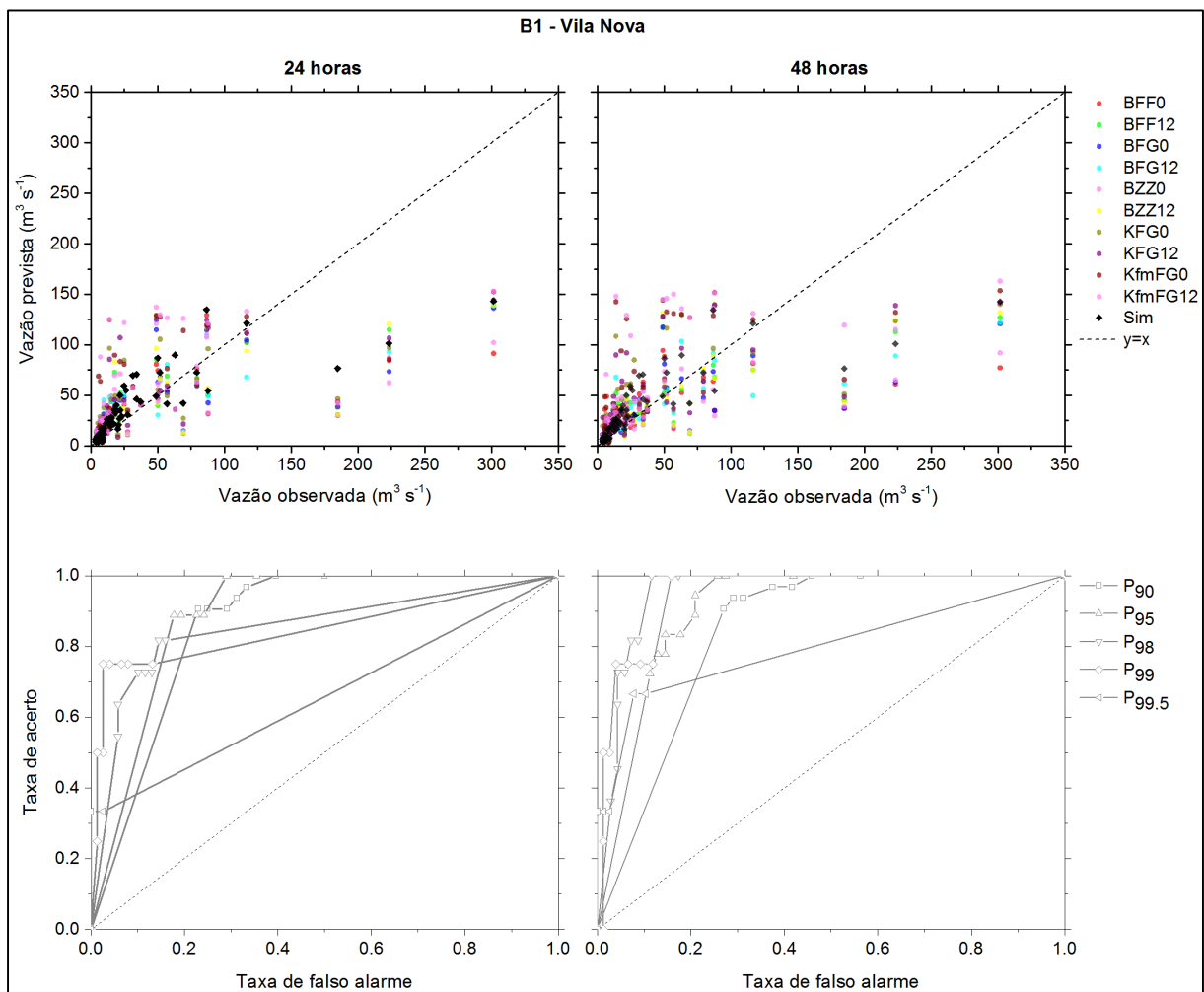


Figura 4.14 Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) *versus* vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os percentis P₉₀, P₉₅, P₉₈, P₉₉ e P_{99.5}. Os gráficos referem-se à sub-bacia B1, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).

Para a sub-bacia B2 (Figura 4.15), observa-se uma tendência do conjunto de previsões a subestimar as vazões altas, tanto para 24, quanto para 48 horas. Este efeito também é observado nas vazões simuladas (pontos em preto); porém, com menos intensidade, se comparado aos resultados da sub-bacia B1, indicando que parte deste efeito pode ter causa nas incertezas do modelo hidrológico, ou pela dificuldade de incluir no modelo as precipitações intensas e localizadas, tanto observadas (poucos pluviômetros), quanto previstas.

De forma geral, os diagramas ROC para a sub-bacia B2 (parte de baixo da Figura 4.15) indicam taxas de acerto maiores do que as taxas de falso alarme para todos os percentis, porém, nas vazões mais baixas (P_{90}), as taxas de falso alarme aumentaram significativamente em relação às faixas de vazão maiores, em correspondência com a tendência de superestimação discutida para as vazões baixas, tanto para valores simulados, como previstos em 24 e 48 horas.

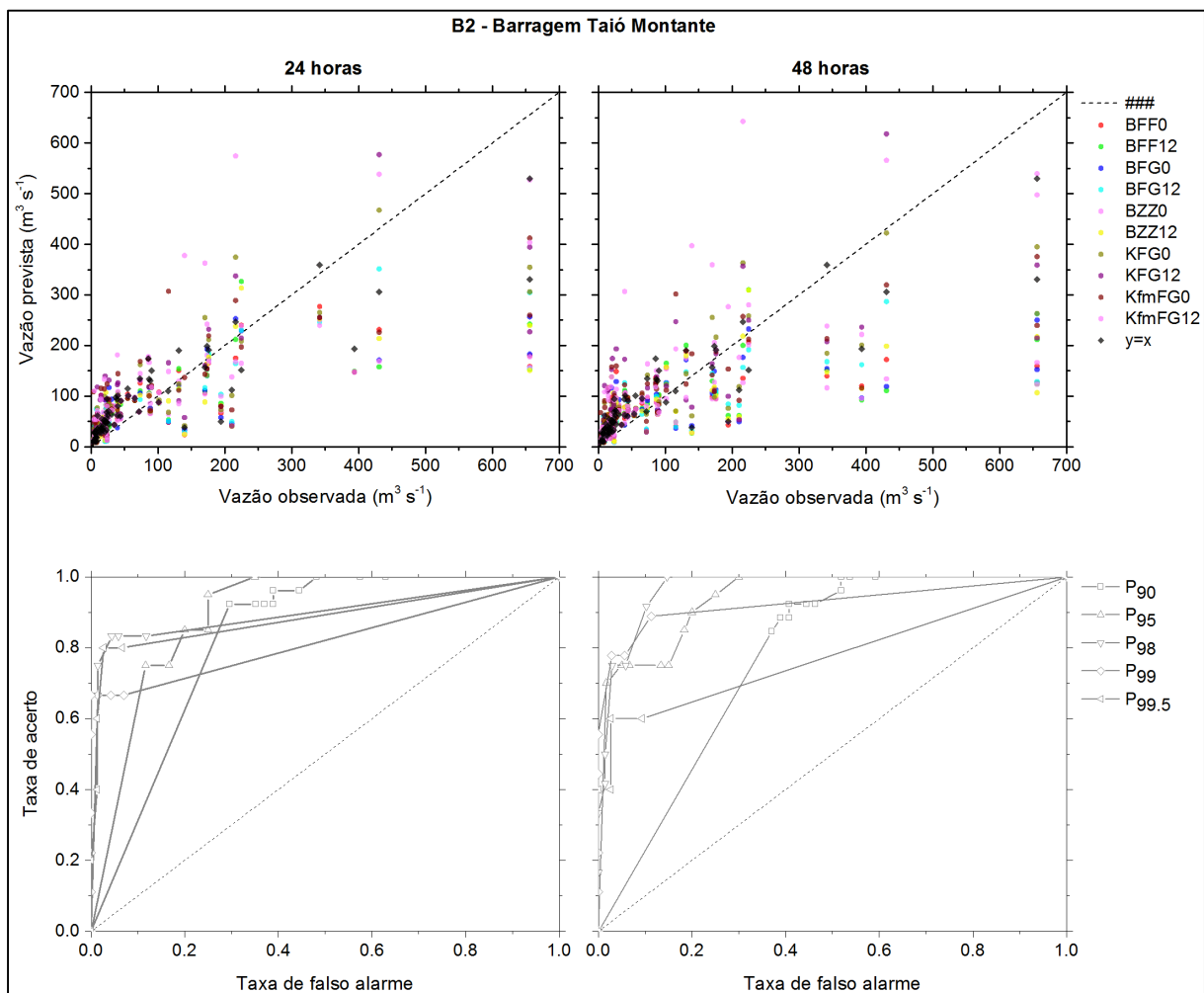


Figura 4.15 Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) *versus* vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os percentis P_{90} , P_{95} , P_{98} , P_{99} e $P_{99.5}$. Os gráficos referem-se à sub-bacia B2, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).

Observa-se, na sub-bacia B3, especificamente nos gráficos da parte de cima da Figura 4.16, que o conjunto de previsões superestima as vazões baixas (aproximadamente até $< 70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), enquanto para as vazões médias e altas mostra uma alta dispersão ao redor do valor observado, tanto para 24 quanto para 48 horas. Este efeito não acontece nas vazões simuladas (pontos em preto), indicando que parte deste efeito pode ter causa na incerteza da chuva prevista para as vazões médias e altas. Os diagramas ROC (parte de baixo da Figura 4.16) indicam que o resultado para os percentis 90 e 95 é pouco satisfatório, ficando próximo da reta $y = x$, e com taxas de falso alarme elevadas em vários casos. Já para níveis mais elevados, as taxas de acerto aumentam; no entanto, a taxa de falso alarme é significativa na maioria dos casos, exceto para os maiores limiares de probabilidade.

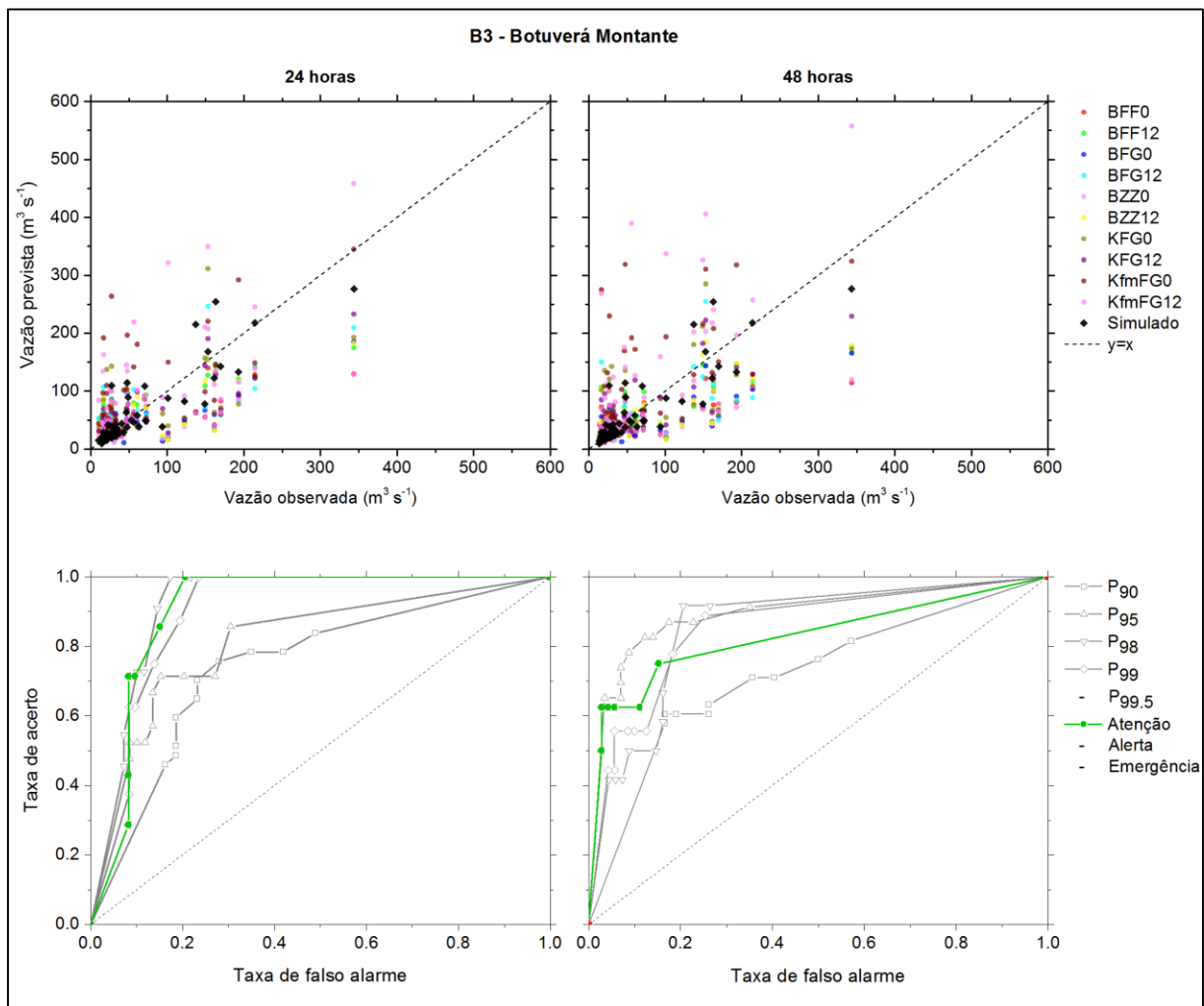


Figura 4.16 Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) *versus* vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para o limiar de atenção, e os percentis P₉₀, P₉₅, P₉₈, P₉₉ e P_{99.5}. Os gráficos referem-se à sub-bacia B3, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).

Para a sub-bacia de Brusque (B4), com área acumulada (1210 km²) maior do que as anteriores, os resultados foram bem mais promissores. Observa-se, nos gráficos da parte de cima da Figura 4.17, que apesar do conjunto de previsões subestimar um pouco as vazões altas, a simulação apresentou bons resultados, tanto para 24, quanto para 48 horas. Os diagramas ROC (parte de baixo da Figura 4.17) indicam altas taxas de acerto para todas as faixas de limiares e baixo índice de falsos alarmes, com os melhores resultados para 48 horas do que para 24 horas, provavelmente porque o espalhamento das previsões em 24 horas é menor, diminuindo a chance de um maior número de membros alcançarem um determinado limiar. A taxa de acerto para o limiar de emergência foi quase perfeita, indicando que o sistema acertou quase a totalidade dos poucos eventos que ocorreram nesta faixa de vazão.

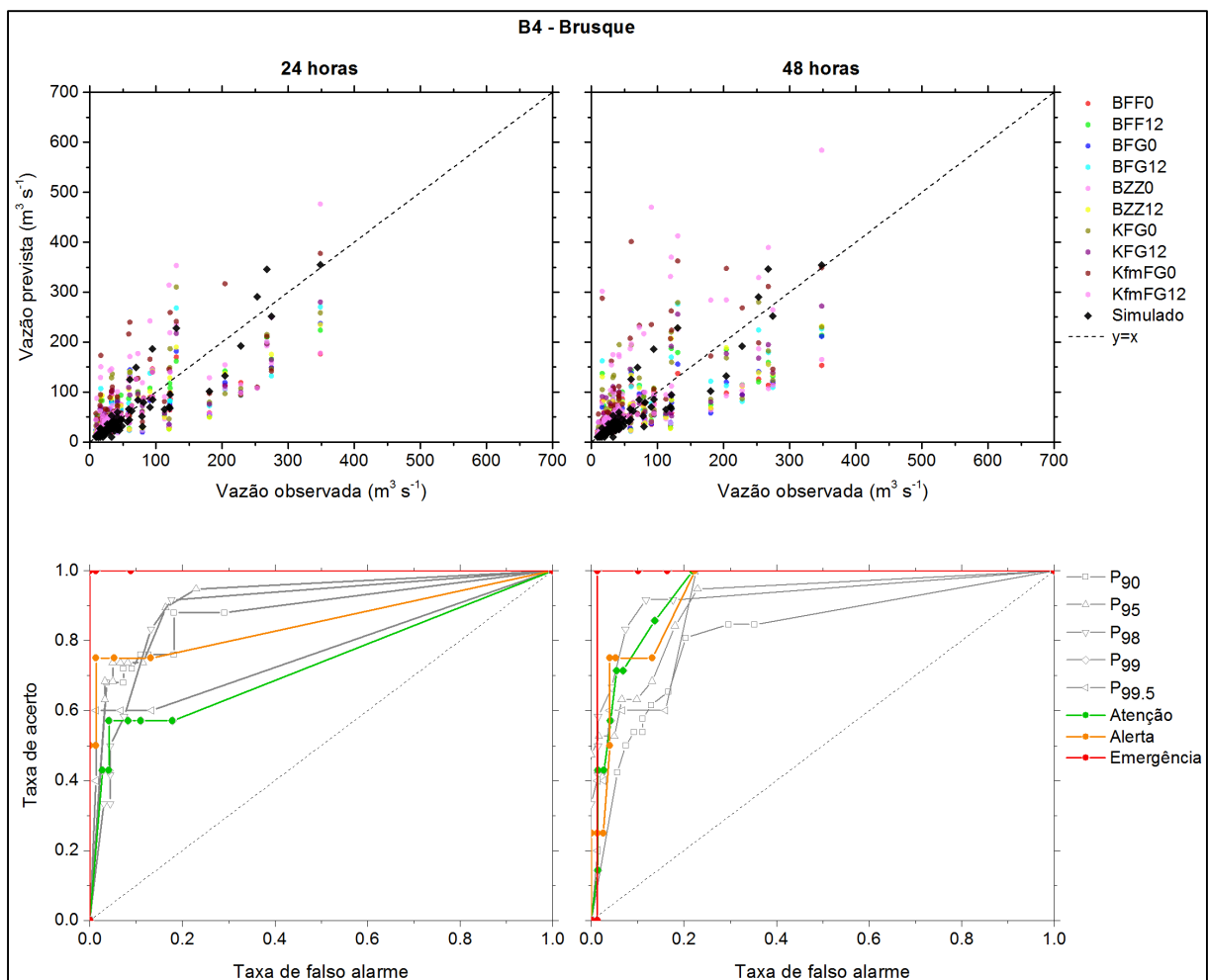


Figura 4.17 Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) *versus* vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os limiares de atenção, alerta, emergência e os percentis P₉₀, P₉₅, P₉₈, P₉₉ e P_{99.5}. Os gráficos referem-se à sub-bacia B4, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).

No caso da bacia B5 (Figura 4.18), cuja área acumulada é de 1430 km², observa-se, nos gráficos da parte de cima, que o conjunto de previsões superestima as vazões baixas (aproximadamente até < 200 m³ s⁻¹, próximo ao percentil P99,5) e subestima as vazões altas (com exceção do membro “Kfm_F_G”), tanto para 24, quanto para 48 horas. Este efeito também acontece nas vazões simuladas (pontos em preto), indicando que parte deste efeito pode ter causa nas incertezas do modelo hidrológico ou na precipitação já discutidas. Os diagramas ROC (parte de baixo da Figura 4.18) indicam resultados pouco satisfatórios para esta bacia, com taxas de acerto próximas ou inferiores a 50% dos casos e taxas de falso alarme elevadas.

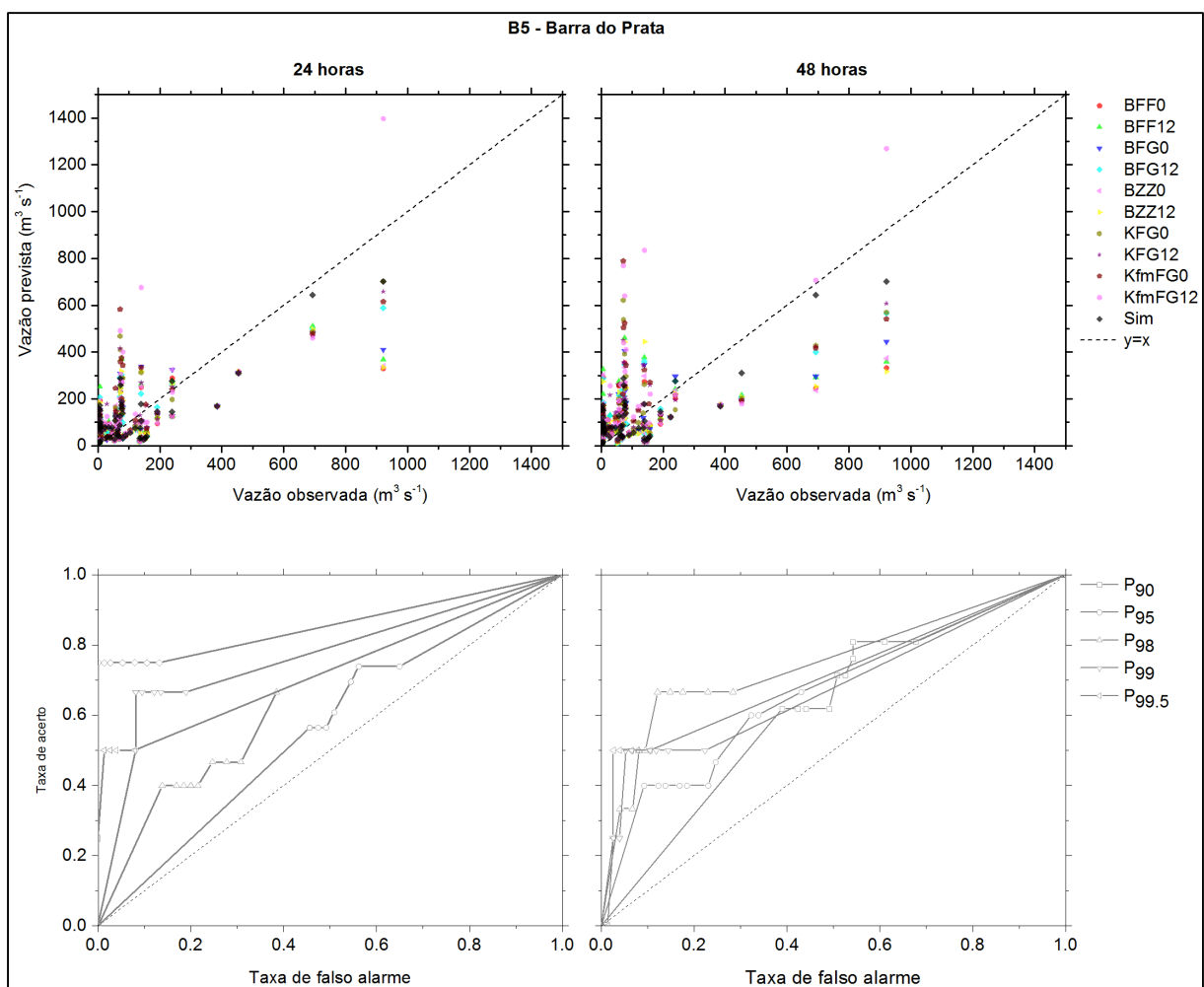


Figura 4.18 Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) *versus* vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os percentis P₉₀, P₉₅, P₉₈, P₉₉ e P_{99,5}. Os gráficos referem-se à sub-bacia B5, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).

Para a sub-bacia B6 (Figura 4.19) o conjunto de previsões subestima bastante as vazões médias e altas, tanto para 24, quanto para 48 horas. Este efeito também acontece nas vazões simuladas (pontos em cor preta), indicando que, em parte, as causas podem estar nas incertezas do modelo hidrológico, ou pela falta de chuva, tanto observada (poucos pluviômetros), quanto prevista para as vazões mais altas. De forma geral, em função da subestimação, houve impacto nas taxas de acerto dos diagramas ROC (parte de baixo da Figura 4.19), com resultados muito semelhantes para todos os limiares considerados. Observa-se que taxas de acerto próximas a 0.6 correspondem a taxas de falso alarme próximas a 0,2, e podem ser obtidas ao considerar limiares de probabilidade baixos (0,35-0,45). Porém ao aumentar o limiar de probabilidade (de forma efetiva, o número de membros que prevê o evento) a taxa de acerto diminui sensivelmente sem diminuir a taxa de falso alarme.

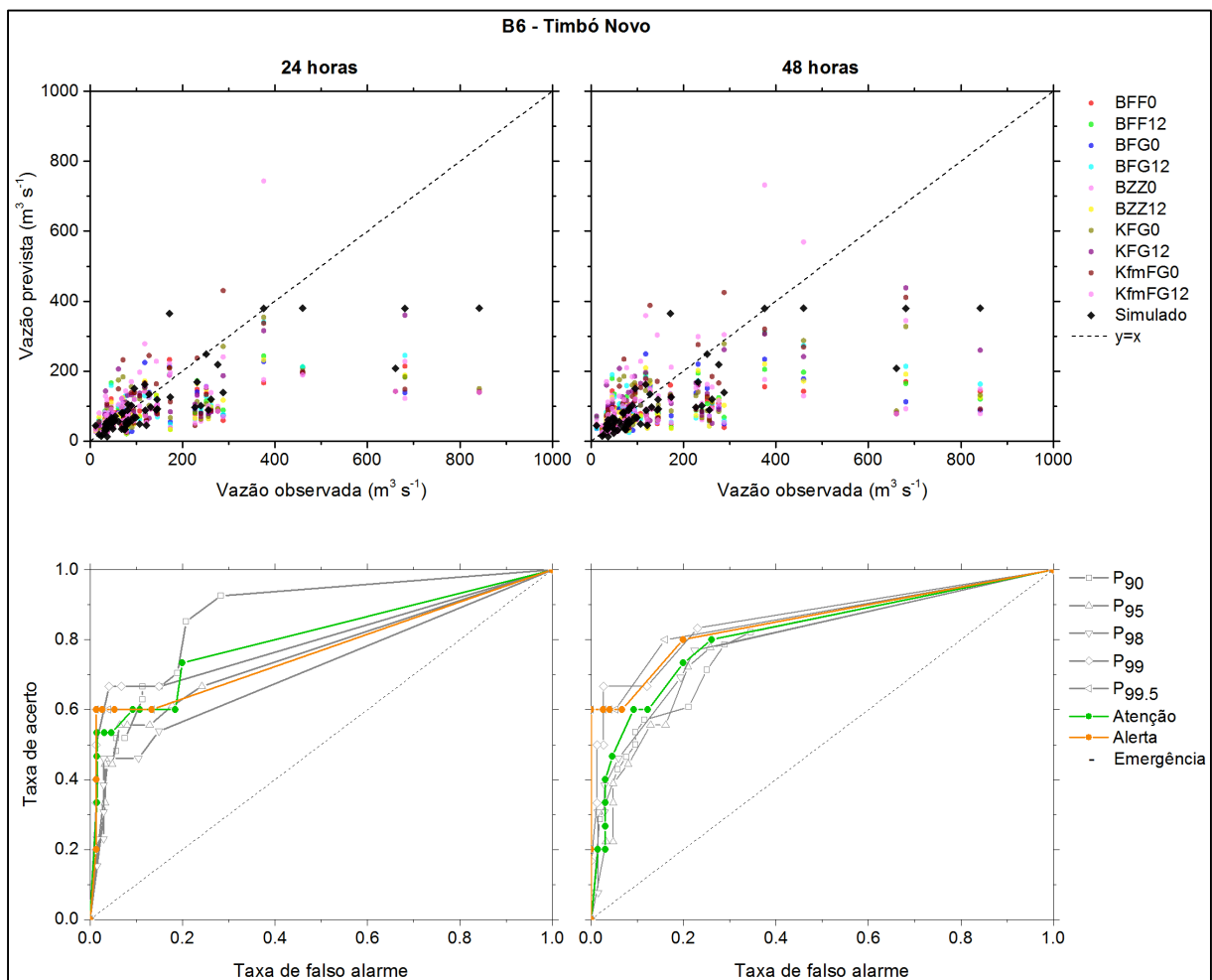


Figura 4.19 Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) *versus* vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os limiares de atenção, alerta e os percentis P₉₀, P₉₅, P₉₈, P₉₉ e P_{99,5}. Os gráficos referem-se à sub-bacia B6, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).

Para a sub-bacia B7 observa-se, nos gráficos da parte superior da Figura 4.20, que o conjunto de previsões culminam em uma distribuição equilibrada em torno do eixo diagonal $y=x$, assim como as vazões simuladas, tanto para 24, quanto para 48 horas, porém com uma tendência à subestimação das vazões previstas pelo membro “Kfm_F_G”. Os diagramas ROC (parte inferior da Figura 4.20) indicam taxas de acerto maiores do que as taxas de falso alarme para todos os limiares, com taxas de acerto mais baixas para os limiares P_{99} , $P_{99,5}$ e Emergência, considerando previsões com antecedência de 24 horas, e $P_{99,5}$ para previsões com antecedência de 48 horas. Isto se deve, em parte, ao baixo número destes eventos ocorrido durante os períodos estudados, aumentando a sensibilidade dos resultados. Para os demais níveis, limiares de probabilidade entre 0,45 e 0,65 produziram os melhores resultados.

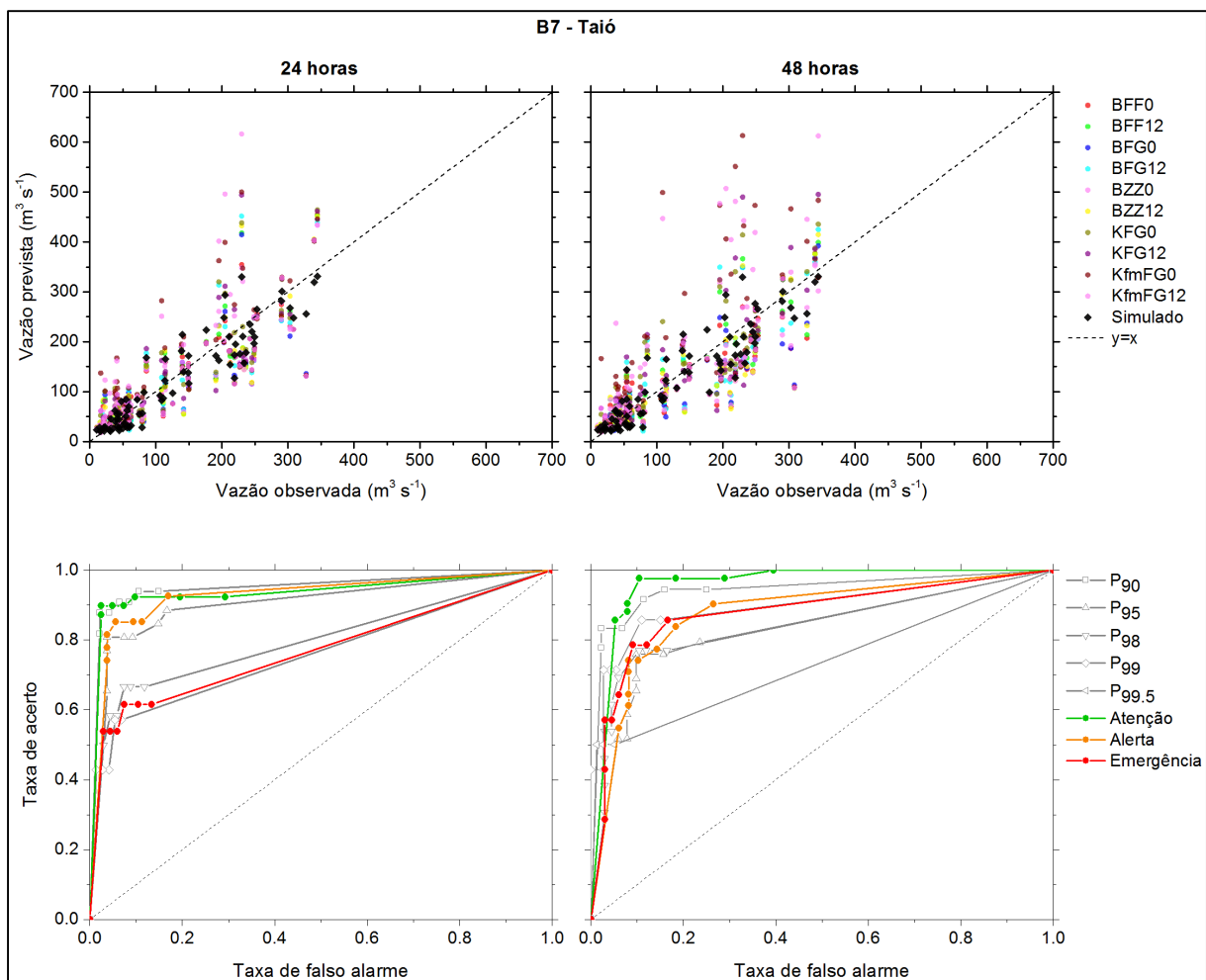


Figura 4.20 Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) *versus* vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os limiares de atenção, alerta, emergência e os percentis P_{90} , P_{95} , P_{98} , P_{99} e $P_{99,5}$. Os gráficos referem-se à sub-bacia B7, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).

Para a sub-bacia B8 (Figura 4.21), o conjunto de previsões apontou para uma distribuição equilibrada em torno do eixo diagonal $y=x$, porém com um espalhamento muito alto, tanto para 24, quanto para 48 horas. Os diagramas ROC (parte inferior da Figura 4.21) também indicam taxas de acerto acima de 0,6, mas com taxas de falso alarme, em muitas vezes, superior a 0,2 para todos os limiares. Considerando que o posto de Ituporanga (B8) sofre uma atenuação bastante clara nas vazões em função da barragem de contenção de cheias, os resultados foram favoráveis em função da correção do viés e os resultados são melhores para as vazões mais elevadas.

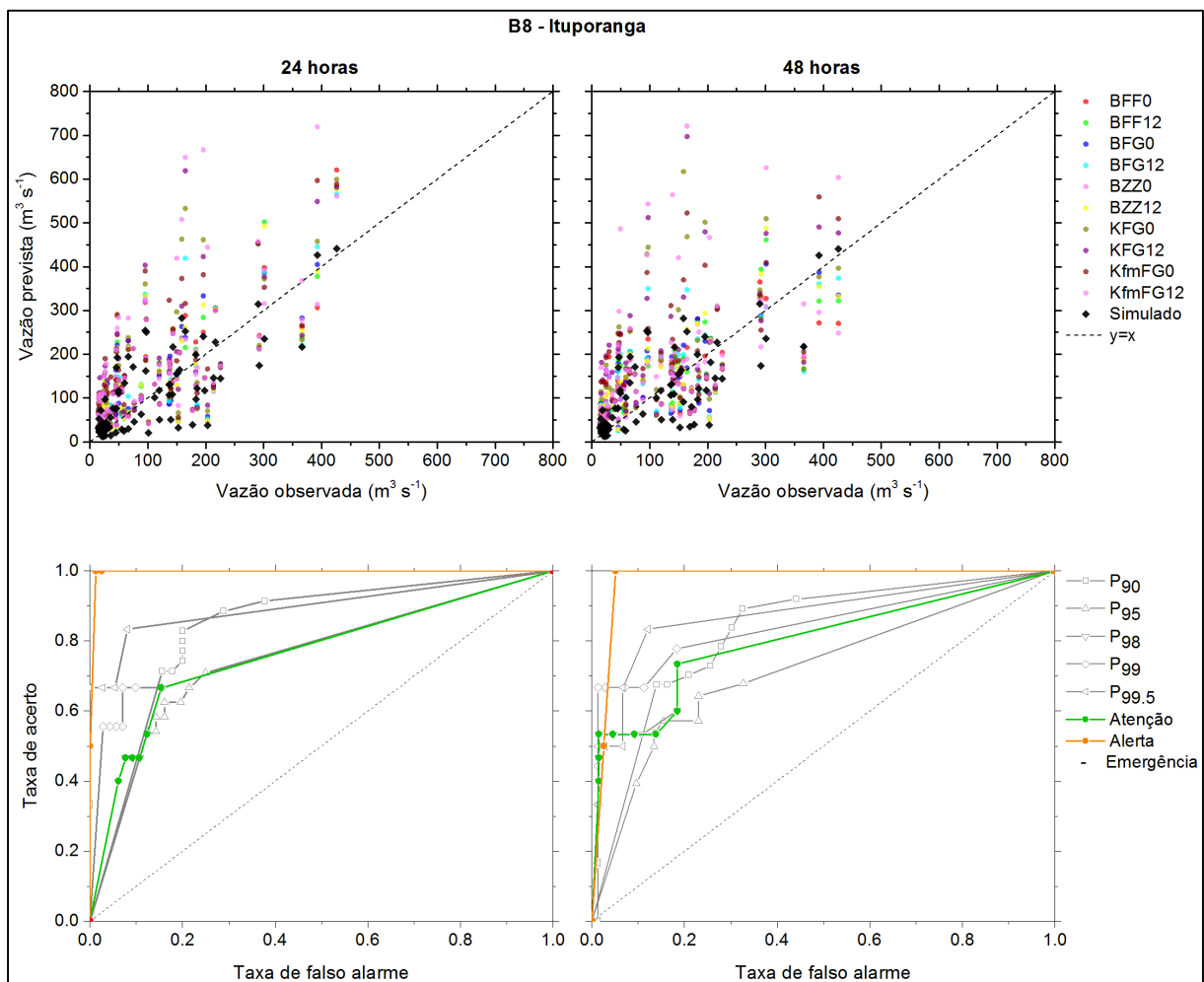


Figura 4.21 Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) *versus* vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os limiares de atenção, alerta e os percentis P₉₀, P₉₅, P₉₈, P₉₉ e P_{99.5}. Os gráficos referem-se à sub-bacia B8, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).

Para a sub-bacia B9, cujos resultados são considerados bons, observa-se, nos gráficos da parte superior da Figura 4.22, que o conjunto de previsões ficou com uma distribuição equilibrada em torno do eixo diagonal $y=x$, assim como as vazões simuladas, tanto para 24, quanto para 48 horas, porém com uma maior dispersão neste segundo caso. Os diagramas ROC (parte de baixo da Figura 4.22) indicam taxas altas de acerto e baixas taxas de falsos alarmes para todos os limiares para 24 horas. Para 48 horas, limiares de probabilidade acima de 0,35 (no geral) conseguem diminuir a taxa de falso alarme a valores inferiores a 0,1.

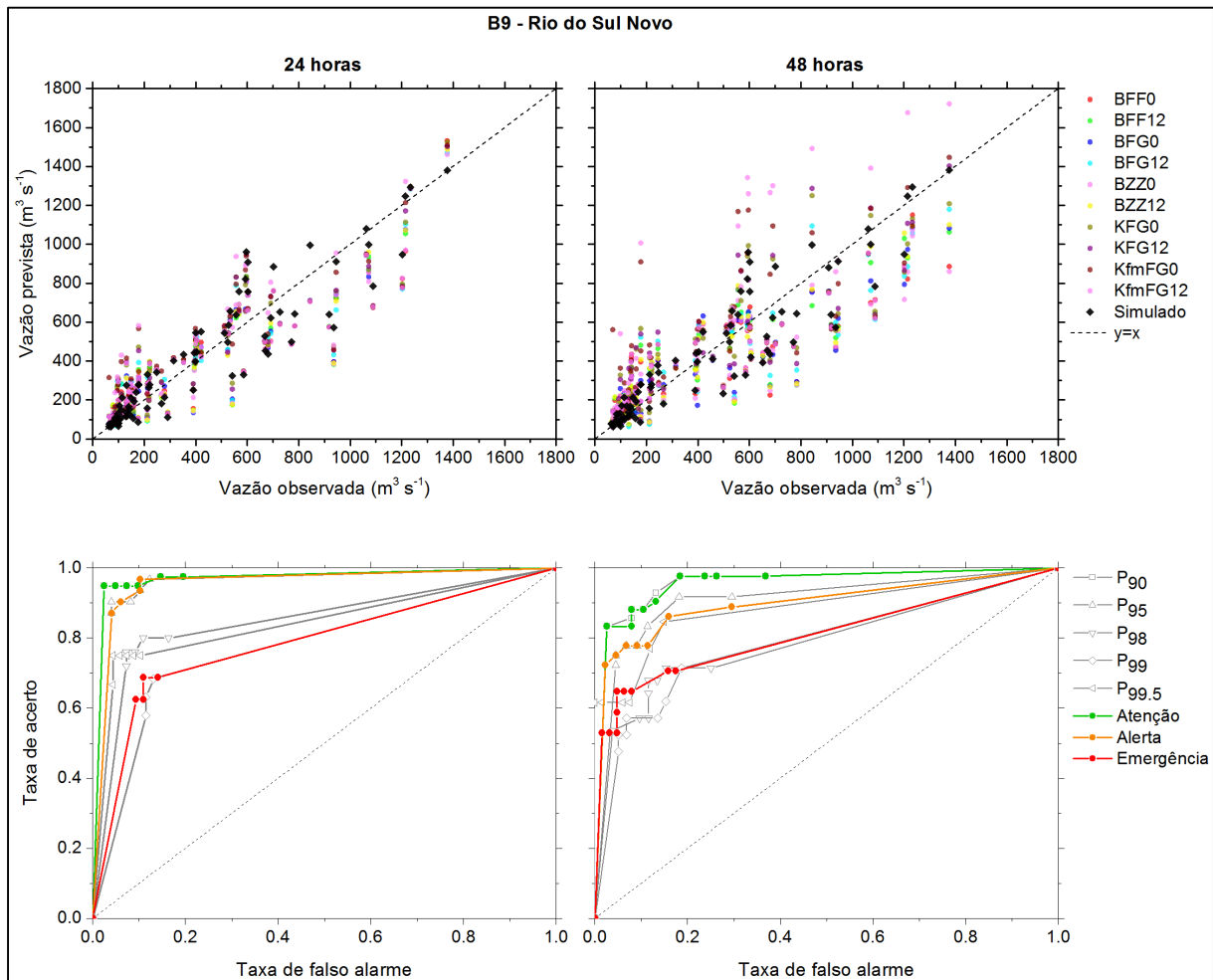


Figura 4.22 Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) *versus* vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os limiares de atenção, alerta, emergência e os percentis P₉₀, P₉₅, P₉₈, P₉₉ e P_{99.5}. Os gráficos referem-se à sub-bacia B9, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).

Para a sub-bacia B10, cujos resultados também são considerados bons, observa-se, nos gráficos da parte superior da Figura 4.23, que o conjunto de previsões caracterizou-se por mostrar uma distribuição equilibrada em torno do eixo diagonal $y=x$, assim como as vazões simuladas, tanto para 24, quanto para 48 horas. De modo semelhante à sub-bacia B9, para 48 horas, a dispersão é maior. Os diagramas ROC (parte inferior da Figura 4.23) indicam um comportamento similar ao observado para a sub-bacia B9 porém, para antecedências de 48 horas limiares de probabilidade acima de 0,55 (no geral) ainda não conseguem diminuir a taxa de falso alarme à valores inferiores a 0,1, ficando, portanto, abaixo de 0,2.

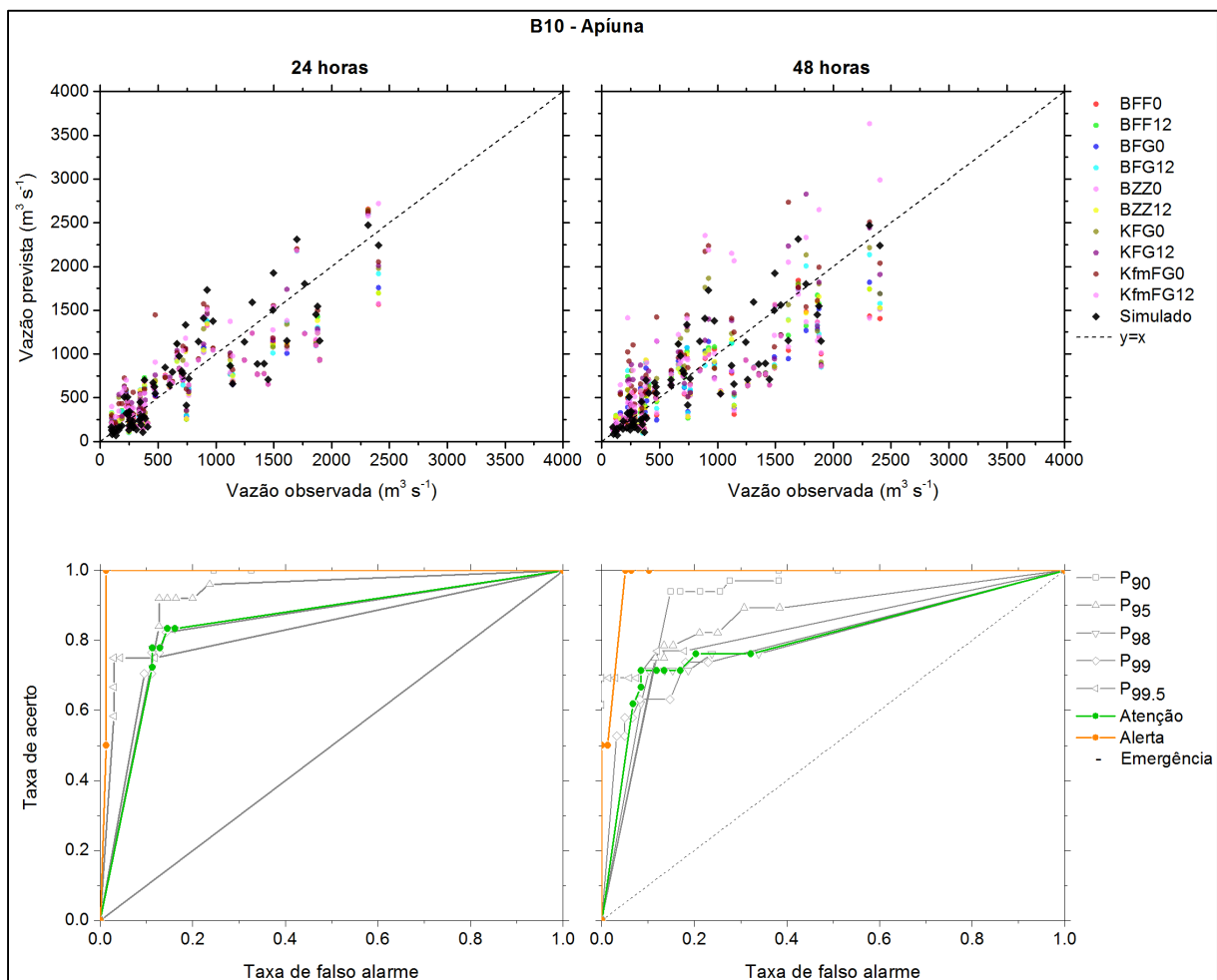


Figura 4.23 Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) *versus* vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os limiares de atenção, alerta e os percentis P₉₀, P₉₅, P₉₈, P₉₉ e P_{99.5}. Os gráficos referem-se à sub-bacia B10, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).

Observa-se, nos gráficos da parte superior da Figura 4.24, que o conjunto de previsões para a sub-bacia B11 apresenta uma leve tendência de subestimar as vazões altas, tanto para 24, quanto para 48 horas. Por outro lado, as simulações apresentam tendência contrária, e superestimam as vazões na faixa intermediária mostrada nos gráficos. Os diagramas ROC (parte inferior da Figura 4.24) apresentaram índices de acerto satisfatórios, entre os percentis P_{90} até P_{98} , e as taxas de falso alarme ficaram em torno de 0,4 para limiares de probabilidade de 0,35.

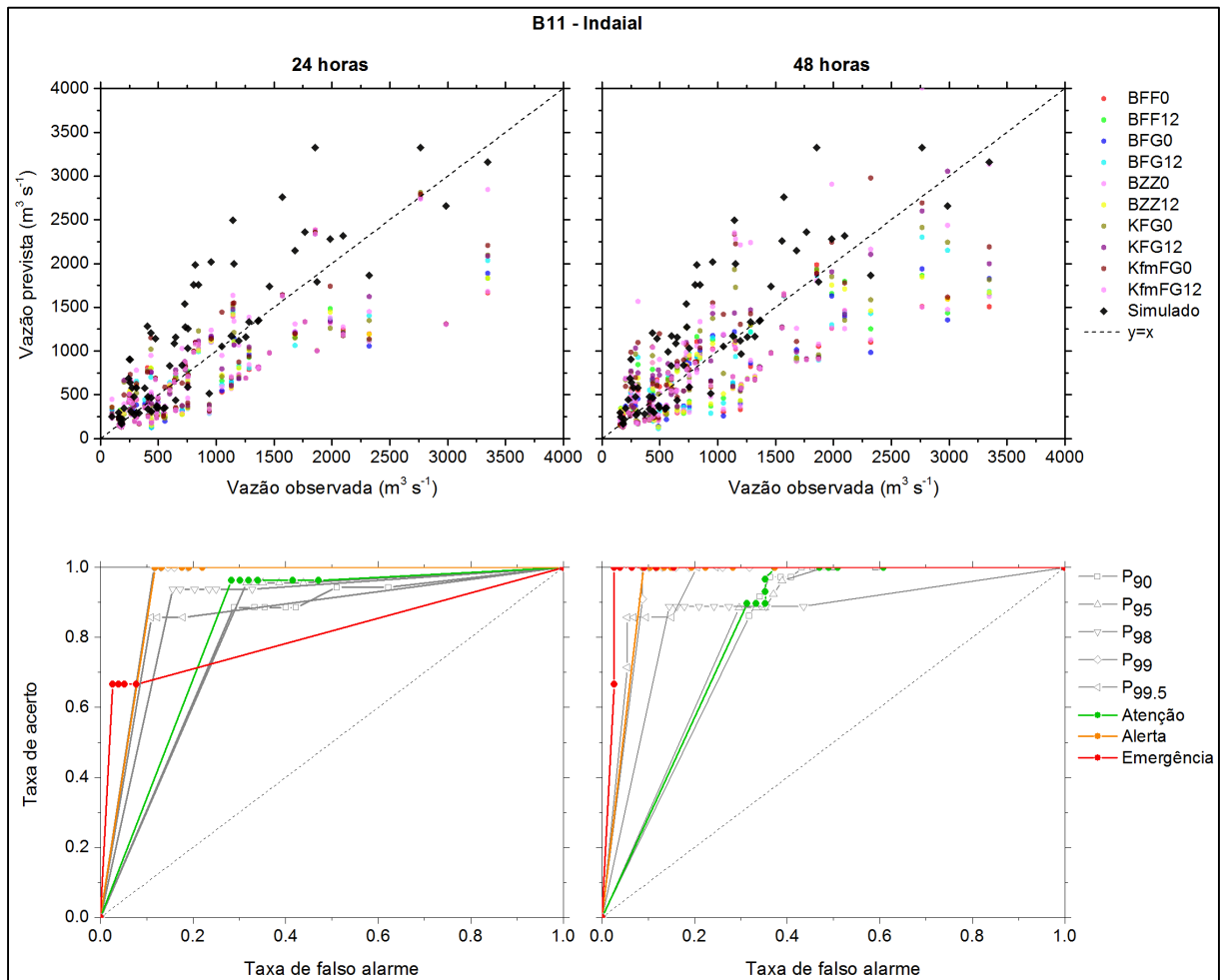


Figura 4.24 Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) *versus* vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os limiares de atenção, alerta, emergência e os percentis P_{90} , P_{95} , P_{98} , P_{99} e $P_{99.5}$. Os gráficos referem-se à sub-bacia B11, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).

Para a sub-bacia de Blumenau (B12) (Figura 4.25), a correspondência entre previsão e observação é adequada, com exceção do membro “Kfm_F_G” que apresenta a tendência de subestimar as vazões altas para 48 horas. De qualquer forma, os diagramas ROC (parte inferior da Figura 4.25) apresentaram taxas de acerto superiores a 0,6 em quase todos os casos, com taxas de falso alarme inferiores a 0,1 para limiares de probabilidade acima de 0,35.

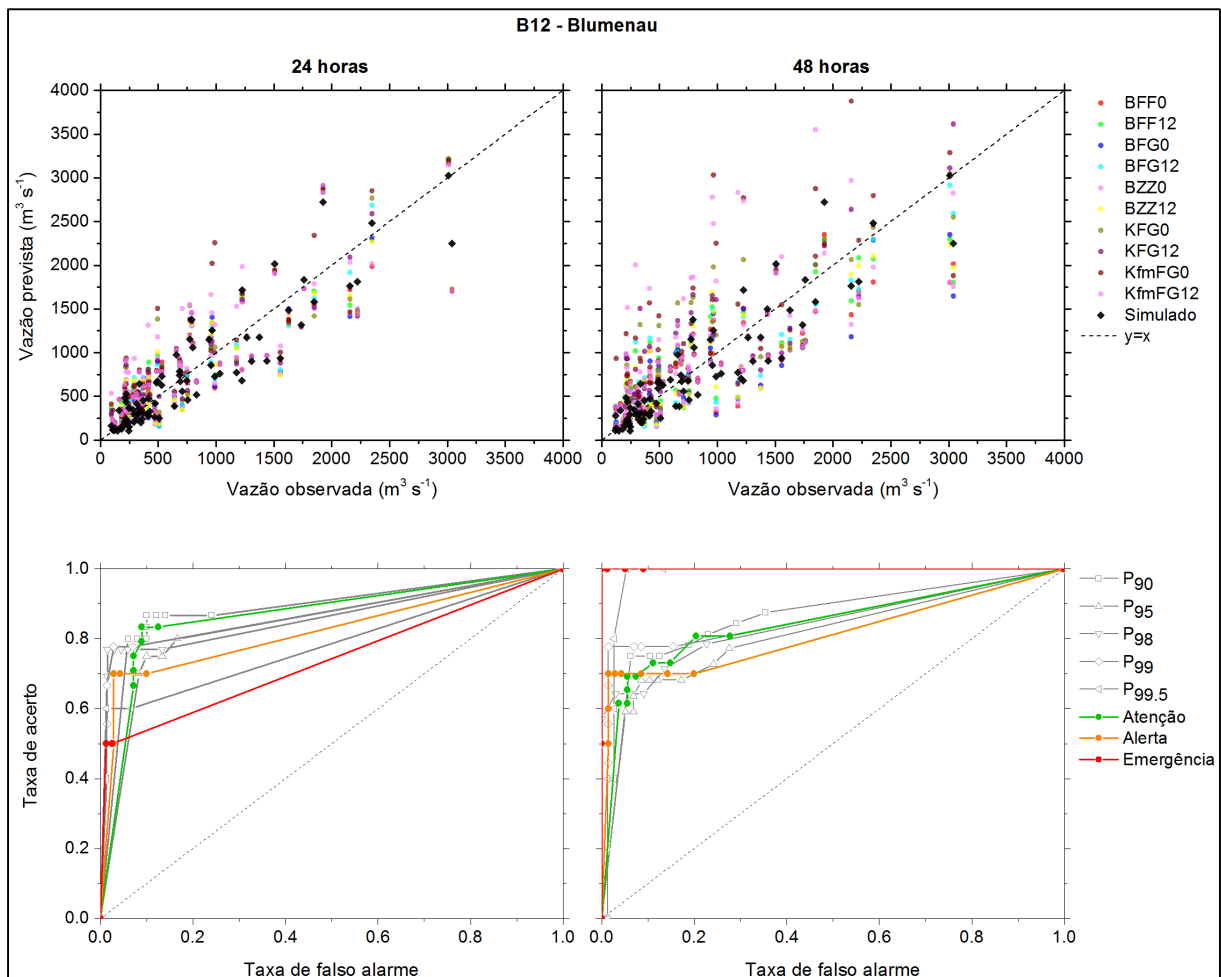


Figura 4.25 Acima, gráficos das vazões previstas pelo conjunto e também o valor simulado (escala de cores) *versus* vazões observadas para os períodos dos 10 eventos. Abaixo, diagramas ROC para os limiares de atenção, alerta, emergência e os percentis P₉₀, P₉₅, P₉₈, P₉₉ e P_{99.5}. Os gráficos referem-se à sub-bacia B12, para antecedências de 24 (esquerda) e 48 horas (direita).

4.4. Diagramas da Característica Operacional Relativa (ROC) por grupos

Agrupar os resultados das sub-bacias com o objetivo de reduzir o efeito da baixa densidade de dados referentes aos limiares das vazões mais altas, foi outra forma de avaliar o desempenho

do sistema usando diagramas ROC, com vistas a subsidiar a compreensão dos resultados gerais obtidos no estudo. Se imaginarmos que, para um determinado grupo de sub-bacias, o nível de emergência foi atingido apenas uma vez em cada uma delas nos eventos estudados, o diagrama ROC apresentado de forma individual (com o histórico de uma sub-bacia apenas) seria pobre em termos de resultados. Já, no caso da avaliação por grupos, se avaliarmos o diagrama ROC de 5 sub-bacias agrupadas, em que cada uma delas teve apenas um evento de emergência, teríamos 5 eventos no diagrama ROC.

Desta forma, os resultados das nove sub-bacias, para as quais se dispõe dos limiares disponíveis de atenção, alerta e emergência (apresentados de forma unitária no item anterior), foram reunidos em dois grupos, de acordo com o tamanho da área de drenagem. O primeiro grupo, com áreas de drenagem que variam de 397 a 1650 km², inclui as sub-bacias menores B3, B4, B6, B7 e B8; enquanto o segundo grupo, com áreas de drenagem que variam de 5160 a 12200 km², inclui as sub-bacias maiores B9, B10, B11 e B12 (Tabela 4.1).

Os diagramas ROC, apresentados de forma agrupada, referentes ao primeiro e segundo grupos de sub-bacias, para previsões de 24 horas (Figura 4.26), mostram melhores taxas de acerto das previsões para as bacias maiores (grupo 2).

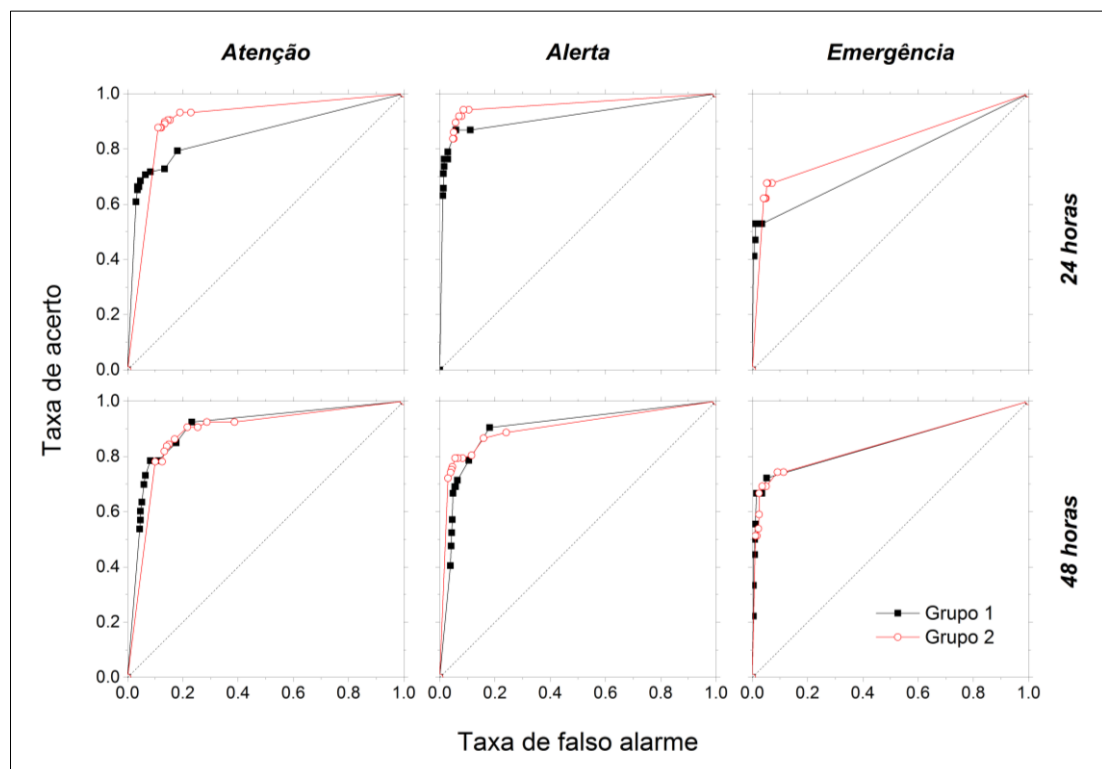


Figura 4.26 Diagramas ROC para os grupos de sub-bacias 1 e 2, para os níveis de atenção, alerta, e emergência, calculados para 24 e 48 horas de antecipação.

Em contraste, a taxa de falso alarme também é maior para as bacias maiores; porém em menor grau, mantendo-se abaixo de 0,2 para quase todos os limiares de probabilidade considerados. Isto se deve ao fato de que para as sub-bacias maiores o tempo de concentração também é maior, e, conseqüentemente, a vazão prevista com antecedência de 24 horas tem um maior efeito da propagação da onda de cheia, e, em menor grau, da precipitação prevista no período.

Para as sub-bacias menores, a influência da chuva prevista e a probabilidade de erro dada pela localização da chuva prevista são maiores. Observou-se também que, para antecedência de 24 horas, as taxas de acerto e falso alarme são próximos, evidenciando um baixo espalhamento dos membros do conjunto de previsões. Também evidencia o baixo espalhamento dos membros para esta antecedência, o fato de que não se observam mudanças significativas entre os pontos obtidos para diferentes limiares de probabilidade.

Para o nível de atenção, observou-se que para os primeiros limiares de probabilidade a taxa de falso alarme é mais alta, com pouco ganho em termos de acerto. Já para os níveis de alerta e emergência, os limiares mais baixos de probabilidade correspondem às maiores taxas de acerto e limiares superiores de probabilidade se revertem em diminuição da taxa de acerto. Para previsões com antecedência de 48 horas, o comportamento dos dois grupos foi praticamente igual, sugerindo uma menor influência relacionada ao tamanho da sub-bacia.

Observa-se que os diagramas ROC avaliados de forma agrupada, permite uma compreensão melhor dos resultados, visto que, existe uma menor influência da baixa quantidade de dados referentes aos limiares das vazões mais altas.

5 CONCLUSÕES

A aplicação do modelo hidrológico MHD-INPE para a bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu apresentou boa capacidade de simular as vazões na maioria dos postos avaliados no estudo. Considerando que a sua concepção é voltada para uso com grandes bacias, os resultados estatísticos da verificação do modelo indicam que, para sub-bacias menores, desde que existam variáveis meteorológicas disponíveis (principalmente a precipitação), é possível obter desempenho satisfatório, utilizando o MHD-INPE para simulações também com pequenas bacias.

Os resultados das previsões de vazão por conjuntos para os períodos avaliados sugerem que a grande maioria dos eventos pode ser prevista satisfatoriamente com antecedências de até 48 horas mediante a metodologia proposta. Mesmo com pequenas diferenças, todos os diagramas ROC dos grupos 1 e 2 mostraram altas taxas de acerto com baixo custo em termos de alarme falso. Considerando que as previsões são feitas apenas para intervalos de 24 e 48 horas de antecedência, conclui-se que para bacias hidrográficas pequenas, em que o tempo de concentração pode ser menor do que 24 horas, as previsões servem para indicar o cenário futuro de um evento antes mesmo do início da chuva. A exatidão na previsão da hora de ocorrência da vazão de pico não foi considerada, visto que, dentro de 24 horas, a vazão pode ter grandes oscilações nas sub-bacias de cabeceira. De forma geral, os resultados obtidos são relevantes no contexto de uma estrutura operacional, em que a tomada de decisão para a emissão de um alerta geralmente se dá em função do grau de certeza da previsão com relação ao impacto potencial de um evento.

Existem alguns estudos de previsão de vazão baseados na propagação da onda de cheia, com resultados satisfatórios para antecipação máxima de 8 horas para o município de Blumenau (CORDERO; MOMO; SEVERO, 2011), e o Centro de Operação do Sistema de Alerta (CEOPS), da Universidade de Blumenau (FURB), mantém uma estrutura de monitoramento de vazões utilizada pelas Defesas Civas da região. Neste contexto, os resultados do presente estudo podem vir a agregar informações com escalas diferentes. Assim, a utilização da metodologia proposta aumentaria 40 horas na antecipação dos eventos em relação às técnicas atualmente utilizadas, incluindo regiões de bacias de cabeceiras, e com alto índice de acerto.

Mesmo com resultados satisfatórios, cabe ressaltar que as previsões do modelo numérico “Eta” na resolução de 5 km tendem a subestimar a precipitação diária na região de estudo, exceto para a configuração “Kfm_F_G” (Esquema de convecção Kain-Fritsch com fluxo de momento, esquema de microfísica Ferrier e condições iniciais e de contorno do GFS), que apresentou previsões de vazão superestimada em praticamente todos os eventos estudados.

É importante observar que as simulações das previsões iniciadas às 00h UTC e às 12h UTC tiveram praticamente a mesma resposta hidrológica, indicando que o efeito das condições iniciais teve pouca influência nas avaliações. Desta forma, opção de utilizar as rodadas iniciadas nos dois horários não trouxe muitos benefícios em termos de espalhamento do EPS.

Cabe ainda ressaltar, como já mencionado, que o Brasil carece de pesquisas que foquem sistemas de alerta baseados na estratégia proposta, e os resultados deste trabalho poderão servir de base para a implantação de sistemas de alerta de conceito semelhante, até mesmo em outras regiões para as quais exista a necessidade e a disponibilidade de dados. Os resultados sugerem ainda que uma antecipação no tempo de previsão de cheias de até 48 horas na região estudada é factível de ser alcançada através do uso de previsões de vazão por conjunto, e pode trazer grandes avanços no gerenciamento dos riscos para as populações vulneráveis.

Atualmente o CEMADEN emite alertas para a região da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu com base no monitoramento dos dados em tempo real da rede telemétrica disponível no site da ANA, levando em consideração os acumulados de precipitação das estações do CEMADEN, INMET e EPAGRI, os acumulados de precipitação por Radar (Morro da Igreja) e a previsão do tempo. Com esta estrutura, é possível antecipar eventos em apenas alguns minutos para as regiões de cabeceira, e, na melhor das hipóteses, algumas poucas horas para Blumenau, com alto índice de incertezas. Este fato mostra a importância deste estudo para melhorar a qualidade dos alertas e aumentar a antecipação na emissão dos mesmos.

6 RECOMENDAÇÕES

Considerando que os resultados deste trabalho foram promissores dentro do horizonte de até 48 horas, existe a possibilidade de explorar tempos de antecedência acima deste período, em trabalhos futuros. Além disso, caso haja a disponibilidade de dados de outros modelos de escala regional compatíveis com a escala deste trabalho, sugere-se a ampliação do número de membros para aumentar o espalhamento do conjunto de previsões.

Em meados de 2013 foram instalados aproximadamente 130 pluviômetros automáticos na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu (CEMADEN, 2015b), o que futuramente subsidiará a realização de estudos hidrológicos com uma maior precisão e com escalas de tempo menores do que 1 dia.

Caso exista a possibilidade de obter o histórico de operação das barragens de contenção de cheias localizadas na bacia, seria possível incluir a dinâmica destes reservatórios na modelagem hidrológica e abrir campo, até mesmo, para estudos voltados à modelagem do impacto das barragens, com vistas à avaliação dos resultados da ampliação das mesmas.

Considerando que os sistemas de previsão de cheias implantados no Brasil, oficialmente não utilizam metodologias que associam previsão de tempo com modelagem hidrológica, recomenda-se a propagação da metodologia proposta neste trabalho para estudos de outras bacias, no intuito de ampliar o conhecimento sobre o assunto e aumentar a abrangência deste tipo de técnica em território nacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, E. S. et al. TERRAHIDRO – A distributed hydrological system to delimit large basins. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2012 IEEE International. **Proceedings...**Munich: IEEE International, 2012.
- ALFIERI, L. et al. GloFAS-global ensemble streamflow forecasting and flood early warning. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, p. 1161–1175, 2013.
- ALFIERI, L. et al. Evaluation of ensemble streamflow predictions in Europe. **Journal of Hydrology**, v. 517, p. 913–922, 2014.
- ALFIERI, L. et al. Global warming increases the frequency of river floods in Europe. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, p. 2247–2260, 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Sistema de informações hidrológicas Hidroweb**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 20 maio. 2005a.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Sistema de monitoramento hidrológico em tempo real**. Disponível em: <<http://mapas-hidro.ana.gov.br/Usuario/mapa.aspx?dado=Nivel&nivel=3&bacia=83&origem=12345>>. Acesso em: 20 maio. 2007b.
- ARDUINO, G.; REGGIANI, P.; TODINI, E. Recent advances in flood forecasting and flood risk assessment. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 9, n. 4, p. 280–284, 2005.
- BAO, H. J. et al. Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinjiang model for flood forecast. **Advances in Geosciences**, v. 29, p. 61–67, 2011.
- BARTHOLMES, J. C. et al. The European Flood Alert System EFAS - Part 2: Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, p. 141–153, 2009.
- BARTHOLMES, J.C.; TODINI, E.. Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 9, p. 333–346, 2005.
- BERTHET, L. et al. How crucial is it to account for the Antecedent Moisture Conditions in flood forecasting? Comparison of event-based and continuous approaches on 178 catchments. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 6, n. 2, p. 1707–1736, 2009.
- BEVEN, K. How far can we go in distributed hydrological modelling? **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 5, n. 1, p. 1–12, 2001.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, p. 43–69, 1979.
- BEZADA, M. Natural Hazards and Human-Induced Disasters Triggered by Intense and Episodic Tropical Rains in the Venezuelan Mountains. **Developments in Earth Surface Processes**, v. 13, p. 115–129, 2009.

BLACK, T. L. The New NMC Mesoscale Eta Model: Description and Forecast Examples. **Weather and Forecasting**, v. 9, p. 265–278, 1994.

BLOSCHL, G.; RESZLER, C.; KOMMA, J. A spatially distributed flash flood forecasting model. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, n. 4, p. 464–478, 2008.

BLÖSCHL, G.; SIVAPALAN, M. Scale Issues in Hydrological Modelling: A Review. In: KALMA, J. D.; SIVAPALAN, M. (Eds.). . **Scale Issues in Hydrological Modelling**. Chichester: John Wiley & Sons, 1995. p. 9–48.

BOTH, G. C.; HAETINGER, C. Uso da modelagem matemática para a previsão de enchentes no Vale do Taquari – RS. p. 1–7, . In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 6., 2008, Serra Negra. **Anais...** São Paulo: ASBEA, 2008. p.1-7. ISSN 1983-0653, cd-rom.

BRAVO, J. M. et al. Incorporating forecasts of rainfall in two hydrologic models used for medium-range streamflow forecasting. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 14, p. 435–445, 2009.

BRIER, G. W. Verification of forecasts expersses in terms of probaility. **Monthly Weather Review**, v. 78, p. 1–3, 1950.

BROOKS, R. H.; COREY, T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Papers**, Colorado State University, n. 3, p. 27, 1964

BUSTAMANTE, J. F.; CHOU, S. C. Impact of including moisture perturbations on short-range ensemble forecasts. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 114, n. 20, p. 1–12, 2009.

CASTILHO, A. S.; OLIVEIRA, L. M. Previsão Hidrológica de vazões para a cidade de Governador Valadares utilizando modelo linear de propagação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 14., 2001, Aracaju, SE. **Anais...**Aracaju: ABRH, 2001.

CASTRO, A. L. . **Manual de planejamento em defesa civil**. Volume I. 1. ed. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 1999. v. I

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN). **Missão**. Disponível em: <www.cemaden.gov.br/missao>. Acesso em: 8 fev. 2015a.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN). **Projeto Pluviômetros automáticos**. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/pluviometrosautomaticos/>>. Acesso em: 20 maio. 2007b.

CEPED/UFSC. **Atlas Brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012**. Vol. Brasil. 2. ed. Florianópolis: CEPED/UFSC, 2013a.

CEPED/UFSC. **Atlas Brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012**. Vol. Santa Catarina. In: 2. ed. Florianópolis: CEPED/UFSC, 2013b. p. 168.

- CHEN, F.; JANJIC, Z.; MITCHELL, K. Impact of atmospheric surface-layer parameterizations in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale Eta model. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 85, n. 3, p. 391–421, 1997.
- CHOU, S. C. Modelo regional Eta. **Climanálise**, v. Edição Esp, p. 203–207, 1996. ISSN: 0103-0019.
- CHOU, S. C.; NUNES, A. M. B. Extended Range Forecasts Over South America Using the Eta Regional. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, p. 10147–10160, 2000.
- CLOKE, H. L.; PAPPENBERGER, F. Ensemble flood forecasting: A review. **Journal of Hydrology**, v. 375, n. 3-4, p. 613–626, 2009a.
- CLOKE, H. L.; PAPPENBERGER, F. Ensemble flood forecasting: A review. **Journal of Hydrology**, v. 375, p. 613–626, 2009b.
- COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2001.
- COLLISCHONN, W. et al. Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. **Journal of Hydrology**, v. 305, p. 87–98, 2005.
- COLLISCHONN, W. et al. Medium-range reservoir inflow predictions based on quantitative precipitation forecasts. **Journal of Hydrology**, v. 344, p. 112–122, 2007a.
- COLLISCHONN, W. et al. The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, p. 878–895, 2007b.
- COLLISCHONN, W.; MORELLI TUCCI, C. E.; CLARKE, R. T. Previsão Sazonal de Vazão na Bacia do Rio Uruguai 2: Previsão Climática-Hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, p. 61–72, 2005.
- CORDERO, A.; MOMO, M. R.; SEVERO, D. L. Previsão de cheia em tempo atual , com um modelo ARMAX , para a cidade de Rio do Sul - SC. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. **Anais...** Maceió: 2011Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/ccad18bf02d5a87b17c23b64e5139d5b_d987acd551ef387e4e219508a27e69c5.pdf>
- CPRM. **Sistema de alerta contra enchentes do Rio Doce**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/alerta/site/>>. Acesso em: 1 jun. 2015.
- CUNGE, J. A. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). **Journal of Hydraulic Research**, v. 7, p. 205–230, 1969.
- DAUPRAS, F. et al. Analysis of the robustness of the French flood warning system: a study based on the 2009 flood of the Garonne River. **Natural Hazards**, p. 215–241, 2015.
- DE ROO, A. P. J. et al. Development of a European flood forecasting system. **International Journal of River Basin Management**, v. 1, n. 1, p. 49–59, 2003.

- DEMARGNE, J. et al. The science of NOAA's operational hydrologic ensemble forecast service. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 95, p. 79–98, 2014.
- DEMERRITT, D. et al. Ensemble predictions and perceptions of risk, uncertainty, and error in flood forecasting. **Environmental Hazards**, v. 7, n. 2, p. 115–127, 2007.
- DERECZYNSKI, C. P. et al. Avaliação das Previsões do Modelo Eta na Região da Serra do Mar (Estado de São Paulo), Brasil Evaluation of Eta Model Forecasts at Serra do Mar Region (São Paulo State), Brazil Os modelos numéricos regionais . **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 33, n. 3, p. 36-51, 2010. Disponível em: <http://www.anuario.igeo.ufrj.br/2010_2/2010_2_36_51.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2016.
- DODSON, R.; MARKS, D. Daily air temperature interpolated at high spatial resolution over a large mountainous region. **Climate Research**, v. 8, p. 1–20, 1997.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, H. V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research**, v. 28, p. 1015–1031, 1992.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. **Journal of hydrology**, v. 158, p. 265–284, 1994.
- DUARTE, A. G.; CARAM, R. D. O.; TOMASELLA, J. **Previsão de enchentes na bacia rio itapemirim**. Anais do XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. **Anais...Natal: 2014**
- EMBRAPA. Solos do Estado de Santa Catarina. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 46, 2004.
- EPSTEIN, E. S. A Scoring System for Probability Forecasts of Ranked Categories. **Journal of Applied Meteorology**, v. 8, p. 985–987, 1969.
- FALCK, A. S. **Avaliação da incerteza nas estimativas de precipitação por satélite e sua propagação no modelo hidrológico distribuído MHD-INPE**. 2015. 183 p. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/02.26.17.15-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J3C842>>. Acesso em: out. 2015.
- FAN, F. M. et al. Ensemble streamflow forecasting experiments in a tropical basin: The São Francisco river case study. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 2906–2919, 2014.
- FARR, T. G. et al. The shuttle radar topography mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, p. 1–43, 2007.
- FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis. **Pattern Recognition Letters**, v. 27, p. 861–874, 2006.
- FUNDAÇÃO CENTRO TÉCNICO DE HIDRÁULICA (FCTH). **Sistema de alerta a inundações de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.saisp.br/>>. Acesso em: 6 fev. 2015.

- FELS, S. B.; SCHWARZKOPF, M. D. The simplified exchange approximation-A new method for radiative transfer calculations. **Journal of Atmospheric Sciences**, v.32, n.7, p. 1475–1488, 1975.
- FERNÁNDEZ BOU, A. S.; DE SÁ, R. V.; CATALDI, M. Flood forecasting in the upper Uruguay River basin. **Natural Hazards**, p. 1–18, 2015.
- FERRIER, B. S. et al. Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model. In: CONFERENCE ON WEATHER ANALYSIS AND FORECASTING, 19., 2002, San Antonio. **Anais...** Boston: MAS, 2002
- FIALHO, W. M. B.; BOTTINO, M. J.; CHOU, S. C. Avaliação numérica do modelo ETA para a bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. **Em preparação para submissão**, 2015.
- FILHO, A. G. A.; SZÉLIGA, M. R.; ENOMOTO, C. F. Estudo de medidas não estruturais para controle de inundações urbanas. **Publicatio UEPG**, v. 6, p. 69–90, 2000.
- FRAKES; BRENT. YU, Z. An evaluation of two hydrologic models for climate change scenarios. **Journal Of The American Water Resources Association**, v. 35, n. 6, p. 1351–1363, 2000.
- FRANK, B., PINHEIRO, A. Uma história das enchentes e seus ensinamentos. In: **Enchentes na Bacia do Itajaí: 20 anos de experiências**. Blumenau: Edifurb, 2003. p. 15–57.
- FURB. **Sistema de alerta**. Disponível em: <<http://ceops.furb.br/sistema-de-alerta>>. Acesso em: 4 fev. 2015.
- GASH, J. H.; LLOYD, C. R.; LACHAUD, G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. **Journal of Hydrology**, v. 170, p. 79–86, 1995.
- GEOAMBIENTE SENSORIAMENTO REMOTO LTDA. **Projeto de proteção da mata atlântica em Santa Catarina (PPMA / SC)**. Relatório Técnico do Mapeamento Temático Geral do Estado de SC. São José dos Campos: GEOAMBIENTE, 2008.
- GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M. Considerações sobre as inundações no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABRH, 2005. Disponível em: <http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ABRH2005_inundacoes.pdf>
- GOMES SOARES, D.; GHIZONI TEIVE, R. C. Previsão de cheias do Rio Itajaí-Açu utilizando redes neurais artificiais. In: **COMPUTER ON THE BEACH**, 2015, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2015
- GONÇALVES, A. S. et al. Previsões preliminares de desastres hidrológicos na bacia do Rio Doce. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 12., 2014, Natal. **Anais...**Natal: ABRH, 2014.
- GONÇALVES, A. S.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A. Estudos dos efeitos das mudanças globais na bacia do rio Madeira. SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 12., 2014, Natal. **Anais...**Natal: ABRH, 2014.

- GOUWELLEEUW, B. T. et al. Flood forecasting using medium-range probabilistic weather prediction. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 9, n. 4, p. 365–380, 2005.
- GOVERNO DE SANTA CATARINA. **Inventário florístico florestal de Santa Catarina**. Relatório do Projeto Piloto. Florianópolis: Epagri, 2005.
- GRACIOSA, M. C. P. **Modelo de seguro para riscos hidrológicos com base em simulação hidráulico-hidrológica como ferramenta de gestão de risco de inundações**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - USP-São Carlos, 2010.
- GROISMAN, P. Y. et al. Trends in intense precipitation in the climate record. **Journal of Climate**, v. 18, p. 1326–1350, 2005.
- HARRIS, A.; HOSSAIN, F. Investigating the optimal configuration of conceptual hydrologic models for satellite-rainfall-based flood prediction. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 5, p. 532–536, 2008.
- HASHINO, T.; BRADLEY, A. A.; SCHWARTZ, S. S. Evaluation of bias-correction methods for ensemble streamflow volume forecasts. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 939–950, 2007.
- HE, Y. et al. Tracking the uncertainty in flood alerts driven by grand ensemble weather predictions. **Meteorological Applications**, v. 114, p. 103–114, 2009.
- HE, Y. et al. Ensemble forecasting using TIGGE for the July-September 2008 floods in the Upper Huai catchment: A case study. **Atmospheric Science Letters**, v. 11, n. 2, p. 132–138, 2010.
- INEA. **Sistema de alerta de cheias do Instituto Estadual do Ambiente**. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/Portal/MegaDropDown/Monitoramento/Centrodemonitdedesastresamb/Alertadecheias/index.htm&lang=PT-BR>>. Acesso em: 20 maio. 2005.
- INMET. **Normais climatológicas do Brasil 1961-1990**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso em: 1 fev. 2015.
- INPE/CPTEC. Boletim de Monitoramento e Análise Climática. **Climanálise ISSN: 0103-0019**, v. 28, n. 8, p. 44, 2013.
- IORGULESCU, I.; MUSY, A. Generalization of TOPMODEL for a power law transmissivity profile. **Hydrological Processes**, v. 11, n. 9, p. 1353–1355, 1997.
- IPCC. **The physical science basis**. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2013.
- JANJÍČ, Z. I. The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. **Monthly Weather Review**, v. 122, p. 927–945, 1994.
- JARVIS, N. J. A simple empirical model of root water uptake. **Journal of Hydrology**, v. 107, p. 57–72, 1989.

- KAIN, J. S. The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update. **Journal of Applied Meteorology**, p. 170–181, 2004.
- KAIN J. S.; FRITSCH, J. M. A One-Dimensional Entraining/Detraining Plume Model and Its Application in Convective Parameterization. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 47, p. 2784–2802, 1990.
- KAIN, J. S.; FRITSCH, J. M. The representation of cumulus convection in numerical models. **Meteorological Monographs**, v. 24, n. 46, p. 1–246, 1993.
- KANG, T.-H.; KIM, Y.-O.; HONG, I.-P. Comparison of pre- and post-processors for ensemble streamflow prediction. **Atmospheric Science Letters**, v. 11, p. 153–159, 2010.
- LACIS, A. A.; HANSEN, J. A Parameterization for the Absorption of Solar Radiation in the Earth's Atmosphere. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, p. 118-133, doi:10.1175/1520-0469(1974)031<0118:APFTAO>2.0.CO;2.1974.
- LIANG, X.; XIE, Z. A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models. **Advances in Water Resources**, v. 24, n. 9-10, p. 1173–1193, 2001.
- LU, G. et al. Real-time flood forecast and flood alert map over the Huaihe River Basin in China using a coupled hydro-meteorological modeling system. **Science in China, Series E: Technological Sciences**, v. 51, p. 1049–1063, 2008.
- MCENERY, J. et al. NOAA's advanced hydrologic prediction service: Building pathways for better science in water forecasting. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 86, p. 375–385, 2005.
- MEDEIROS, A. D. **A influência da maré e da batimetria sobre a intrusão salina no estuário Do Rio Itajaí-Açu**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
- MELLER, A. et al. Previsão de cheias por conjunto em curto prazo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 33–49, 2014.
- MELLOR, G. L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysics**, v. 20, n. 4, p. 851, 1982.
- MENDIONDO, E. E. M. et al. Escalas hidrológicas I: conceitos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 1, p. 59–122, 1997.
- MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Rivista di Meteorologia Aeronautica**, v. 44, p. 195–202, 1984.
- MESINGER, F.; BLACK, T. L. On the impact on forecast accuracy of the step-mountain (η) vs. sigma coordinate. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 50, n. 1-3, p. 47–60, 1992.
- MOHOR, G. S. et al. Exploratory analyses for the assessment of climate change impacts on the energy production in an Amazon run-of-river hydropower plant. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 41–59, 2015.

- MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, v. 19, p. 205–234, 1965.
- NÓBREGA, M. T. et al. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, p. 585–595, 2011.
- NORBIATO, D. et al. Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins. **Journal of Hydrology**, v. 362, n. 3-4, p. 274–290, 2008.
- OLSSON, J.; LINDSTRÖM, G. Evaluation and calibration of operational hydrological ensemble forecasts in Sweden. **Journal of Hydrology**, v. 350, p. 14–24, 2008.
- PAPPENBERGER, F. et al. Cascading model uncertainty from medium range weather forecasts (10 days) through a rainfall-runoff model to flood inundation predictions within the European Flood Forecasting System (EFFS). **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 9, p. 381–393, 2005.
- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on a relatively high-resolution digital elevation model. **Journal of Hydrology**, v. 343, n. 3-4, p. 127–139, 2007.
- PEDROLLO, M. et al. Alerta hidrológico da bacia do rio Caí: concepção e implantação do sistema. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2011, Maceió. **Anais...Maceió: ABRH**, 2011.
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633–1644, 11 out. 2007.
- PIELKE, R. A. **Mesoscale meteorological modeling**. [s.l.] Academic Press, International Geophysics Series, 2002.
- RAO, K. H. V. D. et al. A distributed model for real-time flood forecasting in the Godavari Basin using space inputs. **International Journal of Disaster Risk Science**, v. 2, p. 31–40, 2011.
- RIO DO OESTE -SC. **Níveis dos rios e barragens**. Disponível em: <<http://www.riodoeste.com.br/comdec/?id=regua/niveis#.VhJRdHpViko>>. Acesso em: 9 fev. 2015.
- RODRIGUEZ, D. A. **Impactos dos padrões espaciais da vegetação nas variáveis atmosférica e terrestre do ciclo hidrológico, em bacia de floresta amazônica**. 2011. 244 p. (sid.inpe.br/mtc-m18/2011/02.23.18.55-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/398C778>>. Acesso em: 11 fev. 2016.
- RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J. On the ability of large-scale hydrological models to simulate land use and land cover change impacts in Amazonian basins. **Hydrological Sciences Journal**, p. 1–34, 2015.

- ROMANG, H. et al. IFKIS-Hydro: An early warning and information system for floods and debris flows. **Natural Hazards**, v. 56, p. 509–527, 2011.
- SANGATI, M.; BORGA, M. Influence of rainfall spatial resolution on flash flood modelling. **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 9, p. 575–584, 2009.
- SCHAAKE, J. et al. The Hydrologic Ensemble Prediction EXperiment (HEPEX). **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 3, n. 5, p. 3321–3332, 2006a.
- SCHAAKE, J. et al. The Hydrologic Ensemble Prediction EXperiment (HEPEX). **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 3, p. 3321–3332, 2006b.
- SCHAAKE, J. C. et al. HEPEX: The Hydrological Ensemble Prediction Experiment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 88, n. 10, p. 1541–1547, 2007.
- SCHETTINI, C. A. F. Caracterização Física do Estuário do Rio Itajaí-açu , SC. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, p. 123–142, 2002.
- SELUCHI, M. E.; CHOU, S. C.; GRAMANI, M. A case study of a winter heavy rainfall event over the Serra do Mar in Brazil. **Geofísica Internacional**, v. 50, n. 1, p. 41–56, 2011.
- SILVA, L. P. DA; EWEN, J. Modelagem hidrológica de grandes bacias hidrográficas: a necessidade de novas metodologias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. Figura 1, p. 81–92, 2000.
- SIQUEIRA-JÚNIOR, J. L.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A. Impacts of future climatic and land cover changes on the hydrological regime of the Madeira River basin. **Climatic Change**, p. 117–129, 2015.
- STILLWELL, H. D. Natural Hazards and Disasters in Latin America. **Natural Hazards**, v. 6, p. 131–159, 1992.
- SWETS, J. A; DAWES, R. M.; MONAHAN, J. Better decisions through science. **Scientific american**, v. 283, p. 82–87, 2000.
- THIELEN, J. et al. The European Flood Alert System – Part 1: Concept and development. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, p. 125–140, 2009.
- THIEMIG, V. et al. Ensemble flood forecasting in Africa: A feasibility study in the Juba-Shabelle river basin. **Atmospheric Science Letters**, v. 11, p. 123–131, 2010.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2000.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2005.
- UNIVERSITY CORPORATION FOR ATMOSPHERIC RESEARCH (UCAR). **Flash flood early warning system reference guide**. [S.l]: COMET/NOAA, 2010.
- UNISDR. **Hyogo framework for action 2005-2015: building the resilience of nations and communities to disasters**. Hyogo: [s.n.]. Disponível em: <www.unisdr.org/wcdr>.

- UNISDR. **Global survey of early warning systems** UN. Vienna: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.unisdr.org/ppew/info-resources/ewc3/Global-Survey-of-Early-Warning-Systems.pdf>>.
- VIOLA, M. R. et al. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 581–590, 2009.
- WERNER, M. et al. Recent developments in operational flood forecasting in England, Wales and Scotland. **Meteorological Applications**, v. 16, p. 13–22, 2009.
- WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2. ed. [s.l.] Elsevier Academic Press, 2006.
- WOOD, A. W. et al. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. **Journal of Geophysical Research D: Atmospheres**, v. 107, n. 20, p. 1–15, 2002.
- WOOD, A. W.; LETTENMAIER, D. P. A Test Bed for New Seasonal Hydrologic Forecasting Approaches in the Western United States. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 87, p. 1699–1712, 2006.
- WOOD, A. W.; SCHAAKE, J. C. Correcting Errors in Streamflow Forecast Ensemble Mean and Spread. **Journal of Hydrometeorology**, v. 9, p. 132–148, 2008.
- YOUNIS, J.; ANQUETIN, S.; THIELEN, J. The benefit of high-resolution operational weather forecasts for flash flood warning. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 12, p. 1039–1051, 2008.
- ZEHE, E.; BLÖSCHL, G. Predictability of hydrologic response at the plot and catchment scales: Role of initial conditions. **Water Resources Research**, v. 40, p. 1–21, 2004.
- ZHAO, Q.; CARR, F. H. A Prognostic Cloud Scheme for Operational NWP Models. **Monthly Weather Review**, v. 125, p. 1931–1953, 1997.
- ZHAO, R. J. The Xinanjiang model applied in China. **Journal of Hydrology**, v. 135, p. 371–381, 1992.
- ZHAO, R. J.; LIU, X. R.; SINGH, V. P. The Xinanjiang model. **Computer models of watershed hydrology**, p. 215–232, 1995.

APÊNDICE A - HIDROGRAMAS DO PERÍODO DE VERIFICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO MHD-INPE PARA OS 12 POSTOS DE VAZÃO ESTUDADOS

A seguir, as séries temporais das vazões observadas, simuladas sem correção do viés, e simuladas após a correção do viés (exceto para as sub-bacias B1, B2 e B5) para as sub-bacias estudadas, referentes ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE, que compreende os anos de 2012 a 2014.

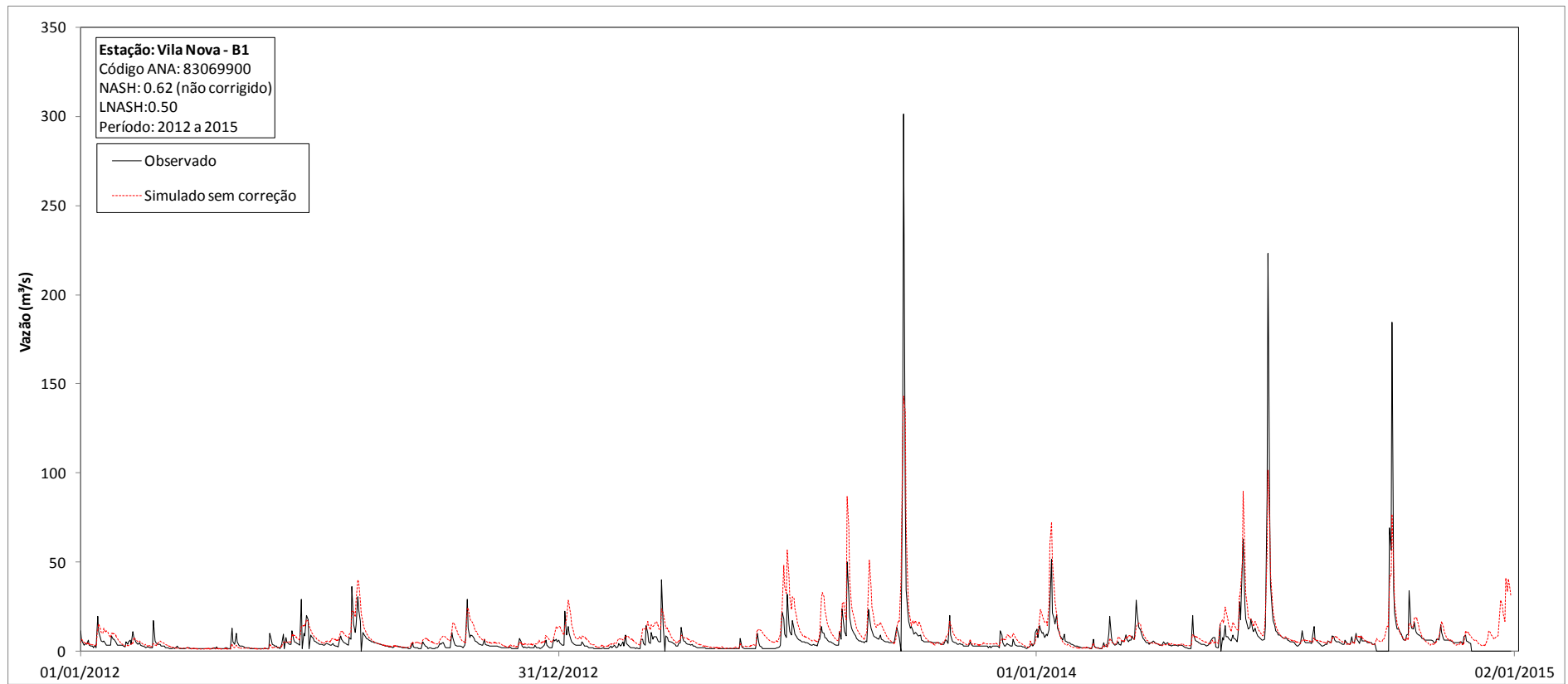


Figura A.1 Série temporal das vazões observadas e simuladas para sub-bacia B1, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.

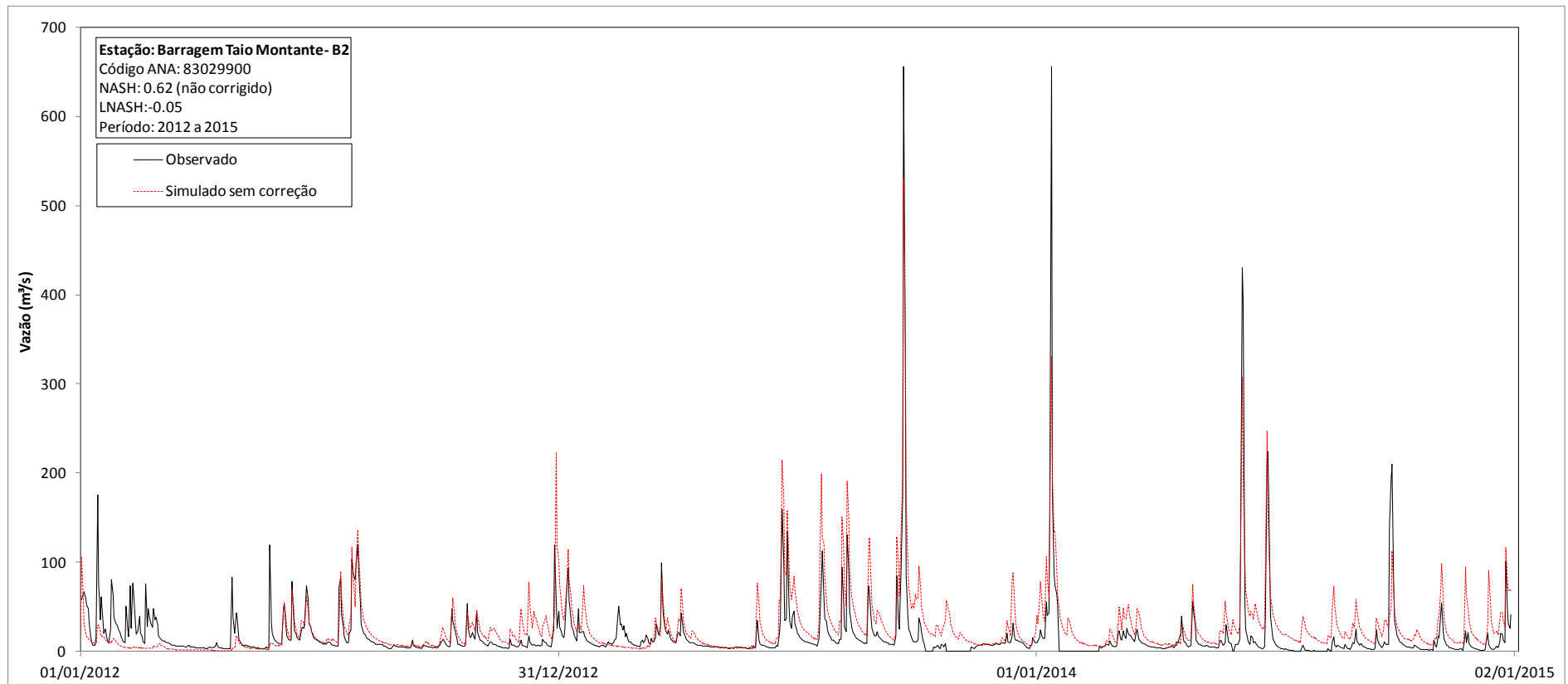


Figura A.2 Série temporal das vazões observadas e simuladas para sub-bacia B2, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.

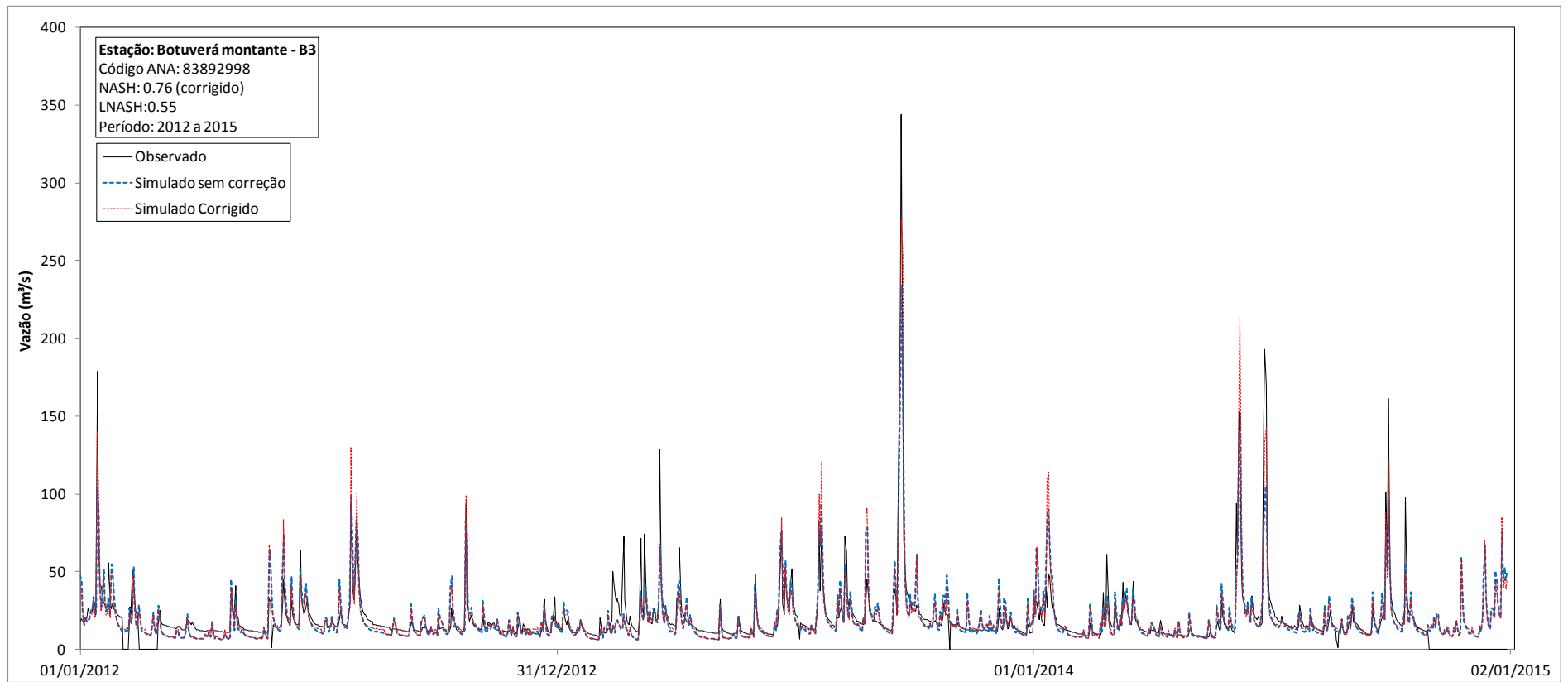


Figura A.3 Série temporal das vazões observadas, simuladas sem correção do viés e simuladas com correção do viés, para sub-bacia B3, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.

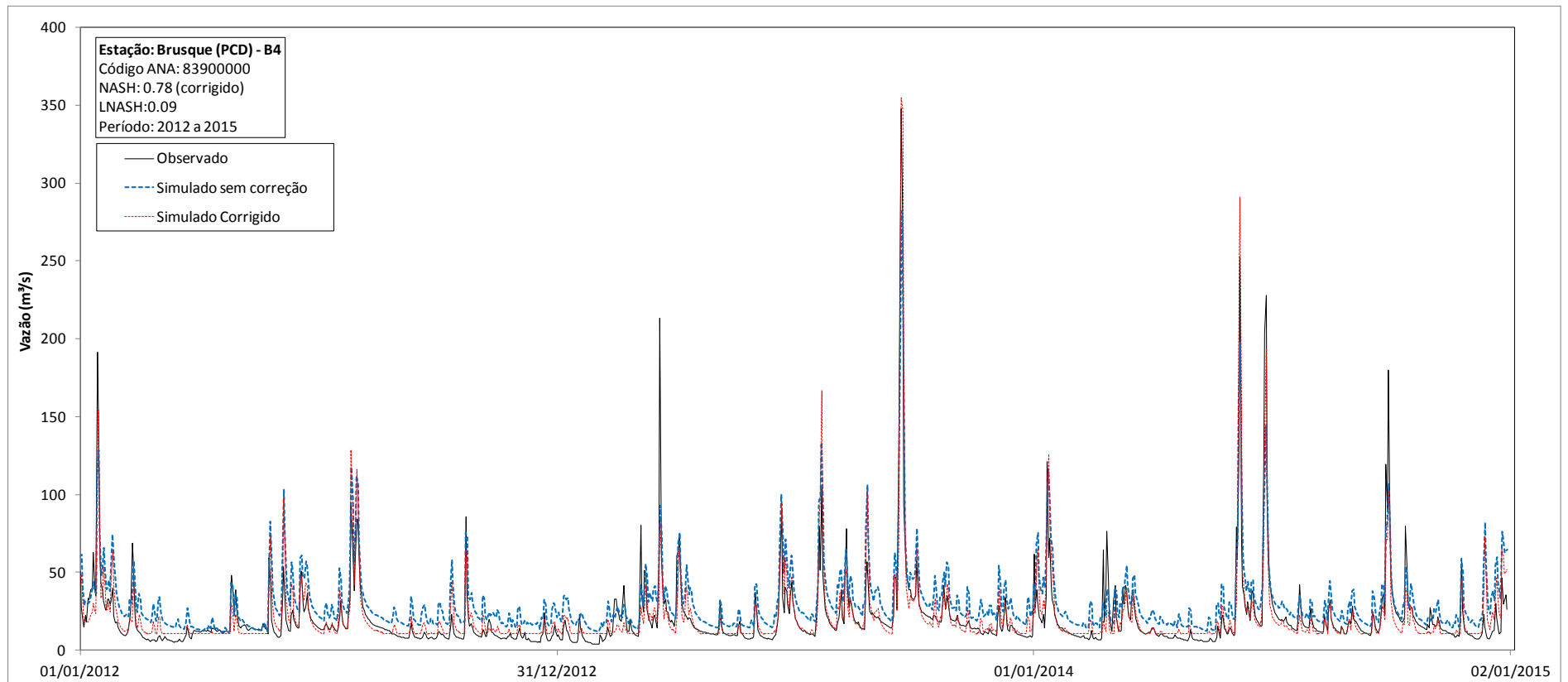


Figura A.4 Série temporal das vazões observadas, simuladas sem correção do viés e simuladas com correção do viés, para sub-bacia B3, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.

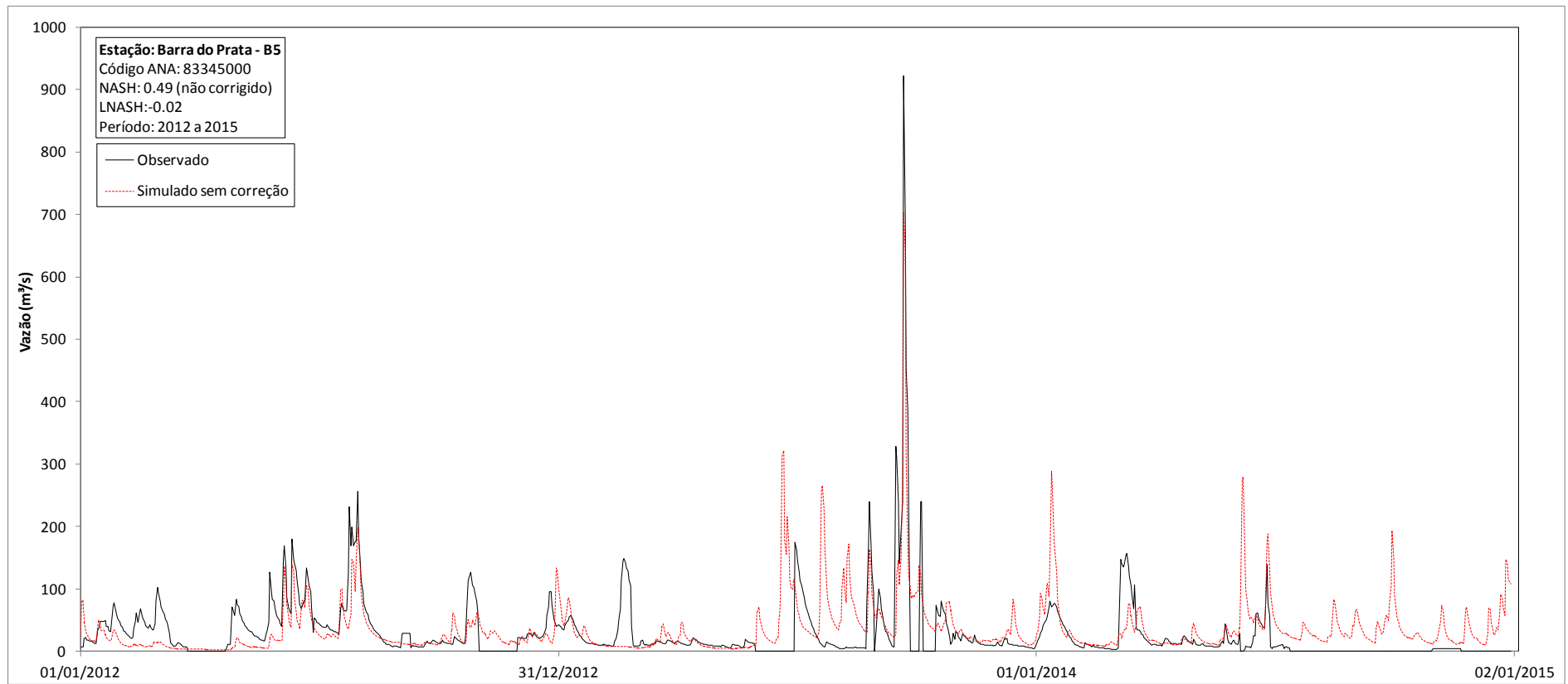


Figura A.5 Série temporal das vazões observadas e simuladas para sub-bacia B5, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.

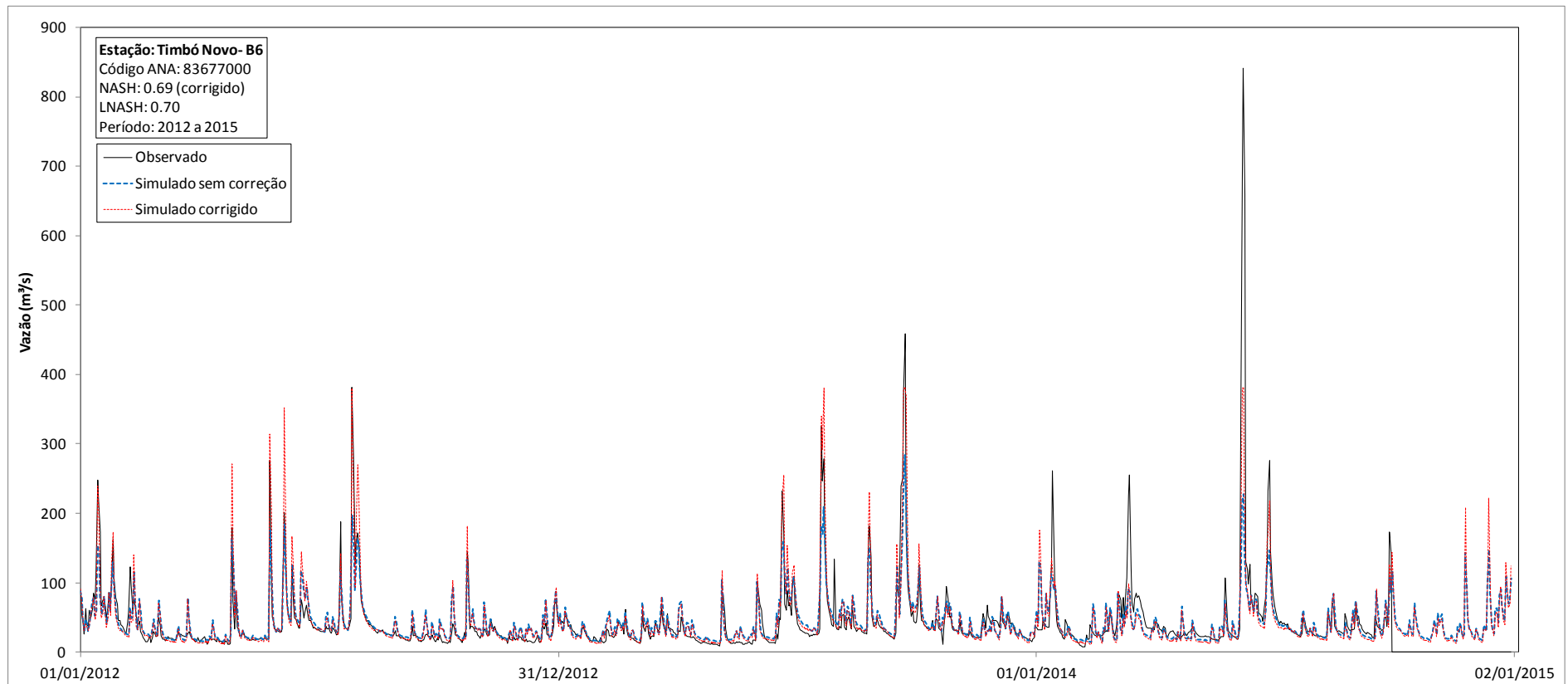


Figura A.6 Série temporal das vazões observadas, simuladas sem correção do viés e simuladas com correção do viés, para sub-bacia B6, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.

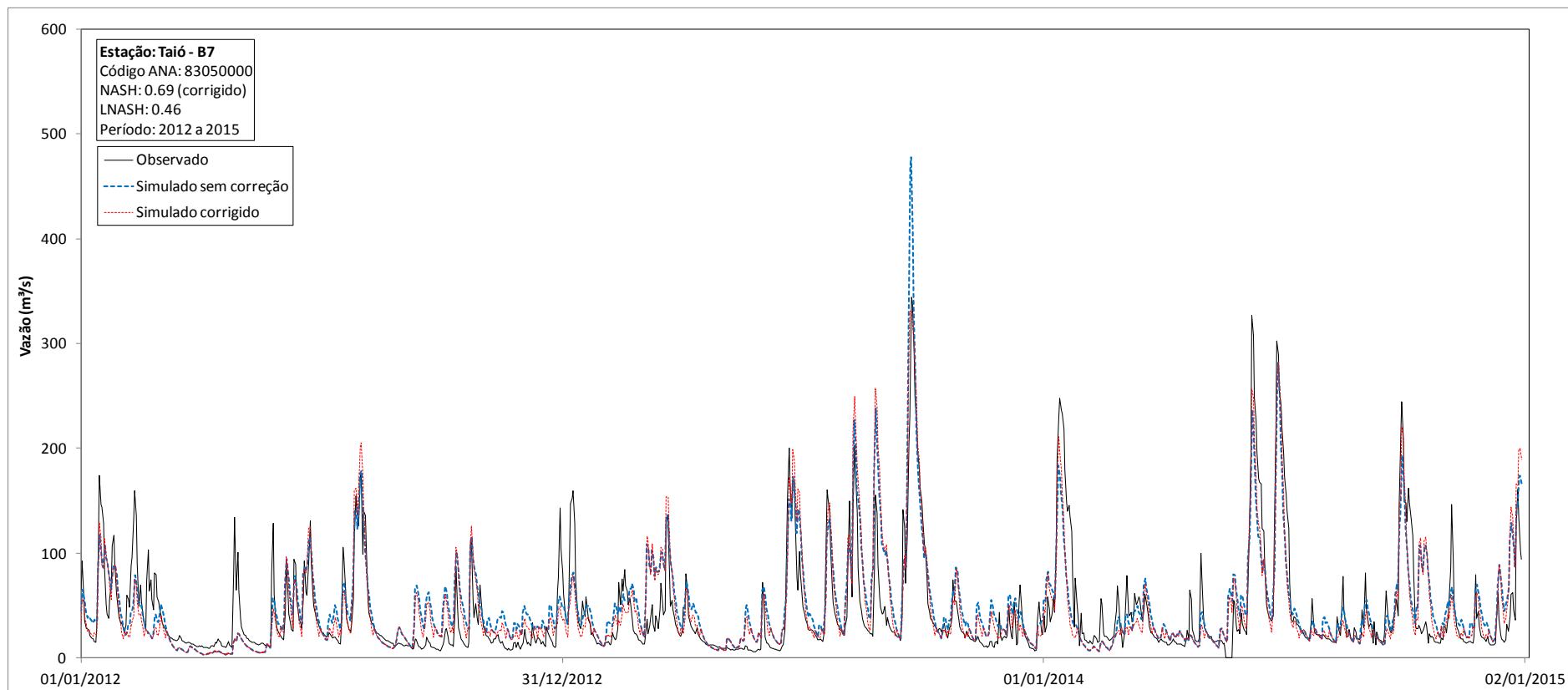


Figura A.7 Série temporal das vazões observadas, simuladas sem correção do viés e simuladas com correção do viés, para sub-bacia B7, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.

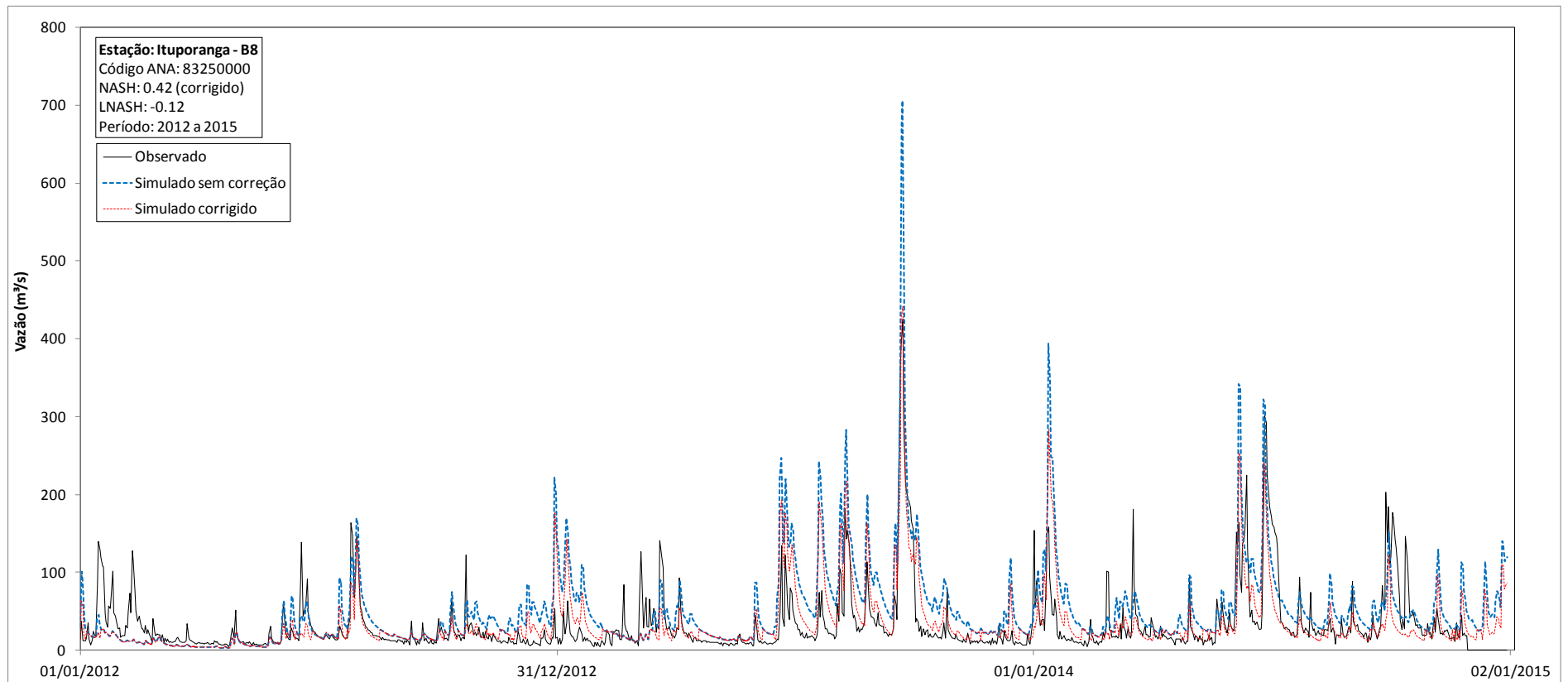


Figura A.8 Série temporal das vazões observadas, simuladas sem correção do viés e simuladas com correção do viés, para sub-bacia B8, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.

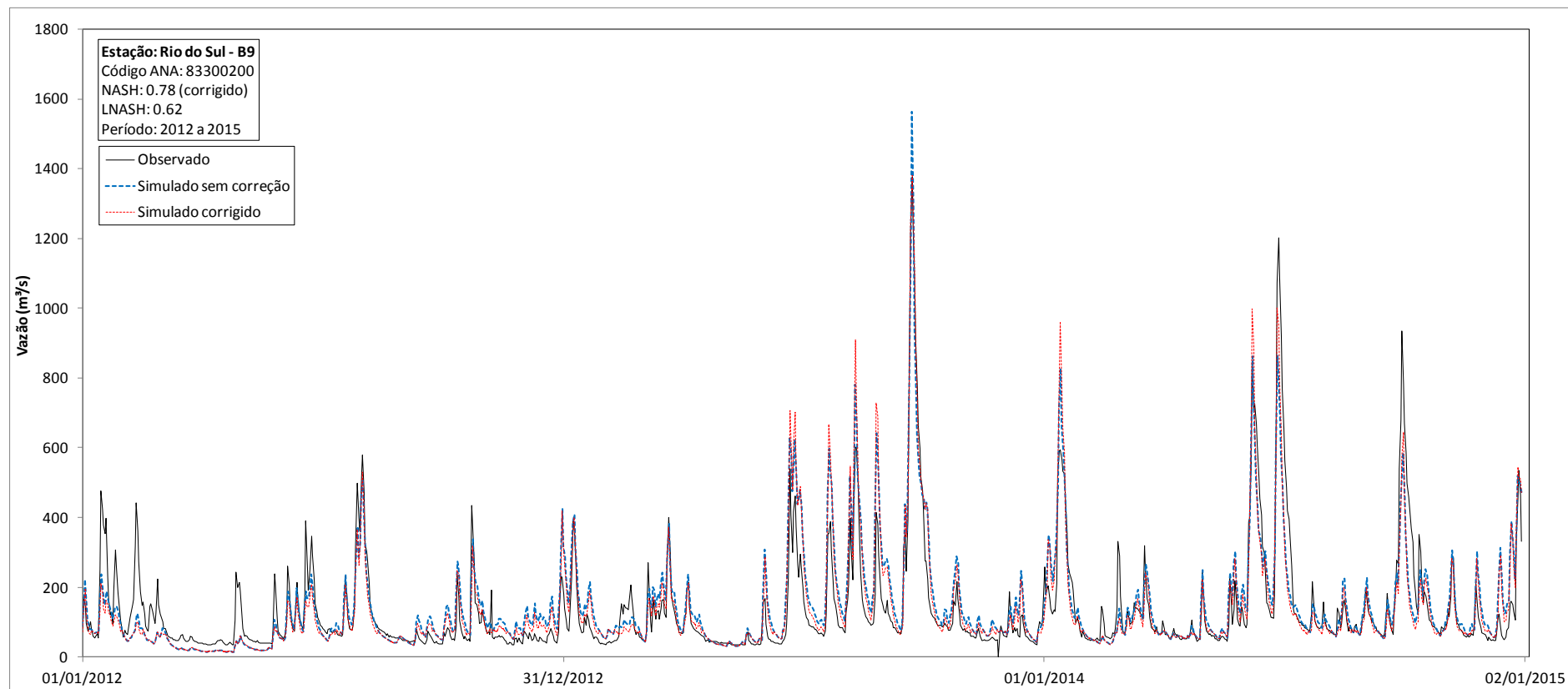


Figura A.9 Série temporal das vazões observadas, simuladas sem correção do viés e simuladas com correção do viés, para sub-bacia B9, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.

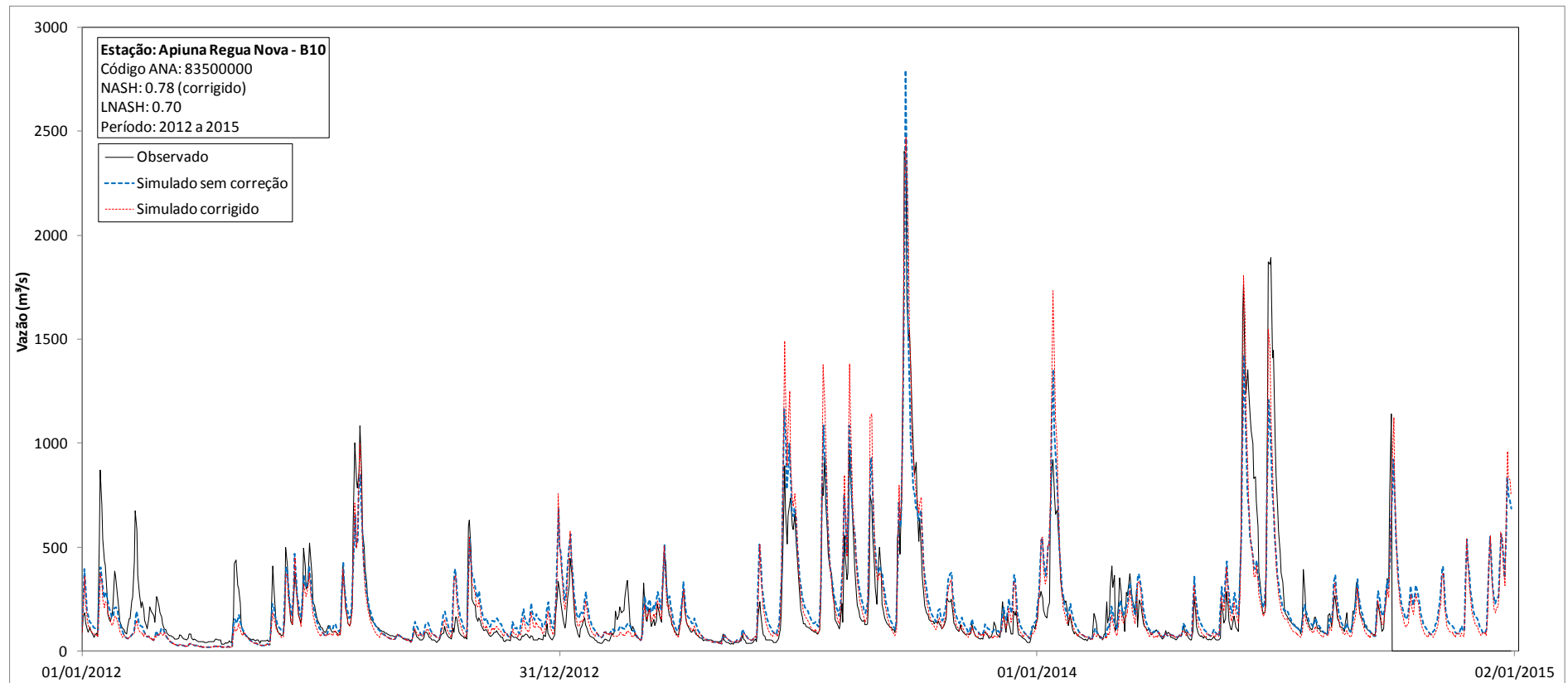


Figura A.10 Série temporal das vazões observadas, simuladas sem correção do viés e simuladas com correção do viés, para sub-bacia B10, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.

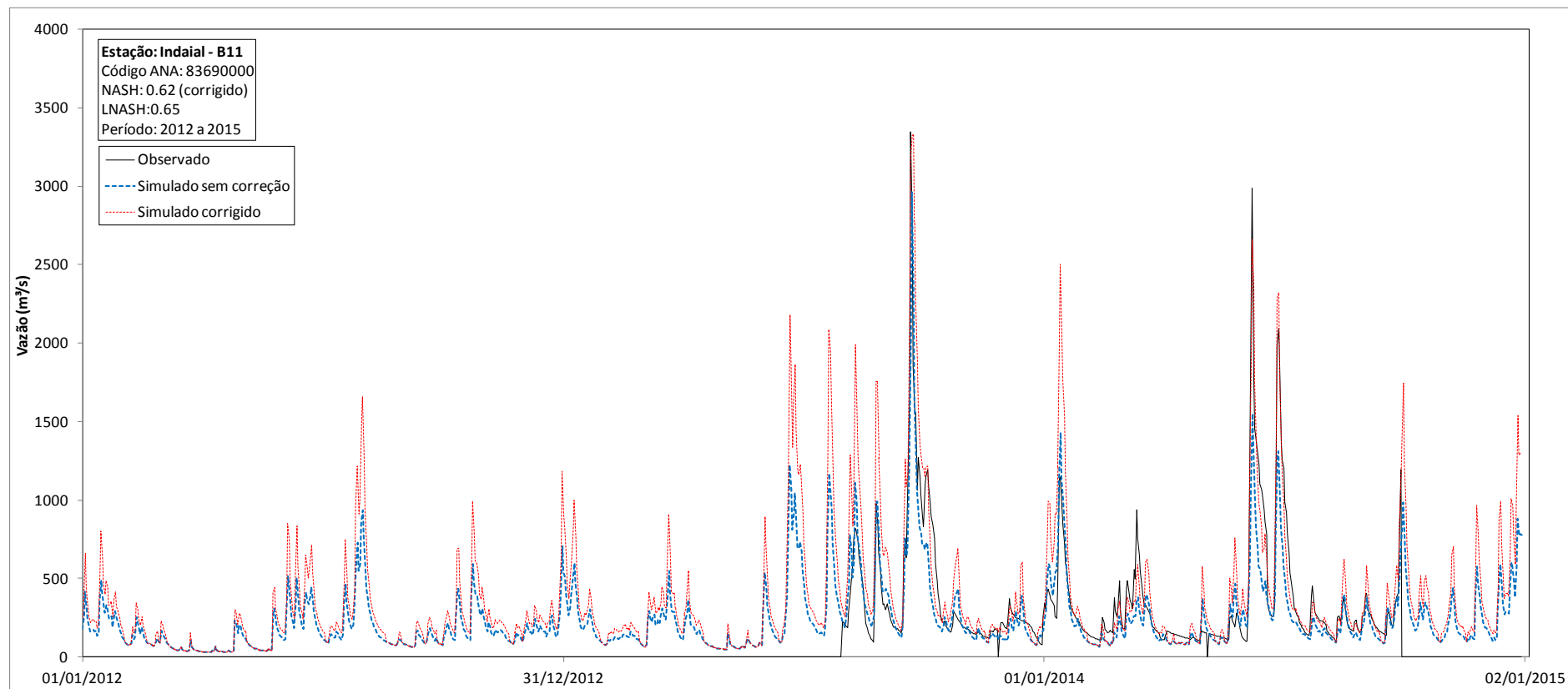


Figura A.11 Série temporal das vazões observadas, simuladas sem correção do viés e simuladas com correção do viés, para sub-bacia B11, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.

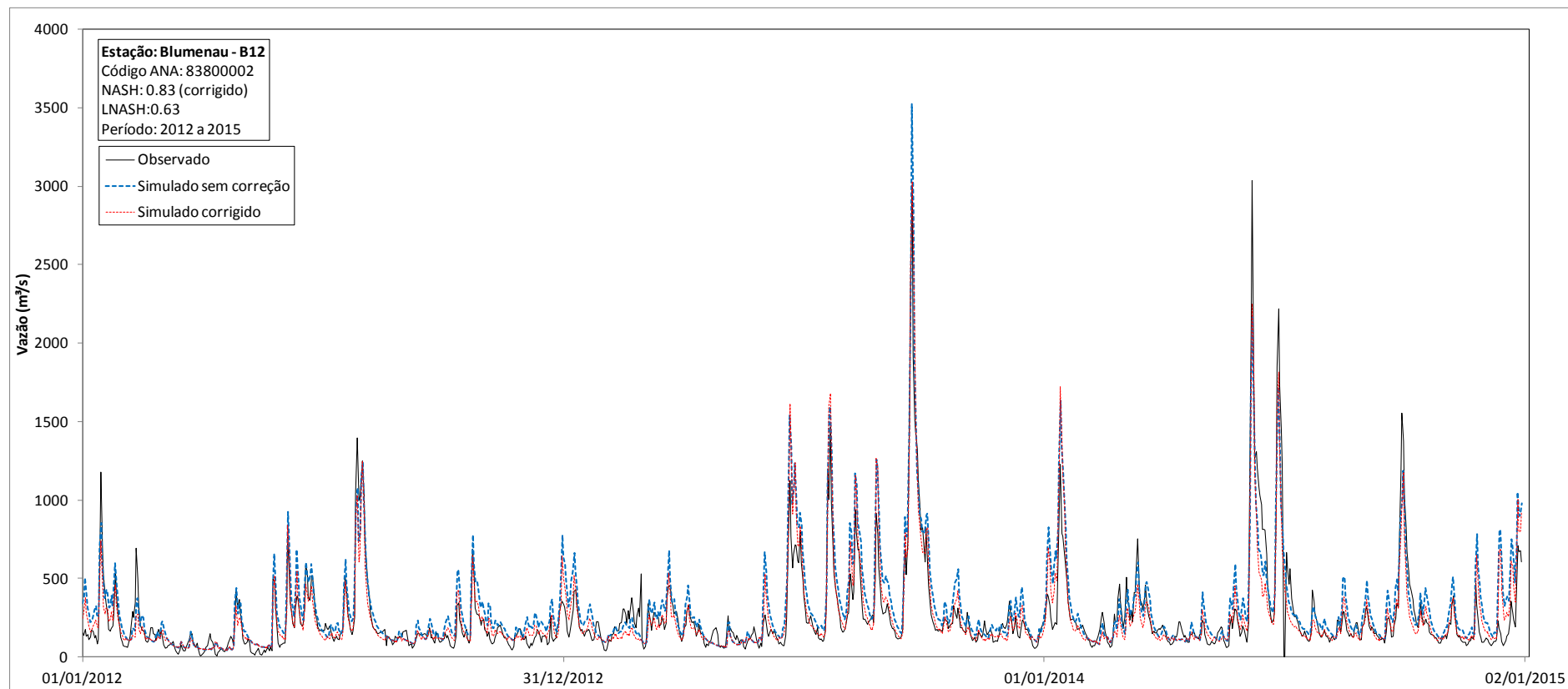


Figura A.12 Série temporal das vazões observadas, simuladas sem correção do viés e simuladas com correção do viés, para sub-bacia B12, referente ao período de verificação do modelo hidrológico MHD-INPE.

APÊNDICE B – CURVAS DE PORCENTAGEM DE TEMPO DE PERMANÊNCIA DOS POSTOS DE VAZÃO UTILIZADOS NA CORREÇÃO DO VIÉS

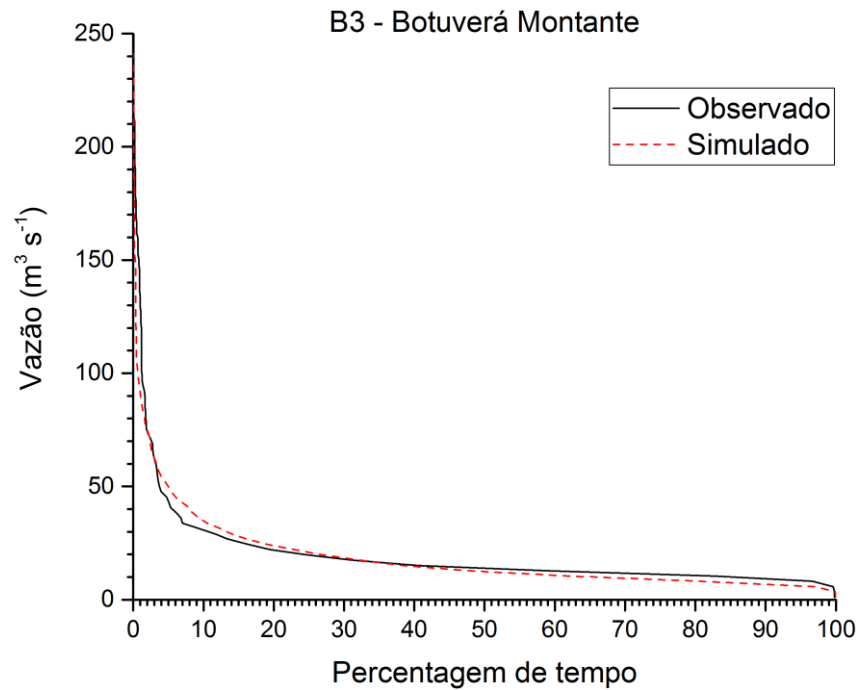


Figura B.1 Curva de porcentagem de tempo de permanência do posto de vazão B3.

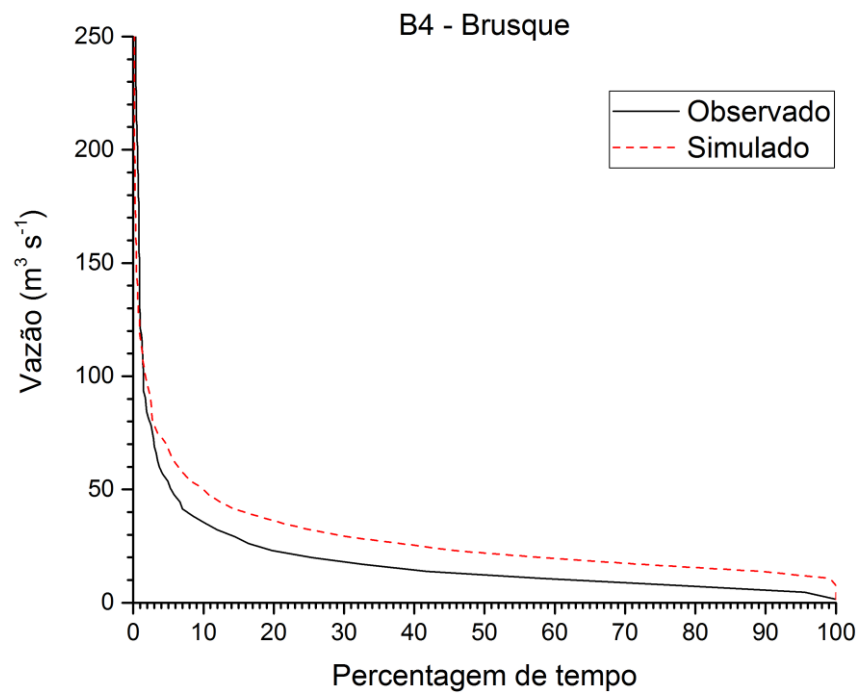


Figura B.2 Curva de porcentagem de tempo de permanência do posto de vazão B4.

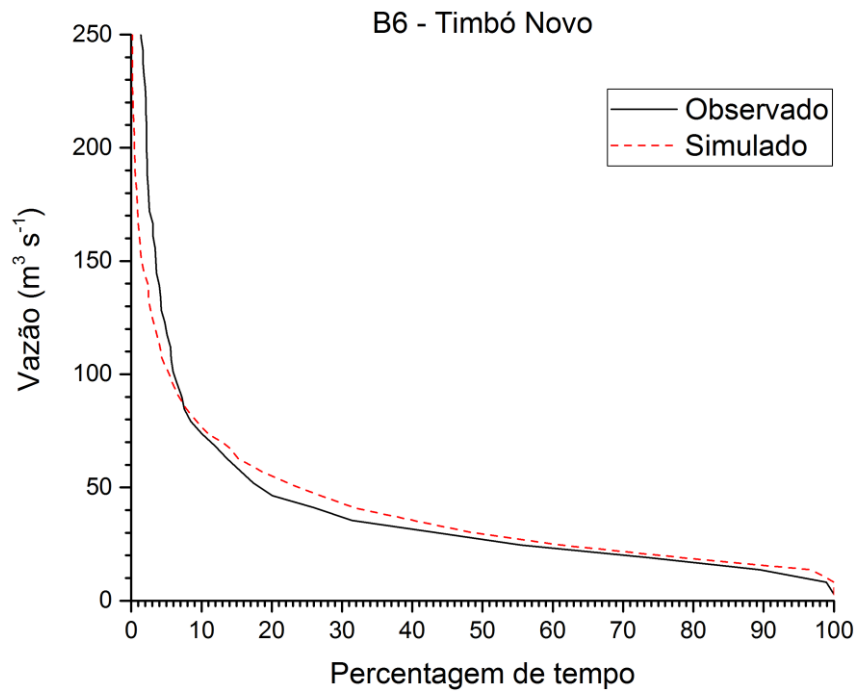


Figura B.3 Curva de porcentagem de tempo de permanência do posto de vazão B6.

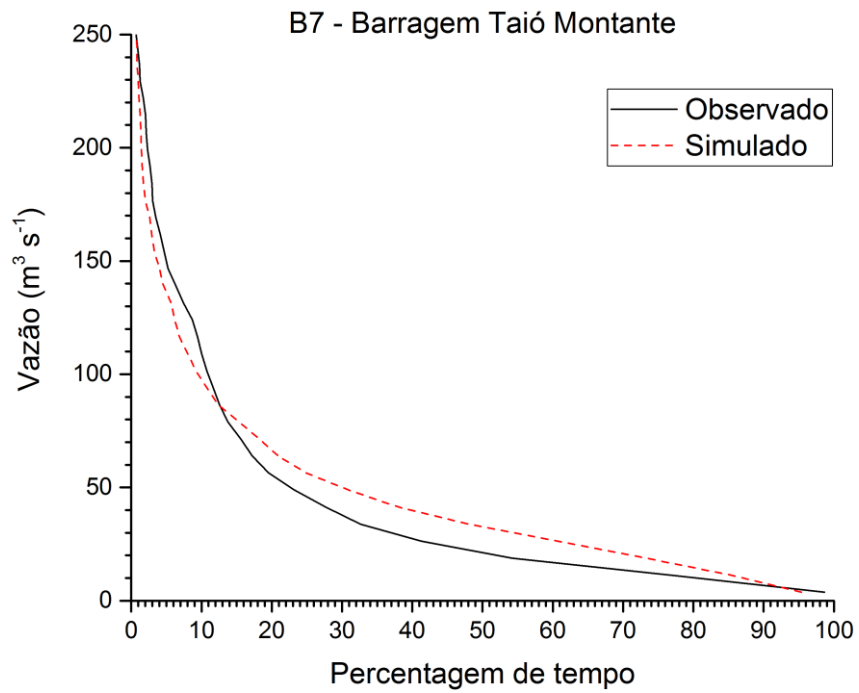


Figura B.4 Curva de porcentagem de tempo de permanência do posto de vazão B7.

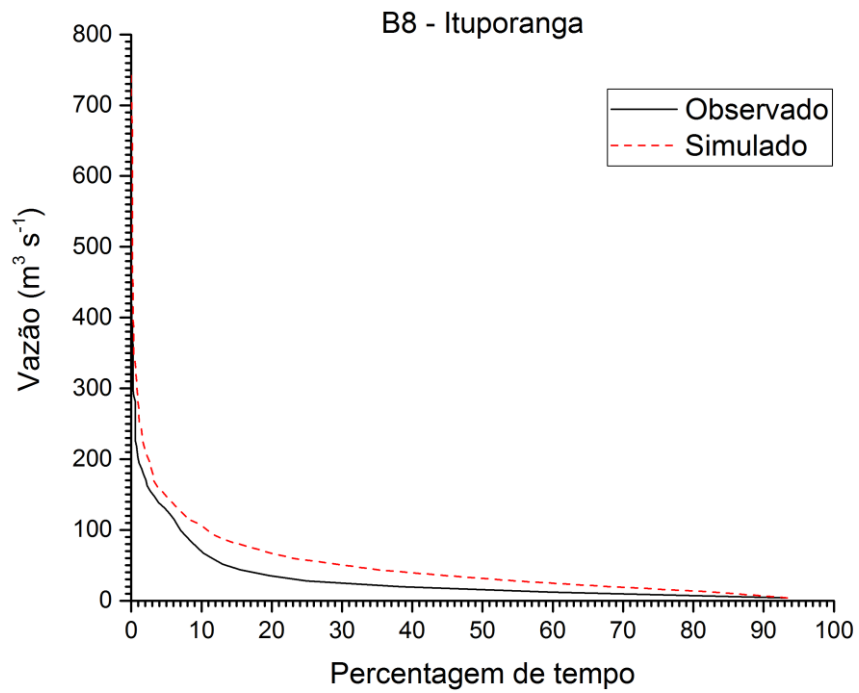


Figura B.5 Curva de porcentagem de tempo de permanência do posto de vazão B8.

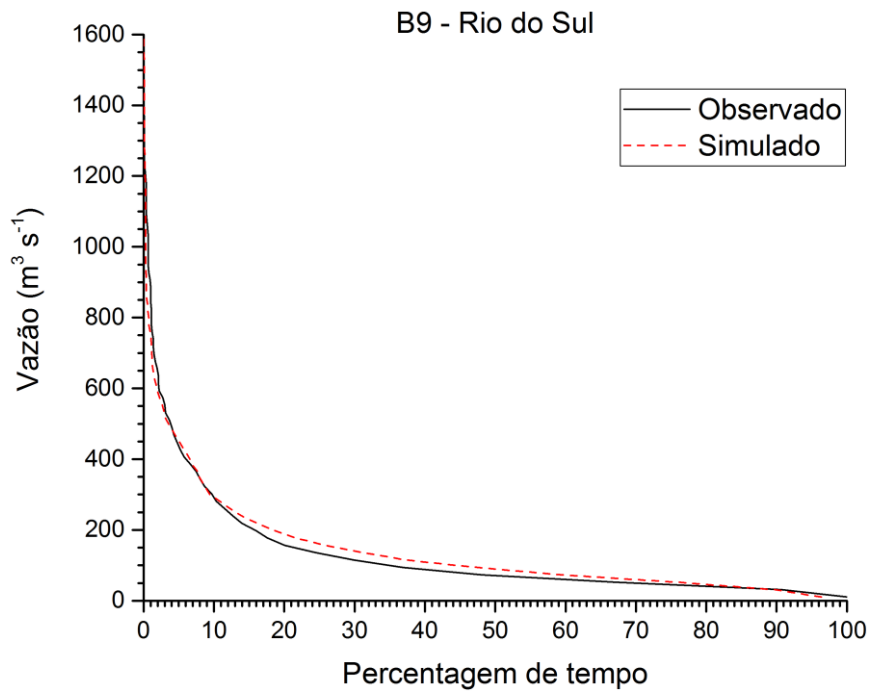


Figura B.6 Curva de porcentagem de tempo de permanência do posto de vazão B9.

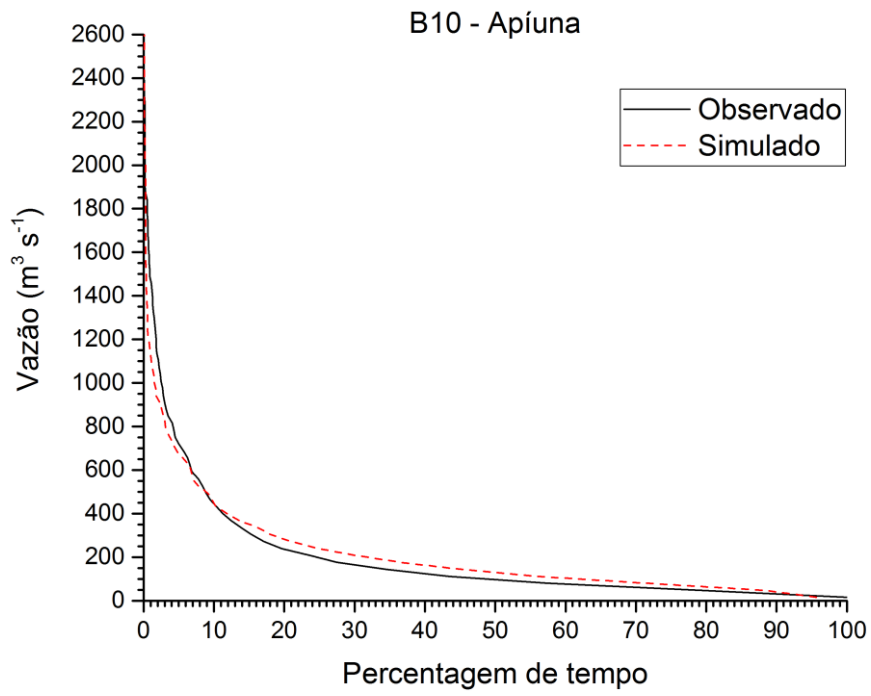


Figura B.7 Curva de porcentagem de tempo de permanência do posto de vazão B10.

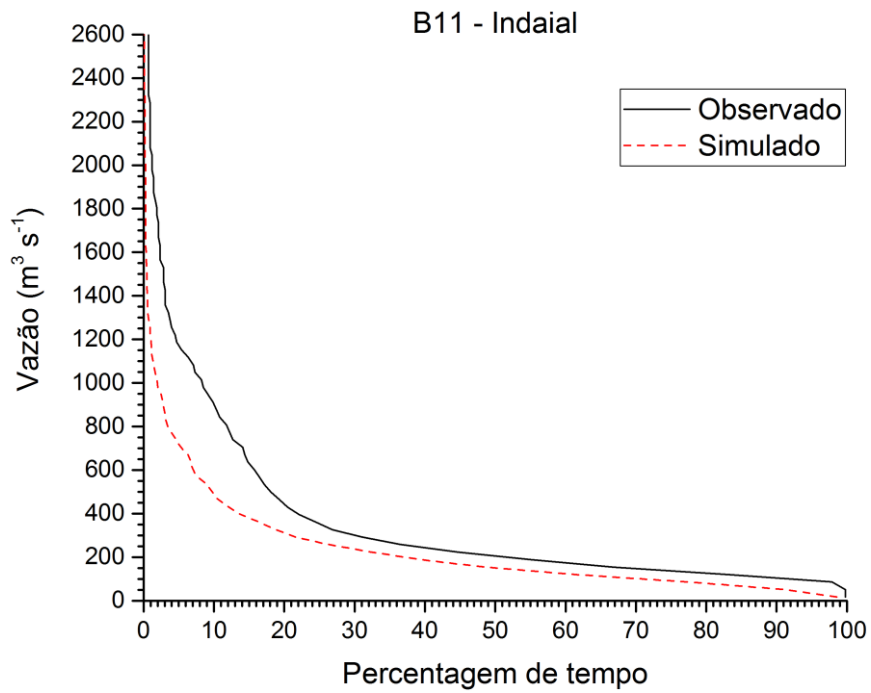


Figura B.8 Curva de porcentagem de tempo de permanência do posto de vazão B11.

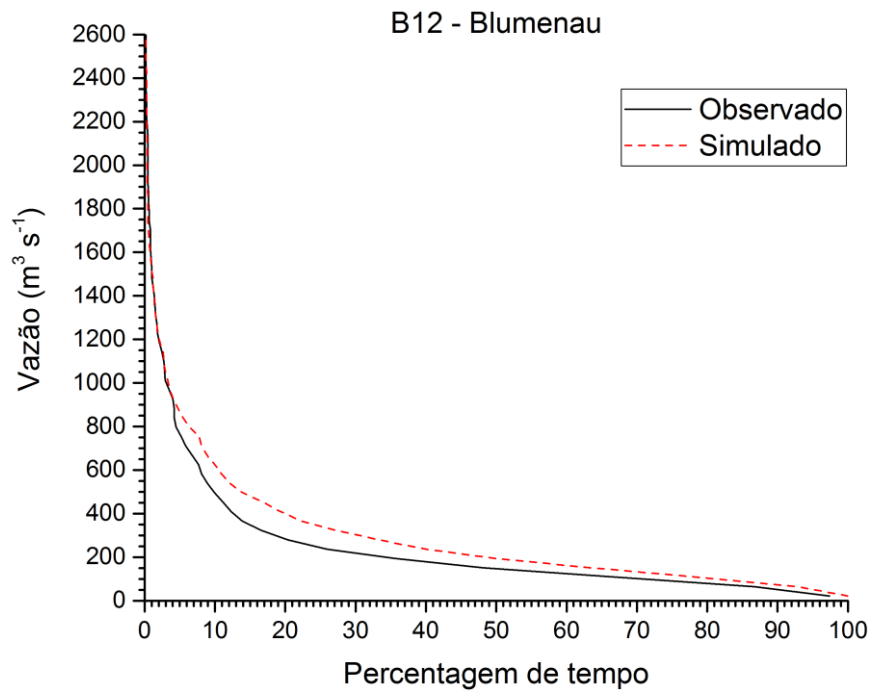


Figura B.9 Curva de porcentagem de tempo de permanência do posto de vazão B12.

APÊNDICE C – SÉRIES TEMPORAIS DE VAZÕES DIÁRIAS OBSERVADAS NOS POSTOS DE VAZÃO ESTUDADOS

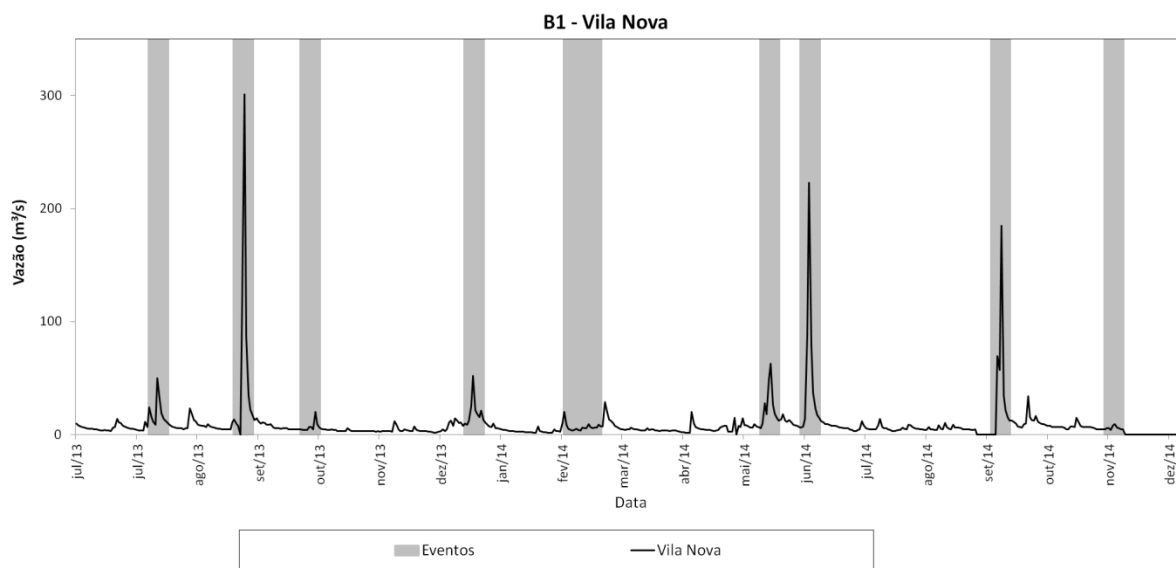


Figura C.1 Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Vila Nova (B1) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.

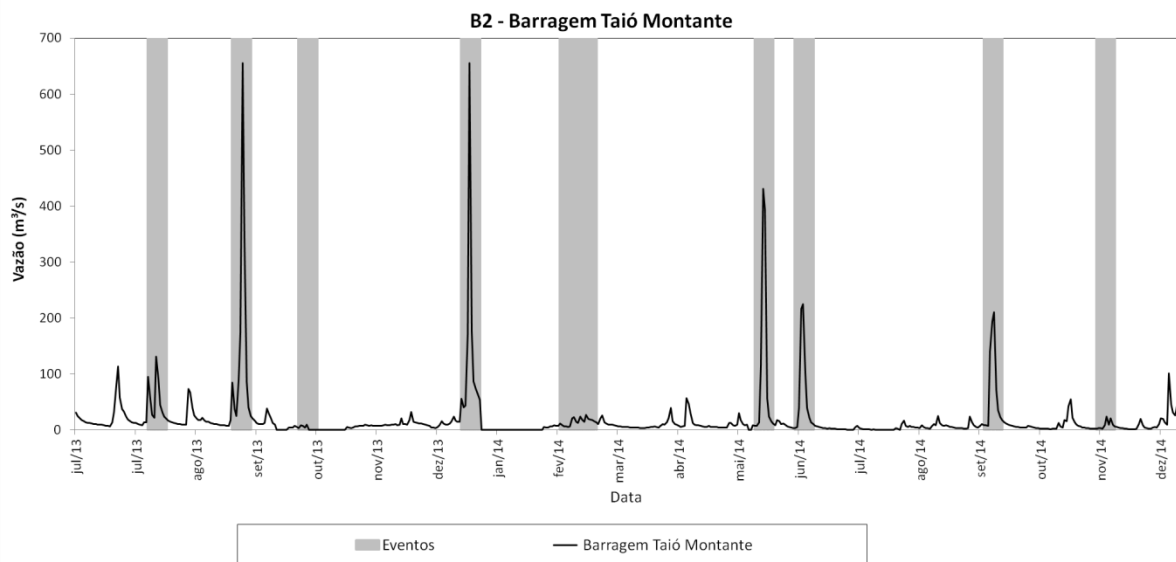


Figura C.2 Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Barragem Taió Montante (B2) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.

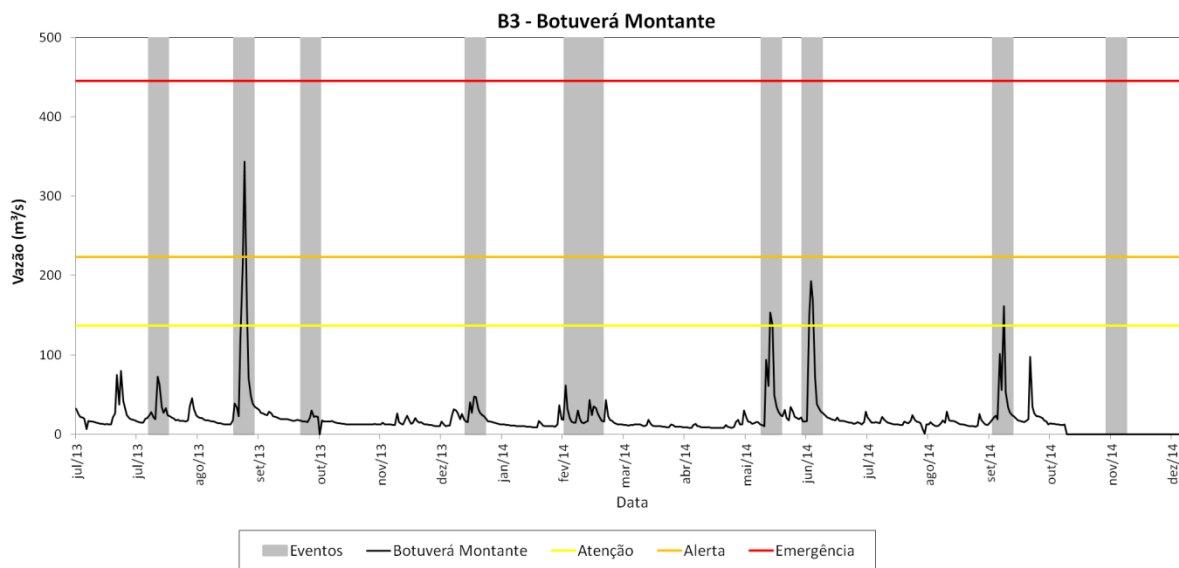


Figura C.3 Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Botuverá Montante (B3) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.

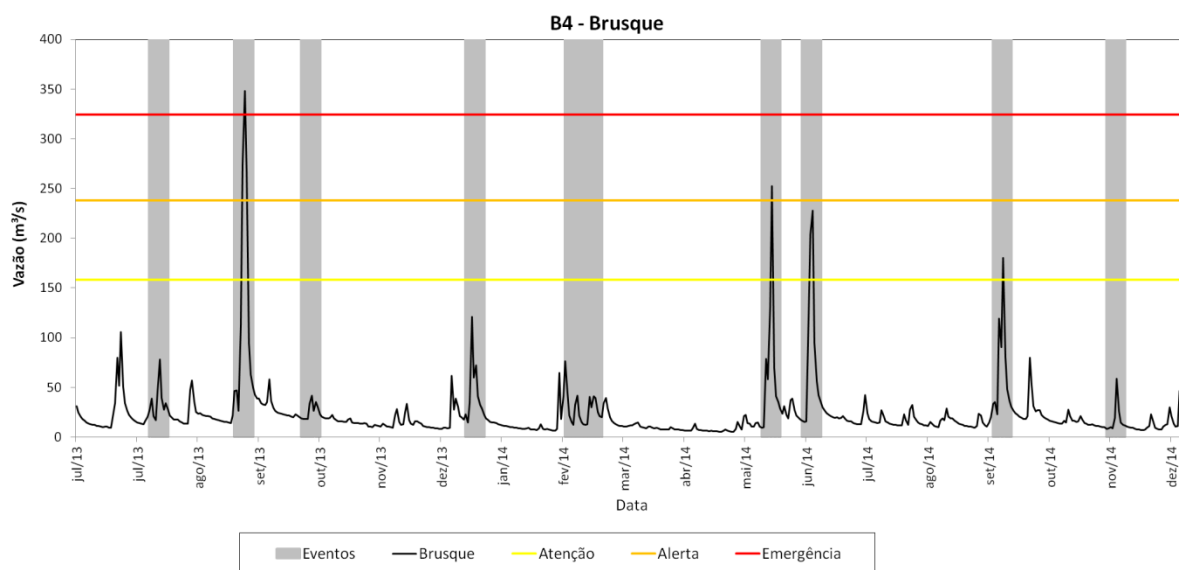


Figura C.4 Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Brusque (B4) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.

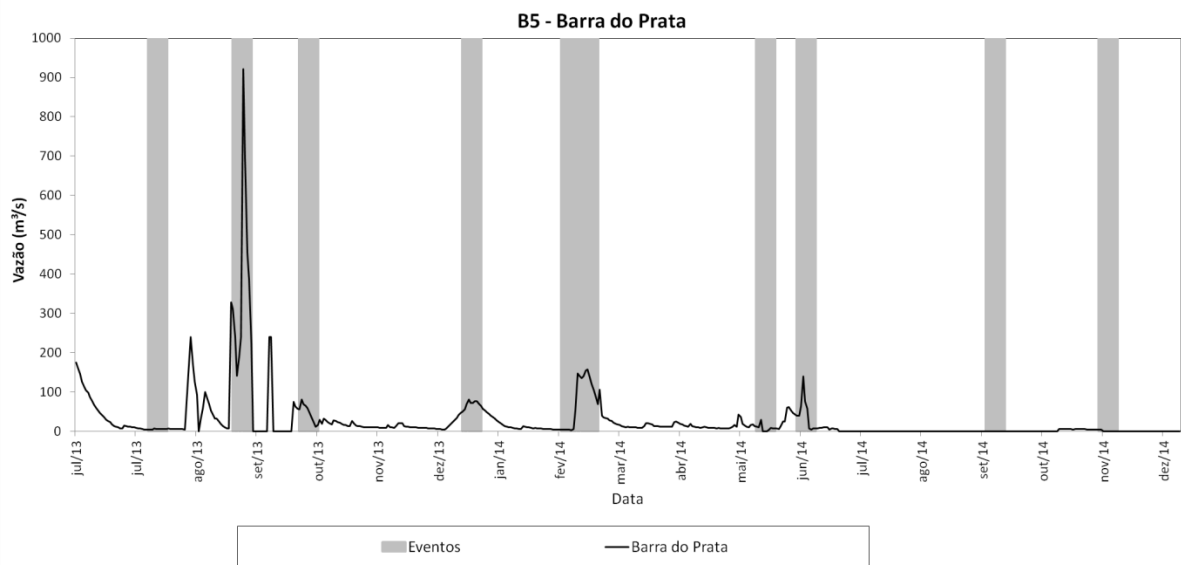


Figura C.5 Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Barra do Prata (B5) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.

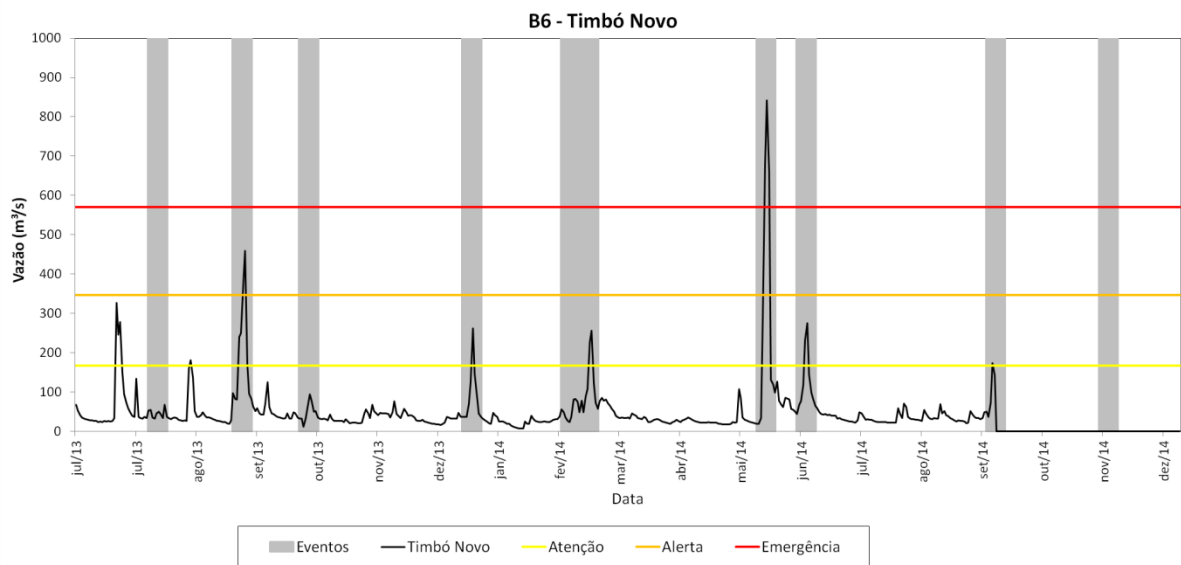


Figura C.6 Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Timbó Novo (B6) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.

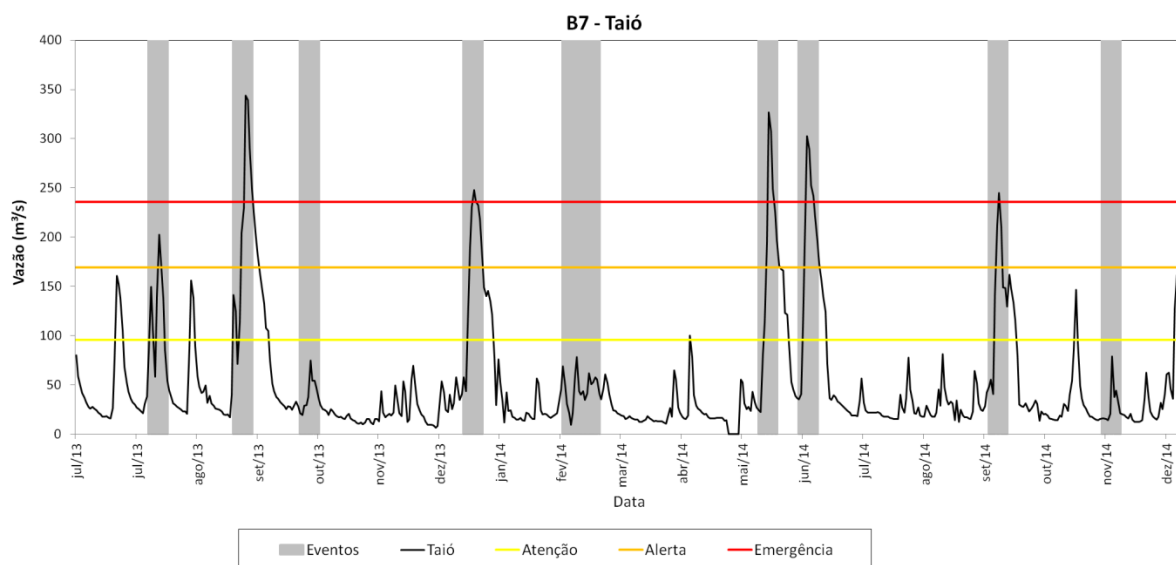


Figura C.7 Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Taió (B7) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.

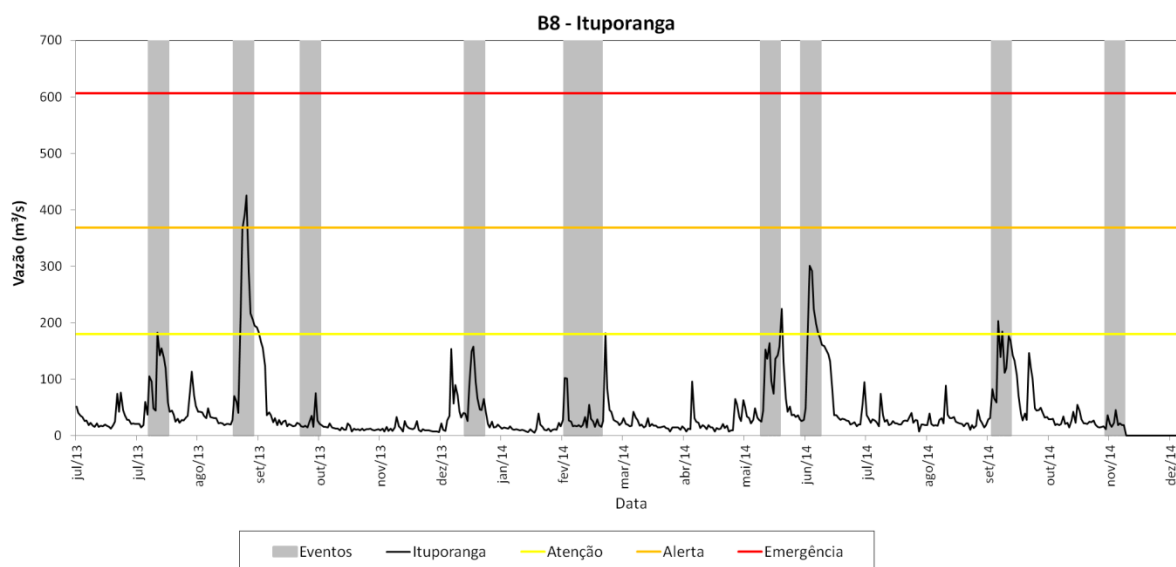


Figura C.8 Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Ituporanga (B8) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.

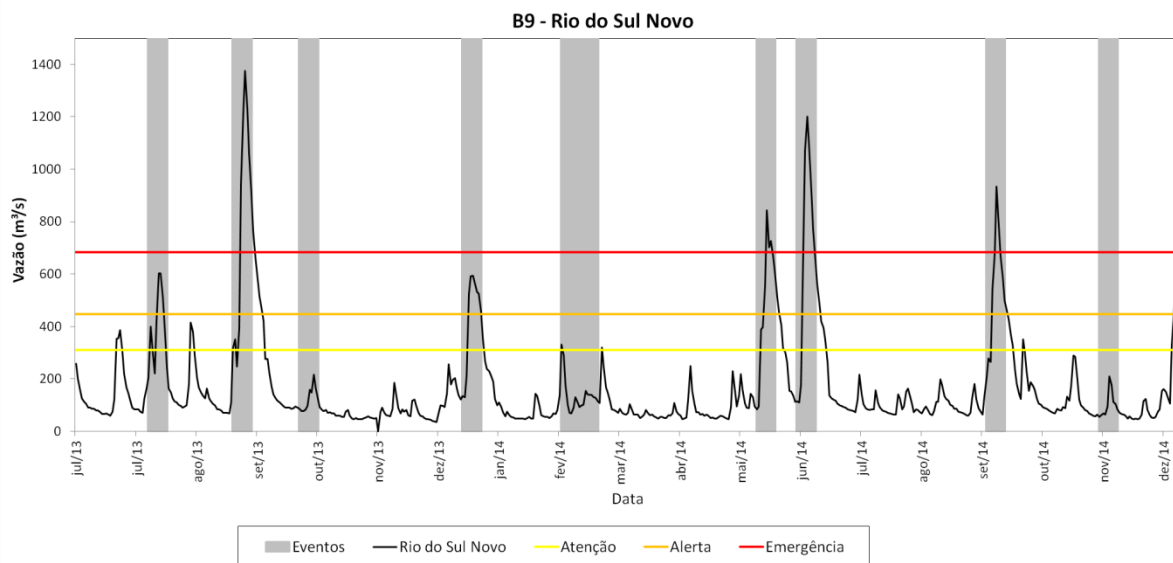


Figura C.9 Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Rio do Sul Novo (B9) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.

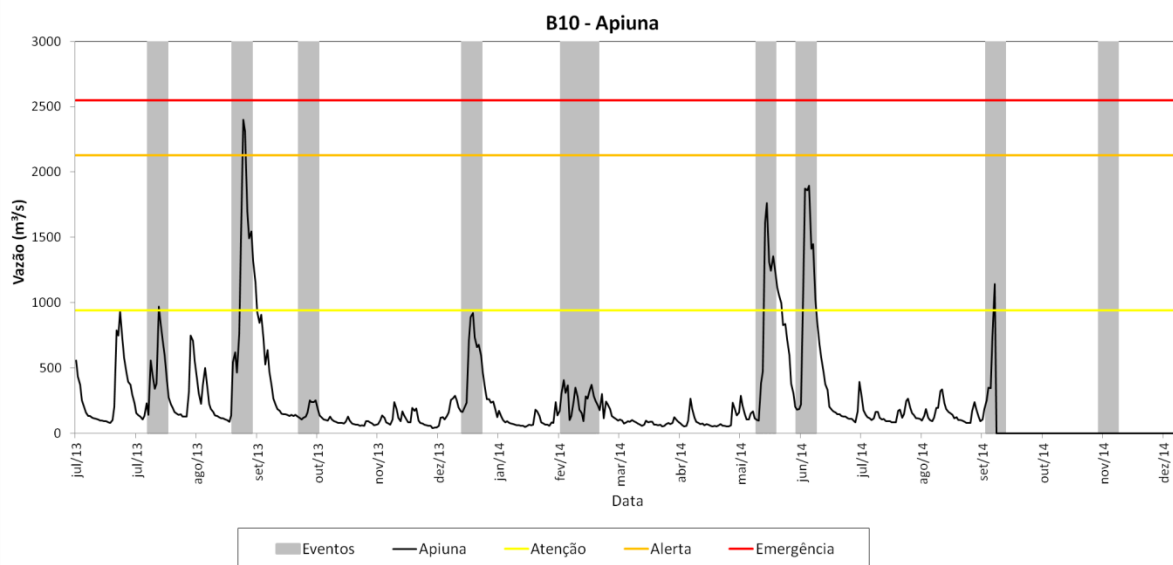


Figura C.10 Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Apiúna (B10) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.

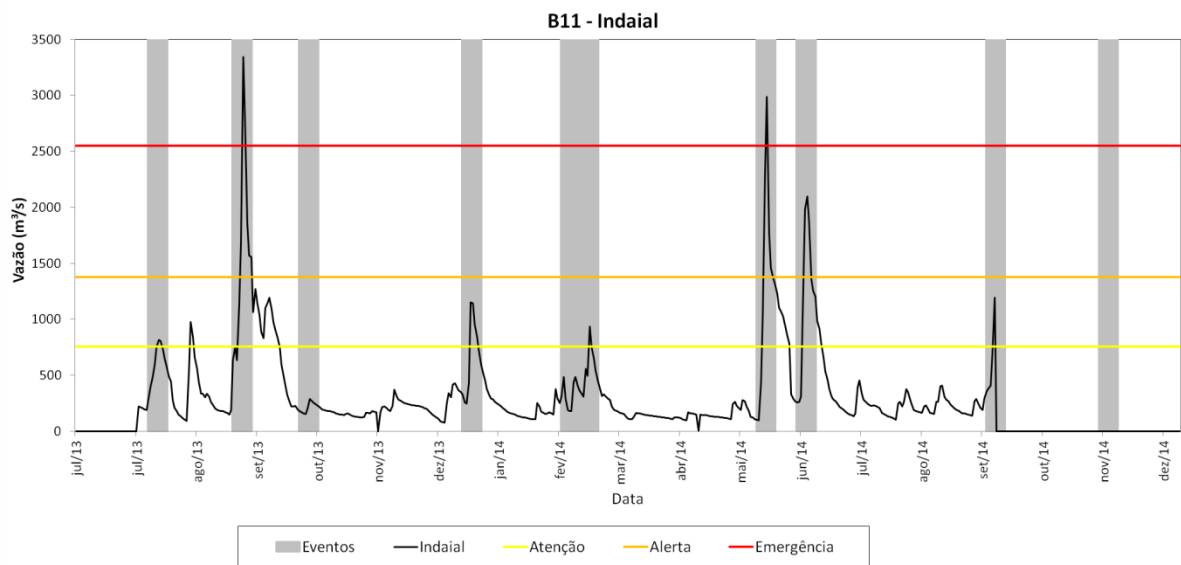


Figura C.11 Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Indaial (B11) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.

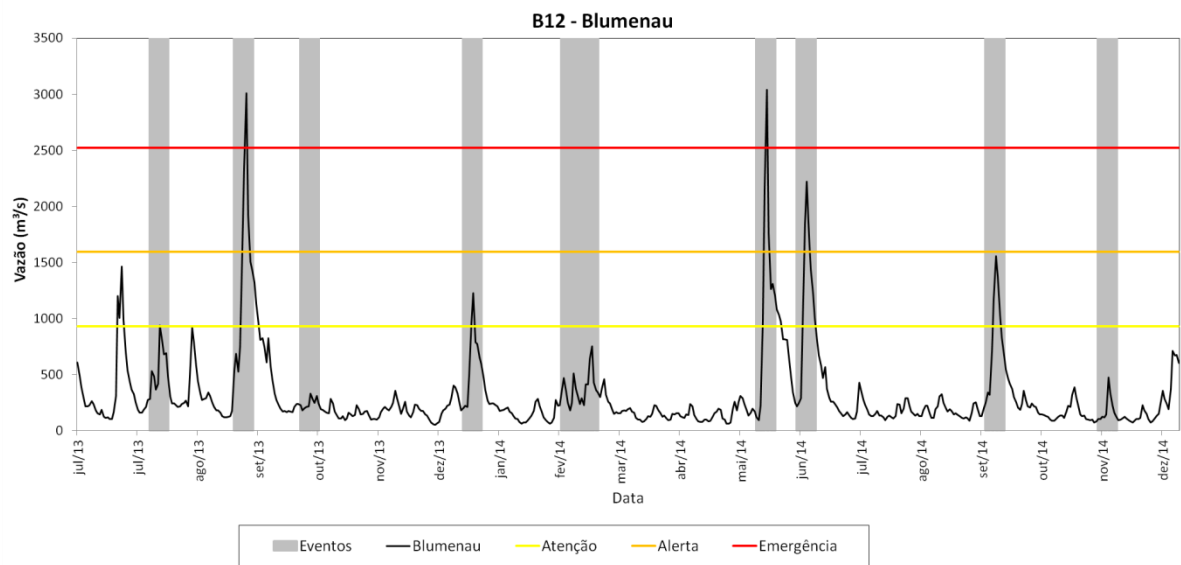


Figura C.12 Série temporal de vazões diárias observadas do posto de Blumenau (B12) com a indicação dos eventos (períodos de 10 dias) escolhidos, entre o segundo semestre de 2013 e o final de 2014.

APÊNDICE D – CURVAS-CHAVE PARA OS 12 POSTOS DE VAZÃO OBTIDAS PELOS LEVANTAMENTOS DISPONIBILIZADOS PELA “ANA”

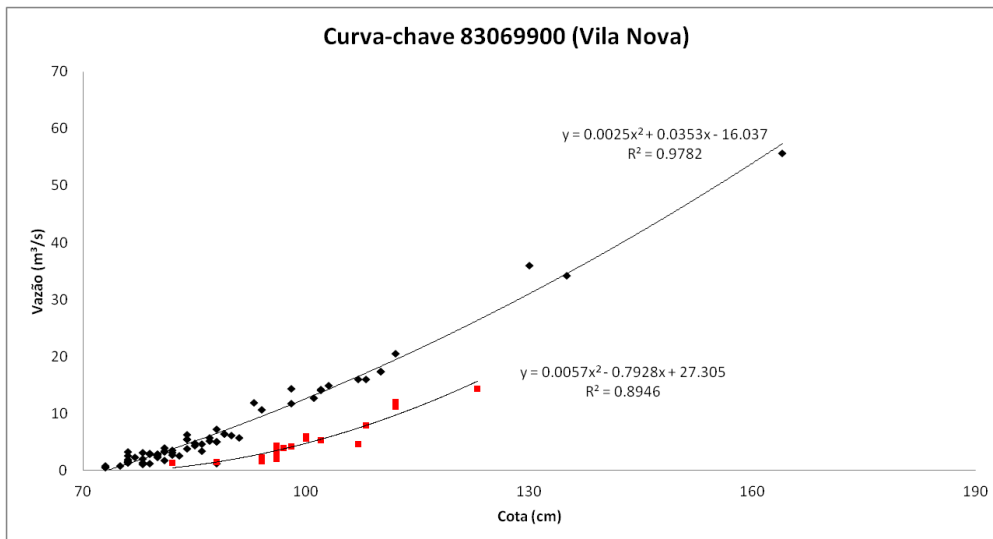


Figura D.1 Curva-chave para o posto de Vila Nova (B1), onde os pontos em vermelho referem-se aos dados até o ano de 1989, a partir de 1989 houve uma mudança na seção do canal.

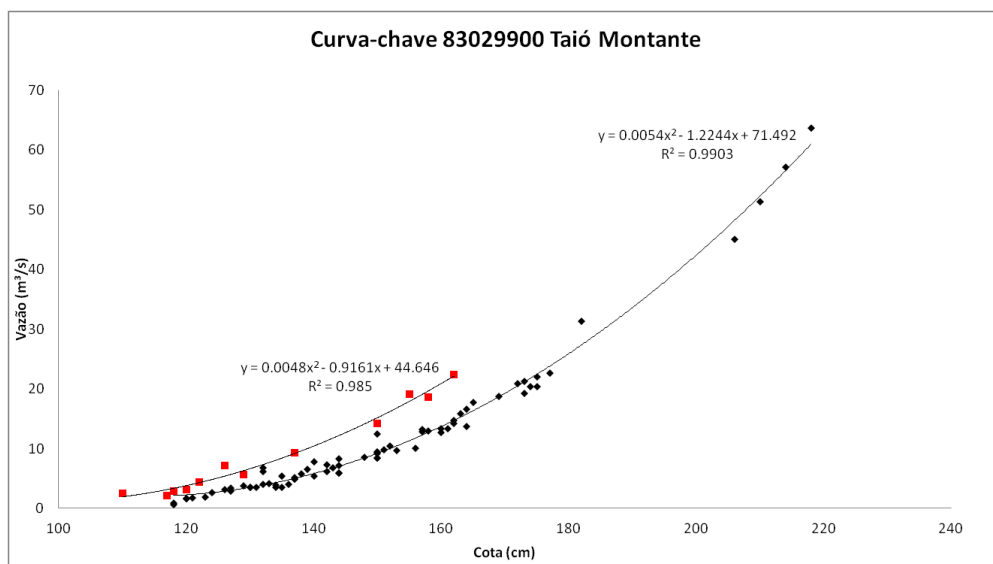


Figura D.2 Curva-chave para o posto de Taió Montante (B2), onde os pontos em vermelho referem-se aos dados até o ano de 2011, a partir de 2011 houve uma mudança na seção do canal.

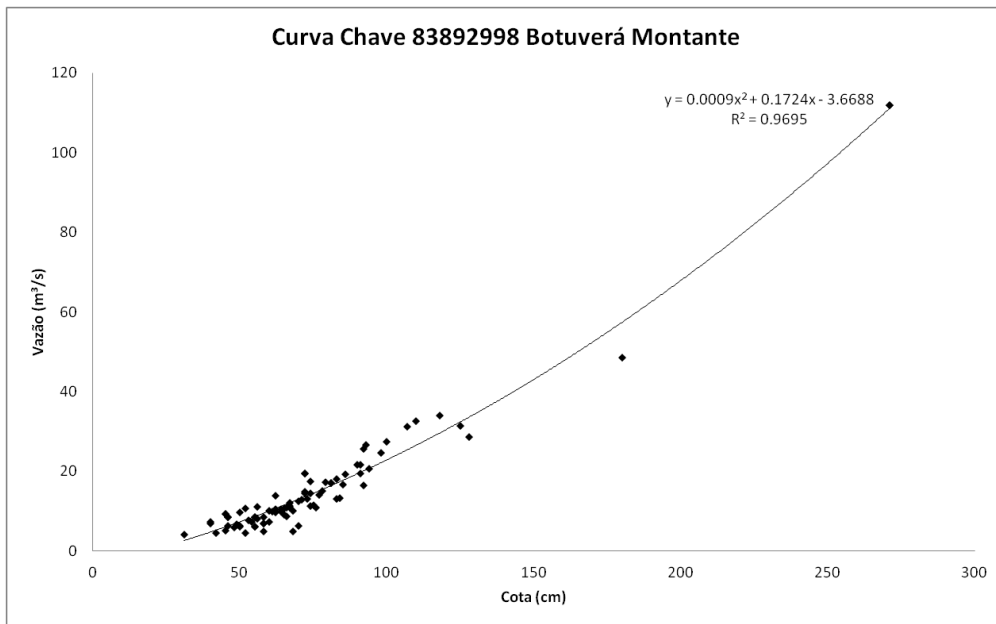


Figura D.3 Curva-chave para o posto de Botuverá Montante (B3).

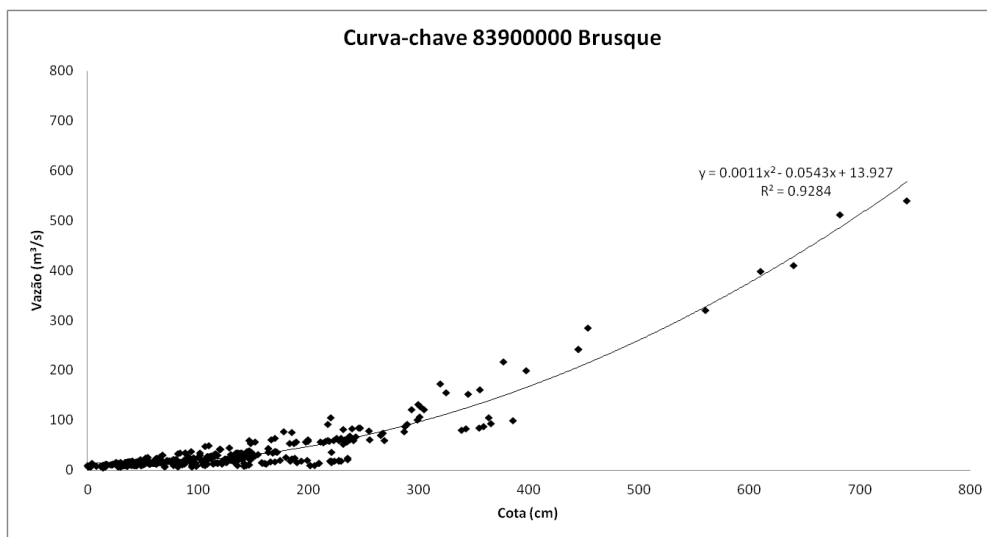


Figura D.4 Curva-chave para o posto de Brusque (B4).

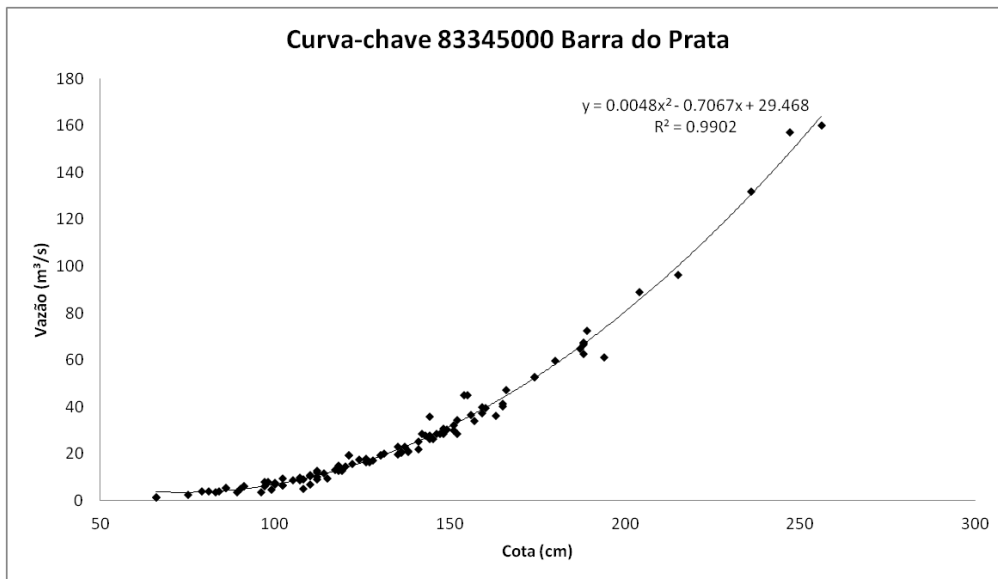


Figura D.5 Curva-chave para o posto de Barra do Prata (B5).

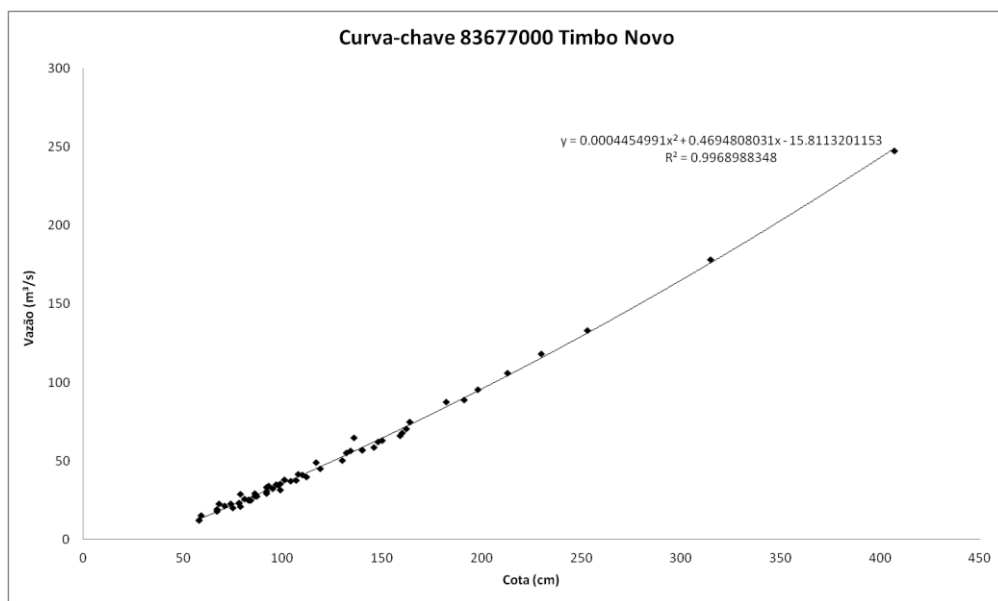


Figura D.6 Curva-chave para o posto de Timbó Novo (B6).

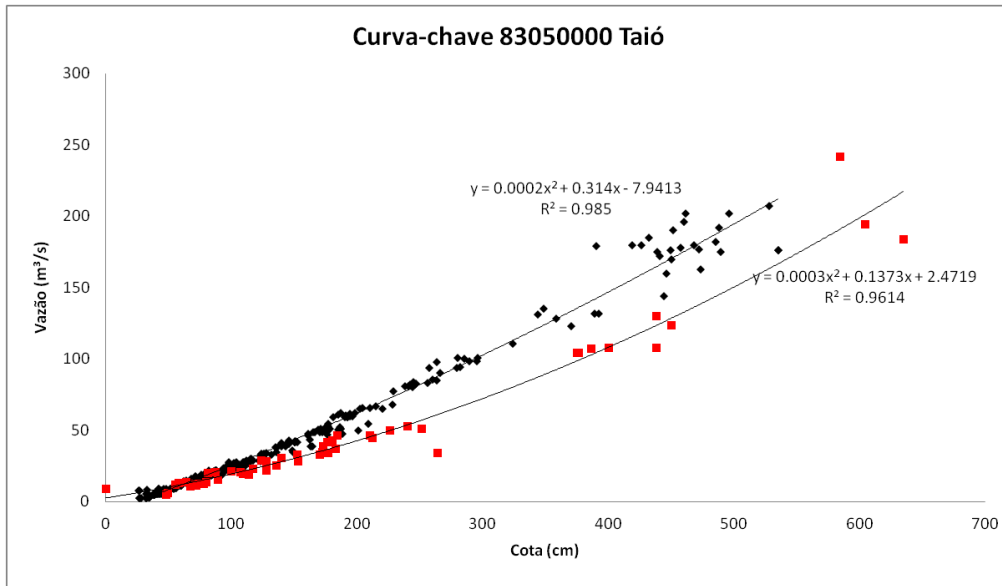


Figura D.7 Curva-chave para o posto de Taió (B7), onde os pontos em vermelho referem-se aos dados até o ano de 1997, a partir de 1997, houve uma mudança na seção do canal.

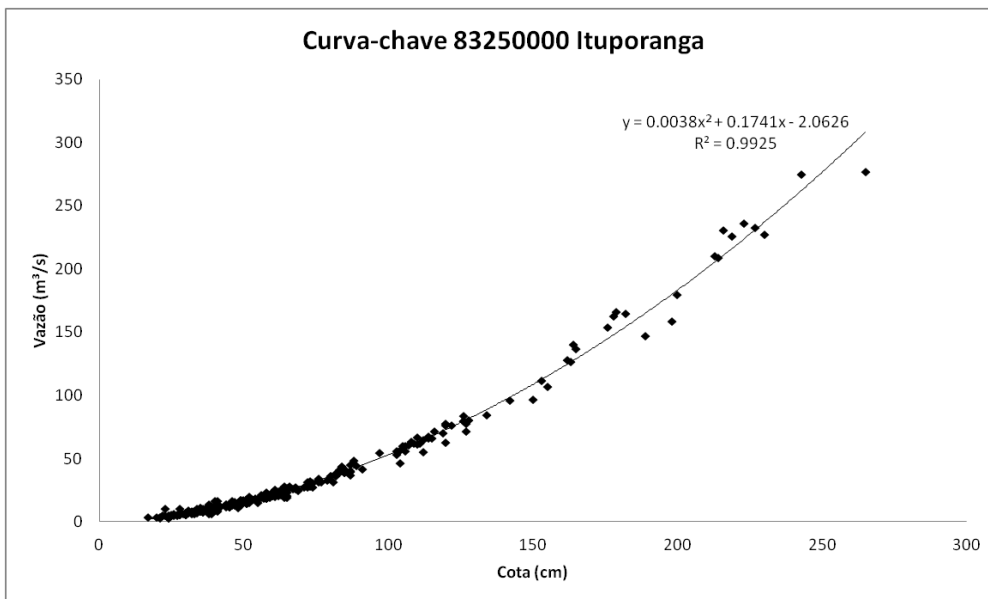


Figura D.8 Curva-chave para o posto de Ituporanga (B8).

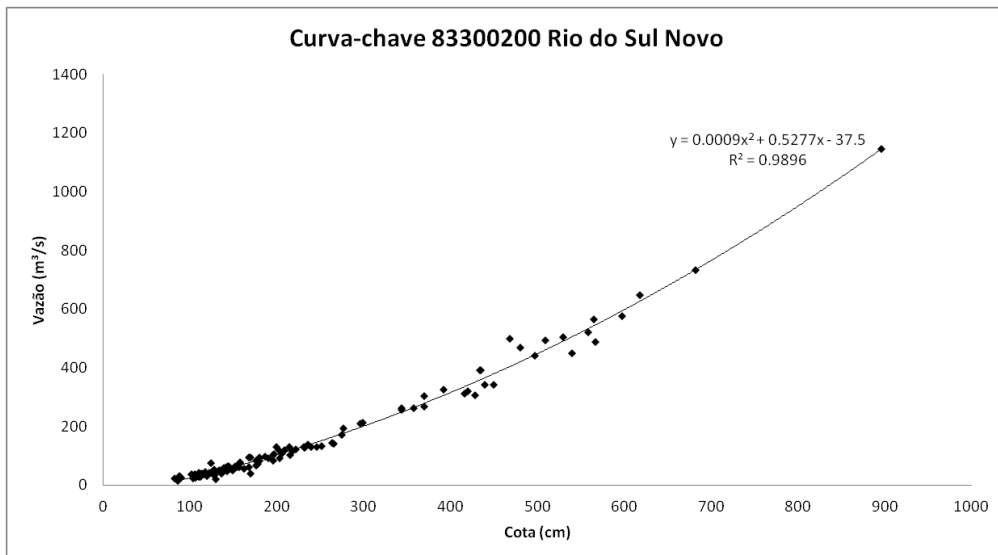


Figura D.9 Curva-chave para o posto de Rio do Sul (B9).

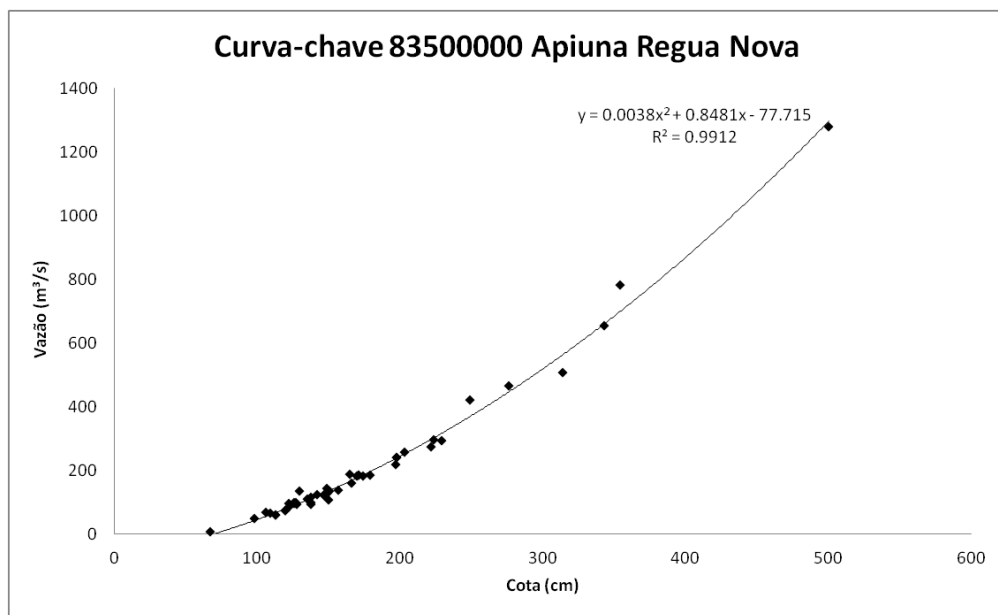


Figura D.10 Curva-chave para o posto de Apiúna Regua Nova (B10).

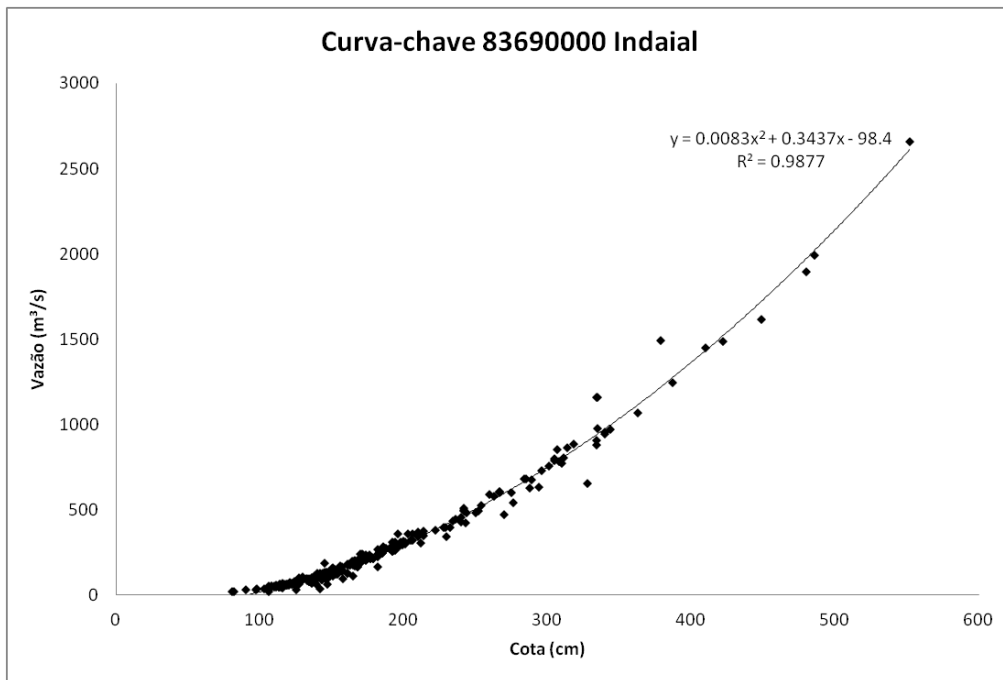


Figura D.11 Curva-chave para o posto de Indaial (B11).

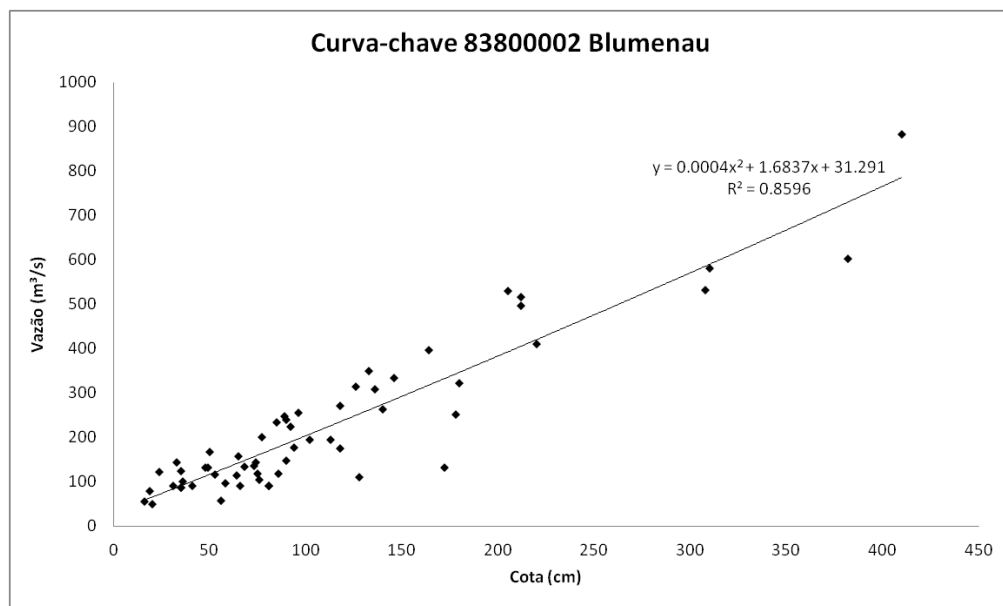


Figura D.12 Curva-chave para o posto de Blumenau (B12).