

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE
ENGENHARIA

CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

GUILHERME MENDOZA GUIMARÃES

**ANÁLISE DE PREVISIBILIDADE DE CHEIAS NA BACIA DO RIO
URUGUAI ATRAVÉS DO MODELO MGB-IPH**

Porto Alegre
2018

GUILHERME MENDOZA GUIMARÃES

ANÁLISE DE PREVISIBILIDADE DE CHEIAS NA BACIA DO RIO URUGUAI
ATRAVÉS DO MODELO MGB-IPH

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas e Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan

Coorientador: Dr. Francisco Fernando Noronha Marcuzzo

Porto Alegre

Janeiro de 2018

GUILHERME MENDOZA GUIMARÃES

ANÁLISE DE PREVISIBILIDADE DE CHEIAS NA BACIA DO RIO URUGUAI ATRAVÉS DO MODELO MGB-IPH

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas e Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre,.....de.....de 2018.

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia “ANÁLISE DE PREVISIBILIDADE DE CHEIAS NA BACIA DO RIO URUGUAI ATRAVÉS DO MODELO MGB-IPH”, elaborada por GUILHERME MENDOZA GUIMARÃES, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Ambiental

Comissão Examinadora:

.....
Professor Orientador Doutor Fernando Mainardi Fan
Departamento de Obras Hidráulicas
Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH

.....
Mestre Vinícius Alencar Siqueira
Bolsista de Doutorado pelo CNPq no PPGRHSA do IPH - UFRGS
Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH

.....
Mestre Franco Turco Buffon
Gerência de Hidrologia e Gestão Territorial – GEHITE / SUREG-PA
Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - CPRM

Aos que amo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma estiveram envolvidos no processo de construção deste trabalho. Primeiramente, agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela sua excelência de ensino, e a todos os colaboradores, que ensejam uma universidade pública de extrema qualidade. Sou extremamente grato por ter a oportunidade de tornar-me graduado nesta instituição.

Cabe também o agradecimento à Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), pelo acolhimento e por todos os conhecimentos que me foram passados durante meu estágio, sem os quais este trabalho não teria sido possível. Faço aqui agradecimentos especiais à M^a Andrea Germano, que além de me supervisionar, sempre confiou na minha capacidade e na minha dedicação. Obrigado pela amizade, pelos conselhos, pelas vibrações ao ver minhas conquistas e pela atenção que sempre dedicou a mim. Agradeço também ao André Chagas pelas ótimas conversas, pelas piadas e pelas críticas, que apesar de contundentes, sempre foram construtivas e visaram ao meu crescimento profissional. Agradeço ao meu co-orientador, Dr. Francisco Marcuzzo, pela orientação e conhecimentos compartilhados.

Faço um agradecimento em especial ao professor Dr. Fernando Fan, por ter aceitado meu convite de orientar-me neste trabalho, pela sua atenção e suas contribuições inestimáveis durante todo o processo de desenvolvimento desta monografia. Agradeço também pelos conhecimentos (saberes), competências (habilidades) e atitudes (valores) que me foram passados ao longo das suas disciplinas, bem como pelas reflexões desde o início até o fim de cada semestre. Sou muito grato por ter sido seu aluno.

Agradeço à banca examinadora, M^e Vinícius Siqueira e M^e Franco Buffon, pela disponibilidade, interesse e por aceitar colaborar com leitura atenta e crítica a este trabalho. Obrigado por compartilharem seus conhecimentos e opiniões.

Agradeço também aos professores Dr. Rafael Baptista, Dr. Nelson Todt, Dra. Fernanda Marquesan e, em especial, ao Dr. Aderson Loureiro, da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, tanto pelos ensinamentos técnico-científicos quanto pela transmissão de valores que levarei comigo pelo resto da vida, além do incentivo para que eu siga na carreira acadêmica. Obrigado por partilharem comigo a paixão pela Educação Física e o cuidado com o próximo que levam em seus corações.

Agradeço também aos meus colegas e amigos de curso que me acompanharam na jornada acadêmica, especialmente à Marcele Colferai e à Lúcia Silva, pela amizade incondicional que tornou esta jornada acadêmica repleta de momentos alegres. Agradeço também ao Juliano Finck, pela sua grande amizade e ajuda durante a realização deste trabalho. Agradeço aos integrantes do Grupo de Pesquisa de Hidrologia de Grande Escala do IPH, especialmente à Aline Meyer, pela disponibilidade, pelo auxílio e por dirimir inúmeras dúvidas que surgiram durante a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos aqueles que amo e que estiveram ao meu lado em todos os momentos, minha família. Aos meus pais, Arlene e Sergio, por todo o amor, carinho, compreensão e pelos valores morais que me passaram ao longo da minha vida. Sou muito grato a vocês por tudo. Ao meu irmão, Victor, que também sempre esteve presente, me auxiliando durante toda a graduação com muito amor e carinho. Ao meu irmão do coração, Mário Augusto, pela compreensão das minhas ausências. À minha namorada, Vittoria, pelo amor incondicional e compreensão em todos os momentos desta jornada, por ser minha grande companheira e amiga, e por me apoiar em todos os momentos, palavras não são capazes de expressar o quanto sou grato por tudo. A todos vocês, muito obrigado pela torcida e vibração com que encaram meus projetos e sonhos, sem vocês nada disso seria possível de ser concretizado.

Agradeço a todos àqueles que de alguma forma dedicam uma parte de si e que contribuem para tornar este mundo um lugar melhor.

Nós não vamos ser capazes de operar com sucesso nossa nave espacial Terra por muito mais tempo, a menos que a vejamos como uma nave inteira e nosso destino como comum. Tem que ser todos ou ninguém.

Buckminster Fuller

RESUMO

A previsão de vazão de curto a médio prazo consiste em estimar a vazão em um ponto de interesse do curso de água com antecedência no tempo que varia de algumas horas até cerca de 14 dias. Esta possui diversas aplicações diretas como para a irrigação, o abastecimento de água, a operação energética bem como para o gerenciamento de desastres naturais através de sistemas de alerta. Dessa maneira, o presente estudo insere-se no âmbito de previsão hidrológica através de modelagem matemática distribuída do tipo chuva-vazão utilizando o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH) aplicado na Bacia do Rio Uruguai. Nesse sentido, objetiva-se investigar a previsibilidade de eventos críticos em pontos de interesse na bacia do rio Uruguai, isto é, avaliar com qual período de antecedência é possível estimar o pico de vazão em alguns locais suscetíveis à inundação. A Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai é uma bacia transfronteiriça com aproximadamente 50% de sua área em território brasileiro, 32% no Uruguai e 18% na Argentina. As enchentes na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai atingem principalmente a população ribeirinha ao longo do rio principal e em alguns de seus afluentes. Entre os municípios mais acometidos por enchentes nessa região estão Garruchos, Iraí, Itaqui, Porto Lucena, São Borja e Uruguaiana, para cujos os postos fluviométricos é realizada a análise de previsibilidade. Para a avaliação da eficiência do modelo hidrológico, utilizou-se o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), o coeficiente de Nash-Sutcliffe modificado (NSE_{LOG}) e o cálculo da diferença entre os volumes observados e calculados (ΔV). Posteriormente à calibração e à validação do modelo, realizou-se a análise de previsibilidade com base em 15 eventos de cheia que ocorreram entre 1980 e 2017 em que as previsões com incremento de antecedência diária são comparadas a uma simulação de referência. Para a avaliação de previsibilidade utilizaram-se os mesmos índices de desempenho da fase de calibração e de validação, além da inclusão do parâmetro do erro relativo em relação ao pico de vazão (ERP). Verificou-se que há um incremento da previsibilidade quanto mais à jusante o posto fluviométrico estiver localizado, como pode ser observado na estação de Uruguaiana, a qual apresentou os melhores resultados nesse quesito. Além disso, constata-se o efeito da distribuição espacial da chuva na previsibilidade, com a estação de Uruguaiana apresentando características distintas para eventos cuja precipitação predominante é na Sub-bacia do Ibicuí e para eventos cuja precipitação predominante é nas Sub-bacias do Alto e Médio Uruguai. Em suma, as estações do Médio Uruguai apresentaram boa previsibilidade para em média dois a três dias de antecedência.

Palavras-chave: Previsão de vazão. Análise de Previsibilidade. Bacia do Rio Uruguai.

ABSTRACT

Short to medium-term flow forecasts are characterized by the estimation of flow at different important sites in a watershed with a lead time of few hours to about 14 days. The flow forecast is an important tool not only for optimization of energy generation and water supply, but also for the management of areas susceptible to flood, contributing to the decision-making processes with flood alert systems. In this way, the scope of the present study is within hydrological forecasts applying the hydrological model MGB-IPH in the Uruguay River Basin. In this context, this study aims to investigate the predictability of flood occurrences at important sites in the Uruguay River basin, that is, to evaluate at which lead time is possible to estimate the peak flow in some sites susceptible to flood. The Uruguay River basin is a transboundary basin with approximately 50% of its area in Brazilian territory, 32% in Uruguay and 18% in Argentina. The floods in this river basin mainly affect the riverine population along the main river and in some of its major tributaries. Among the towns most affected by floods in this region are Garruchos, Iraí, Itaqui, Porto Lucena, São Borja and Uruguai, to whose hydrometric stations the predictability analysis is performed. It was applied the Nash-Sutcliffe (NSE), the modified Nash-Sutcliffe (NSE_{LOG}) and the difference between the observed and calculated volumes (ΔV) to evaluate the efficiency of the hydrological model. After the calibration and validation of the model, the predictability analysis was performed based on 15 flood occurrences that happened between 1980 and 2017 in which the forecasts with a daily increment of lead time are compared to a standard simulation. For the predictability assessment, the same performance indexes of the calibration and validation phase were used, besides the inclusion of the peak flow relative error (ERP). It was verified that there is an increase of the predictability downstream, with the hydrometric station of Uruguai having the best results in this subject. Moreover, the spatial rainfall distribution effect on predictability is verified, especially for the Uruguai hydrometric station presenting distinct characteristics for occurrences whose major rainfall distribution is on the Ibicuí catchment and for occurrences whose major rainfall distribution is on the Upper and Medium Uruguay's catchment. In short, the hydrometric stations on the Medium Uruguay's catchment provided good predictability for an average of two to three lead time forecasts.

Keywords: Hydrological Forecasting. Predictability Analysis. Uruguay River.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Caracterização de situação de enchente e inundação (GOERL e KOBIYAMA, 2005).....	24
Figura 2 - Distribuição de estações fluviométricas na Austrália. Adaptado de PAGANO <i>et al.</i> (2016).	33
Figura 3 - Distribuição de inundações na China (CRED, 2016).	34
Figura 4 - Densidade de postos fluviométricos na bacia hidrográfica do rio Congo antes de 1960 (esquerda) e sua situação atual (direita) (THSIMANGA <i>et al.</i> 2016).....	39
Figura 5 - Fluxograma esquemático da estrutura metodológica utilizada no presente estudo. 50	
Figura 6 - Localização da Bacia do Rio Uruguai	51
Figura 7 - Caracterização da Região Hidrográfica do Uruguai com Definição das Sub-bacias de Estudo	53
Figura 8 - Caracterização Geológica da Bacia do Rio Uruguai (Adaptado segundo Comissão da Carta Geológica do Mundo, 2001).	54
Figura 9 - Caracterização Hidrogeológica da Bacia do Rio Uruguai (Adaptado de Diniz <i>et al.</i> 2014).....	57
Figura 10 - Mapa hipsométrico da Bacia do Rio Uruguai.....	60
Figura 11 - Mapa de declividade da Bacia do Rio Uruguai.	61
Figura 12 - Caracterização climática segundo Classificação de Köppen.....	62
Figura 13 - Precipitação média anual na parte brasileira da Bacia do Rio Uruguai.....	63
Figura 14 - Caracterização Populacional da Região Hidrográfica do Uruguai e principais municípios acometidos por enchentes.	64
Figura 15 - Municípios inicialmente atendidos pelo sistema de alerta hidrológico desenvolvido pela CPRM na Bacia do Rio Uruguai.	65
Figura 16 - Diagrama esquemático dos processos físicos no MGB-IPH, representados pelos fluxos horizontais e verticais (SIQUEIRA, 2015).....	68
Figura 17 - Postos pluviométricos utilizados na modelagem hidrológica.....	70
Figura 18 - Postos fluviométricos utilizados na modelagem hidrológica.	71
Figura 19 - Postos climáticos utilizados na modelagem hidrológica.	72
Figura 20 - Caracterização das URHs da Bacia do Rio Uruguai.....	74
Figura 21 - Mapa das minibacias geradas.	75
Figura 22 - Interface dos parâmetros calibráveis do MGB-IPH.....	77
Figura 23 - Postos fluviométricos utilizados para a análise de previsibilidade.....	80
Figura 24 - Metodologia utilizada para análise de previsibilidade.....	81
Figura 25 - Resultado da calibração para o posto de Iraí (74100000).....	83
Figura 26 - Resultado da calibração para o posto de São Borja (75780000)	83
Figura 27 - Resultado da calibração para o posto de Uruguaiana (77150000).....	84
Figura 28 - Resultado da calibração para o posto Passo Mariano Pinto (76800000).....	84
Figura 29 - Resultado da validação para o posto de Garruchos (75550000).....	86
Figura 30 - Resultado da validação para o posto de São Borja (75780000).	86
Figura 31 - Resultado da validação para o posto de Itaqui (75900000) sem preenchimento da falha.	87

Figura 32 - Resultado da validação para o posto de Itaqui (75900000) com o preenchimento da falha.	88
Figura 33 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para estação 74100000 (Iraí) no evento de junho de 2017.	89
Figura 34 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para estação 77150000 (Uruguaiana) no evento de julho de 1983.	90
Figura 35 – Ensemble do índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe da análise de previsibilidade da estação de Uruguaiana (77150000).	92
Figura 36 - Ensemble do índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe modificado da análise de previsibilidade da estação de Uruguaiana (77150000).	93
Figura 37 – Ensemble do erro de volume da análise de previsibilidade da estação de Uruguaiana (77150000).	93
Figura 38 – Ensemble do erro relativo em relação ao pico de vazão da análise de previsibilidade da estação de Uruguaiana (77150000).	94
Figura 39 - Ensemble do índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe da análise de previsibilidade da estação de Uruguaiana (77150000), destacando eventos cuja onda de cheia é proveniente do rio Ibicuí (Laranja) e do rio Uruguai (Azul).	95
Figura 40 - Ensemble do índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe Modificado da análise de previsibilidade da estação de Uruguaiana (77150000), destacando eventos cuja onda de cheia é proveniente do rio Ibicuí (Laranja) e do rio Uruguai (Azul).	96
Figura 41 - Ensemble do erro de volume da análise de previsibilidade da estação de Uruguaiana (77150000), destacando eventos cuja onda de cheia é proveniente do rio Ibicuí (Laranja) e do rio Uruguai (Azul).	96
Figura 42 - Ensemble do erro relativo ao pico de vazão da análise de previsibilidade da estação de Uruguaiana (77150000), destacando eventos cuja onda de cheia é proveniente do rio Ibicuí (Laranja) e do rio Uruguai (Azul).	97
Figura 43 - Previsibilidade das estações da Bacia do Rio Uruguai adotando valor de máximo de -5% do erro relativo ao pico de vazão.	98
Figura 44 - Resultado da calibração para o posto de Iraí (74100000).	117
Figura 45 - Resultado da calibração para o posto de Porto Lucena (74800000).	117
Figura 46 - Resultado da calibração para o posto de Garruchos (75550000).	118
Figura 47 - Resultado da calibração para o posto de São Borja (75780000).	118
Figura 48 - Resultado da calibração para o posto de Itaqui (75900000).	119
Figura 49 - Resultado da calibração para o posto Passo Mariano Pinto (76800000).	119
Figura 50 - Resultado da calibração para o posto de Uruguaiana (77150000).	120
Figura 51 - Resultado da validação para o posto de Iraí (74100000).	121
Figura 52 - Resultado da validação para o posto de Porto Lucena (74800000).	121
Figura 53 - Resultado da validação para o posto de Garruchos (75550000).	122
Figura 54 - Resultado da validação para o posto de Passo São Borja (75780000).	122
Figura 55 - Resultado da validação para o posto de Itaqui (75900000) sem preenchimento da falha.	123
Figura 56 - Resultado da validação para o posto de Itaqui (75900000) com preenchimento da falha.	123
Figura 57 - Resultado da validação para o posto de Passo Mariano Pinto (76800000).	124

Figura 58 - Resultado da validação para o posto de Uruguaiana (77150000).....	124
Figura 59 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de julho de 1983.....	126
Figura 60 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de setembro de 1989.	128
Figura 61 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de junho de 1990.....	130
Figura 62 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de abril de 1992.....	132
Figura 63 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de junho de 1992.....	134
Figura 64 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de outubro de 1997.	136
Figura 65 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de abril de 1998.....	138
Figura 66 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de outubro de 2002.	140
Figura 67 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de junho de 2005.....	142
Figura 68 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de novembro de 2008.....	144
Figura 69 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de novembro de 2009.....	146
Figura 70 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de julho de 2014.....	148
Figura 71 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de outubro de 2015.	150
Figura 72 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de dezembro de 2015.	152
Figura 73 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de junho de 2017.....	154
Figura 74 - Ensemble dos resultados da análise de previsibilidade para a estação 74100000 (Iraí).....	157
Figura 75 - Ensemble dos resultados da análise de previsibilidade para a estação 74800000 (Porto Lucena).	158
Figura 76 - Ensemble dos resultados da análise de previsibilidade para a estação 75550000 (Garruchos).....	159
Figura 77 - Ensemble dos resultados da análise de previsibilidade para a estação 75780000 (São Borja).....	160
Figura 78 - Ensemble dos resultados da análise de previsibilidade para a estação 75900000 (Itaqui).	161
Figura 79 - Ensemble dos resultados da análise de previsibilidade para a estação 76800000 (Passo Mariano Pinto).	162

Figura 80 - Ensemble dos resultados da análise de previsibilidade para a estação 77150000 (Urugaiana).....	163
Figura 81 - Ensemble dos resultados da análise de previsibilidade para a estação 77150000 (Urugaiana), destacando eventos cuja onda de cheia é proveniente do rio Ibicuí (Laranja) e do rio Uruguai (Azul)..	164
Figura 82 - Distribuição Espacial dos Postos Pluviométricos e Fluviométricos da Bacia do Rio Uruguai em Território Brasileiro.....	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Formações hidrogeológicas da Bacia do Rio Uruguai.	57
Tabela 2 - Caracterização geomorfológica da Bacia do Rio Uruguai.	60
Tabela 3 - Índices de Eficiência do MGB-IPH para a bacia do Uruguai - período de calibração.....	85
Tabela 4 - Índices de Eficiência do MGB-IPH para a bacia do Uruguai - período de validação.	87
Tabela 5 – Índices de eficiência da análise de previsibilidade do posto de Uruguaiana (77150000) para o evento histórico de julho de 1983.	90
Tabela 6 - Resultado dos coeficientes da análise de previsibilidade.	91
Tabela 7 - Análise dos eventos cuja propagação da onda de cheia é proveniente do rio Uruguai para a estação de Uruguaiana (77150000).....	95
Tabela 8 - Análise dos eventos cuja propagação da onda de cheia é proveniente do rio Ibicuí para a estação de Uruguaiana (77150000).....	95
Tabela 9 - Previsibilidade das estações da Bacia do Rio Uruguai adotando valor de máximo de -5% do erro relativo ao pico de vazão.	98

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Figuras com os mapas em PDF deste estudo com melhor resolução (500dpi)....	116
Quadro 2 - Lista das estações pluviométricas utilizadas.	167
Quadro 3 - Lista das estações fluviométricas utilizadas.....	171
Quadro 4 - Lista dos postos climáticos utilizados.	173

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA: Agência Nacional de Água

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

API: *Antecedent Precipitation Index*

BoM: *Bureau of Meteorology* – Agência de Meteorologia Australiana

CEMIG: Companhia Energética de Minas Gerais

CPRM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Serviço Geológico do Brasil

CPTEC-INPE: Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto de Pesquisas Espaciais

DWD: *German Weather Service*

EC: *European Commission*

ECMWF: *European Centre for Medium-range Weather Forecasts*

EFAS: *European Flood Awareness System*

EM-DAT: *International Disaster Database*

EPS: *Ensemble Prediction System*

ERCC: *Emergency Response Coordination Centre*

GEFS: *Global Ensemble Forecasting System* (Sistema Global de Previsão por Conjunto)

GR4J: *Génie Rural a 4 Parametres*

HEFS: *Hydrologic Ensemble Forecast System*

IRSTEA: *Institut national de Recherche em Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture da França*

LARSIM: *Large Area Runoff Simulation Model*

LISFLOOD: Modelo de balanço hídrico distribuído e de simulação de inundação usado pela EFAS.

MDE: Modelo Digital de Elevação

MGB-IPH: Modelo de Grandes Bacias desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas

MLP: *Multi-Layer Perceptron*

MNT: Modelo Numérico do Terreno

MWR-BoH: *Bureau of Hydrology of the Ministry of Water Resources* da China

NSE: Nash-Sutcliffe Efficiency (Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe)

NOAA: *National Oceanic and Atmospheric Administration* dos Estados Unidos

NWP: *Numerical Weather Prediction* (previsão numérica do tempo)

NWS: *National Weather Service* dos Estados Unidos

NWSRFS: *National Weather Service River Forecast System* dos Estados Unidos

ONS: Operador Nacional do Sistema

RFC: *River Forecast Centers* dos Estados Unidos

RNA: Rede Neural Artificial

SACE: Sistema de Alerta Contra Eventos Críticos operado pela CPRM

SIG: Sistema de Informação Geográfica

SIN: Sistema Interconectado Nacional

SRTM: *Shuttle Radar Topography Mission* (Missão Topográfica Radar Shuttle)

SSARR: *Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation*. Modelo desenvolvido pelo U.S Corps of Engineers.

STEPS: *Short-Term Ensemble Prediction System*

SWAT: *Soil Water Assessment Tool*

TIGGE: *Thorpex Interactive Grand Global Ensemble*

TRMM: *Tropical Rainfall Measuring Mission*

UHE: Usina Hidrelétrica

URH: Unidade de Resposta Hidrológica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVOS	22
2.1. OBJETIVO GERAL	22
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1. ENCHENTES, INUNDAÇÕES E IMPORTÂNCIA DE PREVISÕES	23
3.2. MÉTODOS DE PREVISÃO DE VAZÃO	26
3.2.1. Modelos de previsão ao redor do Mundo	32
3.2.2. Modelos de previsão no Brasil	39
3.3. ESTUDOS DE PREVISÃO NO RIO URUGUAI	46
4. METODOLOGIA	50
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	50
4.1.1. Localização e hidrografia	50
4.1.2. Geologia	54
4.1.3. Hidrogeologia	55
4.1.4. Altimetria e declividade	58
4.1.5. Clima e Distribuição espacial da precipitação média anual	61
4.1.6. Dados populacionais	64
4.1.7. Uso e ocupação do solo	65
4.2. O MODELO MGB-IPH	66
4.3. DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS	69
4.3.1. Dados pluviométricos	69
4.3.2. Dados fluviométricos	70
4.3.3. Dados climatológicos	71
4.4. PRÉ-PROCESSAMENTO DO MGB-IPH	72
4.4.1. Dados espaciais	72
4.4.2. Definição das URHs	73
4.4.3. Discretização do modelo e espacialização dos dados pluviométricos	74
4.5. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO	75
4.6. ANÁLISE DE PREVISIBILIDADE	78

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
5.1. CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MGB-IPH	82
5.1.1. Calibração	82
5.1.2. Validação	85
5.2. TESTES ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE DE PREVISIBILIDADE	88
6. CONCLUSÃO	99
7. RECOMENDAÇÕES	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
APÊNDICE A – Lista de Mapas Para Realização de Download	116
APÊNDICE B – Hidrogramas Apresentando Resultados da Calibração	117
APÊNDICE C – Hidrogramas apresentando resultados da validação	121
APÊNDICE D – Hidrogramas da Análise de Previsibilidade	125
APÊNDICE E – Gráficos de ensemble da análise de previsibilidade	156
APÊNDICE F – Mapa das Estações Fluviométricas e Pluviométricas em Folha A2	165
ANEXO A – Lista das Estações Pluviométricas Utilizadas	167
ANEXO B – Lista das Estações Fluviométricas Utilizadas	171
ANEXO C – Lista dos Postos Climáticos Utilizados	173

1. INTRODUÇÃO

A inundação é caracterizada pelo aumento do nível dos rios além da sua vazão normal de forma que ocorra o transbordamento da água do rio para as áreas adjacentes. As inundações são fenômenos naturais fortemente influenciados pelas características regionais, tais como uso do solo, geologia, topografia, regime hídrico pluvial, entre outros (KOBAYAMA *et al.*, 2006). No entanto, quando esses fenômenos intensos ocorrem nos locais onde os seres humanos vivem, causando danos materiais e/ou humanos, bem como prejuízos socioeconômicos, estes são considerados desastres naturais. Considera-se que as inundações estão entre os desastres naturais mais devastadores, visto que causam danos imensos e que são responsáveis por um grande número de mortes ao redor do mundo. Além disso, as inundações possuem impactos indiretos à saúde humana, posto que acabam por transportar poluentes das redes de drenagem, produtos químicos como pesticidas, fertilizantes, entre outros (LUO *et al.*, 2011; DUAN *et al.*, 2013a, 2013b).

De fato, as inundações fazem parte da história da humanidade, mas nos últimos anos o número de ocorrências e o número de pessoas afetadas por esse tipo de desastre natural vêm aumentando consideravelmente. Esse cenário não é diferente para o Brasil, o qual possui aumento na frequência desses eventos extremos que coincidem com as mudanças climáticas globais, sendo que de um total de 289 ocorrências registradas pelo EM-DAT no período de 1900 a 2009, em torno de 70% são posteriores a 1960 (TOMINAGA, 2009). Além disso, a tendência é que a frequência desses eventos continue aumentando, uma vez que se espera que as mudanças climáticas acelerem os ciclos hidrológicos globais (HIRABAYASHI *et al.*, 2008). Todo esse contexto fornece ao Brasil uma posição entre os dez países mais afetados por inundação no mundo e estima-se que, desde a década de 1960, mais de 20 milhões de brasileiros já foram afetados por inundações (GUHA-SAPIR, BELOW, HOYOIS, 2017).

Com a ocorrência das inundações se tornando mais comum, houve um aumento da consciência pública, política e científica no âmbito do manejo e do gerenciamento da prevenção de riscos a inundações. Dessa forma, houve uma mudança gradual nas medidas adotadas para prevenção de inundação mudando o foco da implementação de medidas estruturais, como por exemplo, a construção de barragens de concreto para as medidas não estruturais que envolvem ações de planejamento e de gerenciamento, como sistemas de alerta e zoneamento ambiental (TUCCI, 2000). Assim, no âmbito das medidas não estruturais, a previsão de vazão é uma ferramenta importante para o gerenciamento das áreas suscetíveis a

inundações auxiliando na tomada de decisões. Conseqüentemente, os modelos de previsão hidrológica em conjunto com sistemas de alerta proporcionam benefícios significativos, permitindo a evacuação da população, relocação de bens materiais e gerenciamento da infraestrutura afetada, sendo tal sistema reconhecido como uma das medidas mais efetivas de mitigação deste tipo de desastre natural (ALFIERI *et al.*, 2012; MOORE *et al.*, 2005).

A escolha da Bacia do Rio Uruguai para a realização dessa análise justifica-se pela grande ocorrência de eventos de inundação nesta bacia, os quais causam elevados prejuízos às cidades ribeirinhas que perpassam o rio Uruguai, conforme levantamento realizado por Righi e Robaina (2010), que identificaram 41 eventos de inundação nessa bacia hidrográfica entre 1980 e 2005. Em concomitância a este projeto está a implementação do projeto “Sistema de Alerta Hidrológico na Bacia do Rio Uruguai” pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), que visa o desenvolvimento e a operacionalização de um sistema de alerta hidrológico para a região, planejando atender inicialmente os municípios de Garruchos, Itaquí, Porto Lucena, São Borja e Uruguaiana (PEDROLLO, SOTÉRIO, GERMANO, 2017). Logo, os resultados apresentados neste trabalho podem ter aplicação direta nesse projeto da CPRM, sendo uma ferramenta eficaz para a elaboração de um sistema de alerta hidrológico. Nesse sentido, o presente estudo insere-se no âmbito de previsão de vazões de curto a médio prazo utilizando um modelo hidrológico distribuído. A previsão de vazão de curto a médio prazo consiste em estimar a vazão em um ponto de interesse do curso de água com antecedência no tempo que varia de algumas horas até cerca de 14 dias (TUCCI, 2000, 2005).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O presente estudo tem como objetivo principal investigar a previsibilidade de eventos críticos em pontos de interesse na bacia do rio Uruguai, isto é, avaliar com qual período de antecedência é possível estimar o pico de vazão em alguns locais suscetíveis à inundação com a finalidade de dar suporte para a tomada de decisão em eventos críticos na Bacia do Rio Uruguai. Tal procedimento permite prevenir perdas humanas, bem como reduzir os prejuízos materiais, econômicos e ambientais em casos de eventos extremos com a implementação de sistemas de alerta. Para tal, através de modelagem matemática distribuída do tipo chuva-vazão, investigou-se a previsibilidade em pontos de interesse na Bacia do Rio Uruguai.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

De forma a realizar o objetivo geral proposto serão abordados os seguintes objetivos específicos:

- Testar e avaliar o desempenho de um modelo hidrológico para a previsão de eventos extremos em pontos de interesse na bacia do rio Uruguai, utilizando um longo período de dados a fim de conseguir representar as maiores cheias registradas na região;
- Identificar um conjunto de evento extremos históricos na bacia do rio Uruguai e executar uma análise de previsibilidade para postos fluviométricos de interesse com o objetivo de identificar o tempo de antecedência que é possível utilizar na previsão de vazão para essas estações.
- Avaliar uma ferramenta de análise de previsibilidade desenvolvida para este estudo, e que pode ser acoplada no futuro na interface do modelo MGB.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. ENCHENTES, INUNDAÇÕES E IMPORTÂNCIA DE PREVISÕES

A diferença entre os conceitos de fenômenos naturais e desastres naturais é de suma importância, visto que os desastres naturais são ocasionados por fenômenos naturais que causam prejuízo para a sociedade. Isto é, os fenômenos naturais podem ser benéficos para a sociedade, como no caso das inundações que ocorrem sazonalmente no Rio Nilo, depositando um material fértil nas planícies inundadas que permitiram o amplo desenvolvimento agrícola na região. De acordo com Kobiyama (2006), inundações, escorregamentos, secas, furacões, tsunamis são fenômenos naturais severos, fortemente influenciados pelas características regionais, tais como uso do solo, geologia, topografia, entre outros. Assim, quando esses fenômenos intensos ocorrem nos locais onde os seres humanos vivem, gerando danos materiais e/ou humanos ou prejuízos socioeconômicos, os mesmos são considerados como desastres naturais. De fato, o mesmo autor aponta que os desastres naturais são determinados a partir da relação entre o homem e a natureza, sendo que os desastres naturais resultam das tentativas humanas em dominar e em controlar a natureza (KOBİYAMA, 2006).

De acordo com Goerl e Kobiyama (2005), as palavras cheia e enchente possuem como origem o verbo encher, em Latin *implere*, que significa ocupar o vazio, preencher a capacidade. Assim, quando o rio está em sua máxima capacidade, sem transbordar para as áreas adjacentes, pode-se dizer que o mesmo se encontra em uma situação de cheia, caracterizando uma enchente. Dessa forma, apenas quando a água do rio transborda para seu leito maior é que ocorre uma inundação (Figura 1). A partir disso, as inundações podem ser classificadas de diferentes formas, devido à sua causa, ao seu local de ocorrência, como por exemplo as inundações costeiras, e quanto à sua velocidade de ocorrência. Dessa maneira, as inundações podem ocorrer por um processo natural, no qual o rio ocupa o seu leito maior devido a eventos chuvosos extremos. Além do mais, as inundações podem ser classificadas em graduais ou bruscas, uma vez que para as inundações graduais a água do rio eleva-se de forma previsível e paulatinamente, sendo provocadas por precipitações intensas e persistentes e estão associadas a grandes rios. Já as inundações bruscas possuem um elevado pico de descarga, ocorrendo em pequenas áreas e, devido a chuvas intensas com escoamento rápido, estão geralmente associadas a uma maior declividade do rio (GOERL e KOBİYAMA, 2005; TUCCI, 2000).

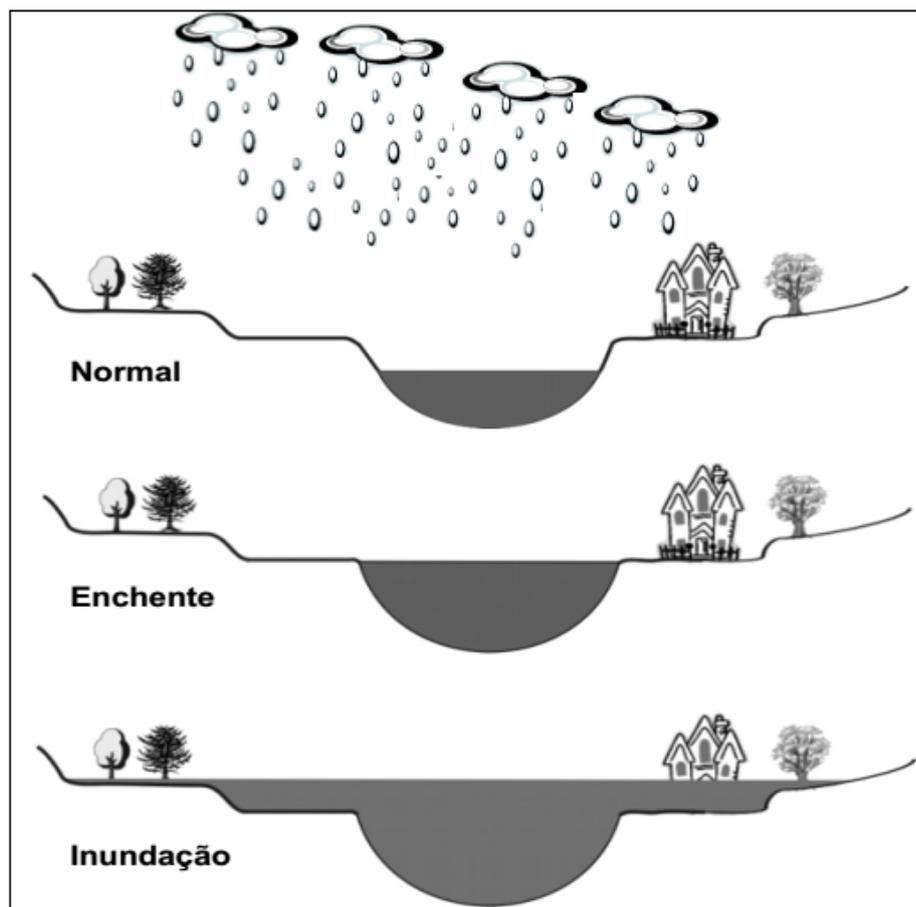


Figura 1 - Caracterização de situação de enchente e inundação (GOERL e KOBIYAMA, 2005)

Assim, o conjunto de certas condições meteorológicas e hidrológicas proporcionam a ocorrência de inundação. Dessa forma, o conhecimento dessas condições é essencial para efetuar a previsão de vazão ou do nível de um rio, visto que o mesmo depende tanto das características físicas da bacia hidrográfica quanto das características climatológicas, sendo que as distribuições temporal e espacial da precipitação são as principais condicionantes climatológicas (TUCCI, 2000). Segundo Tucci (2005), a previsão de variáveis hidrológicas como nível e vazão em um sistema hídrico envolve a estimativa com antecedência no tempo, enquanto que a predição é a estimativa da variável com um determinado nível de probabilidade baseado em dados históricos. Dessa maneira, a predição avalia cenários hipotéticos futuros, geralmente relacionados ao clima, ao uso do solo com o intuito de preparar a sociedade para os potenciais efeitos desses condicionantes climáticos. Já a previsão de vazão é utilizada com o intuito de minimizar os efeitos provocados por eventos extremos, permitindo que ações preventivas sejam tomadas (ALASSIA PICCILLI, 2007; TUCCI, 2005).

Segundo Fan et al. (2015), as informações provenientes da previsão de vazão são de extrema importância tanto para operação de obras hidráulicas, como de barragens, de canais de drenagens e de diques de proteção quanto para a antecipação de eventos como cheias e secas. Assim, no caso de eventos extremos de cheias, a partir dessas informações é que serão adotadas medidas para o controle de inundação. Segundo Tucci (2000), essas medidas podem ser do tipo estrutural e não-estrutural. As medidas estruturais são aquelas que modificam o sistema fluvial a partir de obras de engenharia com a finalidade de contenção de cheias, como por exemplo barragens, diques, reservatórios. Ainda, as medidas estruturais podem ser classificadas em medidas extensivas, as quais possuem ação na bacia hidrográfica, modificando as relações entre precipitação e vazão, como por exemplo, alterando a cobertura vegetal do solo; e em medidas intensivas, as quais possuem ação no rio, como por exemplo, construção de diques, de reservatórios e desvios de escoamento (TUCCI, 2000). Por outro lado, as medidas não-estruturais, segundo Kobiyama (2006), envolvem ações de planejamento e gerenciamento, como zoneamento ambiental e sistemas de alerta. Assim, a partir de um bom planejamento com zoneamento ambiental pode-se evitar a ocupação de áreas com elevado risco, sendo apenas permitida ocupações para fins comunitários como parques, praças, quadras esportivas. A proposta de zoneamento é corroborada por Bowker (2007), ao afirmar que a melhor forma de gerenciar os riscos de inundação é administrar o desenvolvimento urbano para fora da área de perigo de inundação, isto é, apenas construir habitações fora das planícies de inundação.

Assim, no âmbito das medidas não estruturais, a previsão de vazão é uma ferramenta importante para o gerenciamento dessas áreas suscetíveis a inundações que já possuem ocupação humana, pois a partir dela pode-se desenvolver sistemas de alerta. Desse modo, um sistema de alerta nessas áreas pode auxiliar na redução de danos e prejuízos causados por esses eventos extremos (KOBİYAMA, 2006). Dessa forma, Moore et al. (2005) afirmam que modelos de previsão de vazão em conjunto com sistemas de alerta proporcionam benefícios significativos, permitindo a evacuação da população, relocação de bens materiais e o gerenciamento da infraestrutura afetada. Assim, o sistema de alerta é uma ferramenta essencial às autoridades locais e nacionais para a tomada de decisões, como por exemplo, na operação de comportas, na evacuação da população, na instalação de medidas temporárias como barreiras desmontáveis, principalmente em zonas urbanas e industriais (ADAMS, PAGANO, 2016; PAPPENBERGER, 2015; SENE, 2008). Segundo Kobiyama et al. (2004), o sistema de alerta engloba quatro componentes principais: (1) sistema de monitoramento; (2)

modelo e simulação de previsão dos desastres; (3) transmissão das informações dos níveis e das vazões dos rios e da precipitação na bacia aos órgãos públicos e privados; (4) disseminação do alerta com procedimento e com orientação clara para os moradores que possivelmente serão prejudicados. Além disso, apesar de o benefício monetário gerado pelo sistema de alerta não ser de quantificação simples e direta, em um estudo para o EFAS (*European Flood Awareness System*), Pappenberger *et al.* (2015) afirmam que os benefícios gerados são da ordem de 400 € para cada euro investido. Consequentemente, o mesmo autor sugere que modelos de previsão de vazão acoplados com sistemas de alerta devem ter alta prioridade de investimento e de suporte a longo prazo, visto que possuem elevada eficiência, garantindo tanto uma economia monetária a médio e longo prazo quanto uma redução no possível número de vítimas ocasionado por eventos extremos.

3.2. MÉTODOS DE PREVISÃO DE VAZÃO

Conforme mencionado anteriormente, a previsão de vazão consiste em estimar a vazão em um determinado local do curso de água com antecedência no tempo (TUCCI, 2005). Dessa maneira, a previsão de vazão pode ser realizada em curto, em médio e em longo prazo; sendo assim classificada como de curto e de médio prazo para um horizonte de previsão que varia entre algumas horas até cerca de 14 dias. Já a previsão de vazão de longo prazo possui uma antecedência de até nove meses (FAN, 2015; TUCCI, 2000, 2005).

Segundo Tucci (2005), a previsão de vazão de longo prazo é uma área em ascensão devido aos avanços tecnológicos nos modelos climáticos e na identificação de relações entre as condições dos oceanos e as variáveis hidrológicas. Assim, a previsão de vazão de longo prazo possui aplicação direta no planejamento do preço da energia hidrelétrica, na produção agrícola nos casos em que é possível estimar também a umidade do solo e no gerenciamento de conflitos da água (TUCCI, 2005).

Já a previsão de vazão de curto e médio prazo, a qual é o tema desse trabalho, possui aplicação direta tanto para o controle de inundações através de sistemas de alerta quanto para a navegação, a irrigação, o abastecimento de água e a operação energética (FAN, 2015; TUCCI 2005). No âmbito do abastecimento de água e da operação energética, a previsão de vazão é extremamente importante, pois o conhecimento das vazões afluentes ao reservatório, estimadas pela previsão permitem definir o grau de flexibilidade aos volumes de espera e trazer benefícios na operação do reservatório (BRAVO, 2008b). Nesse contexto, Bravo

(2008a) avaliou, em um estudo de caso, os benefícios da utilização de previsão de vazão de afluência na operação de um reservatório com uso conflitante entre geração de energia e o controle de cheias, concluindo que a previsão de vazão poderia proporcionar um benefício entre 4 a 8% aproximadamente, gerando um lucro de mais de 2,75 milhões de dólares anuais para esse reservatório.

Segundo Tucci (2005), um modelo hidrológico representa o comportamento de um sistema físico mais complexo com o intuito de avaliar as possíveis respostas desse sistema, sendo uma ferramenta para atingir um objetivo e encontrar respostas. Assim, os modelos usualmente são classificados em físicos e em matemáticos. Os modelos físicos representam o sistema a partir de um protótipo em escala menor, na maior parte dos casos, utilizando a teoria da semelhança, sendo que maiores detalhes desse tipo de modelagem com escala reduzida podem ser encontrados em Buffon (2014) e em Silva (2015). Já, os modelos matemáticos, também conhecidos como modelos digitais, representam a natureza do sistema através de equações matemáticas. Ainda, os modelos podem ser classificados como sendo contínuo ou discreto, como concentrado (em inglês *“lumped”*) ou distribuído, como estocástico ou determinístico, bem como conceitual ou empírico (TUCCI, 2005).

Dessa maneira, os modelos são considerados contínuos quando as variáveis de entrada e saída ocorrem de forma contínua ao longo do tempo e do espaço, ao passo que um sistema é considerado discreto quando as mudanças de estado ocorrem em intervalos discretos. Assim, um sistema pode modificar-se continuamente no tempo, em contraponto os registros serão efetuados em intervalos de tempo. Atualmente, os computadores são capazes de diminuir o tamanho dos intervalos de análise da variável em função dos recursos computacionais disponíveis e da precisão desejada nos resultados. Consequentemente, a maioria dos sistemas hidrológicos é do tipo contínuo, mas representado por um modelo discreto (MACHADO, 2005; TUCCI 2005).

Um modelo é dito concentrado quando o mesmo não leva em consideração a variabilidade espacial das variáveis hidrológicas envolvidas no processo modelado. Geralmente, nesses modelos a principal variável é o tempo, sendo esta utilizada como variável independente. Dessa forma, as variáveis do sistema são avaliadas em termos de suas médias espaciais. Ao que se concerne aos modelos distribuídos, estes levam em conta, além da variável temporal, a distribuição espacial dessas variáveis e desses parâmetros (MACHADO, 2005; TUCCI, 2005). Consequentemente, os modelos distribuídos conseguem representar o

sistema de maneira mais fidedigna, justamente devido à capacidade de representar a variabilidade espacial do sistema, detalhando, por exemplo, a distribuição espacial da precipitação em uma bacia hidrográfica, proporcionando, assim, um ganho de qualidade na representação do sistema. No entanto, em alguns casos como o da bacia hidrográfica do Congo, o qual será abordado no item 3.2.1, os modelos distribuídos nem sempre conseguem representar o sistema de maneira adequada, visto que esses modelos são altamente dependentes da qualidade dos dados de entrada, os quais nem sempre estão disponíveis em todos os pontos de interesse da bacia hidrográfica (TUCCI, 2005).

Os modelos são considerados estocásticos quando se valem da chance de ocorrência das variáveis analisadas, isto é, quando o conceito de probabilidade é utilizado no desenvolvimento do modelo. Por outro lado, quando a chance de ocorrência dessas variáveis é ignorada, e o modelo possui uma lei definida com regras claras e entradas bem determinadas que não envolva probabilidade, então esse modelo é considerado determinístico (MACHADO, 2005; TUCCI 2005).

Por fim, um modelo é considerado conceitual quando as funções utilizadas para modelar o sistema são baseadas em conceitos e em leis físicas que regem os vários processos do sistema. Já os modelos empíricos, também conhecidos como do tipo “caixa preta”, são aqueles que ajustam os valores calculados aos dados observados através de equações que não possuem relação com os processos físicos envolvidos (MACHADO, 2005; TUCCI 2005). Ainda, alguns autores realizam uma subdivisão na classificação dos modelos conceituais em semiconceituais e físicos. Os modelos semiconceituais valem-se de funções físicas para reger o processo do sistema, mas ainda mantêm um certo grau de empirismo nos parâmetros das equações envolvidas, ao passo que os modelos físicos se valem de equações diferenciais do sistema físico para representar os processos e os parâmetros utilizados (TUCCI, 2005).

Entre os modelos de previsão de vazão está a previsão realizada com modelos vazão-vazão. Esses modelos são do tipo matemático e utilizam as equações da continuidade, de Euler para fluidos ideais e de Navier-Stokes para fluidos reais (TUCCI, 2005). Ainda, eles podem ser classificados como conceituais conforme os modelos do tipo Armazenamento e Onda Cinemática, mas também como empíricos, caso do Método dos Mínimos Quadrados. De acordo com Andreolli (2003), esses modelos compreendem informações de níveis de posto à montante e à jusante, as quais podem ser utilizadas em grandes bacias cuja contribuição lateral seja pouco significativa. Dessa maneira o horizonte de previsão fica

limitado ao tempo de translado da onda de cheia no canal e às entradas de escoamento das contribuições laterais (ANDREOLLI, 2003). Há diversos modelos de previsão vazão-vazão que são muito utilizados, sendo baseados e classificados de acordo com as simplificações utilizadas nas equações de Saint Venant como por exemplo o modelo linear Muskingun; Modelo Laçada; Modelo SSARR (*Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation*); Modelo Onda Cinemática; Modelo Difusão (TUCCI, 2005). Para tal, a seleção do modelo a ser utilizado depende das condições de contorno e das hipóteses que podem ser feitas sobre o regime de escoamento, sendo que existem critérios para a escolha do modelo a ser utilizado, relacionado principalmente à disponibilidade de dados (ANDREOLLI, 2003; TUCCI, 2005). Esses modelos podem representar tanto a bacia como um todo, sendo classificados como concentrados, quanto discretizando a bacia, sendo classificados como semidistribuídos, ou realizando uma avaliação ao longo do sistema, sendo classificados como distribuídos como por exemplo, o modelo Onda Cinemática (TUCCI, 2005). Além do mais, esses modelos podem ser incorporados a modelos de precipitação-vazão como o modelo SSARR, que possui um módulo de precipitação-vazão na bacia, e outros dois módulos de escoamento em rios e reservatórios e, ainda, de regularização de reservatórios (TUCCI, 2005). Outro modelo que também incorpora tanto a simulação de vazão-vazão quanto a de precipitação-vazão é o MGB-IPH, o qual foi utilizado neste projeto e que terá abordagem detalhada no item 4.2.

Já os modelos de precipitação-vazão que segundo Machado (2005), possuem como objetivo principal avaliar qual é a resposta em termos de vazão de uma dada bacia hidrográfica em função de uma precipitação qualquer. Esses modelos são matemáticos e podem ser tanto empíricos quanto conceituais. Entre os modelos empíricos de base numérica, as Redes Neurais Artificiais (RNAs) são usadas como alternativa aos modelos hidrológicos que possuem base física devido à complexidade das variáveis hidrológicas envolvidas nos modelos hidrológicos. Assim, as RNAs apresentam soluções práticas e rápidas com o uso de um algoritmo para determinar as relações entre as variáveis em um mapeamento direto de dados de entrada em dados de saída (DEBASTIANI *et al.*, 2015). Por conseguinte, uma RNA possui memória e processamento não linear cuja inspiração é o funcionamento das células do cérebro humano (MACHADO, 2005; NETO, PAZ, 2015). De acordo com Machado (2005), dependendo da maneira como uma RNA é abordada, ela pode ser classificada em contínua ou discreta, em concentrada ou distribuída e em estocástica ou determinística. Entre as RNAs, o método *Multi-Layer Perceptron* (MLP), ou seja, Perceptron de Multi-Camadas, é o mais utilizado, o qual é composto estruturalmente por três camadas com os sinais propagando-se

em uma direção positiva: uma camada de entrada, uma oculta intermediária e outra de saída (DEBASTIANI *et al.*, 2015; MACHADO, 2005; NETO, PAZ, 2015; SOUSA, de SOUSA, 2010). Dessa forma, os métodos de MLPs têm sido cada vez mais utilizados na hidrologia devido à sua capacidade de modelar sistemas não lineares e aos modelos de previsão de vazão tenderem a ser sensíveis à variação da precipitação, sendo capazes de reproduzir grandes períodos de cheia com facilidade (DIAS, CATALDI, FERREIRA, 2016). No entanto, entre as dificuldades no uso da MLP na modelagem hidrológica está a identificação do conjunto de variáveis de entrada que melhor representem o comportamento do sistema hidrológico (DEBASTIANI, 2015). Outro ponto importante a salientar é que, geralmente, esses modelos possuem dificuldade para reproduzir períodos de recessão e situações onde o escoamento da bacia é próximo ao escoamento de base (DIAS, CATALDI, FERREIRA, 2016). Já os modelos de precipitação-vazão conceituais devem ser capazes de descrever em função da precipitação as perdas por evaporação, por interceptação, por infiltração e percolação da água subterrânea, além de calcular o escoamento superficial e o escoamento de base (MACHADO, 2005; SCHUSTER, 2014; TUCCI, 2005).

Os modelos de precipitação-vazão do tipo conceitual podem ser classificados tanto em concentrados, quando a bacia é representada por uma precipitação média na bacia, quanto em distribuídos por sub-bacias ou por módulos (TUCCI, 2005). Historicamente, de acordo com Tucci (2005), os primeiros modelos surgiram na década de 1930 e descreviam os processos de cada componente do ciclo hidrológico, como infiltração, escoamento em rios de forma isolada. Somente na década de 50, após a 2ª Guerra Mundial em decorrência do uso de computadores é que surgiram os primeiros modelos hidrológicos de chuva-vazão como o SSARR, sendo que a principal característica desses modelos foi tentar representar por completo o ciclo hidrológico (MACHADO, 2005; TUCCI, 2005). Nas décadas subsequentes vários outros modelos com a mesma proposta foram desenvolvidos, cada um contribuindo com a introdução de uma característica singular ou com a otimização dos parâmetros hidrológicos. A partir da década de 80, os modelos deixaram de ser quantitativos sobre apenas uma variável, geralmente vazão, para representar outros processos que envolvem componentes inter-relacionados com o escoamento, incluindo além da equação da continuidade, expressões da dinâmica dos processos sendo conhecido como modelos físico-distribuídos (TUCCI, 2005; TUCCI, COLLISCHONN, 2007).

Salienta-se que, atualmente, os dados de entrada desses modelos de precipitação-vazão podem ser tanto com chuva observada transmitida em tempo real quanto esta última acoplada

à chuva prevista. Posto isto, caso o modelo de previsão utilize apenas a chuva observada, a previsão de vazão limita-se ao tempo de concentração da bacia, enquanto que o uso da previsão de chuva no modelo pode trazer benefícios em termos de horizonte de previsão e na redução do erro das vazões previstas (ANDREOLLI, 2003). Assim, segundo Fan (2015), as previsões de vazão que se valem da previsão de precipitação possuem a grande vantagem de permitir estender a antecedência da previsão hidrológica de vazão. No entanto, as previsões de precipitação nos sistemas de previsão para alerta de cheias brasileiros ainda são muito pouco utilizados, visto que há uma grande incerteza associada às previsões quantitativas de chuva obtidas com modelos numéricos de previsão do tempo (FAN, 2015). Dessa maneira, Lorenz (1969) afirmou que a previsão meteorológica é difícil, uma vez que a atmosfera é um sistema não linear caótico. Sendo assim, qualquer mudança nas condições iniciais de contorno do sistema pode gerar resultados distintos. No momento presente, uma das alternativas para contornar esse problema é o uso de previsão de precipitação por conjunto ou *ensemble*, que utiliza um modelo numérico de tempo (NWP) com várias condições iniciais de contorno e/ou parametrizações físicas e são geradas várias previsões, denominadas “membros”, em que cada membro do conjunto equivale a um possível resultado dos processos atmosféricos ao longo do horizonte de previsão (FAN, 2015; SIQUEIRA, 2015; YU *et al.*, 2016).

Cabe ressaltar que o uso de NWP nos modelos de precipitação-vazão pode apresentar problemas na integração de previsões meteorológicas à transferência dos dados medidos para os dados de previsão em previsões contínuas. Isto pode ocorrer, por exemplo, caso a progressão de uma frente carregada de chuva aconteça antes do previsto pelo modelo meteorológico. Nesse caso, esse atraso de tempo entre a previsão e o sistema NWP pode resultar em dados de precipitação duplicados, visto que o modelo numérico de tempo estaria indicando uma chuva futura que já estaria sendo medida por estações pluviométricas locais (DEMUTH, RADEMACHER, 2016). Apesar disso, o uso desses sistemas associado aos avanços computacionais permite um benefício no uso das previsões hidrológicas ao estender o horizonte de previsão, podendo dar suporte à emissão de pré-alertas e auxílio na tomada de decisão no gerenciamento de controle a inundações (SIQUEIRA *et al.*, 2016; YU *et al.*, 2016; YU, NAKAKITA, JUNG, 2016).

Portanto, percebe-se que as previsões hidrológicas com modelos ainda não são perfeitas e apresentam erros. Sendo que tais erros estão inseridos na previsão da chuva e na transformação da previsão de chuva em previsão de vazão, pois sabe-se que um modelo de transformação chuva-vazão é apenas uma simplificação da realidade e em consequência, não

alcança uma descrição de 100% do comportamento hidrológico da bacia (BRAVO, 2008a). Mesmo assim, Adams e Pagano (2016), relatam que grandes avanços na tecnologia permitiram a aplicação de estudos hidrometeorológicos, hidrológicos e hidráulicos para a previsão de vazão. Esses avanços foram possíveis graças ao desenvolvimento de computadores com ampla memória e alta capacidade de armazenamento interno; à grande disponibilidade de imagens de alta resolução de satélites, as quais são necessárias para estimação de parâmetros e para a calibração dos modelos; além da tecnologia de ponta utilizada no sistema de telecomunicação para a transmissão de dados. Apesar disso, ainda assim há países e regiões que não possuem agências responsáveis pela previsão de vazão e por sistemas de alerta para a população. Isso deve-se, possivelmente, à falta de recursos financeiros e de dados hidrometeorológicos, como no caso da bacia hidrográfica do Congo que será abordado no próximo capítulo deste projeto (ADAMS, PAGANO, 2016).

3.2.1. MODELOS DE PREVISÃO AO REDOR DO MUNDO

Na Austrália, de acordo com Pagano *et al.* (2016), o sistema de alerta é umas das principais ferramentas usadas para mitigar os impactos causados por inundações. Assim, esse sistema envolve todos os níveis governamentais do País, os quais trabalham em conjunto. A Austrália é influenciada tanto pelos fenômenos do *El Niño* quanto da *La Niña*, sendo o primeiro associado com secas severas no leste do País enquanto que o último está associado com condições que contribuem para cheias históricas como o aumento da precipitação pluvial. As cheias na Austrália devem-se principalmente a precipitações pluviais elevadas, ocasionando tanto inundações bruscas quanto inundações graduais. Dessa maneira, as agências reguladoras australianas desenvolveram um mapa de perigo para ambos os tipos de inundação. Atualmente a Agência de Meteorologia Australiana (BoM - *Bureau of Meteorology*), responsável por estudos hidrometeorológicos, fornece sistema de previsão de vazão e sistema de alerta para aproximadamente 150 bacias hidrográficas e possuem mais de 2.000 estações fluviométricas (Figura 2) além de 4.000 estações pluviométricas em pontos de interesse. Além disso, a Austrália também possui 69 radares meteorológicos para fornecer estimativas em tempo real de precipitação pluvial, bem como opera um sistema de previsão por conjunto de curto período (STEPS – *Short-Term Ensemble Prediction System*) acoplado com previsões numéricas do tempo (NWP – *Numerical Weather Predictions*). Dessa maneira, a Austrália utiliza tanto modelos estatísticos com correlações de variáveis quanto modelos hidrológicos. Entre os modelos hidrológicos, são utilizados modelos de chuva-vazão semidistribuídos com o uso de SIG; modelos contínuos para previsão de vazão com horizonte

de sete dias, utilizando o GR4J (*Génie Rural a 4 Parametres*) que foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas em Ciência e Tecnologia para o Meio Ambiente e Agricultura (IRSTEA) da França e, ainda, possui uma abordagem *top-down* capaz de testar 235 estruturas de modelos diferentes e combinar partes de 19 modelos conhecidos (PAGANO *et al.*, 2016).

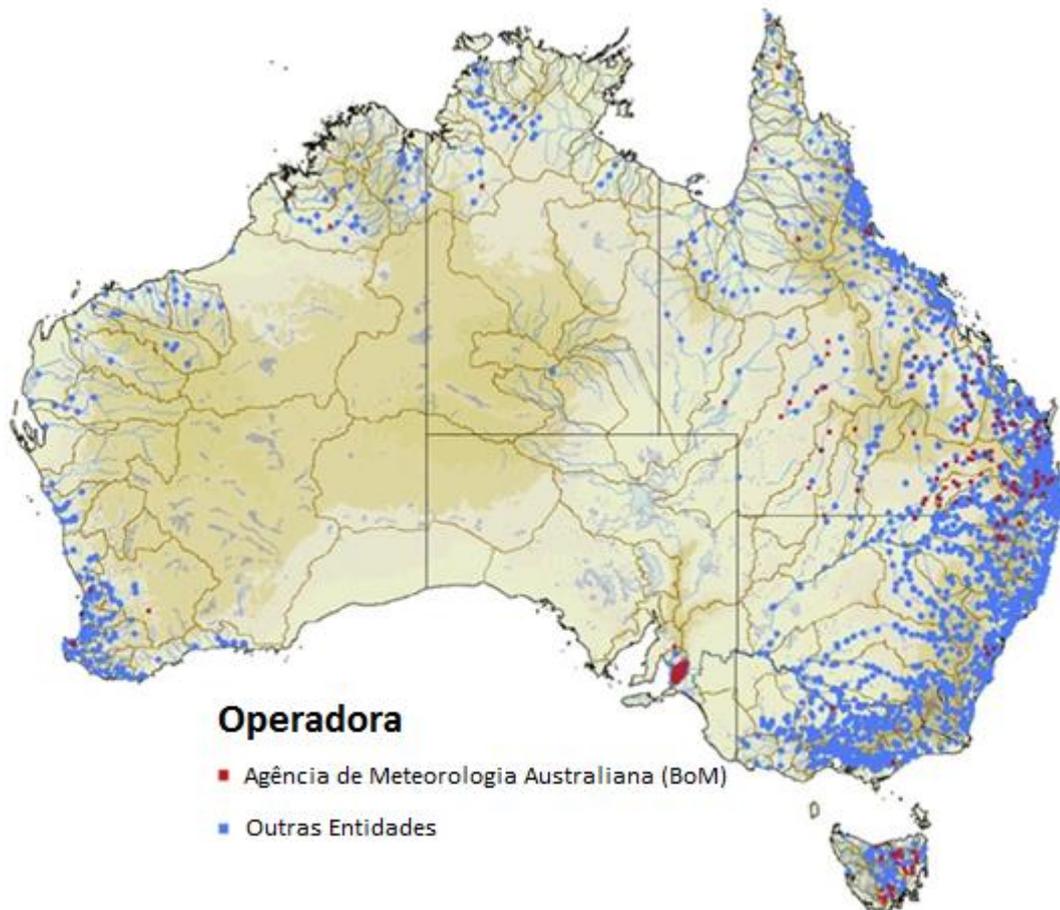


Figura 2 - Distribuição de estações fluviométricas na Austrália. Adaptado de PAGANO *et al.* (2016).

A previsão de vazão na China é uma ferramenta muito importante, visto que a inundação é considerada o desastre natural mais severo na China (Figura 3) correspondente às suas especiais condições climática, geográfica e socioeconômica. Desse modo, apesar de algumas inundações na porção oeste da China ocorrerem devido ao degelo de geleiras e de neve, a maior parte de inundações é oriunda de chuvas intensas combinadas com tempestades costeiras. De acordo com registros históricos, eventos extremos de inundação ocorreram com uma frequência de dois anos anteriormente a 1949, sendo que um evento em 1931 afetou mais de 51 milhões de pessoas e causou 400 mil mortes. Com o passar dos anos e o avanço dos sistemas de controle de cheias o número de vítimas fatais apresentou uma tendência a diminuir de 8571 casos na década de 1950 para 1454 casos nos anos 2000. Devido ao alto

impacto que as inundações possuem na China, desde o final da década de 1980 houve uma predisposição à utilização de medidas não estruturais com uma abordagem mais integrada em detrimento das medidas estruturais para o controle de cheias. Em resposta à elevada demanda e ao desenvolvimento computacional aplicado na hidrometeorologia, a China criou a Agência de Hidrologia do Ministério de Recursos Hídricos (MWR-BoH) responsável pela administração hídrica e previsão hidrometeorológica. Assim, a China possui um elevado monitoramento hidrológico, possuindo, no final de 2013, 86.554 estações hidrométricas, sendo que 43.028 são estações pluviométricas e, aproximadamente, 13.525 estações fluviométricas, o restante das estações são de controle de qualidade da água, de índice de humidade, entre outros. Atualmente, há dois métodos para a previsão hidrometeorológica na China: métodos de previsão hidrológico empírico e modelos conceituais hidrológicos. Os métodos empíricos incluem uso de índice de precipitação, método correspondente de descarga líquida, método resultante de descarga líquida, métodos de correlação de multifatores. Os modelos conceituais hidrológicos utilizados na China valem-se de tecnologias aplicadas a imagens de satélite e de radar para realizar previsão de precipitação por conjunto, além de utilizarem modelos distribuídos acoplados com SIG (LIU, 2016).

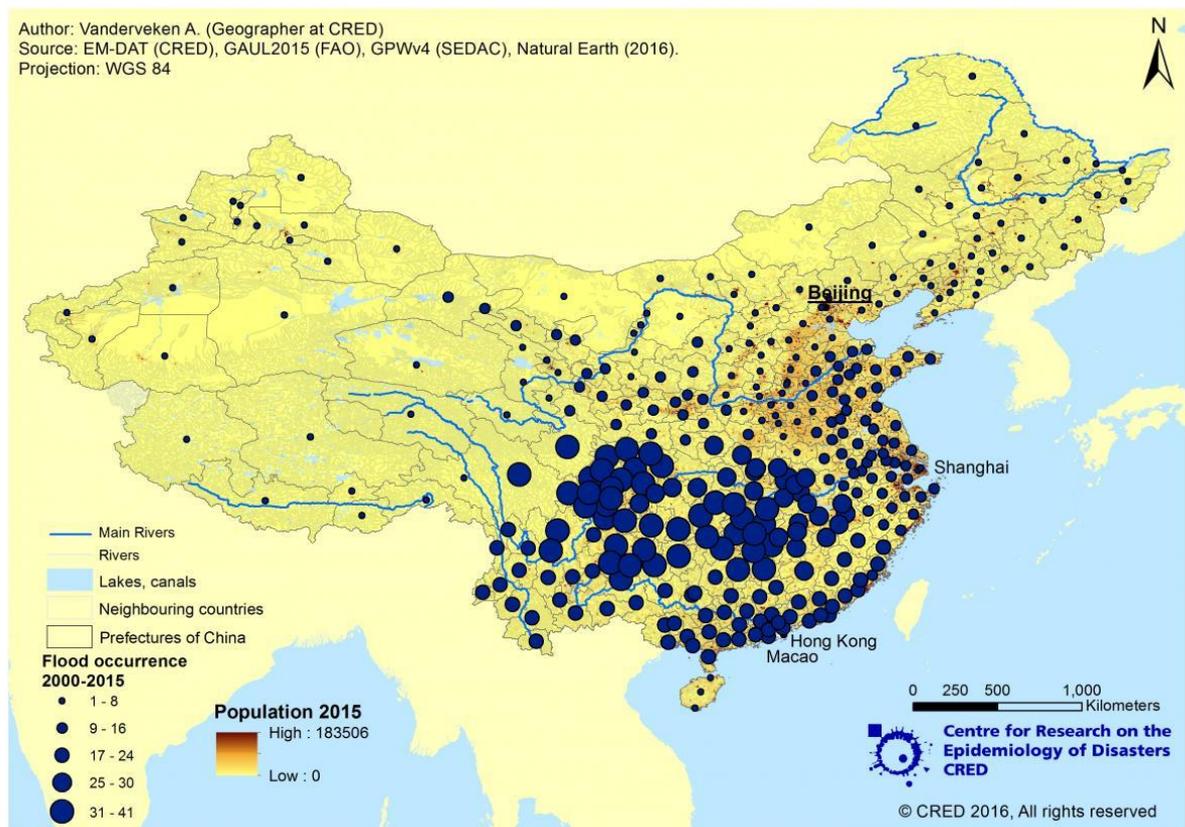


Figura 3 - Distribuição de inundações na China (CRED, 2016).

Nos Estados Unidos, a Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA) e o Serviço Nacional do Tempo (NWS) são responsáveis por produzir e disseminar todas as previsões dentro do país. O NWS possui 13 Centros de Previsão para Rios (RFCs) que são responsáveis pelos modelos de previsão das regiões dos Estados Unidos. O Serviço Geológico de Pesquisa Americano (USGS) é responsável por operar e monitorar 7400 estações fluviométricas espalhados pelo país. Assim, é possível observar em tempo real postos em que há probabilidade de ocorrência de inundação no website da NOAA (<http://water.weather.gov/ahps/index.php#>). O setor de previsão de vazão do NWS (NWSRFS) desenvolveu inúmeros modelos para previsão de vazão, entre eles: Índice de Precipitação Antecedente (API), desenvolvido na década de 1940, sendo um modelo empírico que correlaciona precipitação-vazão com quantidade de dias sem chuva no local, precipitação antecedente e vazão no início da tempestade; modelos hidrológicos de chuva-vazão; modelos de acumulação e degelo de neve; modelos de simulação e operação de reservatórios; modelos de propagação de vazão em rios; HEC-HMS e HEC-RAS; além da utilização de um sistema hidrometeorológico de previsão por conjunto (HEFS) com uso de previsão numérica do tempo (NWP) (ADAMS, 2016).

A previsão de cotas de rios é uma tradição na Alemanha, datando de 1881 no rio Elba. Desde este período até então, vários métodos foram utilizados para calcular o pico de cheia e o momento em que ele ocorreria, permitindo a percepção da importância de sistemas de previsão de vazão e de sistemas de alerta. Assim, a Alemanha é uma república federativa constituída de 16 estados, sendo que cada Estado é responsável pela previsão de vazão sob assistência do Serviço de Tempo da Alemanha (DWD). Devido à estrutura administrativa e à diversidade hidrológica diversos centros administrativos transregionais foram criados, visto que os limites políticos da Alemanha não coincidem com os limites das bacias hidrográficas. Tal fato afeta praticamente todos os países que fazem fronteira com a Alemanha como Polônia, República Tcheca, Áustria, Suíça, França, Luxemburgo e Holanda. A partir dessa necessidade de cooperação entre esses países, criaram-se, além de sistemas de troca de dados, o desenvolvimento colaborativo de sistemas de previsão de vazão. Essa cooperação internacional é evidenciada na bacia hidrográfica do rio Reno, o qual se origina nos Alpes Suíços e deságua no Mar do Norte, a qual sua bacia hidrográfica cobre uma área de 185.000 km² compreendendo nove países. Assim, somente para o Reno há cinco centros responsáveis pela previsão de vazão e inúmeros outros para seus afluentes. Dessa maneira, esses centros organizam reuniões anuais para discutir experiências, enquanto que os centros

individuais informam os demais centros sobre avanços adquiridos em cada área. Assim, a DWD realiza consistência de dados, incluindo valores temporais e consistência geoespacial. Além do mais, a Alemanha possui radares meteorológicos para fornecer dados de precipitação horário com resolução espacial de 1 km² e com resolução de intensidade de 0.1 mm. Assim, a inclusão da previsão numérica de tempo (NWP) na previsão de vazão tem sido uma prática comum no país, utilizando modelos globais (ICON – malha de 13 km), modelos locais (COSMO-EU – malha de 7 km) e modelos regionais de alta resolução (COSMO-DE – malha de 2,8 km). A Alemanha possui dois modelos principais utilizados em diversos centros: LARSIM (*Large Area Runoff Simulation Model*) que é um modelo determinístico conceitual de balanço de água que permite o processamento espacial detalhado; e o sistema WAVOS que é utilizado principalmente para fins de navegação para previsão do nível da cota de rios, sendo que este sistema possui uma variante chamada WAVOS-1D, baseado em modelos hidrodinâmicos para avaliar a propagação de ondas de cheias (DEMUTH, RADEMACHER, 2016).

Na Europa, mais de 40 rios cruzam pelo menos uma vez a fronteira entre países, sendo que o rio mais transnacional da Europa é o Danúbio, o qual é compartilhado entre 18 países. Em situações de cheia e de inundação, isso significa que diferentes autoridades envolvidas na gestão de recursos hídricos, na proteção civil e na organização de assistência aos feridos devem se comunicar, compartilhar dados e informações e, idealmente, tomar decisões em conjunto para reduzir os impactos causados pelas inundações. Nessas situações, o manejo do risco de inundações se torna desafiante, à medida que informações inconsistentes são coletadas, as quais podem surgir através da comunicação incompleta entre as agências reguladoras, dos diferentes modelos utilizados nos métodos de previsão ou até mesmo em barreiras de linguagem, na dificuldade de entender outro idioma, visto que podem introduzir incertezas e erros na avaliação da situação de cheias. Assim, esses erros podem levar à tomada de decisões incoerentes e descoordenadas entre as agências, além disso, essas ações tornam-se contraproduativas na redução dos impactos de eventos de inundação através da cadeia de responsabilidades entre agências. Dessa maneira, para evitar discrepâncias no conteúdo de informações, é necessário um canal de comunicação claro com protocolos fixados para a troca de dados e de informação. No entanto, são poucos os casos, como o da bacia do rio Reno mencionado anteriormente, em que apenas um modelo de previsão é dimensionado e a informação é disponível para todas as autoridades envolvidas. Assim, o comum é que diferentes modelos e sistemas de previsão sejam utilizados em diferentes países ou até mesmo

dentro de uma unidade administrativa. Para tanto, após análises realizadas pela Comissão Europeia (EC – *European Commission*), desenvolveu-se o Sistema Europeu de Consciência de Inundação (EFAS – *European Flood Awareness System*) cujo objetivo é providenciar previsão de vazão pan-europeia com horizonte de médio prazo e um sistema de informação de alerta especialmente para grandes bacias hidrográficas transnacionais como uma ferramenta de suporte direto para as agências nacionais responsáveis pelos serviços de previsão de vazão, assim como por fornecer informações coordenadas sobre possíveis inundações de elevado impacto para o Centro de Coordenação de Resposta e de Emergência (ERCC – *Emergency Response Coordination Centre*) da Comissão Europeia (EC). Assim, em casos extremos de inundação, a EFAS contribui para uma melhor proteção dos cidadãos europeus, do meio ambiente, da infraestrutura e do patrimônio histórico. Atualmente, mais de 48 sistemas hidrológicos e de proteção civil na Europa estão incorporados na rede da EFAS. Posto isto, a EFAS fornece mapas de perigo pan-europeus de inundação com horizonte de até dez dias previsão. Por se tratar de um sistema de previsão de escala continental e transfronteiriço, a EFAS fornece produtos complementares para as agências nacionais ou regionais, no entanto essa instituição não se envolve com eventos de escala local para bacias hidrográficas menores que 2.000 km², alagamentos ou fluxo de detritos. Dentro da EFAS, os modelos hidrológicos de previsão são gerados por uma cascata de previsão meteorológica em conjunto através de um modelo hidrológico determinístico. Dessa maneira, a EFAS opera diversos sistemas com NWP, providenciando as informações necessárias para utilizar o LISFLOOD, o qual é um modelo hidrológico espacialmente distribuído de chuva-vazão que utiliza SIG (SMITH, 2016).

A bacia hidrográfica do rio do Congo está localizada geograficamente na África e, assim como a bacia hidrográfica do rio Reno na Alemanha, também engloba nove países, entre eles Angola, Burundi, República Centro-Africana, República Democrática do Congo, Camarões, República do Congo, Ruanda, Tanzânia e Zâmbia. A região da bacia hidrográfica do Congo abrange uma grande variedade de condições climáticas estando suscetível a eventos extremos e desastres naturais, incluindo inundações, secas, ciclones e mudança no padrão de precipitação pluvial e de temperatura. Associado a essa situação estão o rápido crescimento populacional com urbanização descontrolada, o desmatamento de florestas e a degradação do solo, representando um grande desafio para o desenvolvimento sustentável. Apesar de as inundações serem recorrentes causando impactos socioeconômicos e ambientais significativos, as ações empregadas para mitigar esses eventos são muito limitadas. Isso deve-

se principalmente à falta de conhecimento na dinâmica dos processos de eventos extremos, à falta de dados hidrometeorológicos adequados, à infraestrutura precária aliada com a falta de uma estrutura governamental adequada para gerenciar sistemas de previsão de vazão e de alerta. Assim, todos esses fatores enfraquecem e dificultam a implementação de um sistema de alerta efetivo necessário para o desenvolvimento socioeconômico do país. No entanto, esses fatores colocaram em evidência a importância de sistemas de alerta e previsão de vazão na região. No período colonial, entre os anos de 1903 e a década de 1960 houve um intenso monitoramento hidrometeorológico nessa bacia hidrográfica, com mais de 400 estações fluviométricas e mais de 1000 estações pluviométricas (Figura 4). Porém, após a década de 1960 houve um declínio na implementação da rede hidrometeorológica da região devido ao momento político instável e à independência de países na região. Atualmente, o monitoramento hidrometeorológico na região é um grande desafio para todos os países envolvidos na bacia hidrográfica do Congo havendo apenas aproximadamente 20 estações fluviométricas em toda a bacia devido à falta de recursos financeiros e a prioridades governamentais. Para superar esse desafio, é utilizado basicamente informações de imagens de satélite e de radar para avaliar tanto as mudanças temporais do nível dos rios e a conectividade entre as planícies de inundação secundárias e principais quanto para desenvolver modelos de precipitação mensal. Referente aos modelos de previsão de vazão, há muitos estudos para o desenvolvimento de modelos de chuva-vazão acoplados com ferramentas de SIG, porém todos esses projetos esbarraram na dificuldade de adquirir os dados necessários para a construção e a calibração dos modelos, não validando os modelos. Portanto, em vista aos inúmeros desafios presentes nessa bacia hidrográfica espera-se que futuramente haja uma cooperação internacional entre os países envolvidos para monitorar, gerenciar e desenvolver um sistema de alerta adequado para a região (TSHIMANGA *et al.* 2016).

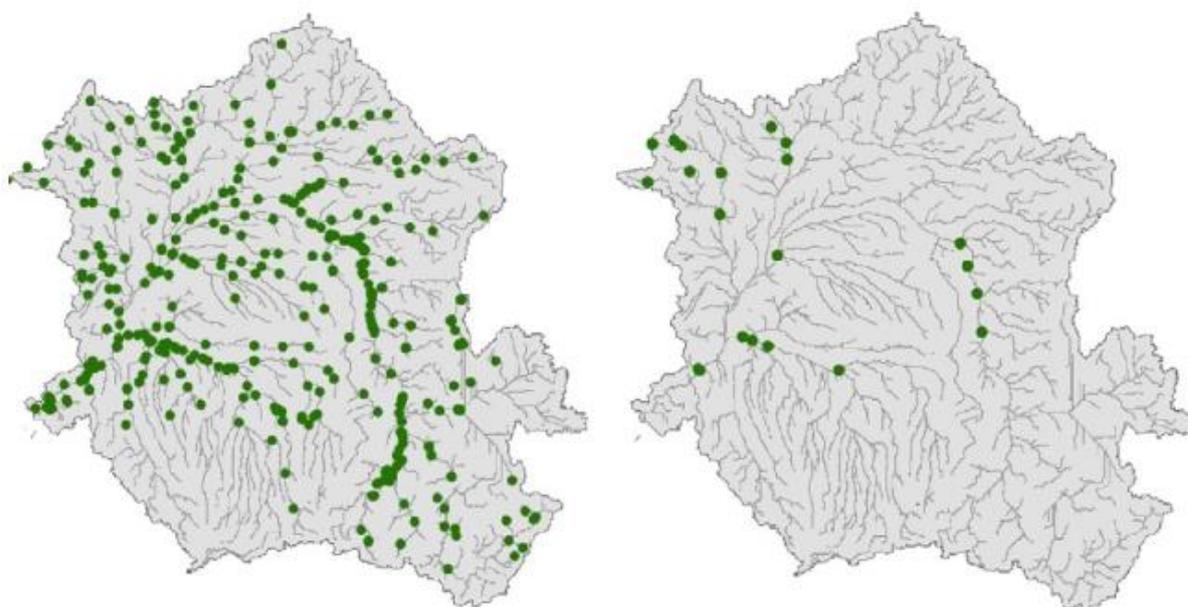


Figura 4 - Densidade de postos fluviométricos na bacia hidrográfica do rio Congo antes de 1960 (esquerda) e sua situação atual (direita) (THSIMANGA *et al.* 2016).

3.2.2. MODELOS DE PREVISÃO NO BRASIL

No item anterior foram apresentados exemplos de sistemas operacionais de previsão ao redor do Mundo, as peculiaridades de cada região e seus desafios enfrentados. Em âmbito nacional, o território brasileiro cobre uma vasta área com uma grande diversidade climática, topográfica, hidrológica. Assim, o clima tropical pode ser encontrado ao norte, na região amazônica, com elevada taxa de precipitação, vegetação densa e grandes rios que sazonalmente sofrem inundações. Já o nordeste brasileiro possui condição climática árida onde rios intermitentes podem ser encontrados. Na região central ocorre o bioma Cerrado em que a precipitação é fortemente influenciada pelas estações climáticas, sendo elevada durante o verão. Quanto à região sul, esta possui clima temperado com intensa precipitação distribuída ao longo do ano (FAN, PAIVA, COLLISCHONN, 2016). Assim, os impactos socioeconômicos devido a inundações são recorrentes, tanto em grandes bacias brasileiras quanto em bacias de rios pequenos. Segundo dados do EM-DAT, banco de dados internacional de desastres, o Brasil está entre os dez países mais afetados por inundações no mundo e estima-se que, desde a década de 1960, mais de 20 milhões de brasileiros já foram afetados por inundações (GUHA-SAPIR, BELOW, HOYOIS, 2017). Outro ponto a ser destacado é que grande parte dos recursos hídricos do Brasil são utilizados para a geração de energia, assim, a informação hidrológica é importante não só para a otimização de geração de

energia, mas também para o gerenciamento do controle de cheias (BRAVO *et al.*, 2008a, 2008b; GOERL, KOBIYAMA, 2005; FAN, PAIVA, COLLISCHONN, 2016; TUCCI, 2005). Devido a essas características peculiares do Brasil, Fan, Paiva e Collischonn (2016), apontam alguns desafios para o desenvolvimento dos sistemas de previsão hidrológicos, entre eles a escala continental de toda a região a ser estudada; a natureza transnacional de algumas bacias hidrográficas; a diversidade das características climáticas e hidrológicas; o perigo de inundações ocorrerem em múltiplas escalas espaço-temporais e a necessidade de sistemas de previsão tanto para grandes bacias quanto para pequenas bacias; e ao extenso número de rios que são gerenciados por barramentos hidroelétricos.

Por conseguinte, o Operador Nacional do Sistema (ONS) é responsável por coordenar a geração de energia elétrica e sua transmissão no Sistema Interconectado Nacional (SIN), sob supervisão e regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Dessa maneira, em circunstâncias normais de escoamento, o ONS vale-se de previsões de vazão para dois horizontes temporais: de curto prazo até 14 dias, com discretização em valores médios diários para a programação diária e de médio prazo, até seis semanas através de valores médios semanais (GUILHON, ROCHA, MOREIRA, 2007). Diversos métodos são utilizados para gerar a previsão de vazão para os locais de aproveitamento hidrelétrico, sendo que muitos desses locais utilizam os modelos estocásticos PREVIVAZ e PREVIVAZH para previsão de vazão média semanal e diária, respectivamente. Esses modelos utilizam como dados de entrada apenas as informações históricas de vazões naturais observadas nos locais de aproveitamentos hidrelétricos e apresentam baixo desempenho com um elevado desvio absoluto entre as vazões previstas e as vazões naturais observadas (GUILHON, ROCHA, MOREIRA, 2007; FAN, PAIVA, COLLISCHONN, 2016). Dessa maneira, Guilhon, Rocha e Moreira (2007) avaliaram a aplicação de diversos modelos, entre eles MLP; Modelo de Regressão Dinâmica; Modelo Fuzzy Recorrente; Modelo SMAP; Modelo SMAP-MEL e Modelo MGB-IPH nas bacias do rio Iguaçu, Parnaíba e Paraná. Tais autores concluíram que todas as alternativas superaram o desempenho do modelo PREVIVAZ, comprovando que o uso de precipitação futura resulta em uma melhor qualidade do sistema de previsão de vazão.

A maior parte dos sistemas de previsão para o gerenciamento de inundação no Brasil é operada pela CPRM, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, que representa o Serviço Geológico do Brasil. Atualmente, a CPRM opera doze sistemas de previsão através do Sistema de Alerta Contra Eventos Críticos (SACE) que monitoram as bacias hidrográficas do rio Amazonas; do rio Paraguai (região do pantanal); do rio Doce (MG); do rio Caí (RS); do

rio Muriaé (RJ e MG); do rio Acre (AC); do rio Madeira (RO); do rio Parnaíba (PI); do rio Taquari (RS); do rio Branco (RR); do rio Xingu (MT e PA); e do rio Mundaú (AL). Além disso, a CPRM está desenvolvendo estudos de viabilidade e de implantação para a bacia do rio das Velhas e do rio Uruguai, da qual esta monografia é parte integrante. Em vista disso, espera-se que, até o final de 2018, a CPRM possua 14 sistemas de previsão de vazão em operação (CPRM, 2017).

A bacia Amazônica é reconhecida como o principal sistema hidrológico do mundo, bem como pelo seu importante papel no sistema terrestre, a qual contribui com aproximadamente 15% do volume de água doce afluyente aos oceanos, contabilizando uma área de drenagem de aproximadamente 6 milhões de km². Esta bacia apresenta características únicas, com precipitações intensas e com alta variabilidade espacial, além de os rios apresentarem baixa declividade, possuindo efeitos de remanso predominantes e extensas áreas alagadas. Nessa bacia tem se observado um aumento na magnitude das cheias e das secas com a ocorrência de eventos extremos como as secas de 1996, 2005 e 2010 e as cheias de 2009, 2012 e 2014. Tais eventos extremos impactam na população amazônica, a qual depende fortemente dos recursos hídricos para a produção de alimentos, para o transporte público e comercial, para o escoamento de produtos, para a produção de energia elétrica, entre outros. Somando-se a isso, a parcela dominante da população reside ao longo dos grandes rios amazônicos cuja suscetibilidade à inundação é elevada (FAN, PAIVA, COLLISCHONN, 2016; PAIVA, 2012). Para tanto, foi desenvolvido um sistema de previsão composto por três módulos: modelo hidrológico distribuído; assimilação de dados no sistema a fim de condições hidrológicas iniciais, como por exemplo, umidade do solo, fluxos de energia, armazenamento de água subterrâneo (PAIVA *et al.*, 2013); e uso de previsão de precipitação por conjunto baseado em dados históricos (PAIVA *et al.*, 2012). Assim, o modelo hidrológico distribuído utilizado foi o MGB-IPH combinado com um módulo hidrodinâmico para o armazenamento de água nas planícies de inundação durante as cheias através de métodos de regionalização e algoritmos de SIG (PAIVA, COLLISCHONN, TUCCI, 2011). Ainda, o modelo utiliza dados de precipitação fornecido pelo TRMM e assimilação de dados de sensoriamento remoto através do filtro por conjunto de Kalman (PAIVA *et al.*, 2013). Os resultados do modelo permitem a previsão de vazão com alta precisão nos rios principais da bacia para grandes horizontes projeto, como para 90 dias de horizonte de previsão por exemplo. Esse modelo também foi capaz de prever o evento extremo de seca do ano de 2005 com aproximadamente

90 dias de antecipação (FAN, PAIVA, COLLISCHONN, 2016; PAIVA, 2012; PAIVA, COLLISCHONN, TUCCI, 2011; PAIVA *et al.*, 2012, 2013).

A bacia hidrográfica do rio Madeira possui uma área total em torno de 1,35 milhões de km² e possui implantação do sistema de alerta pela CPRM desde 2014, baseado em conceitos de autorregressão, propagação linear utilizando regressão linear múltipla e de chuva-vazão com escala de tempo mensal. Ressalta-se que essa bacia hidrográfica é transnacional, ocupando territórios da Bolívia, do Brasil e do Peru. Assim, entre as adversidades encontradas nesta bacia estão a falta de monitoramento fora do território brasileiro por parte de órgãos do Brasil. Em 2014 ocorreu a maior cheia já monitorada na bacia com a estação fluviométrica de Porto Velho marcando cota de 19,69 m correspondendo a um tempo de retorno com cerca de 161 anos. Durante este evento, foram mapeadas as áreas inundadas das cidades de Porto Velho, Abunã e Jaci-Paraná. Indica-se investir na modelagem hidrológica com uso de modelos de transformação de chuva em vazão associados com previsão meteorológicas e por satélite (GERMANO *et al.*, 2015).

Como mencionado anteriormente, O Serviço Geológico do Brasil – CPRM monitora a bacia do rio Doce, a qual possui área de drenagem de 83.400 km² e está localizada na região sudeste do Brasil entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Os problemas de inundação são frequentes entre os meses de dezembro a março, período das cheias na região sudeste. O sistema desenvolvido pela CPRM no ano de 1996 contribui para a redução dos prejuízos causados pelas cheias nessa bacia hidrográfica, abrangendo 15 municípios e beneficiando mais de 1 milhão de pessoas às margens dos principais rios da bacia. Assim, a operação do sistema é realizada 24 horas por dia durante o período chuvoso com coleta de dados hidrometeorológicos em 45 estações distribuídas pela bacia. O sistema utilizado é baseado em modelos estatísticos lineares com um horizonte de previsão médio de 12 horas. A cheia ocorrida em 2013, que teve um tempo de retorno de 70 anos, é um exemplo de sucesso de operação desse sistema. Nesse caso o fenômeno climático responsável pela elevada precipitação na bacia foi a Zona de Convergência do Atlântico Sul (MATOS *et al.*, 2014, 2015; FAN, PAIVA, COLLISCHONN, 2016). Além deste modelo operado pela CPRM, Fan *et al.* (2015b) desenvolveram um sistema de previsão por conjunto para essa bacia utilizando o MGB-IPH a fim de auxiliar na tomada de decisão na operação de limpeza de sedimentos do reservatório da UHE Aimorés, indicando benefícios no uso da previsão por conjunto em comparação com a previsão determinística.

O rio Tocantins é imprescindível para o Brasil no quesito de geração de energia, visto que ele possui muitas usinas hidrelétricas distribuídas no seu caminho principal e nos seus afluentes. A bacia do rio Tocantins está localizada na região centro-norte do Brasil, com mais de 300.000 km² de área de drenagem na confluência com o rio Araguaia. Assim, o manejo de eventos de cheia ao longo do rio Tocantins não é importante apenas para a geração de energia, mas também para as cidades e para os habitantes que são afetados frequentemente. Devido à suscetibilidade às inundações, um sistema hidrológico de previsão foi desenvolvido a fim de auxiliar na tomada de decisões na operação dos reservatórios localizados no rio Tocantins. Tal sistema está em operação desde 2012, sendo baseado também no MGB-IPH. Entre as características mais relevantes estão: o uso de dados de precipitação em tempo real da Missão de Mensuração de Chuva Tropical (TRMM – *Tropical Rainfall Measuring Mission*) acoplada com as informações de pluviômetros; o uso da previsão numérica determinística de precipitação com horizonte de sete dias do Centro de Previsão do Tempo (CPTEC) brasileiro e da previsão por conjunto com horizonte de 16 dias fornecido pelo Sistema Global de Previsão por Conjunto (GEFS – *Global Ensemble Forecasting System*); e o uso de uma interface gráfica acoplado com SIG através do software MapWindow ®. Entre as principais limitações desse sistema está a baixa densidade de estações pluviométricas telemétricas na bacia hidrográfica, que possui apenas 16 estações para uma área aproximada de 300.000 km², representando uma densidade espacial com cerca de 17.000 km² por estação pluviométrica (FAN, PAIVA, COLLISCHONN, 2016). Dessa forma, tal limitação foi atenuada através do uso de dados de precipitação do TRMM, possibilitando que os resultados desse sistema sugiram que o uso de previsão por conjunto é útil para a previsão de eventos de cheia com dias de antecipação (FAN *et al.*, 2014a, 2015a; FAN, PAIVA, COLLISCHONN, 2016).

Na bacia do rio São Francisco um sistema de previsão foi desenvolvido para fornecer informações à Usina Hidrelétrica (UHE) de Três Marias, a qual é operada pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e está localizada na porção setentrional da bacia, no sudeste brasileiro. A UHE Três Marias foi construída na década de 1950 e opera com múltiplos objetivos, entre eles, geração de energia, controle de cheias, navegação, fornecimento municipal e industrial de água e irrigação. No entanto, devido a possíveis impactos de inundação à jusante no gerenciamento de operação do reservatório, o sistema de previsão foi estendido para a cidade de Pirapora, localizada a 120 km à jusante da barragem, com uma área de drenagem em torno de 60.000 km². Dessa maneira, quando há previsão de cheia para a região de Pirapora, o reservatório libera uma quantidade menor de água para

amortecer esse pico de cheia. Assim, o sistema utilizado é uma combinação do MGB-IPH com simulação horária e um sistema empírico de assimilação de dados para levar em consideração as observações de tempo real de vazão para atualizar as condições iniciais do modelo. Para os dados de precipitação no futuro ao longo do horizonte de previsão foram utilizadas as previsões quantitativas do modelo Eta com resolução de grade de 15km, o qual é utilizado operacionalmente pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE) para gerar previsões meteorológicas, sendo que o horizonte de previsão dos dados é de sete dias. De forma geral, o conjunto entre o modelo hidrológico e meteorológico resultou em boas previsões, principalmente para um horizonte de dois a três dias. Em termos de persistência de previsão e de diagramas de excedência, as previsões para a UHE Três Marias mostraram-se úteis para antecipação de cheias (FAN *et al.*, 2013, 2014c; FAN, PAIVA, COLLISCHONN, 2016). Após o desenvolvimento inicial deste modelo, houve um aperfeiçoamento do sistema com o uso de otimização matemática, a qual permite utilizar algoritmos de otimização de reservatórios com o software RTC-Tools, de previsão de vazão por conjunto através de vários QPFs de diferentes modelos de NWP como do Sistema global de Previsão por Conjunto (EPS – *Ensemble Prediction System*) fornecido pelo Centro Europeu de Previsão de Tempo de Médio Prazo (ECMWF – *European Centre for Medium-range Weather Forecasts*), do NOAA, do TIGGE (*Interactive Grand Global Ensemble*) (FAN, PAIVA, COLLISCHONN, 2016; SCHWANENBERG *et al.*, 2015). Em outro estudo baseado na bacia do rio Paraopeba, o qual é um afluente do rio São Francisco, Meller *et al.* (2014) utilizaram o modelo MGB-IPH para previsão de cheias associada a um conjunto de previsões de precipitação, possuindo um intervalo de tempo horário e horizonte de previsão de 72h. Nesse caso, evidenciou-se o benefício da incorporação da previsão de precipitação na ampliação do horizonte de previsão de cheias.

Sousa e de Sousa (2010) propuseram um modelo baseado em RNA do tipo MLP para simular e prever vazões médias mensais na Bacia Hidrográfica do Rio Piancó através de dados de precipitação média mensal, cuja bacia está inserida em região de clima semiárido – quente e seco – com regime pluviométrico baixo e irregular. Logo, conclui-se que a RNA proposta possuiu elevado coeficiente de determinação e de eficiência, sendo, também, um modelo válido para regiões de clima árido (SOUSA, de SOUSA, 2010). Nesse contexto, Neto e Paz (2015), desenvolveram um modelo do mesmo tipo para a bacia hidrográfica do rio Ji-Paraná cuja área aproximada é de 74.400 km², enquanto que Machado (2005), desenvolveu

um modelo de chuva-vazão utilizando RNA para a bacia hidrográfica do rio Jangada, situada no Paraná, apresentando um coeficiente de correlação igual a 96,9%. Além disso, Dias, Cataldi e Ferreira (2016) elaboraram um modelo de previsão de vazão para um horizonte de previsão de dez dias para o trecho da Bacia do Rio Grande incremental da UHE Furnas também utilizando RNA do tipo MLP e incluindo informações de vazão e de precipitação observadas, precipitação prevista e prevista corrigida. Assim, verificou-se que a inclusão da precipitação prevista no sistema de RNA proporcionou melhorias nas simulações dos períodos de recessão e uma diminuição nos casos de efeito “sombra” que representa a defasagem dos picos de cheia e as recessões (DIAS, CATALDI, FERREIRA, 2016).

Na bacia do rio Sapucaí, cuja área de drenagem é de 3.924 km², localizada na região sudeste do Brasil foi desenvolvido um sistema de alerta para o município de Itajubá (MG) em razão da recorrência de eventos de inundações nesse rio, o qual é o principal rio que atravessa a área urbana desse município. Utilizou-se um modelo matemático de regressão polinomial para previsão do nível do rio Sapucaí. Após ajuste e calibração do modelo, o mesmo foi implementado na plataforma TerraMA² para realizar o monitoramento e produzir alertas com três a quatro horas de antecedência (REIS, 2014).

A bacia do rio Taquari-Antas, localizada na região sul do Brasil, é caracterizada por regimes torrenciais com escoamentos superficiais rápidos e bruscas variações de vazão, proporcionando inundações com frequência quase anual na bacia, sendo que para o período compreendido entre 1940 e 2010 o rio Taquari inundou a região mais baixa da bacia 44 vezes (SIQUEIRA, 2015; SIQUEIRA *et al.*, 2015). Nesse contexto, foi desenvolvido um modelo de previsão utilizando MGB-IPH até a cidade de Encantado, correspondendo a uma área de drenagem de cerca de 70% do total dessa bacia. Além das informações obtidas em tempo real a partir de estações telemétricas nela instaladas, o modelo foi acoplado a diferentes sistemas de previsão utilizando dados de previsão de precipitação por conjunto do Modelo Regional Atmosférico Eta, de curto prazo (até 72 horas); do Modelo Global Europeu de Previsão de Tempo de Médio Prazo (ECMWF) (até dez dias); e da previsão determinística do Modelo Regional Eta com horizonte de sete dias. Constatou-se que as previsões por conjunto demonstraram maior acurácia, principalmente até 72 horas de antecedência, em comparação com as previsões determinísticas (SIQUEIRA, 2015). Além disso, essa bacia conta com diversos pontos de aproveitamentos hidrelétricos e a CPRM iniciou um projeto para o seu monitoramento no ano de 2013, desenvolvendo um modelo de precipitação-vazão que

permanece em operação e que permite uma antecipação da ordem de 12h (CHAGAS *et al.*, 2014).

A bacia do rio Caí está localizada no estado do Rio Grande do Sul (RS) e possui área de aproximadamente 4.938 km², sendo que suas inundações estão entre os aspectos mais críticos no âmbito de recursos hídricos desta bacia. Em 2010 iniciou-se a instalação de estações telemétricas que transmitem em tempo real dados de chuva e de níveis dos rios nessa bacia para a integração dessa bacia no SACE, operada pela CPRM. Assim, devido ao tamanho da bacia, o que resulta em respostas muito rápidas aos eventos de chuva, optou-se pelo desenvolvimento de um modelo de RNA que permite uma antecipação de dez horas (PEDROLLO *et al.*, 2011, 2014).

Baseado no cenário atual, segundo Fan, Paiva e Collischonn (2016), é possível afirmar que o desenvolvimento e a operação de sistemas de previsão no Brasil são, geralmente, descentralizados, sendo que cada agência é responsável por uma bacia hidrográfica específica. Além do mais, não há uma troca de informação clara entre os centros de previsão hidrológica que compartilham sistemas em uma mesma bacia. Tal fato deve-se principalmente à inexistência de um sistema de previsão continental como o EFAS utilizado na Europa ou à falta de integração dos sistemas utilizados no Brasil. Um sistema que pudesse integrar e compartilhar informações provenientes dos sistemas de previsão utilizados por diferentes agências poderia beneficiar tanto os modelos de previsão já existentes com complementação de informação quanto para o desenvolvimento de modelos em outros lugares através de novas informações (FAN, PAIVA, COLLISCHONN, 2016).

3.3. ESTUDOS DE PREVISÃO NO RIO URUGUAI

A bacia do rio Uruguai é uma bacia hidrográfica transfronteiriça, abrangendo três países: Argentina, Brasil e Uruguai, sendo considerado, portanto, o segundo sistema fluvial da bacia do rio da Prata em importância (RIGHI e ROBAINA, 2010). Já foram realizados diversos estudos de previsão na bacia do rio Uruguai, um deles elaborado por Andreolli (2003), que desenvolveu uma metodologia para realizar previsão de vazão em tempo real integrando a previsão de precipitação ao modelo hidrológico MGB-IPH na seção de Machadinho, porção setentrional da bacia do rio Uruguai, à jusante da confluência do rio Pelotas e rio Canoas com a finalidade de gerenciamento de recursos hídricos no âmbito de

aproveitamentos hidrelétricos. Nesse trabalho, o autor incorporou o uso de previsão quantitativa de precipitação com resultados satisfatórios para os eventos analisados com horizontes de até 30 horas.

Em 2005, Collischonn *et al.* realizaram um estudo de previsão de vazão sazonal na bacia do rio Uruguai, na região de Iraí, combinando o MGB-IPH com previsão de precipitação do modelo climático global do CPTEC. Assim, os resultados obtidos foram comparados às vazões observadas e também às previsões que seriam obtidas utilizando o método tradicional, o qual está baseado nas médias ou medianas mensais de precipitação. Logo, os resultados obtidos revelaram que as previsões de precipitação do modelo global do CPTEC apresentam um erro sistemático, subestimando a precipitação na bacia do rio Uruguai, sendo que a distribuição geográfica da chuva prevista pelo modelo foi bastante diferente da distribuição geográfica da chuva observada. No entanto, quando a precipitação prevista foi corrigida por um método estatístico, elas permitiram obter previsões de vazão significativamente superiores às obtidas pelos métodos tradicionais (COLLISCHONN *et al.*, 2005).

Em 2013, Fan *et al.* (2014b), desenvolveram um sistema operacional de previsão de vazão na região setentrional da bacia do rio Uruguai, utilizando o MGB-IPH e automatizando o modelo para rodar uma vez por dia. O modelo utilizou dados de previsão quantitativa de chuva combinado com assimilação de dados de rede pluviométrica telemétrica local. A informação de precipitação futura é fornecida através de NWP do modelo Eta de resolução espacial de 15 km com horizonte de previsão de sete dias do CPTEC. Como a previsão fornecida pelo modelo hidrológico é para um horizonte de até dez dias, é utilizada a informação de previsão de precipitação do CPTEC para os sete primeiros dias e nos últimos três dias, a precipitação é considerada nula (FAN, PAIVA, COLLISCHON, 2016). Nesse caso, a previsão de vazão apresentou bons resultados com as vazões observadas, podendo prever eventos de cheias com cinco a sete dias de antecipação, mas revelando melhor performance na previsão de vazão com horizonte de até dois dias. Apesar dos resultados gerais serem satisfatórios, a análise visual também mostrou erros na previsão de vazão, por exemplo, alguns eventos de precipitação não foram capturados pela rede pluviométrica existente, consequentemente, gerando erros nas vazões simuladas. Para contornar tal situação e melhorar as previsões de curto período, os autores sugerem aumentar a densidade de postos pluviométricos telemétricos ou incorporar dados de estimativa de precipitação por sistema de radar. Já para as previsões de longo prazo, os autores sugerem testar o uso de previsão

probabilística por conjunto de precipitação de diferentes modelos, com condições meteorológicas iniciais diferentes (FAN *et al.*, 2014b; FAN, PAIVA, COLLISCHON, 2016). Ainda, Fan *et al.* (2016), valeram-se do uso da informação de persistência de previsões determinísticas de vazão para a tomada de decisões, usando tal ferramenta como uma medida do grau de incerteza dos resultados, gerando melhores resultados em termos de detecção de limiares e erros médios na previsão.

Recentemente, Fan *et al.* (2017) desenvolveram um sistema de previsão de vazão para a bacia do alto rio Uruguai utilizando o MGB-IPH com dados de previsão quantitativa de chuva com antecedência de dez dias combinado com a assimilação de dados da rede pluviométrica telemétrica local. Neste caso, o sistema foi desenvolvido com interesse especial nas afluições dos reservatórios das usinas hidrelétricas de Barra Grande e Campos Novos com intuito de auxiliar na tomada de decisões a cerca da geração de energia elétrica, da segurança de barragens e do controle de cheias através da operação de estruturas hidráulicas. Assim, este modelo hidrológico obteve bom desempenho, prevendo a possível ocorrência de inundações com dois a três dias de antecedência (FAN *et al.*, 2017).

Em outro estudo na porção setentrional da bacia hidrográfica do rio Uruguai, na bacia hidrográfica do Alto Canoas, na qual se encontra a nascente brasileira do Rio Uruguai, Debastiani *et al.* (2015) realizou uma modelagem de chuva-vazão com técnica de Redes Neurais Artificiais para avaliar a contribuição relativa de variáveis meteorológicas na representação desse processo. Além disso, Antunes (2015), utilizou o modelo hidrológico SWAT (*Soil Water Assessment Tool*) na mesma bacia a fim de avaliar os processos hidrológicos que contribuem para as vazões dessa bacia hidrográfica. Dessa maneira, o balanço hídrico calculado pelo modelo indicou que nessa bacia ocorre contribuição significativa do escoamento sub-superficial e básico na formação das vazões nos canais. Por fim, esse modelo revelou-se satisfatório tanto na simulação de eventos diários como na simulação de eventos mensais. Em contrapartida, Adam (2016), desenvolveu uma metodologia para quantificação e análise de incertezas em estudos de impactos de mudanças climáticas sobre o regime de vazões na bacia hidrográfica do rio Uruguai. Tal pesquisa foi de grande importância, pois possíveis mudanças climáticas podem ter impacto tanto para a geração de energia hidrelétrica, produção de alimentos quanto para o aumento da frequência de eventos extremos.

O presente estudo difere dos anteriores ao abordar não somente a porção setentrional da bacia do rio Uruguai, mas toda a porção da bacia que se encontra em território brasileiro com a finalidade de fornecer uma ferramenta para auxiliar na tomada de decisões em eventos extremos. Dessa maneira, o foco da previsão de vazão para diversos municípios da região permite gerar um subsídio para o desenvolvimento de sistemas de alerta, proporcionando um aumento do tempo hábil na preparação da defesa civil para agir quando necessário.

4. METODOLOGIA

A seguir é apresentada uma forma simplificada da metodologia empregada neste estudo, contendo as etapas de trabalho realizadas (Figura 5).

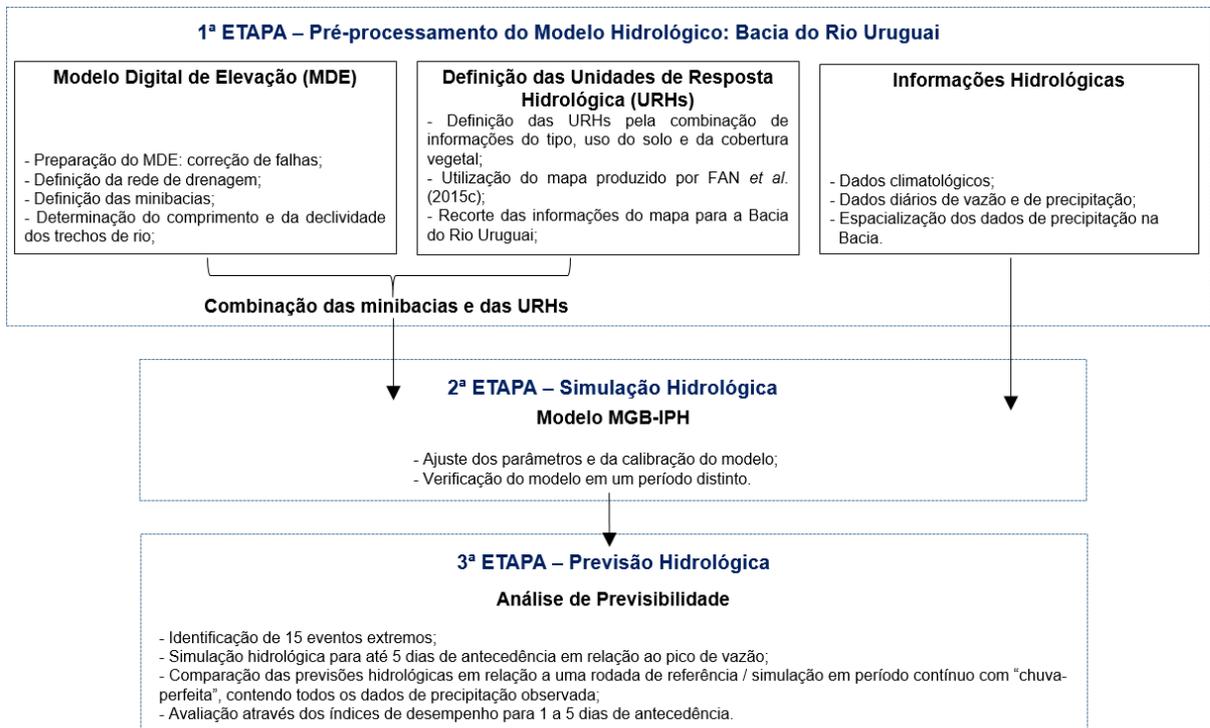


Figura 5 - Fluxograma esquemático da estrutura metodológica utilizada no presente estudo.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1.1. LOCALIZAÇÃO E HIDROGRAFIA

A Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai pertence tanto ao Brasil, quanto à Argentina e ao Uruguai, estando limitada a nível nacional ao Norte pela região hidrográfica do Paraná, ao Oeste pela Argentina e ao Sul pelo Uruguai (Figura 6). A porção brasileira da bacia do rio Uruguai possui aproximadamente 72,6 % de sua área no RS e cerca de 27,4 % em SC (GUIMARÃES, FINCK, MARCUZZO, 2017).

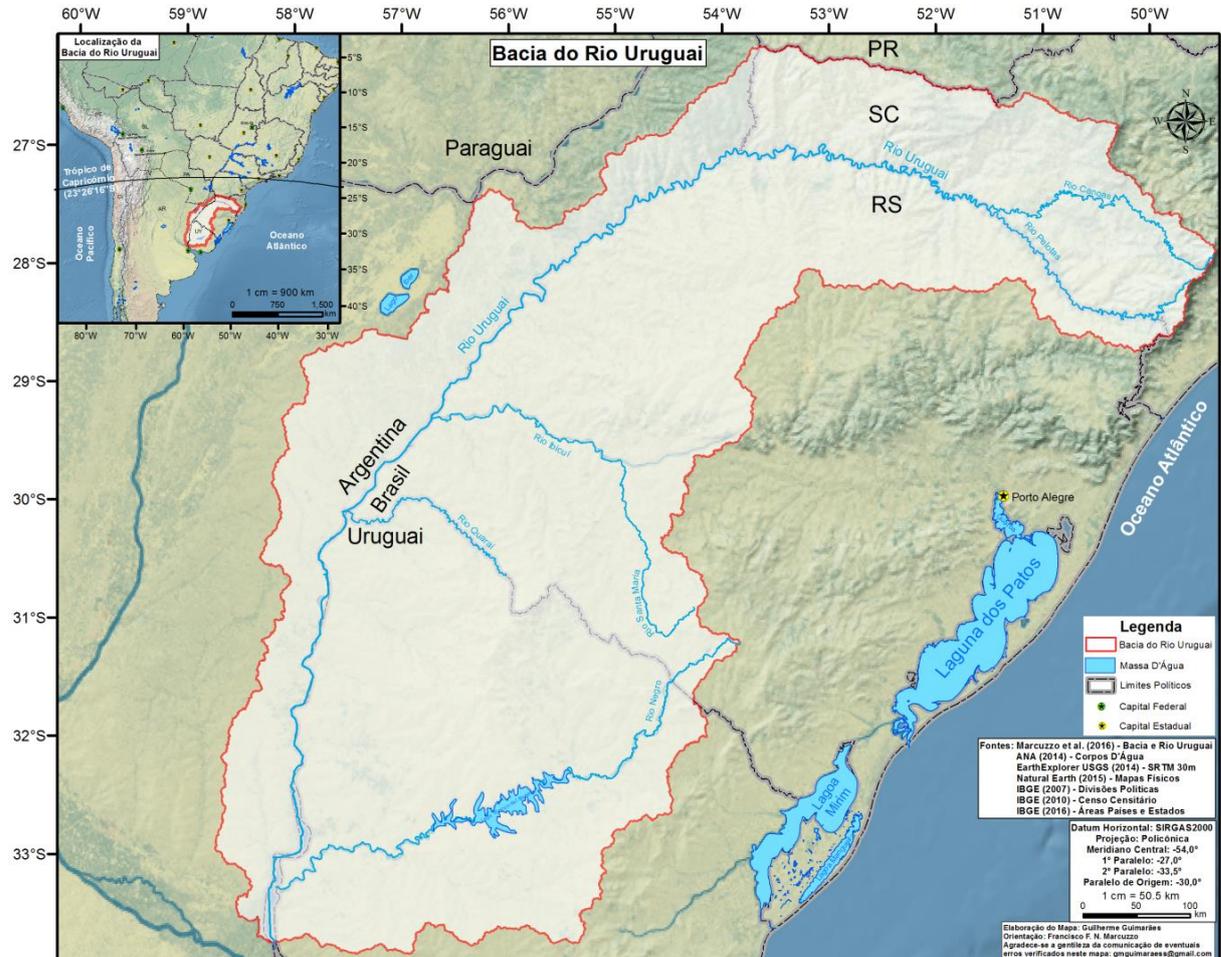


Figura 6 - Localização da Bacia do Rio Uruguai

O rio Uruguai é formado a partir da confluência do rio Pelotas com o rio Canoas, o qual a partir dessa junção percorre um caminho de 2.200 km de extensão até a sua foz no estuário do rio da Prata. Inicialmente, o rio Pelotas é responsável pela divisa entre os Estados do RS e SC, para posteriormente o rio Uruguai dividir esses estados em trecho nacional, com fluxo de água no sentido Leste-Oeste. Após a confluência com o rio Peperi-Guaçu, o rio Uruguai muda para a direção sudoeste e passa a delimitar a fronteira entre o Brasil e a Argentina. Por fim, após a afluência do rio Quaraí, quando o rio Uruguai ultrapassa a tríplice fronteira entre Brasil, Argentina e Uruguai, ele serve de fronteira para o Uruguai e Argentina até a sua foz.

A Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai possui uma superfície de drenagem de aproximadamente 349.843 km², sendo que aproximadamente 49,8% estão localizados na porção brasileira desta bacia hidrográfica, 32,4% no Uruguai e 17,7% na Argentina (MARCUIZZO, 2017). Segundo os critérios da metodologia de Otto Pfafstetter (BRASIL, 2006) a Região Hidrográfica do Uruguai em território brasileiro foi dividida em quatro sub-bacias de nível 1 denominadas de: Sub-bacia do Rio Uruguai – Trecho Alto; Sub-bacia do Rio

Uruguai – Trecho Médio; Sub-bacia do Rio Ibicuí; Sub-bacia do Rio Negro (Figura 7); apresentando, também, a Sub-Bacia do Baixo Uruguai em trecho internacional. O ponto “A” da Figura 7 representa as coordenadas aproximadas do encontro das águas do rio Pelotas com as águas do rio Canos nas coordenadas 27°36'30,5"S e 51°27'26,2"O; já o ponto “B” indica o local em que o rio Uruguai passa a servir de fronteira entre Argentina e Brasil nas coordenadas aproximadas de 27°10'14,67"S e 53°50'02,78"O; o ponto “C” na Sub-bacia do Rio Ibicuí na coordenada aproximada de 29°48'23,5"S e 54°55'08,5"O indica o local em que o rio Santa Maria passa a se chamar rio Ibicuí; por fim o ponto “D” representa a tríplice fronteira entre Brasil, Uruguai e Argentina, cujas coordenadas aproximadas são 30°10'30,30"S e 57°38'39,55"O.

A Sub-Bacia do Alto Uruguai abrange os dois formadores do rio Uruguai e conta com uma área em torno de 77.389 km², a qual possui como característica o alto potencial hidrelétrico devido ao alto gradiente de relevo. A Sub-bacia do Médio Uruguai possui cerca de 93.733 km² de área, nela o rio Uruguai começa a delimitar as fronteiras internacionais e conta com uma área em território brasileiro com cerca de 47.530 km², a qual possui grande diversidade de usos, apresentando áreas com intenso uso para irrigação de arroz, como a Sub-bacia do Rio Quaraí, e áreas com grande potencial hidrelétrico, como o rio Ijuí. A Sub-bacia do Rio Ibicuí possui área de drenagem aproximada de 47.024km² e trata-se de uma região bem característica do médio Uruguai, com rios de Campanha. A Sub-bacia do Rio Negro compreende as nascentes deste importante curso de água que cruza a República do Uruguai, desaguando no rio Uruguai próximo de sua foz. Essa Sub-bacia apresenta uma área de 71.036 km², mas apenas cerca de 3.044 km² estão em território brasileiro. Por fim, a Sub-Bacia do Baixo Uruguai possui cerca de 59.880 km² de área distribuída entre Uruguai e Argentina.

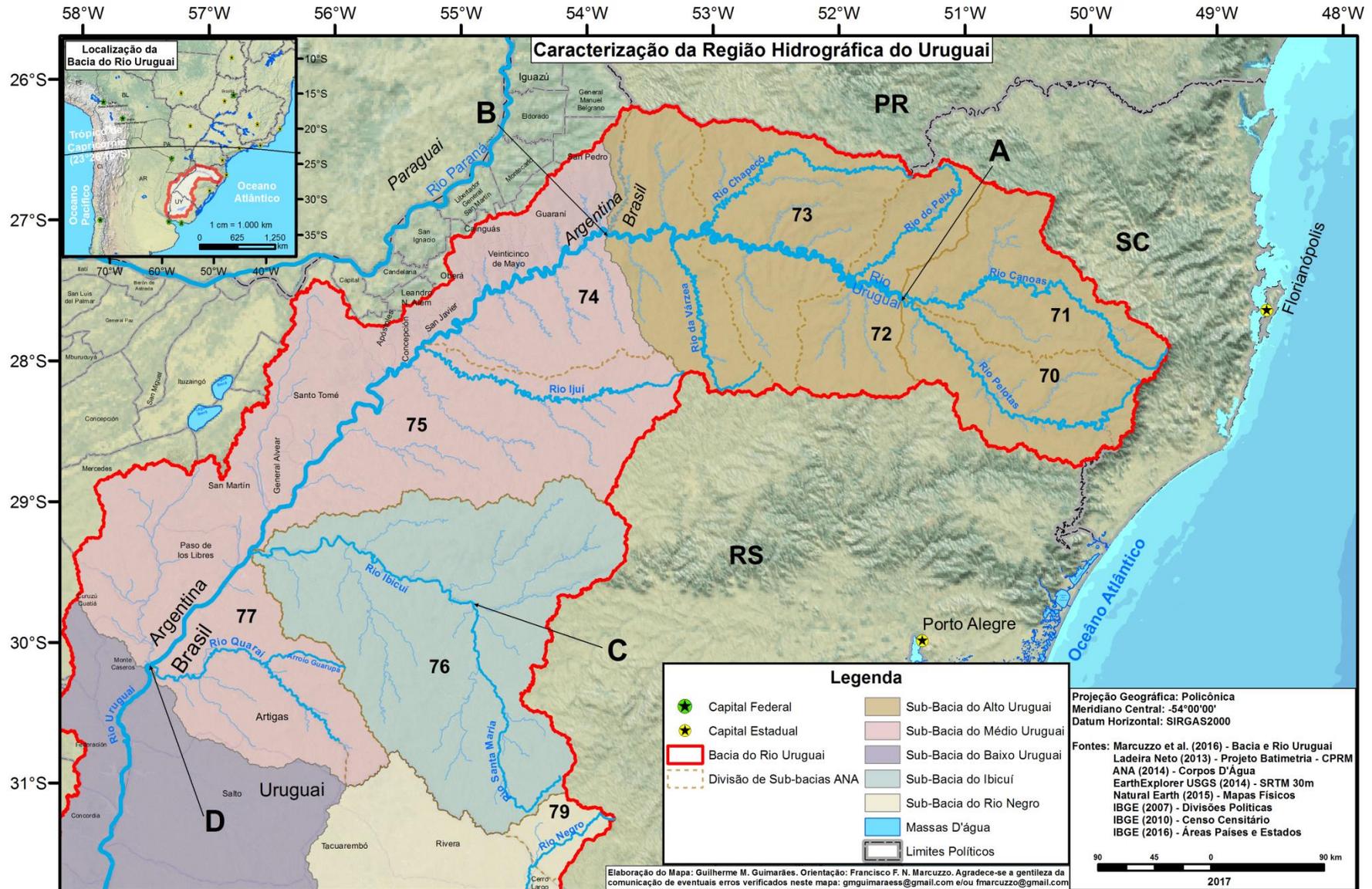


Figura 7 - Caracterização da Região Hidrográfica do Uruguai com Definição das Sub-bacias de Estudo

4.1.2. GEOLOGIA

Para a caracterização geológica da Bacia do Rio Uruguai, utilizou-se o mapa na escala 1:5.000.000 apresentado pela Comissão da Carta Geológica do Mundo (2001) para a América do Sul. A Figura 8 apresenta quando se deu as diferentes formações geológicas na bacia. Além disso, utilizou-se também os mapas geológicos estaduais do RS (WILDNER *et al.*, 2008) e de SC (CPRM, 2014) nas escalas de 1:750.000 e de 1:500.000 respectivamente, a fim de complementar informações. Percebe-se que a região da Bacia do Uruguai está praticamente toda inserida na Bacia do Paraná, a qual é uma vasta bacia intracratônica, ocorrendo ainda em sua porção sul/sudeste rochas mais antigas pertencentes ao denominado Escudo Sul-Rio-Grandense (BRASIL, 2006).

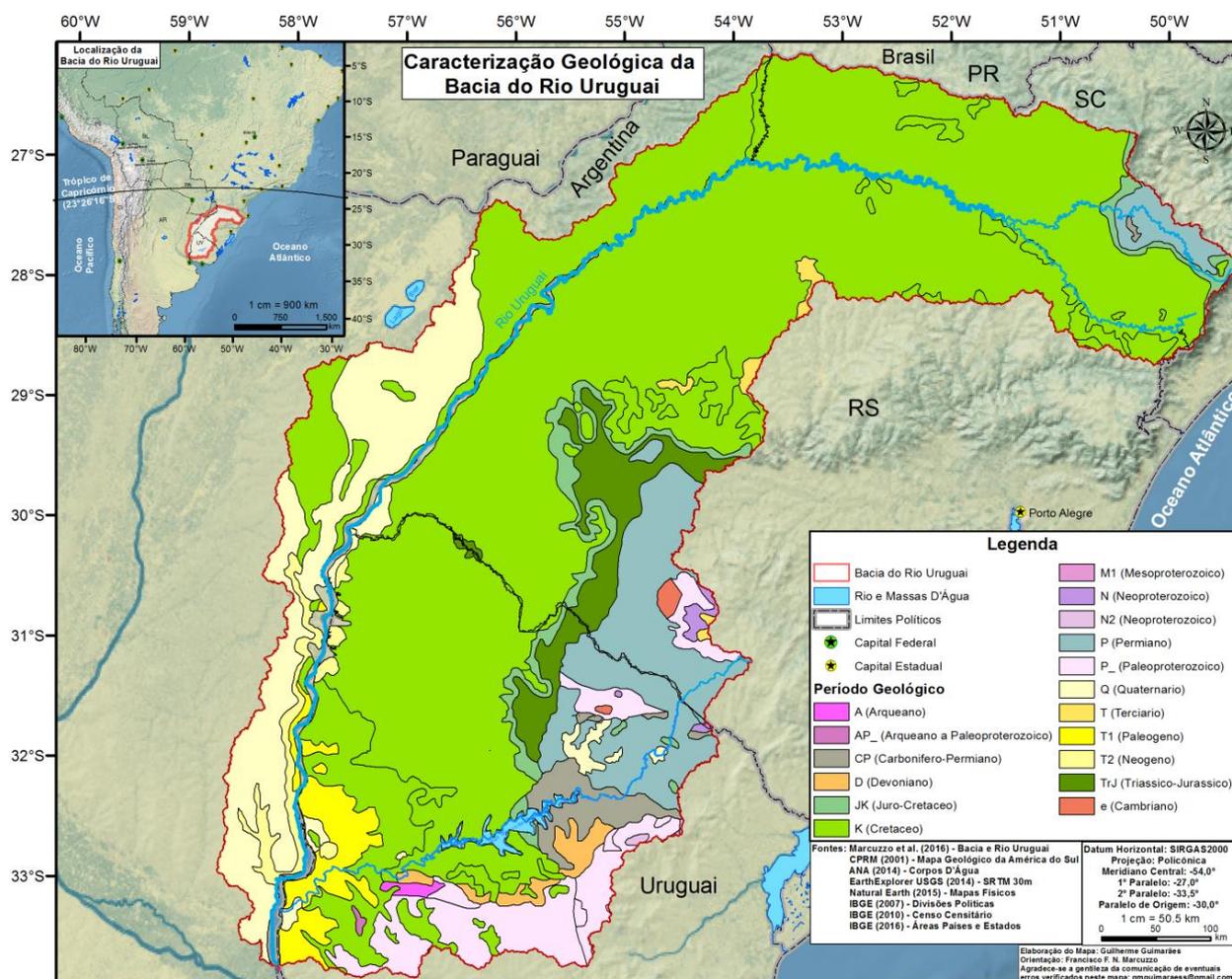


Figura 8 - Caracterização Geológica da Bacia do Rio Uruguai (Adaptado segundo Comissão da Carta Geológica do Mundo, 2001).

Dessa forma, a Bacia do Rio Uruguai compreende as litologias resultantes de processos sedimentares e vulcânicos, as quais foram englobadas em grupos e em formações geológicas. Portanto, percebe-se que a Formação Serra Geral representa majoritariamente a

região de interesse, seguida do Grupo Passa Dois, Formação Botucatu, Formação Rosário do Sul e de Aluviões do período Quaternário. A Formação Serra Geral é caracterizada por episódios vulcânicos, evidenciando sucessivos derrames de caráter basáltico no período Cretáceo, sendo que os efeitos tectônicos mais expressivos são representados por grandes falhamentos, configurando zonas de maior porosidade e permeabilidade polarizada, principalmente no terço superior da Bacia. O Grupo Passa Dois corresponde a eventos geológicos do Permiano, representado por litologias essencialmente de origem marinha com características de permeabilidade intergranular baixa, minimizando a polarização da permeabilidade, sendo mais expressivo ao longo do rio Santa Maria, ao sul da Bacia, e no nordeste de Lajes (SC). A Formação Botucatu gerada no período Jurássico é caracterizada por arenitos finos a médios, podendo localmente evidenciar arenitos argilosos mal selecionados, os quais geraram zonas de permeabilidade de fissuramento; tal formação ocorre de modo expressivo e contínuo nos afluentes do curso médio do rio Ibicuí e de forma irregular em Santa Catarina. A Formação Rosário do Sul, correspondente ao período Triássico, é constituída por arenitos vermelhos de granulação média a muito fina, ocorrendo de forma expressiva na Sub-bacia do Ibicuí, possuindo elevada permeabilidade intergranular. No período Quaternário destacam-se os depósitos aluvionares, com o surgimento de terraços essencialmente arenosos com intercalações de cascalho, silte e argila, definindo extensas planícies de inundação (BRASIL, 2006).

4.1.3. HIDROGEOLOGIA

A caracterização Hidrogeológica da Bacia do Rio Uruguai foi realizada com base nas informações levantadas por Diniz *et al.* (2014) no Mapa Hidrogeológico do Brasil ao milionésimo e no Mapa Hidrogeológico da Bacia do Prata elaborado pelo Comitê Intergovernamental Coordenador dos Países da Bacia do Prata (2015) na escala 1:2.500.000. De acordo com Diniz *et al.* (2014) as unidades hidrolíticas são grupos de unidades geológicas que armazenam e transmitem águas subterrâneas de forma semelhantes, podendo ser agrupadas em quatro grandes grupos de acordo com seu comportamento:

1. Unidades Hidrolíticas Porosas ou Granulares são formações onde a água se acumula nos poros da rocha. Essas unidades ocorrem em rochas sedimentares consolidadas, sedimentos não consolidados e, bem como em materiais arenosos decompostos e, geralmente, constituem aquíferos importantes.

2. Unidades Hidrolitológicas Fraturadas são formações em que a água se acumula nos falhamentos ou fraturamento das rochas. Essas unidades ocorrem em rochas ígneas, metamórficas e algumas rochas sedimentares fortemente cimentadas, sendo geralmente unidades restritas, descontínuas e localizadas.
3. Unidades Hidrolitológicas Cársticas são um tipo específico da unidade fraturada, originando-se através da dissolução pela água de rochas carbonáticas como calcário, dolomita e gipsita.
4. Unidades Hidrolitológicas Não Aquíferas são unidades capazes de armazenar quantidades significativas de água, no entanto suas condições de fluxo impedem a exploração sistemática destes recursos hídricos.

Na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai estão presentes as Unidades Hidrolitológicas Porosas ou Granulares, as Unidades Hidrolitológicas Fraturadas e as Unidades Hidrolitológicas Não Aquíferas, conforme observa-se na Figura 9. Além disso, a Tabela 1 apresenta todas as formações hidrogeológicas presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai com informações de sua produtividade e tipo de porosidade. Percebe-se que a Formação Serra Geral predomina na região, seguido da Formação Arapey, dos Depósitos Eólicos e Lacustres e de Embasamentos Cristalinos. A Formação Serra Geral cobre a totalidade das regiões de planalto no RS e SC, estando representado pelo Aquífero Fraturado Serra Geral, apresentando grande importância hidrogeológica na região, decorrente da elevada explotabilidade das suas zonas aquíferas. A Formação Arapey também é constituída por derrames de lavas basáltica, além de representar o Aquífero Fraturado Serra Geral em território uruguaio, não aflorando no lado argentino da sub-bacia. Já na região do Alto Uruguai na porção argentina da sub-bacia ocorre expressivos depósitos eólicos e lacustres pleistocênicos, constituindo aquíferos granulares de muito alta produtividade; enquanto que os Embasamentos Cristalinos são constituídos de granitos e rochas metamórficas fraturadas na porção sul do Uruguai com produtividade muito baixa, porém localmente baixa (DINIZ *et al.* 2014; CPRM, 2015). Ainda, nota-se que apesar do elevado potencial Hidrogeológico da Região Hidrográfica do Uruguai, o aproveitamento da água subterrânea na região visa, principalmente, o abastecimento público de pequenas comunidades rurais e à suplementação do abastecimento de cidades de porte médio, sendo que a sub-bacia do Ibicuí apresenta a maior densidade de poços (BRASIL, 2006).

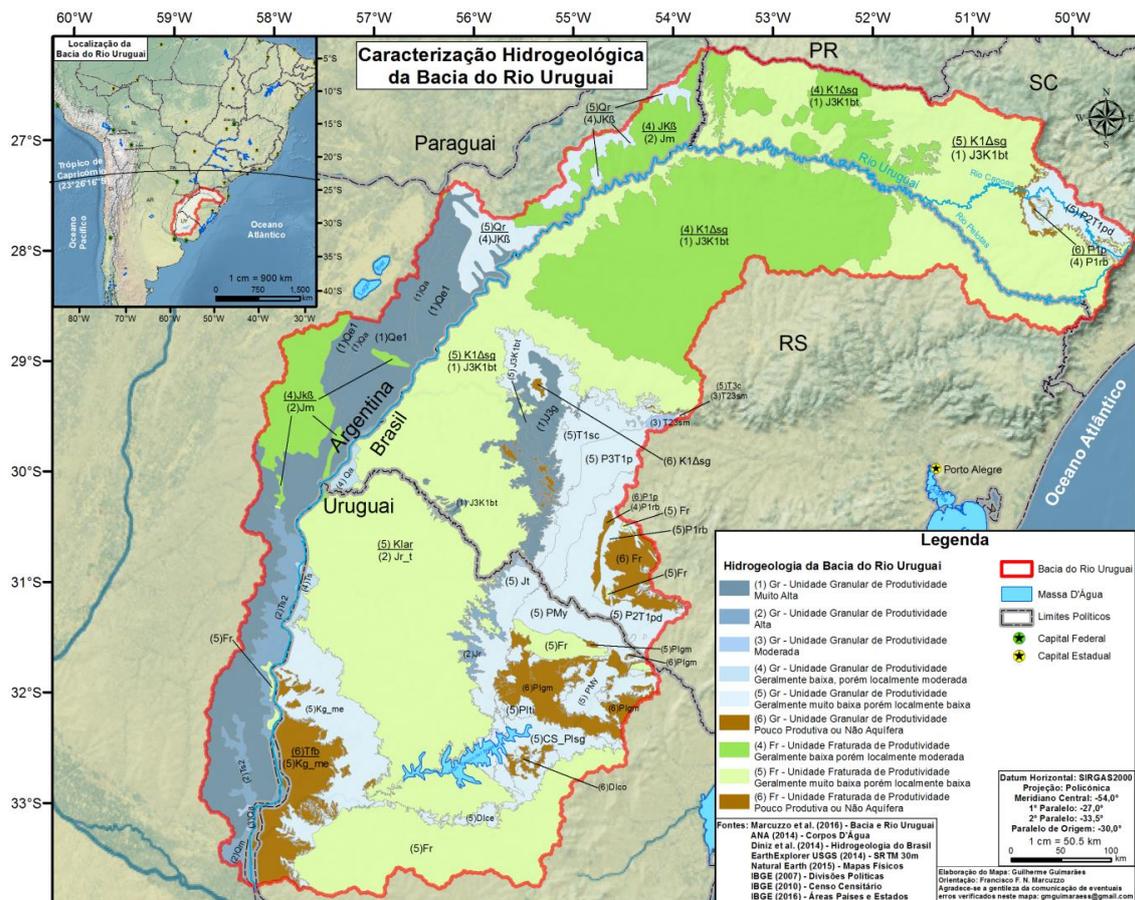


Figura 9 - Caracterização Hidrogeológica da Bacia do Rio Uruguai (Adaptado de Diniz et al. 2014).

Tabela 1 - Formações hidrogeológicas da Bacia do Rio Uruguai.

Formação Hidrogeológica	Produtividade Para Águas Subterrâneas	Porosidade	Área (%)
Depósito Aluvionar	Baixa - Moderada	Granular	0,23%
Depósitos Aluviais e Coluviais	Moderada - Alta	Granular	1,12%
Depósitos Deltaicos	Alta	Granular	0,01%
Depósitos Eólicos e Lacustres	Muito Alta	Granular	7,95%
Depósitos Litorâneos Arenosos	Alta	Granular	0,30%
Embasamento Cristalino	Muito Baixa - Baixa	Fraturada	5,58%
Embasamento Fraturado Indiferenciado	Muito Baixa ou Não Aquífera	Fraturada	1,05%
Formação Arapey	Muito Baixa - Moderada	Fraturada	12,95%
Formação Botucatu	Muito Alta	Granular	1,99%
Formação Buena Vista	Muito Baixa - Baixa	Granular	0,20%
Formação Caturrita	Muito Baixa - Baixa	Granular	0,09%
Formação Cerrezuelo	Muito Baixa - Baixa	Granular	0,55%
Formação Cordobés	Muito Baixa ou Não Aquífera	Granular	0,17%
Formação Cuaró	Muito Baixa ou Não Aquífera	Fraturada	0,10%
Formação Guará	Muito Alta	Granular	1,17%

Continuação da Tabela 1 - Formações hidrogeológicas da Bacia do Rio Uruguai

Formação Hidrogeológica	Produtividade Para Águas Subterrâneas	Porosidade	Área (%)
Formação Guichón e Mercedes	Muito Baixa - Baixa	Granular	2,94%
Formação Ituzaingo	Alta	Granular	1,58%
Formação La Paloma	Muito Baixa - Baixa	Granular	0,03%
Formação Las Arenas	Muito Baixa - Baixa	Granular	0,11%
Formação Palermo	Muito Baixa ou Não Aquífera	Granular	0,17%
Formação Pirambóia	Muito Baixa - Baixa	Granular	1,56%
Formação Rio Bonito	Muito Baixa - Baixa	Granular	0,42%
Formação Riveira	Alta	Granular	0,46%
Formação Riveira Tacuarembó	Moderada	Granular	0,03%
Formação Salto	Baixa - Moderada	Granular	0,27%
Formação Sanga do Cabral	Muito Baixa - Baixa	Granular	1,27%
Formação Santa Maria	Moderada	Granular	0,11%
Formação Santa Tecla	Muito Baixa - Baixa	Granular	0,06%
Formação São Bento	Muito Baixa ou Não Aquífera	Granular	2,40%
Formação São Gregório	Muito Baixa - Baixa	Granular	1,11%
Formação Serra Geral	Muito Baixa ou Não Aquífera - Moderada	Faturada	43,69%
Formação Taciba	Muito Baixa ou Não Aquífera	Granular	0,02%
Formação Tacuarembó	Baixa - Moderada	Granular	1,16%
Formação Três Ilhas	Muito Baixa - Baixa	Granular	0,31%
Formação Yaguarí	Muito Baixa - Baixa	Granular	1,90%
Grupo Itararé	Muito Baixa - Baixa	Granular	0,04%
Grupo Melo	Muito Baixa ou Não Aquífera	Granular	1,68%
Grupo Passa Dois	Muito Baixa ou Não Aquífera	Granular	2,76%
Ilha Cristalina de Aceguá	Muito Baixa - Baixa	Faturada	0,04%
Ilha Cristalina de Rivera	Muito Baixa - Baixa	Faturada	0,53%
Regolitos	Muito Baixa - Baixa	Granular	1,88%

4.1.4. ALTIMETRIA E DECLIVIDADE

Para a caracterização altimétrica da Bacia do Rio Uruguai utilizou-se o modelo digital de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission* – Missão Topográfica Radar Shuttle) com resolução espacial de 30 m, disponibilizado pela Earth Explorer (2014). De acordo com a Figura 10 as maiores altitudes da Região Hidrográfica do Uruguai, conforme também verificado por Marcuzzo (2017), situam-se na sub-bacia mais a montante, sendo que o ponto mais alto com 1822 m localiza-se entre os municípios de Urubici e Bom Retiro em SC, no

denominado Morro da Boa Vista. Já para a análise de declividades da região, os critérios utilizados foram apresentados pela EMBRAPA (2006). A Figura 11 e a Tabela 2 apresentam a classificação de relevo da Bacia do Rio Uruguai e suas sub-bacias, respectivamente. Observa-se que na Sub-Bacia do Alto Uruguai predominam relevos do tipo ondulado, caracterizados por conjunto de colinas com declives moderados, seguido de relevo forte ondulado, o qual é caracterizado por uma superfície topográfica movimentada, formada por morros com declives fortes. Conseqüentemente, na região do Alto Uruguai, onde a declividade é alta e o tempo de deslocamento da onda de cheia é pequeno, as cheias podem decorrer de precipitações intensas e mais localizadas (BRASIL, 2006).

A Sub-Bacia do Médio Uruguai é caracterizada por ser uma região de transição entre o planalto e a campanha, apresentando tipo de relevo majoritariamente suave ondulado e plano. Os relevos do tipo suave ondulado são constituídos por conjunto de colinas, apresentando declividades suaves. Quanto aos relevos planos, estes se caracterizam pela presença de uma superfície de topografia esbatida, com desnivelamentos muito pequenos, ou até mesmo horizontais (EMBRAPA, 2006). Dessa forma, na região do Médio Uruguai, as cheias são oriundas das precipitações de longa duração, possuindo grande abrangência espacial.

Tanto a Sub-Bacia do Ibicuí quanto a Sub-Bacia do Rio Negro apresentam majoritariamente relevo do tipo suave ondulado e plano. Nessas regiões as cheias são dependentes da intensidade da chuva e ocorrem de forma independente das precipitações nas cabeceiras da bacia. Por fim, na Sub-Bacia do Baixo Uruguai predominam relevos do tipo plano e suave ondulado, marcados por coxilhas e planícies.

Tabela 2 - Caracterização geomorfológica da Bacia do Rio Uruguai.

Relevo	Sub-Bacia do Alto Uruguai	Sub-Bacia do Médio Uruguai	Sub-Bacia do Ibicuí	Sub-Bacia do Rio Negro	Sub-Bacia do Baixo Uruguai
Plano 0 a 3%	8,8%	37,7%	31,1%	37,5%	46,3%
Suave Ondulado 3 a 8%	21,2%	38,2%	42,8%	48,7%	45,3%
Ondulado 8 a 20%	39,4%	19,6%	22,6%	12,8%	8,0%
Forte Ondulado 20 a 45%	26,6%	4,2%	3,1%	1,0%	0,3%
Montanhoso 45 a 75%	3,8%	0,3%	0,4%	0%	0%
Escarpado > 75%	0,2%	0%	0%	0%	0%

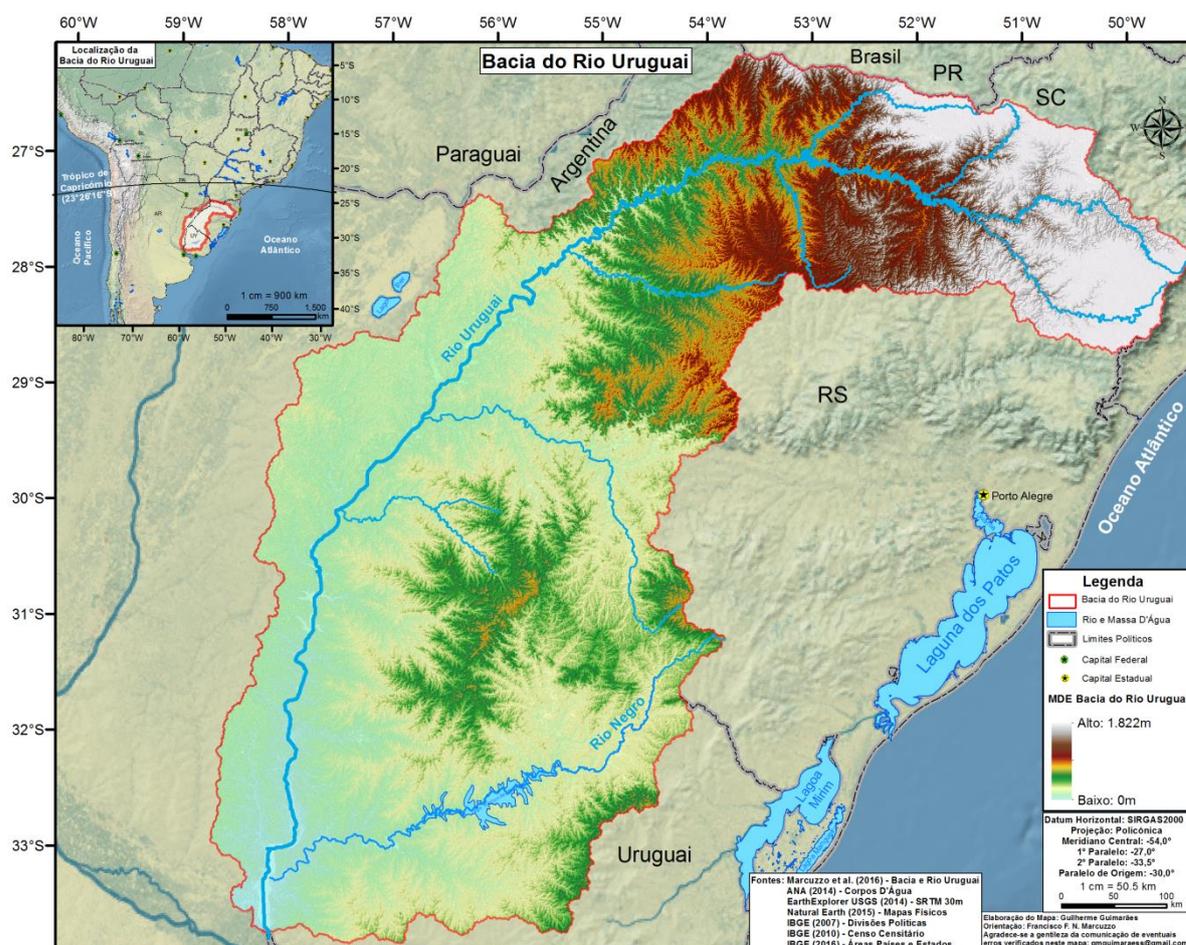


Figura 10 - Mapa hipsométrico da Bacia do Rio Uruguai.

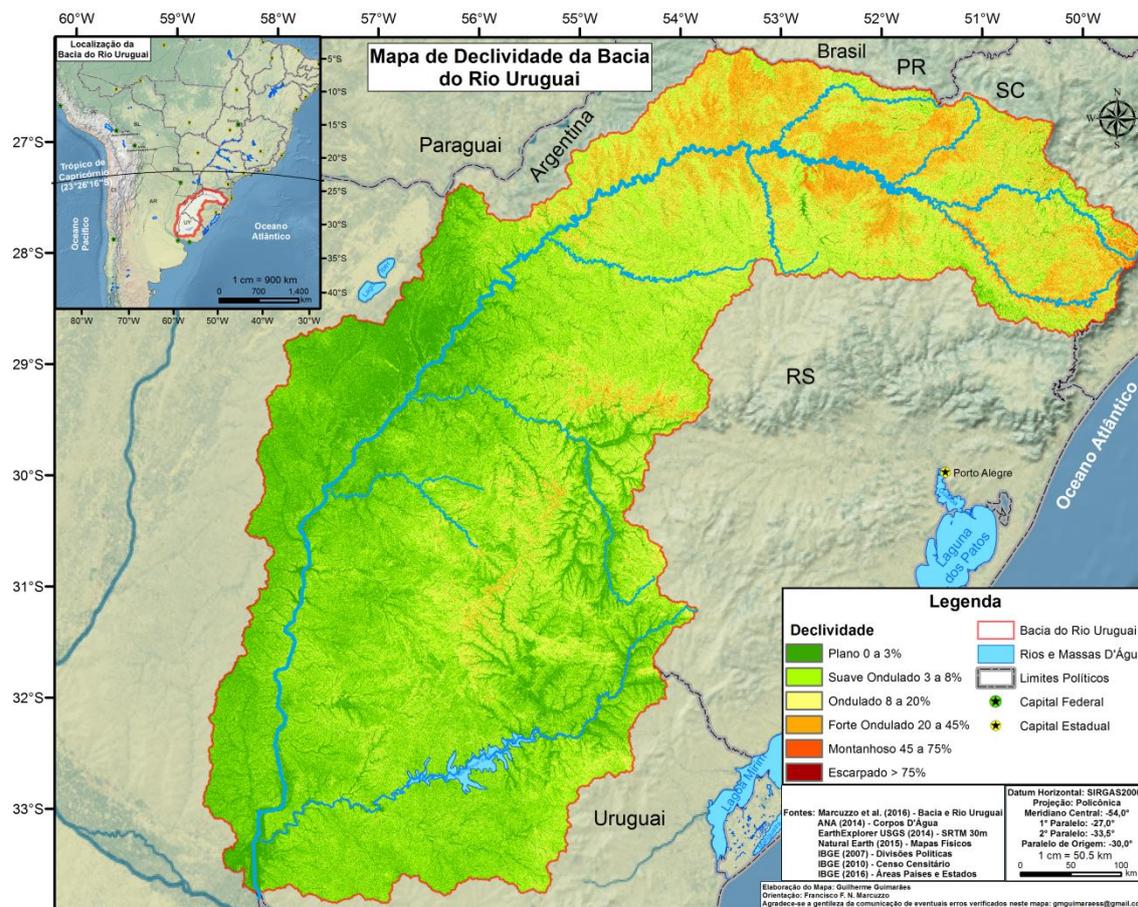


Figura 11 - Mapa de declividade da Bacia do Rio Uruguai.

4.1.5. CLIMA E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL

De acordo com a classificação de Köppen, a bacia do rio Uruguai apresenta dois tipos fundamentais de clima fortemente influenciados pela morfologia: subtropical (Cfa) e temperado (Cfb) como pode ser visualizado na Figura 12 (ALVARES *et al.* 2013; KOTTEK *et al.*, 2006). Em ambos tipos de clima, a temperatura média do mês mais frio oscila entre -3 °C a 18 °C e chove pelo menos 30 mm em todos os meses do ano. Nas áreas de relevo mais baixo, próximas ao rio Uruguai, onde a temperatura média do mês mais quente é superior a 22 °C, o clima é classificado como Cfa e nas áreas mais altas da bacia hidrográfica, onde a temperatura média do mês mais quente é inferior a 22 °C, o clima é classificado como Cfb.

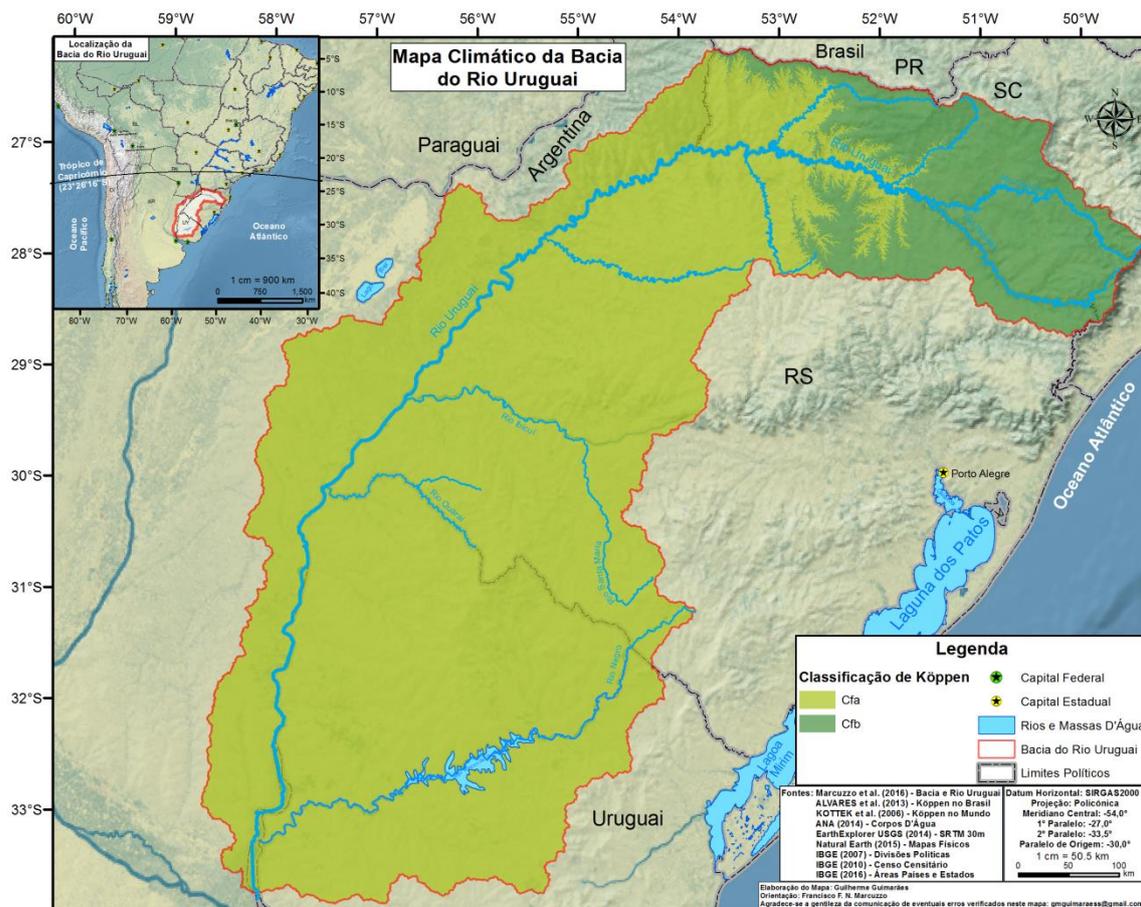


Figura 12 - Caracterização climática segundo Classificação de Köppen.

Segundo Ynoue *et al.* (2017), a dinâmica da região sul do Brasil sofre influência de basicamente quatro massas de ar: polar atlântica, tropical continental, tropical atlântica e equatorial continental, esta a qual tem início na Amazônia. A bacia do rio Uruguai apresenta uma distribuição regular de chuvas, mas, devido às influências das massas de ar, a incidência de onda curta pode variar significativamente, levando a uma distribuição sazonal na dinâmica da região, refletindo também em movimentos periódicos nas variáveis climáticas da região e, conseqüentemente, modificando a gênese das chuvas na região (BRASIL, 2006; YNOUE *et al.*, 2017).

Portanto, as chuvas de inverno decorrem da aproximação de anticiclones, as quais originam as chuvas e, posto à intensa circulação secundária do ar, as massas de ar tornam-se mais intensas, frequentes e duradouras, provocando chuvas mais prolongadas e mais frequentes. Já, durante o verão, a quantidade e a magnitude de anticiclones diminuem, transferindo a responsabilidade da gênese da chuva para os ventos alísios que transportam ar úmido do Atlântico, formadores das chuvas de verão de alta intensidade e curta duração (BRASIL, 2006).

Segundo dados obtidos de Pinto *et al.* (2011) do atlas pluviométrico do Brasil em que 94 estações pluviométricas foram analisadas no período de 1977 a 2006, os totais pluviométricos médios anuais variam de 1.316 mm a 2.109 mm (Figura 13), sendo que as regiões de cabeceira, na porção setentrional da bacia, são mais chuvosas, enquanto que a região de fronteira com o Uruguai é a menos chuvosa. Observa-se que agosto é considerado o mês mais seco da bacia do rio Uruguai com 54 postos pluviométricos que corroboram com tal característica, enquanto que outubro é considerado o mês mais chuvoso com 66 postos pluviométricos que evidenciam tal informação e um detalhamento mensal da espacialização da chuva na parte brasileira da bacia pode ser verificado em Guimarães, Finck, Marcuzzo, 2017.

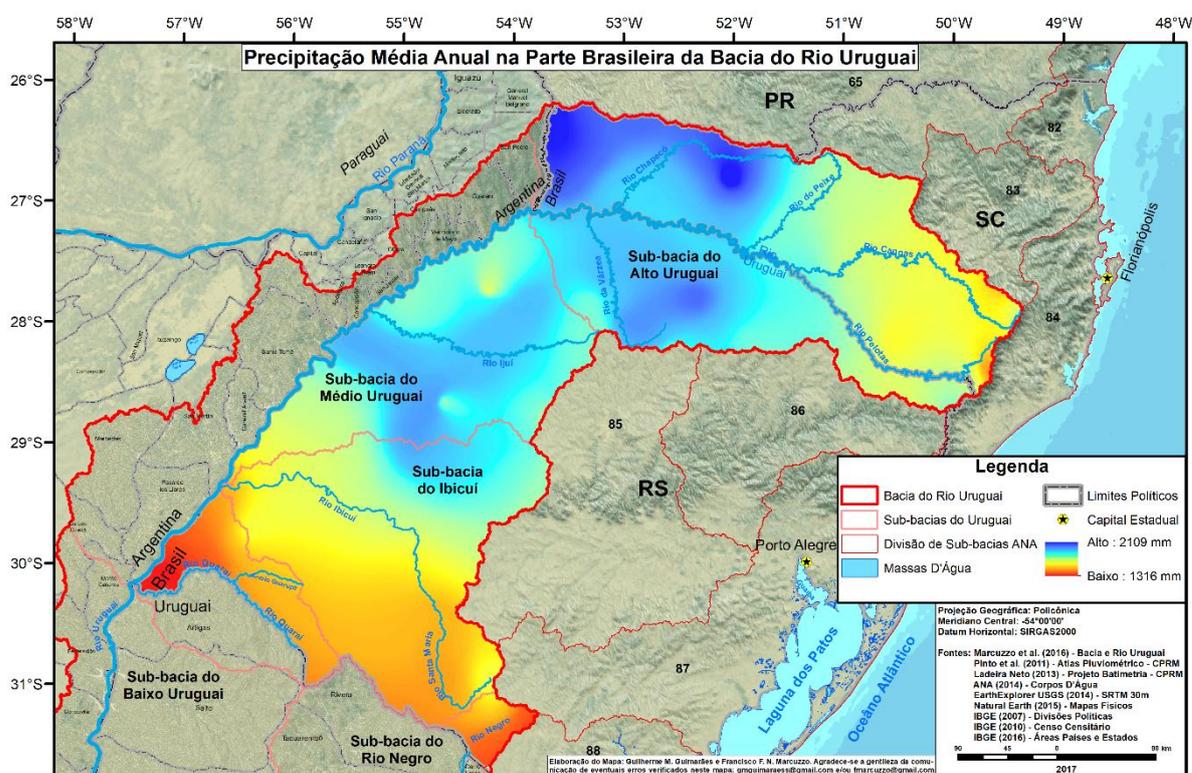


Figura 13 - Precipitação média anual na parte brasileira da Bacia do Rio Uruguai.

Além disso, ao realizar-se o diagnóstico da altimetria e declividade da região, percebe-se que geomorfologia exerce uma importante influência na formação das chuvas. Observa-se que em cidades como Iraí, Xanxerê e Chapecó, localizadas no Alto Uruguai, apresentam precipitações mais elevadas do que outras localidades próximas, enquanto que nas áreas mais planas as chuvas são menores, com registros de estiagens periódicas devido à baixa umidade dos ventos na região oeste do RS (BRASIL, 2006).

4.1.6. DADOS POPULACIONAIS

A ocupação das terras na Região Hidrográfica do Rio Uruguai foi influenciada pelo processo de assentamento da imigração europeia, inicialmente alemã na década de 1820 e, posteriormente, italiana na década de 1870. Segundo Souza (2000 *apud* RIGHI e ROBAINA, 2010)¹, as condições históricas de ocupação geraram duas regiões distintas quanto ao uso do solo, à estrutura fundiária e à divisão político-administrativa. Dessa forma, conforme apresentado na Figura 14, a região norte caracteriza-se por pequenos municípios e pela pequena propriedade em que se desenvolveu a agricultura familiar, enquanto que a porção sul é composta de grandes municípios, grandes propriedades com o desenvolvimento da pecuária como principal atividade. Conseqüentemente, a distribuição dos municípios ao longo das margens do rio Uruguai, de montante para jusante, segue um padrão crescente de área territorial (RIGHI e ROBAINA, 2010).

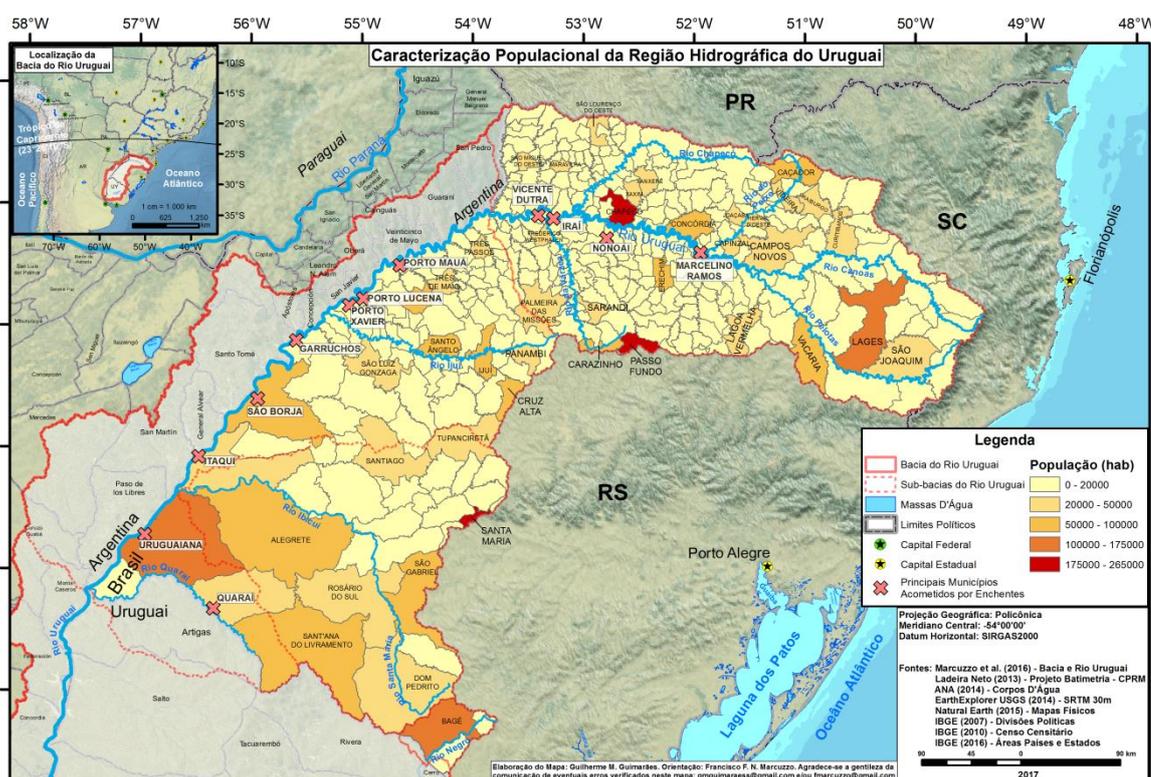


Figura 14 - Caracterização Populacional da Região Hidrográfica do Uruguai e principais municípios acometidos por enchentes.

As enchentes na Região Hidrográfica do Rio Uruguai atingem principalmente a população ribeirinha ao longo do rio principal e em alguns de seus afluentes. Entre os municípios mais acometidos por enchentes nessa região estão Garruchos, Iraí, Itaquí,

¹ SOUZA, C. F. **Contrastes Regionais e Formações Urbanas**. Porto Alegre, UFRGS: 2000. *apud* RIGHI e ROBAINA.

transição entre potencial para geração de energia hidrelétrica e irrigação de arroz nessa sub-bacia; portanto, na região do município de Ijuí ainda há aproveitamentos hidrelétricos, enquanto que na Sub-bacia do Rio Quaraí o uso do solo e da água é utilizado quase que exclusivamente para irrigação de arroz. Na Sub-bacia do Médio Uruguai salienta-se o uso do solo destinado à suinocultura e à cultura de soja em rotação com milho e com outras culturas. Por fim, as Sub-bacias do Rio Ibicuí e do Rio Negro destacam-se pela irrigação de arroz, sendo que na primeira também há uso de solo dedicado para a pecuária bovina (BRASIL, 2006).

4.2. O MODELO MGB-IPH

No presente trabalho foi utilizado o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias, MGB-IPH, que foi desenvolvido por Collischonn (2001) com o intuito de simular os processos de transformação de chuva em vazão em grandes bacias hidrográficas (COLLISCHONN *et al.*, 2007). O modelo MGB-IPH inicialmente foi baseado no modelo LARSIM e VIC com modificações nos módulos de propagação de vazão, de evapotranspiração e de percolação (COLLISCHONN *et al.*, 2007; FAN, 2011, 2015). Assim, o MGB-IPH é um modelo hidrológico do tipo semi-distribuído, tendo sido desenvolvido inicialmente para discretizar a bacia em células quadradas de 10 km por 10 km em uma malha regular conectadas por canais de drenagem. No entanto, a versão atual do modelo possui discretização da bacia em unidades irregulares, definidas a partir de dados do relevo de um Modelo Digital de Elevação (MDE) ou de um Modelo Numérico do Terreno (MNT), denominadas de minibacias, as quais são pequenas subdivisões definidas nos pontos de confluência entre dois trechos de rios ou em pontos específicos de interesse, cuja finalidade é permitir a calibração do modelo hidrológico de forma diferenciada para cada região da bacia simulada (COLLISCHONN *et al.*, 2007, 2017; FAN, 2011, 2015; PAZ *et al.*, 2013; SIQUEIRA, 2015).

Ainda, a caracterização do tipo de solo e do uso de solo representada pelas minibacias vale-se da combinação de planos de informações, entre elas capacidade de armazenamento de água, porosidade do solo, condutividade hidráulica, cobertura vegetal, entre outros, sob a forma de Unidades de Resposta Hidrológica (URH), as quais representam áreas de comportamento hidrológico similar (FAN, 2011; PAZ *et al.*, 2013). Assim, segundo Fan (2011), as URHs são definidas através da superposição de mapas de tipo de solo e de mapas de uso da terra e vegetação, ou mapa de uso do solo. Uma vez que o MGB-IPH é um modelo conceitual com simplificação de alguns processos físicos no interior da bacia, existem

diversos parâmetros específicos que se dividem em fixos e em calibráveis. Assim, os parâmetros fixos possuem valores que podem ser medidos, relacionados à vegetação ou que interferem menos nos resultados, como por exemplo, índice de área foliar, resistência superficial - o qual representa a resistência ao fluxo de umidade do solo - altura da cobertura vegetal e albedo. Quanto aos parâmetros calibráveis, estes são alterados em cada uma das URHs, englobando fatores como condutividade hidráulica em meio saturado, capacidade de armazenamento do solo, tempo de retardo dos reservatórios; sendo que tais parâmetros são alterados a cada aplicação do modelo a fim de otimizar o ajuste entre os dados de vazão observados e calculados (COLLISCHONN, 2001).

Os processos físicos do MGB-IPH são compostos pelos módulos de balanço de água no solo, de evapotranspiração; escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula e o escoamento na rede drenagem; visto que os processos físicos podem ser representados através de fluxos verticais e horizontais (Figura 16) dentro de cada minibacia. Dessa maneira, o balanço de água no solo é contabilizado a partir da geração de escoamento superficial por excesso de capacidade de armazenamento, utilizando uma relação probabilística entre a umidade do solo e a fração de área de solo saturada (COLLISCHONN, 2001; MELLER, 2012). Já a interceptação que representa o processo de retenção de água proveniente da precipitação na vegetação, é modulada através de um reservatório de volume máximo dependente da cobertura vegetal e vale-se do índice de área foliar da vegetação para calcular esse volume máximo interceptado (COLLISCHONN, 2001; PAIVA, 2009). A evapotranspiração é calculada através do método de Penman-Monteith, o qual também é utilizado para determinar a evaporação potencial da lâmina interceptada, sendo que tal método utiliza dados meteorológicos e parâmetros relativos a características aerodinâmicas e aos estômatos das plantas para calcular a evapotranspiração (COLLISCHONN, 2001; PAIVA 2009). A geração de escoamento subterrâneo é obtida através de relação linear, enquanto que o escoamento sub-superficial é calculado através de relações não-lineares, ambos de acordo com o armazenamento de água no solo (COLLISCHONN, 2001; SIQUEIRA, 2015).

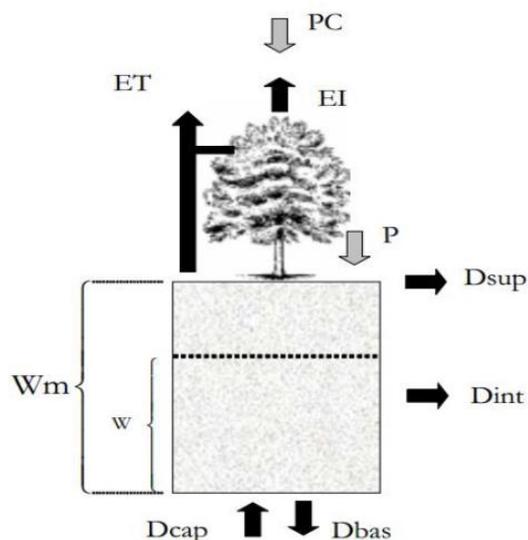


Figura 16 - Diagrama esquemático dos processos físicos no MGB-IPH, representados pelos fluxos horizontais e verticais (SIQUEIRA, 2015).

Os processos hidrológicos horizontais que incluem a propagação de vazão nas minibacias e nas redes de drenagem representam o escoamento da água através do solo, do aquífero até a rede de drenagem, havendo um retardo e amortecimento desse escoamento dentro do interior da minibacia. Posto isto, o escoamento nas minibacias é representado pela propagação desses volumes de água até o rio principal da respectiva minibacia utilizando três reservatórios lineares simples (MELLER, 2012; PAIVA, 2009). Já a propagação de vazão nos trechos de rio é realizada utilizando o método de Muskingum Cunge, que se baseia na equação da continuidade e na equação de armazenamento, relacionando a vazão de entrada e de saída do trecho conforme descrito por Tucci (2005), utilizando os dados de comprimento, de declividade, de rugosidade e da largura média da seção do rio como parâmetros de entrada (COLLISCHONN, 2001; PAIVA, 2009; SIQUEIRA, 2015). Atualmente, o modelo possui uma interface gráfica acoplada ao software MapWindow GIS® (AMES, 2006), que permite a preparação, inserção de dados, simulação e visualização dos resultados em uma plataforma de livre acesso e amigável ao usuário (PONTES *et al.*, 2017). Nota-se que informações mais detalhadas sobre o funcionamento do modelo MGB-IPH podem ser encontradas em Collischonn (2001), Fan (2011, 2015), Fan e Collischonn (2014), Meller (2012), Paiva (2009).

As aplicações do MGB-IPH foram inicialmente desenvolvidas para bacias brasileiras, mas, atualmente, o modelo tem sido testado e utilizado em outras bacias da América do Sul, desde bacias de clima subtropical no sul do Brasil e Uruguai, a bacias situadas na região do

Pantanal entre Bolívia e Brasil, na bacia do rio Ji-Paraná em Rondônia (PAZ *et al.*, 2013), na bacia do Rio São Francisco (da SILVA *et al.*, 2007), na bacia Amazônica (PAIVA, 2009). Esse modelo tem sido utilizado não somente para a previsão de vazão (FAN *et al.*, 2014a, 2015a, 2015b; MELLER, 2012; SIQUEIRA, 2015), mas também para avaliar os efeitos e os impactos das mudanças de uso da terra no regime hidrológico, como por exemplo, da bacia hidrográfica do rio Paraná (BAYER, 2014), na previsão hidroclimática no Alto Paraguai (ALLASIA PICCILLI, 2007), bem como na análise de sensibilidade de evapotranspiração anual, como por exemplo, na bacia hidrográfica do rio Ji-Paraná (PAZ *et al.*, 2013). Os exemplos de uso do modelo MGB-IPH para previsão foram apresentados e comentados de maneira mais detalhada no item 3.2.2, sendo que os estudos já realizados na bacia hidrográfica do rio Uruguai foram abordados no item 3.3.

4.3. DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS

4.3.1. DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Utilizaram-se 158 estações pluviométricas da CPRM para inserir os dados de entrada no modelo MGB-IPH em intervalo de tempo diário. Os dados obtidos foram disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) através do HidroWeb (BRASIL, 2013). Todas as estações utilizadas estão inseridas dentro da bacia do rio Uruguai em território brasileiro. As estações utilizadas neste trabalho podem ser visualizadas no APÊNDICE F e no ANEXO A deste trabalho; enquanto que a Figura 17 apresenta as estações pluviométricas aqui consideradas.

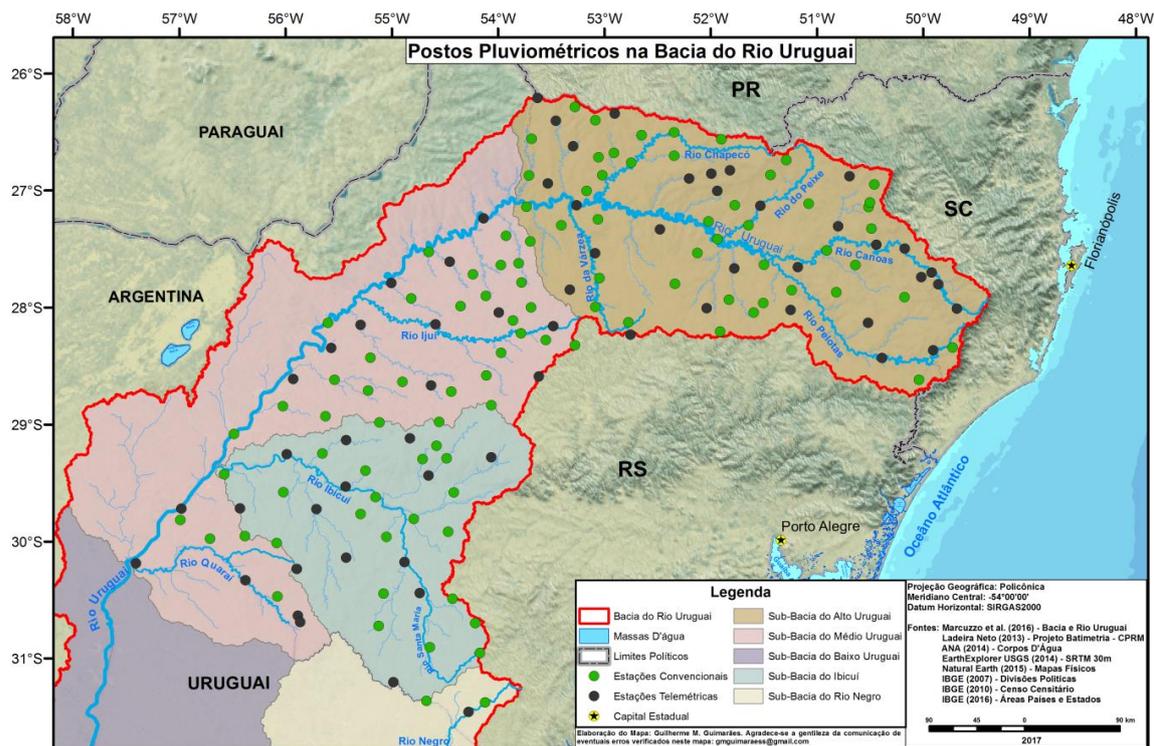


Figura 17 - Postos pluviométricos utilizados na modelagem hidrológica.

4.3.2. DADOS FLUVIOMÉTRICOS

Utilizaram-se 78 estações fluviométricas da rede de monitoramento da CPRM com a finalidade de comparar os hidrogramas gerados pelo modelo MGB-IPH. Os dados obtidos foram disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) através do HidroWeb (BRASIL, 2013). Podem-se visualizar as estações utilizadas no ANEXO B desse trabalho e na Figura 18.

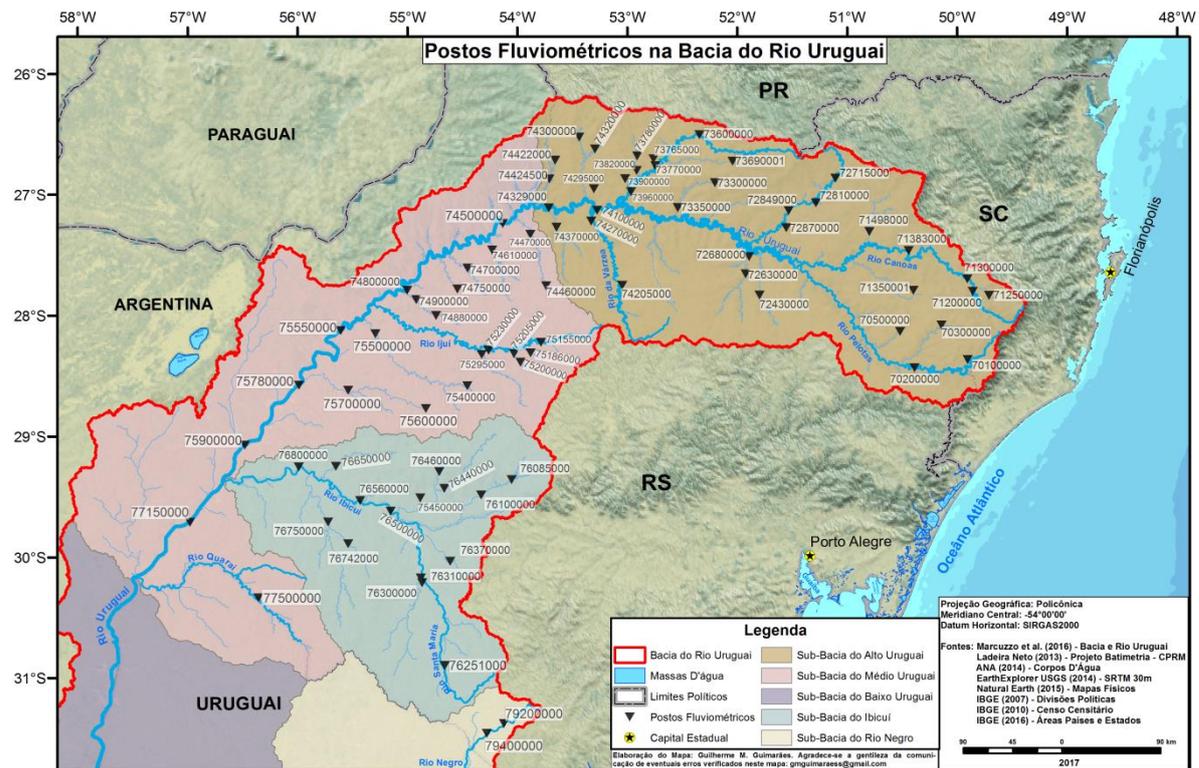


Figura 18 - Postos fluviométricos utilizados na modelagem hidrológica.

4.3.3. DADOS CLIMATOLÓGICOS

As variáveis climáticas na bacia do Uruguai foram obtidas a partir das Normais Climatológicas determinadas no ano de 1992 pelo INMET, a partir da análise referente ao período de 1961 a 1990 para 209 estações, que posteriormente foi ampliado e revisado em 2009 (BRASIL, 2009). Dessas, selecionaram-se 35 estações meteorológicas para utilização na bacia do rio Uruguai, as quais estão apresentadas no ANEXO C e na Figura 19. Entre os parâmetros climáticos utilizados nos processos físicos do MGB-IPH através das Normais Climatológicas estão: temperatura média mensal; humidade; insolação; velocidade do vento; pressão atmosférica;

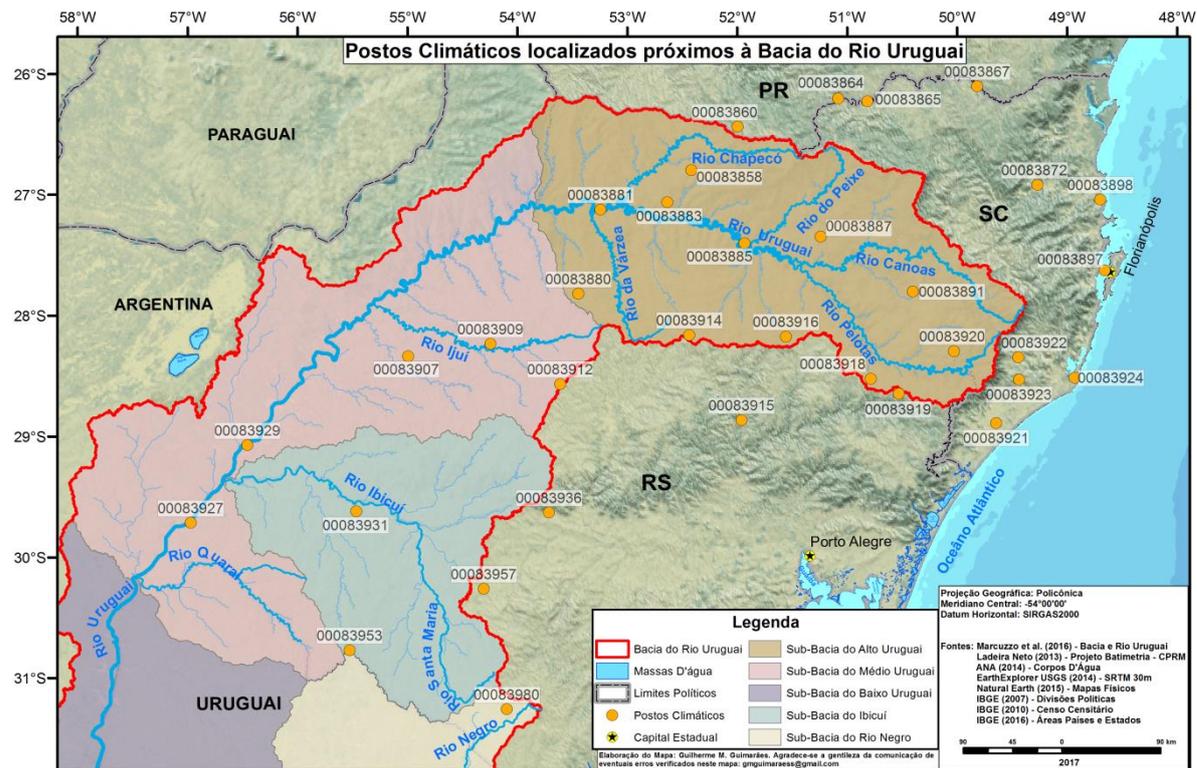


Figura 19 - Postos climáticos utilizados na modelagem hidrológica.

4.4. PRÉ-PROCESSAMENTO DO MGB-IPH

4.4.1. DADOS ESPACIAIS

Para utilização do MGB-IPH (FAN e COLLISCHONN, 2014) é necessário realizar um pré-processamento com aplicação de geoprocessamento para a preparação dos seus dados de entrada. Para tal, utilizou-se o plugin do MapWindow GIS® (AMES, 2006) IPH-Hydro Tools (SIQUEIRA *et al.*, 2016b) a fim de corrigir eventuais falhas do MDE, gerar os arquivos de direção de fluxo, de área acumulada, da rede de drenagem, de sub-bacias, de mini-bacias. As sub-bacias utilizadas são as apresentadas no item 4.1.1, sendo elas: Sub-bacia do Alto Uruguai; Sub-bacia do Médio Uruguai; Sub-bacia do Ibicuí; Sub-bacia do Baixo Uruguai; Sub-bacia do Rio Negro. Nesta etapa utilizou-se o MDE proveniente do SRTM v.4.1 (JARVIS *et al.*, 2008) com resolução espacial de 90 m. Além disso, também realizou-se uma consistência de dados geográficos, corrigindo eventuais erros de coordenadas geográficas de estações hidrométricas.

4.4.2. DEFINIÇÃO DAS URHS

Como descrito anteriormente, as URHs são áreas que possuem comportamento hidrológico semelhante. A definição das URHs constitui uma etapa importante na construção dos modelos hidrológicos no MGB-IPH, pois os parâmetros de calibração do modelo estão associados às URHs. Com o intuito de atender às necessidades hidrológicas em modelos e reduzir o tempo de preparação dos dados de entrada, Fan *et al.* (2015c) publicaram um mapa de URHs para toda a América do Sul, possibilitando a sua aplicação direta em modelagem hidrológica de grandes bacias hidrográficas. Logo, optou-se por utilizar este mapa já publicado, recortando-se as informações para a bacia hidrográfica do rio Uruguai. Assim, utilizaram-se nove classes distintas: (1) Floresta em solo raso; (2) Floresta em solo profundo; (3) Agricultura em solo raso; (4) Agricultura em solo profundo; (5) Campo em solo raso; (6) Campo em solo profundo; (7) Várzeas inundáveis; (8) Áreas Semi-impermeáveis; (9) Água. A representação espacial das URHs na bacia do rio Uruguai está apresentada na Figura 20, o que permite visualizar que há maior representação espacial de Campos em solo raso, de Campos em solo profundo e de Agricultura em solo raso com aproximadamente 26,71%, 26,27% e 13,57%, respectivamente. Além disso, percebe-se que há um maior detalhamento das classes em território nacional, devido à disponibilidade de dados espaciais em território brasileiro na escala de 1:1.000.000, enquanto que em território internacional a escala utilizada é de 1:5.000.000 (FAN *et al.*, 2015c).

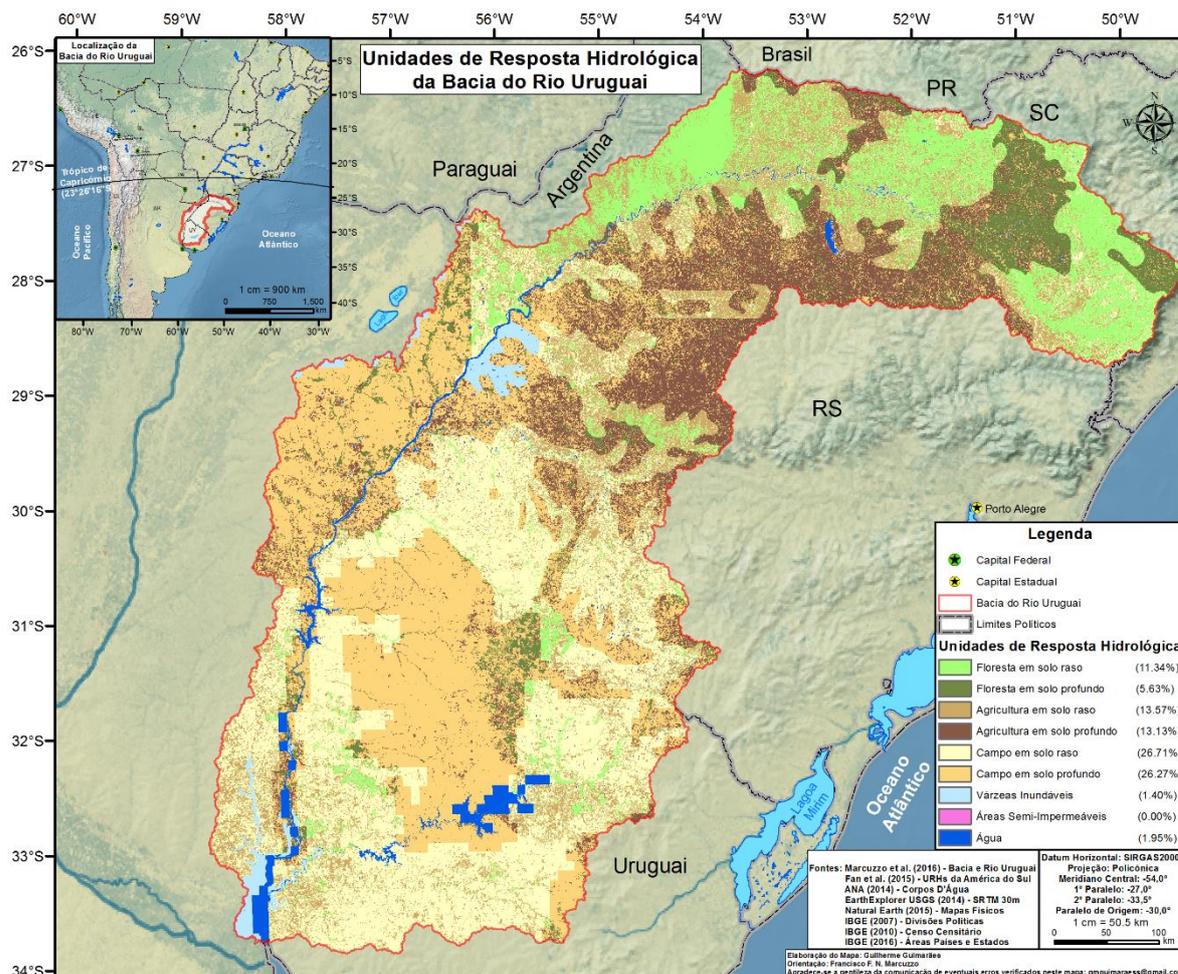


Figura 20 - Caracterização das URHs da Bacia do Rio Uruguai

4.4.3. DISCRETIZAÇÃO DO MODELO E ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Após a geração das mini-bacias e definição das URHs, acoplou-se as informações das classes hidrológicas às mini-bacias geradas, sendo que através das etapas de geoprocessamento foram calculadas para cada mini-bacia características físicas como comprimento, declividade e área de drenagem. Neste projeto, utilizou-se o valor de 5.000 células como limiar mínimo de área de drenagem para definição dos cursos de água para a discretização do modelo, gerando um total de 5211 minibacias (Figura 21). Ademais, a espacialização dos dados pluviométricos para os centroides das minibacias valeu-se da interpolação pelo método do inverso da distância ao quadrado, ferramenta que também está disponível na interface do modelo MGB-IPH.

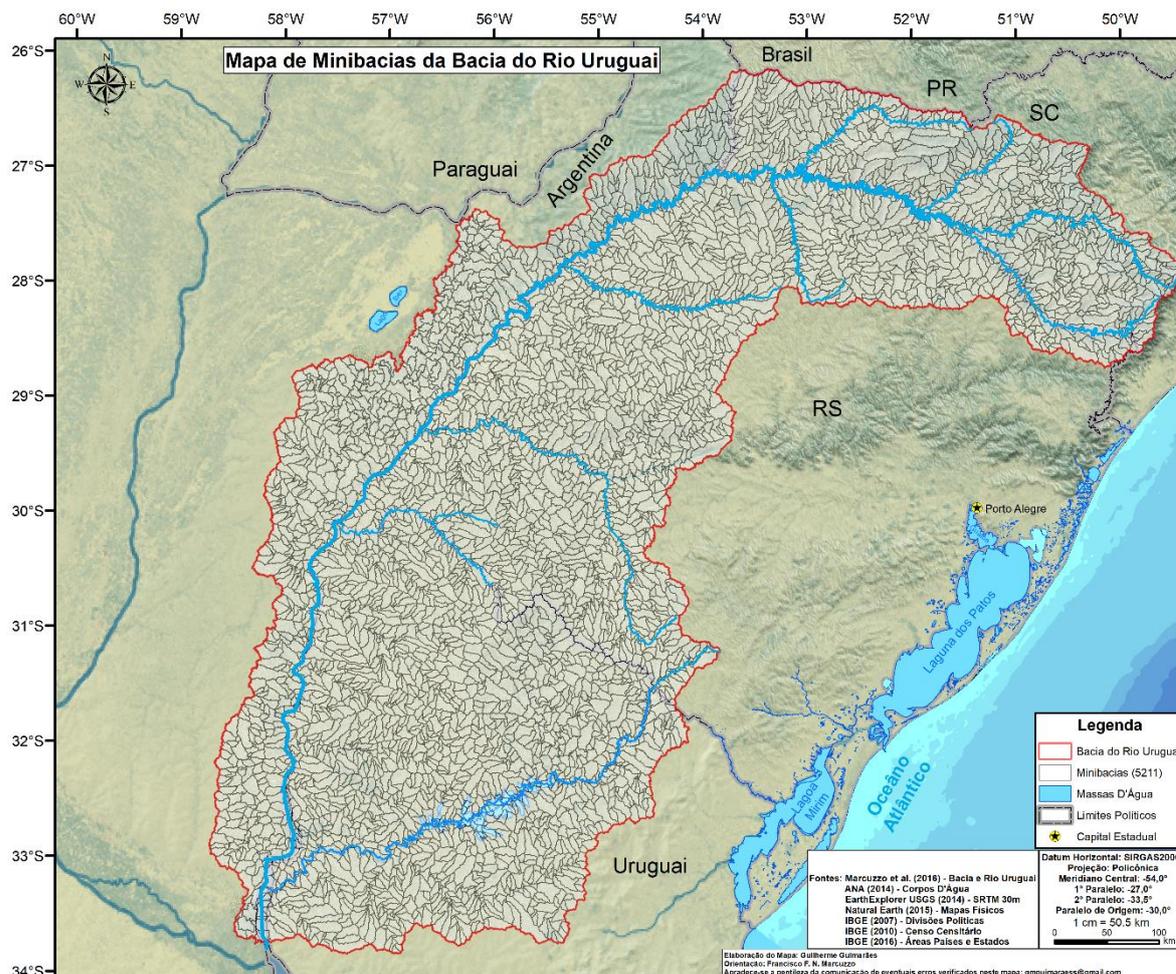


Figura 21 - Mapa das minibacias geradas.

4.5. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO

Uma vez que o sucesso da modelagem hidrológica depende da quantificação dos valores dos parâmetros de entrada que melhor se ajustem ao modelo de acordo com às características da bacia hidrográfica e às equações do modelo, torna-se imprescindível a realização da calibração desses parâmetros a fim de se obter resultados mais satisfatórios possíveis para a modelagem (GUPTA *et al.* 1999). Assim, o processo de calibração consiste em variar os valores dos parâmetros calibráveis do modelo e comparar os resultados obtidos com os observados, verificando se houve ganho na performance. Tal processo pode ser realizado tanto de forma manual quanto automática no MGB-IPH, porém, enquanto o processo manual requer uma certa experiência do operador e tende a ser muito trabalhoso, o processo automático do MGB-IPH utiliza um algoritmo evolucionário, o qual possui um mecanismo de adaptação contínua visando a otimização global do sistema, análogo à genética e ao processo evolutivo de plantas em um sistema natural (YAO, YANG, 2009). Em contrapartida, o processo automático requer uma aproximação inicial dos parâmetros de

entrada de moderada à boa, visto que é um processo em que o operador define o número máximo de populações que será analisado e dependendo do cenário inicial, o valor final do parâmetro pode não ter convergido para o resultado esperado. Além disso, a calibração automática é um processo demorado quando está processando uma grande quantidade de dados, como por exemplo para um grande período de dados e grandes bacias hidrográficas. Conseqüentemente, neste trabalho optou-se por inicialmente realizar a calibração manual do modelo para posteriormente utilizar esses valores como dados de entrada na calibração automática. Além disso, como a calibração automática do modelo calcula uma média do desempenho dos postos, esta foi realizada em etapas, realizando uma série de calibrações automáticas das sub-bacias de montante para jusante, ou seja, realizou-se as calibrações automáticas das sub-bacias do Alto Uruguai e do Ibicuí para, posteriormente, efetuar a calibração automática da Sub-bacia do Médio Uruguai. Ainda, destaca-se que nem todas as 78 estações fluviométricas foram utilizadas na calibração automática, a fim de otimizar o desempenho do modelo em pontos de maior interesse, como por exemplo, para as estações de Iraí, Porto Lucena, Garruchos, São Borja, Itaqui e Uruguaiana.

A calibração do modelo MGB-IPH se dá através da modificação dos parâmetros de solo de cada sub-bacia, os quais também estão associados às URHs, conforme apresentado na Figura 22. Entre alguns parâmetros calibráveis estão o “ W_m ”, o qual representa a capacidade de armazenamento do solo; o parâmetro “ b ” que correlaciona o armazenamento e saturação, bastante útil para ajustar os picos de vazão durante pequenas cheias; o parâmetro “ K_{bas} ” que controla a vazão durante estiagens; o parâmetro “ K_{int} ” o qual regula a quantidade de água da camada de solo que é disposta sob a superfície; os parâmetros “ CS ” e “ CI ” que representam o espalhamento nas células de superfície e de sub-superfície, respectivamente.

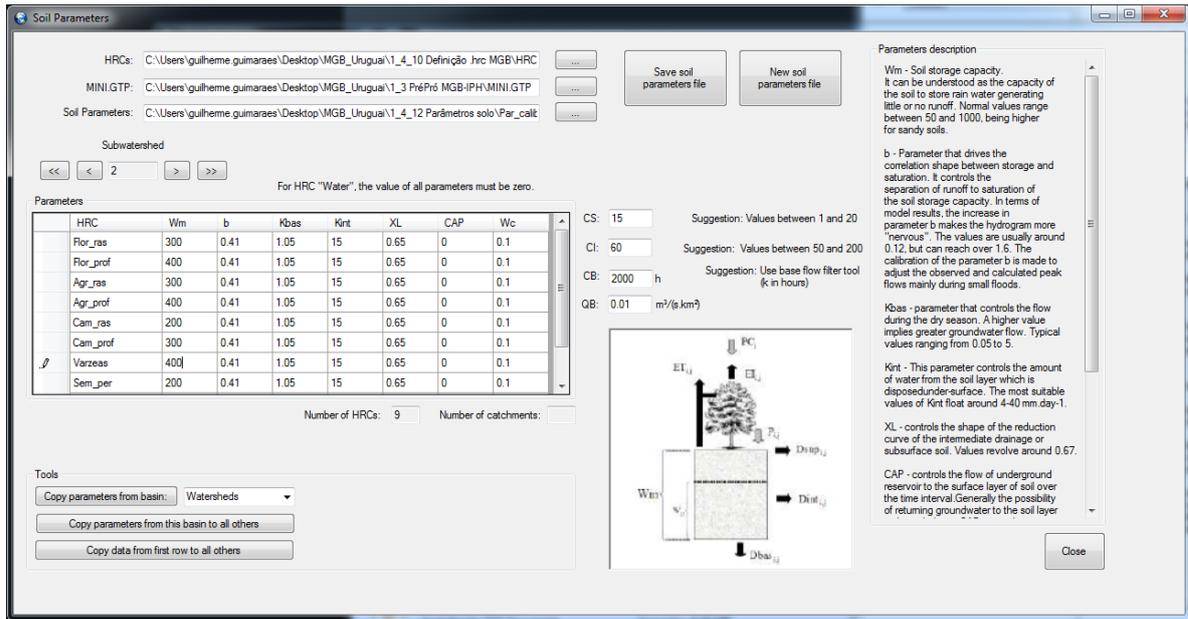


Figura 22 - Interface dos parâmetros calibráveis do MGB-IPH.

Para a análise de verificação do desempenho do modelo utilizaram-se três métricas distintas as quais estão apresentadas e detalhadas a seguir. O Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) apresentado na Equação 1, determina a magnitude relativa da variância residual (“ruído”) comparada à variância dos dados medidos (“informação”). Assim, o índice NSE pode variar entre $-\infty$ a 1, sendo que, quanto mais próximo de 1 melhor é o ajuste das vazões estimadas em relação às observadas. Por outro lado, valores negativos desse índice indicam que a média dos dados observados prediz resultados melhores (FAN *et al.*, 2017; MORIASI *et al.* 2007).

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs}(t) - Q_{calc}(t))^2}{\sum(Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}(t)})^2} \quad (1)$$

Onde, NSE é o índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe; $Q_{obs}(t)$ é a vazão observada no tempo t [m^3/s]; $Q_{calc}(t)$ é a vazão calculada no tempo t [m^3/s]; $\overline{Q_{obs}(t)}$ é a média das vazões observadas [m^3/s]; Σ é o somatório para todos os intervalos de tempo.

Porém, devido à diferença da ordem de grandeza entre vazões mínimas e máximas que ocorre naturalmente, pode haver supressão dos erros associados às vazões de estiagem pelo índice de eficiência de Nash-Sutcliffe. Por conseguinte, uma métrica que é menos sensível aos valores extremos devido à diferença dos quadrados é o Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe Modificado (NSE_{LOG}), o qual é indicado para avaliar o desempenho do modelo ao que se refere às vazões mínimas, podendo ser calculado a partir da aplicação do

logaritmo nas vazões do Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe, exemplificado na Equação 2 abaixo (MORIASI *et al.* 2007; SIQUEIRA, 2015).

$$NSE_{LOG} = 1 - \frac{\sum[\log(Q_{obs}(t)) - \log(Q_{calc}(t))]^2}{\sum[\log(Q_{obs}(t)) - \log(\overline{Q_{obs}(t)})]^2} \quad (2)$$

A última métrica utilizada visa avaliar as perdas de água por evapotranspiração que, segundo Collischonn (2001), pode ser feita através da diferença entre os volumes observados e calculados, conforme apresentado na Equação 3. Assim, valores negativos representam que o modelo está subestimando a vazão observada, enquanto que para valores positivos o modelo está superestimando a vazão observada.

$$\Delta V = \frac{\sum(Q_{cat}(t)) - \sum(Q_{obs}(t))}{\sum(Q_{obs}(t))} \times 100 \quad (3)$$

Em que, ΔV é o erro em [%].

Posteriormente à calibração, realizou-se o processo de validação do modelo, que consoante Refsgaard (1997) é definido como o processo de demonstração que, para uma determinada bacia hidrográfica, o modelo é capaz de fornecer previsões suficientemente precisas. Isso implica na aplicação do modelo utilizando os mesmos parâmetros ajustados durante o processo de calibração para um período diferente do utilizado na calibração do modelo. Desta forma, o modelo hidrológico é dito válido se a acurácia e a capacidade de previsão no período de validação estejam dentro de limites aceitáveis. Para a calibração do MGB-IPH na bacia foi selecionado o período entre janeiro de 1980 e abril de 2017, enquanto que para a validação do MGB-IPH na bacia foram selecionados os meses de maio a julho de 2017

4.6. ANÁLISE DE PREVISIBILIDADE

A previsibilidade é a estimativa da degradação da precisão de uma dada previsão ao longo dos horizontes de previsão, ou seja, é a medida de até qual horizonte de previsão conseguimos fornecer informações e conhecimento sobre eventos que estão por acontecer. Fisicamente, o conceito de previsibilidade está associado ao caos determinístico em que para determinados sistemas há uma forte dependência de suas condições iniciais e de suas condições de contorno e, conseqüentemente, o conhecimento do estado do sistema durante um tempo arbitrariamente longo não permite predizer, de maneira imediata, sua evolução

posterior (CARLI, 2011). Assim sendo, essa incerteza quanto às condições iniciais limita a previsibilidade do sistema. Tal limitação da previsibilidade em sistemas hidrológicos se deve ao fato da não linearidade dos processos hidrológicos, aliada à incerteza da estrutura de modelos hidrológicos (BEVEN, 1989), dos parâmetros utilizados (WOOD, 1976), e das condições iniciais do sistema (ZEHE e BLÖSCHL, 2004; BLÖSCHL e ZEHE, 2005). Enquanto que uma análise mais aprofundada acerca de questões metodológicas sobre previsibilidade como, assimilação de dados, previsão por ensemble e assuntos relacionados à melhoria da capacidade de previsão hidrológica podem ser realizada através dos dados encontrados no relatório publicado pela National Research Council (2002). Portanto, o objetivo desse capítulo é fornecer a metodologia utilizada para quantificar a previsibilidade do modelo MGB-IPH na Bacia do Rio Uruguai.

Dessa maneira, para a análise de previsibilidade do modelo utilizaram-se as mesmas métricas apresentadas no item 4.5, além do cálculo de erro relativo em relação ao pico de vazão, exemplificado na Equação 4. Considerou-se também a avaliação do desempenho do modelo quanto às vazões máximas durante a análise dos eventos.

$$E_{RP_d} = \left(\frac{Q_{PE_d} - Q_{PS}}{Q_{PS}} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

Em que, E_{RP_d} é o erro relativo em relação ao pico de vazão para um determinado tempo d de antecedência [%]; Q_{PE_d} é a vazão de pico do evento prevista com um tempo d de antecedência [m^3/s]; Q_{PS} é a vazão de pico do evento analisado [m^3/s].

Decidiu-se realizar a análise de previsibilidade para sete estações fluviométricas, conforme apresentado na Figura 23. Dessas estações, seis delas localizam-se nos municípios que inicialmente serão beneficiados pelo sistema de alerta hidrológico da CPRM. Ainda, foi avaliada a previsibilidade da estação 74100000 localizada no município de Iraí, o qual também é um município com inúmeras ocorrências de enchentes, além de ser uma estação localizada na Sub-bacia do Alto Uruguai, enquanto que outras cinco estações se localizam na Sub-bacia do Médio Uruguai e outra se localiza na Sub-bacia do Ibicuí.

Assim, para as simulações hidrológicas zerou-se os dados de precipitação na bacia de acordo com o tempo de antecedência em relação ao pico de vazão analisado. Exemplificando para a Figura 24, e para um tempo de antecedência de um dia em relação ao pico de vazão, a simulação foi realizada com dados de precipitação até o dia 01/06/2017; para um tempo de antecedência de dois dias, a simulação foi realizada com dados de precipitação até o dia 31/05/2017; e, assim, sucessivamente.

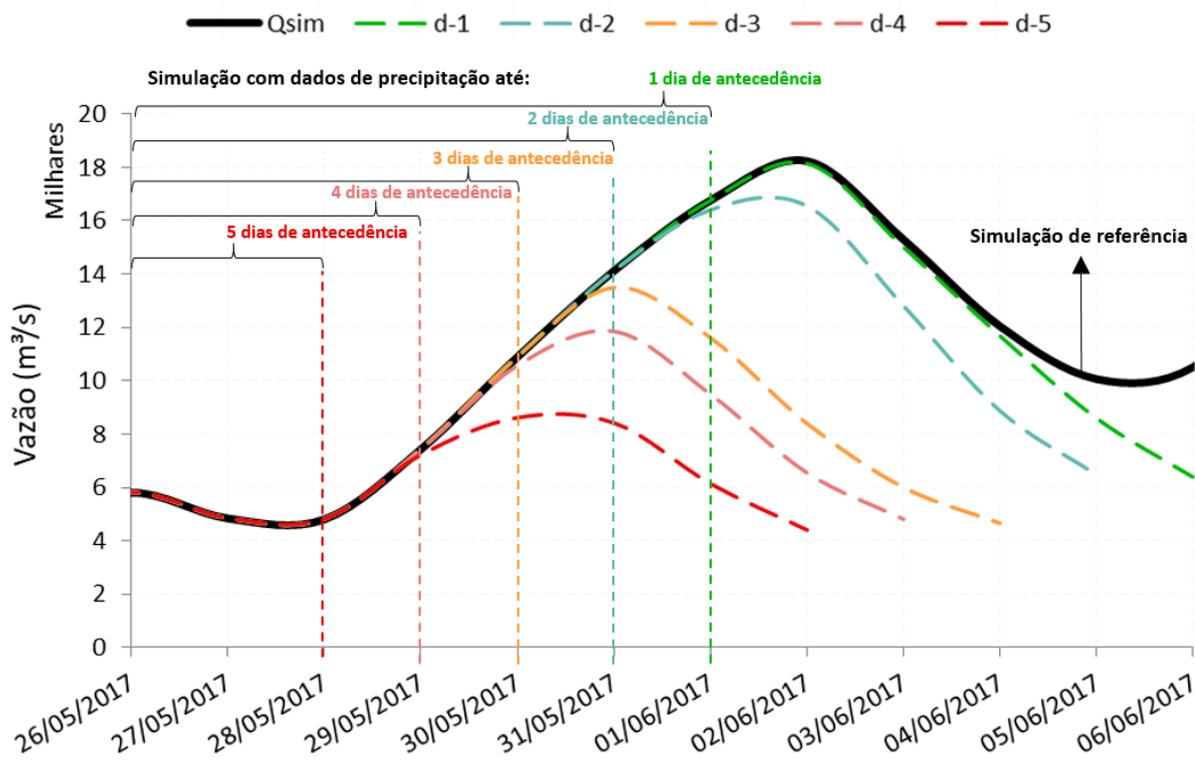


Figura 24 - Metodologia utilizada para análise de previsibilidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MGB-IPH

5.1.1. CALIBRAÇÃO

Para a calibração do MGB-IPH na bacia foi selecionado o período entre janeiro de 1980 e abril de 2017, cuja escolha do longo período se deu em função da elevada disponibilidade de dados, além da ocorrência de grandes eventos de cheia registrados, como o de julho de 1983, o qual foi o maior evento já registrado nessa bacia.

Quanto às vazões observadas neste período, os picos mais elevados ocorreram nos anos de 1983, 1984, 1990, 1992, 1997, 2002, 2005, 2014, 2015. Para as estações mais a montante percebe-se que houve de maneira geral um efeito de atenuação e atraso nos picos de cheia como para a estação 74100000 de Iraí como se observa na Figura 25. Já para os postos fluviométricos localizados na Sub-bacia do Médio Uruguai há um pequeno efeito de antecipação na propagação da onda de cheia, bem como um efeito de atenuação para pequenas cheias e de superestimação do pico de vazão para grandes eventos de cheia, como se observa para as estações 75780000 de São Borja (Figura 26) e 77150000 de Uruguaiana (Figura 27). Por fim, para a estação 76800000 (Passo Mariano Pinto) localizada no município de Itaqui na Sub-bacia do Ibicuí o modelo hidrológico apresentou efeito de antecipação e de superestimação de vazão para eventos extremos (Figura 28). Destaca-se que os efeitos de atenuação e superestimação possivelmente podem estar associados à curva-chave dessas estações devido a possíveis erros de extrapolação da curva-chave. Assim, a realização de uma consistência de dados mais detalhada pode ajudar a detectar tais casos. Além disso, os efeitos encontrados nas estações mais à montante, como, por exemplo, a de Iraí, podem estar associados à presença dos reservatórios da região.

Em complemento às Figura 25 a Figura 28, o APÊNDICE B apresenta os hidrogramas obtidos durante a etapa de calibração do modelo.

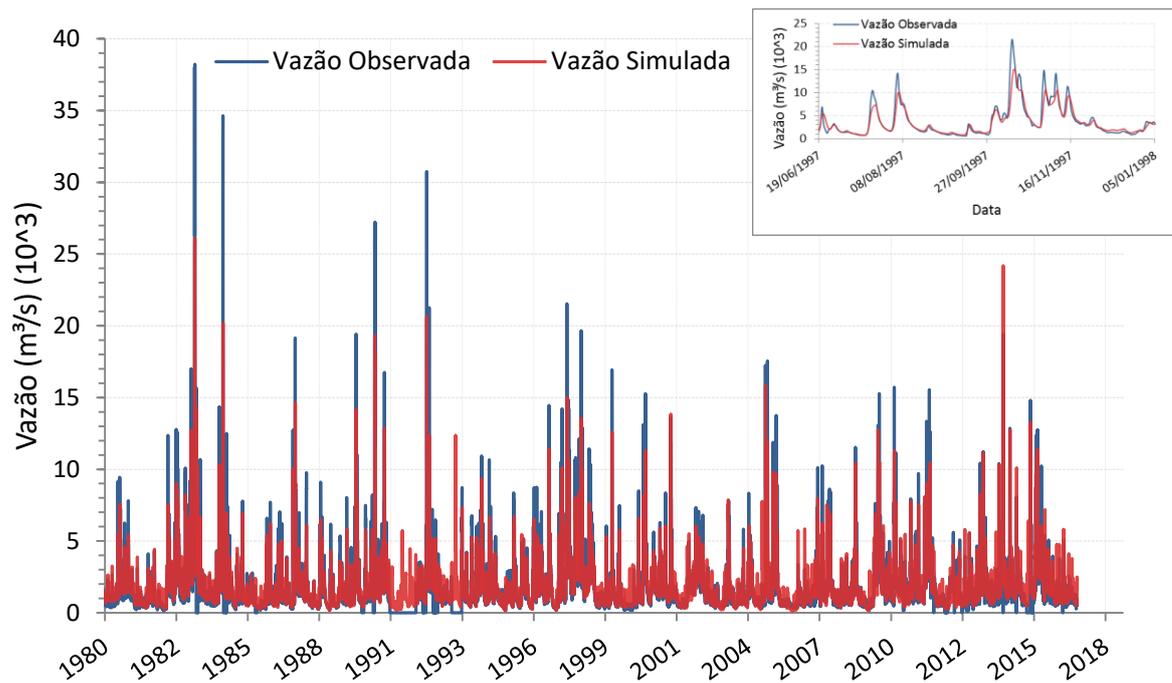


Figura 25 - Resultado da calibração para o posto de Iraí (74100000)

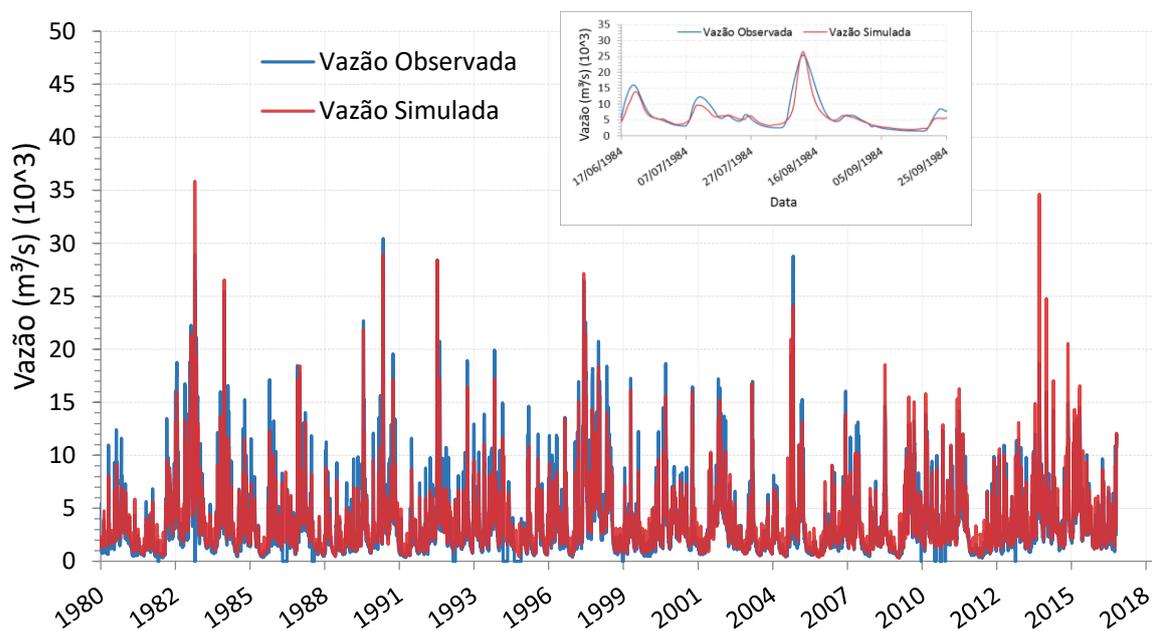


Figura 26 - Resultado da calibração para o posto de São Borja (75780000)

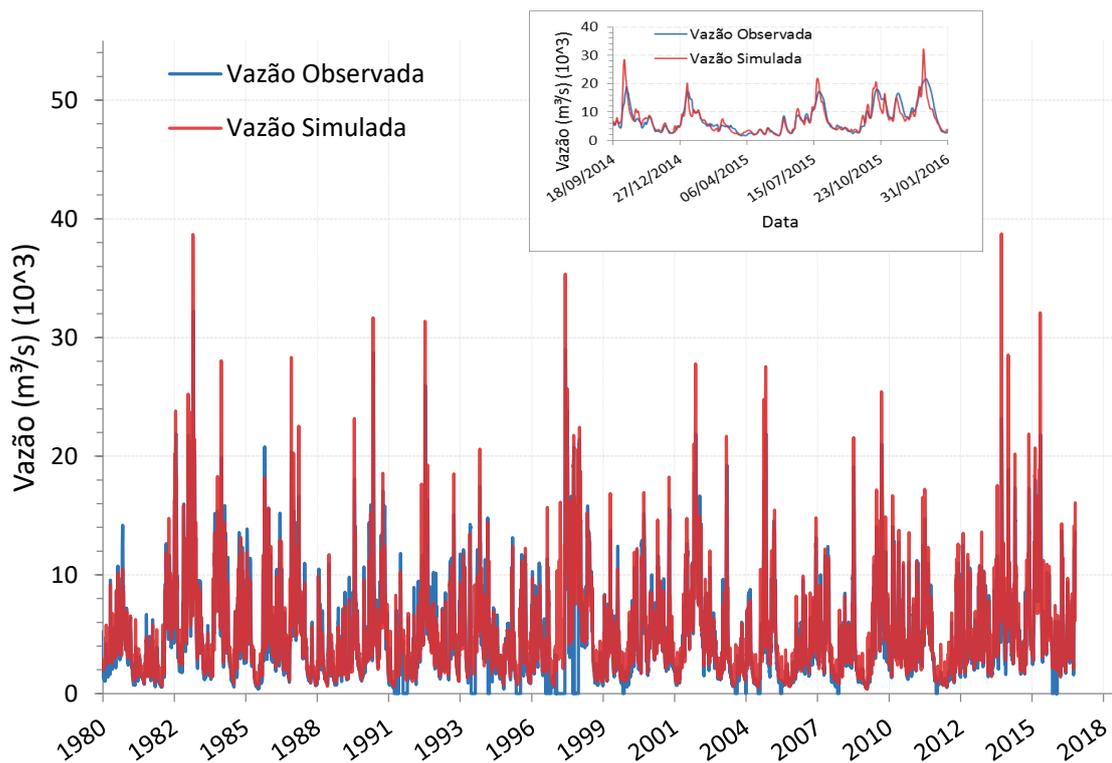


Figura 27 - Resultado da calibração para o posto de Urugaiana (77150000)

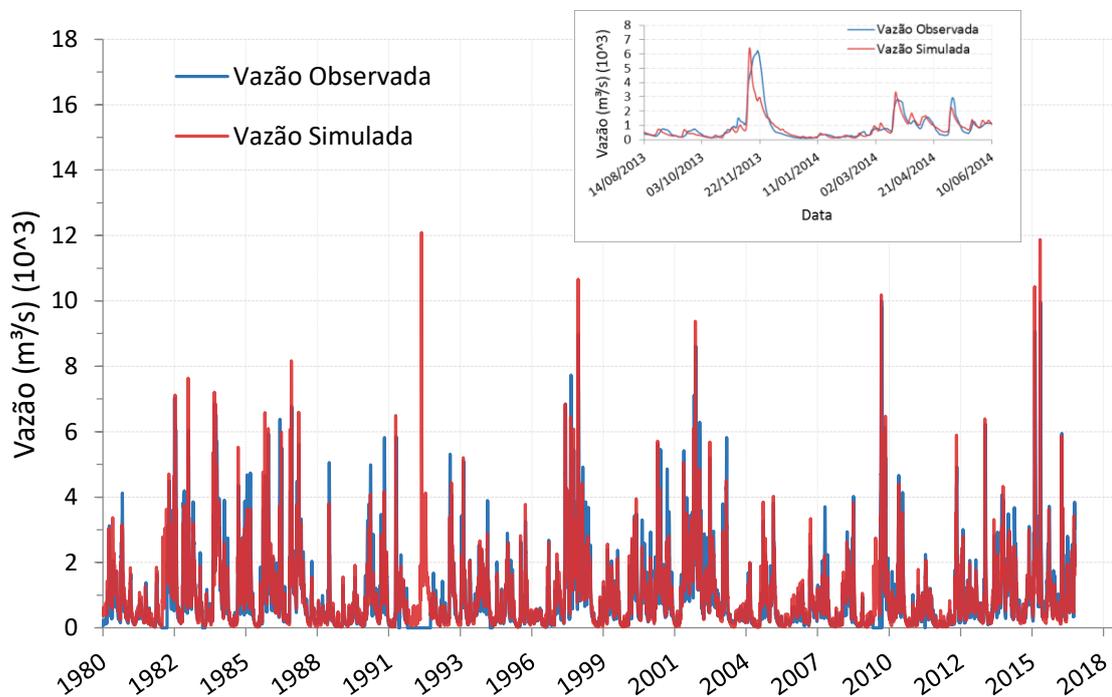


Figura 28 - Resultado da calibração para o posto Passo Mariano Pinto (76800000)

Salienta-se que tais efeitos encontrados em relação aos picos de vazão não foram passíveis de correção, mesmo utilizando a calibração automática do modelo hidrológico, o que pode estar associado ao método Muskingum Cunge Linear de propagação de vazões

utilizado no MGB-IPH. Apesar disso, os resultados finais da calibração podem ser considerados bons ao considerarmos os índices de eficiência NSE, NSE_{LOG} e ΔV (Tabela 3). Dessa maneira, todos os postos fluviométricos apresentaram valores acima de 0,73 e 0,75 para NSE e NSE_{LOG} , respectivamente. Além disso, os erros de volume associados entre os hidrogramas calculados e observados foram pouco substanciais, com valores variando entre aproximadamente -10% a 6% .

Tabela 3 - Índices de Eficiência do MGB-IPH para a bacia do Uruguai - período de calibração.

Código	Nome da Estação	NSE	NSE_{LOG}	ΔV [%]
74100000	Iraí	0,766	0,754	3,8
74800000	Porto Lucena	0,737	0,791	5,1
75550000	Garruchos	0,881	0,841	6,4
75780000	Passo São Borja	0,886	0,868	-0,4
75900000	Itaqui	0,743	0,803	5,4
76800000	Passo Mariano Pinto	0,797	0,886	-10,2
77150000	Uruguiana	0,862	0,883	-0,9

5.1.2. VALIDAÇÃO

Para a validação do MGB-IPH na bacia foram selecionados os meses de maio a julho de 2017, cuja escolha deste curto período se deu em função do longo período utilizado na calibração do modelo, além de haver a ocorrência de um evento extremo no final de maio e início de junho. Em relação às vazões calculadas, observa-se um efeito de retardo para as estações 74100000 (Iraí) e 74800000 (Porto Lucena), bem como uma superestimação de vazão para as estações 75550000 (Garruchos) (Figura 29), 75780000 (Passo São Borja) (Figura 30), 75900000 (Itaqui) e 77150000 (Uruguiana). Já as estações 74800000 (Porto Lucena) e 76800000 (Passo Mariano Pinto) tiveram suas vazões subestimadas pelo modelo hidrológico. Quanto aos resultados (Tabela 4), os índices de eficiência NSE e NSE_{LOG} ficaram abaixo daqueles calculados na calibração do modelo, especialmente em relação à estação Passo São Borja e à Itaqui. Ao que se concerne aos erros de volume, houve um aumento em relação ao período de calibração, exceto para as estações de Garruchos e de Itaqui, às quais apresentaram erros de volume de aproximadamente -1% e -2% , respectivamente. Essa grande variação nos índices de eficiência pode estar associada ao curto período utilizado, visto que o modelo hidrológico é dependente das condições iniciais do sistema e necessita de um período maior para ser ajustado, bem como a possíveis problemas

nos dados de algumas estações, como Garruchos (75550000) e São Borja (75780000) a partir do período de 2015, como evidenciado por Finck (2018).

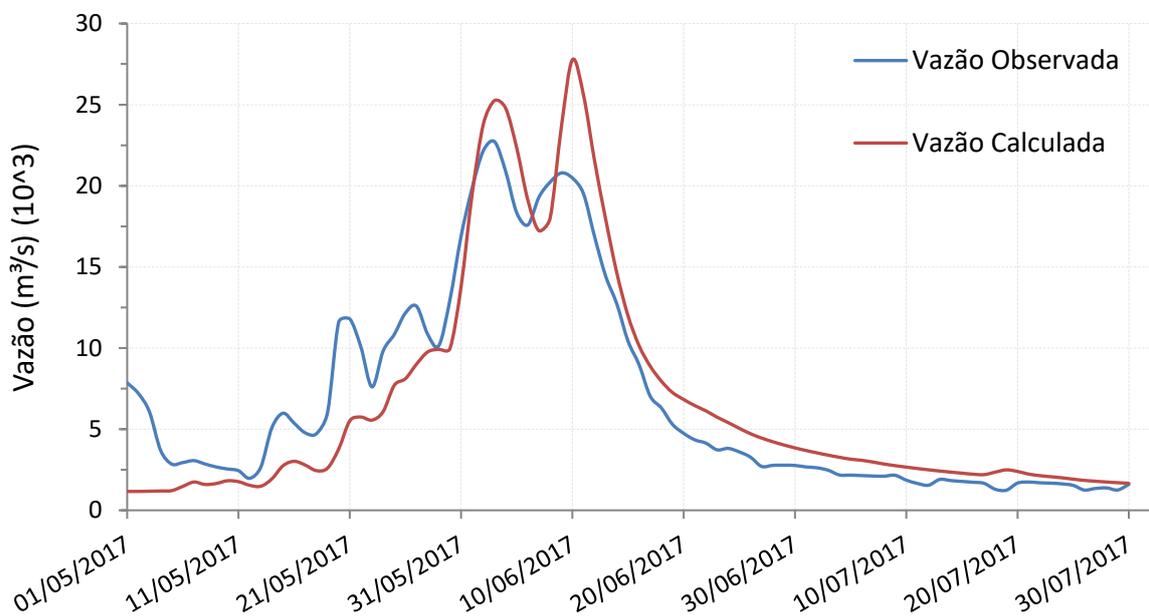


Figura 29 - Resultado da validação para o posto de Garruchos (75550000).

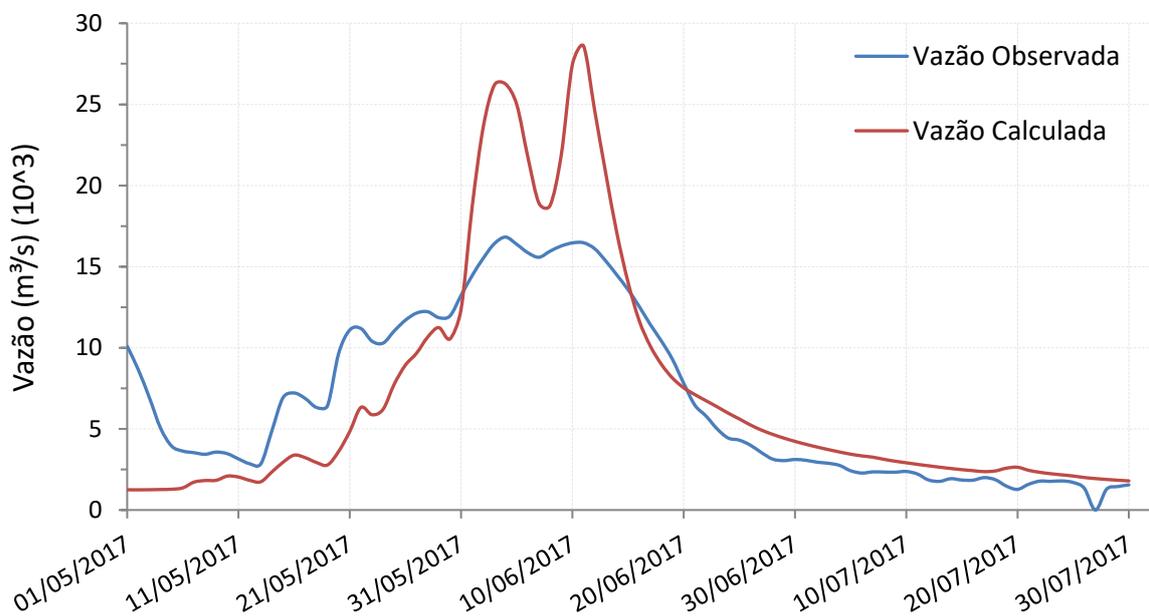


Figura 30 - Resultado da validação para o posto de São Borja (75780000).

Tabela 4 - Índices de Eficiência do MGB-IPH para a bacia do Uruguai - período de validação.

Código	Nome da Estação	NSE	NSE _{LOG}	ΔV [%]
74100000	Iraí	0,718	0,784	24,1
74800000	Porto Lucena	0,707	0,800	-18,0
75550000	Garruchos	0,828	0,649	-1,1
75780000	Passo São Borja	0,466	0,515	4,1
75900000	Itaqui	0,536	0,429	-2,3
76800000	Passo Mariano Pinto	0,638	0,623	-21,5
77150000	Uruguaiana	0,658	0,399	-10,7

Percebe-se, também, que para o posto de Itaqui (75900000) há uma falha nos dados de vazão para o dia 12 de junho (Figura 31). Isso ocorreu devido às regras de alimentação de dados do Hidro da Agência Nacional de Águas, pois para a estação de Itaqui a curva chave possui limite superior de cota para 1320 cm, sendo que a cota registrada no dia 12 de junho foi de 1321 cm. Dessa forma, a excedência de apenas um centímetro de cota foi o suficiente para os dados de vazão fornecidos pelo Hidro ficarem incompletos. Por conseguinte, para melhor visualização dos resultados, completou-se a falha extrapolando os dados da curva chave (Figura 32). Em complemento às Figura 29 a Figura 32, o APÊNDICE C apresenta os hidrogramas obtidos durante a etapa de validação do modelo.

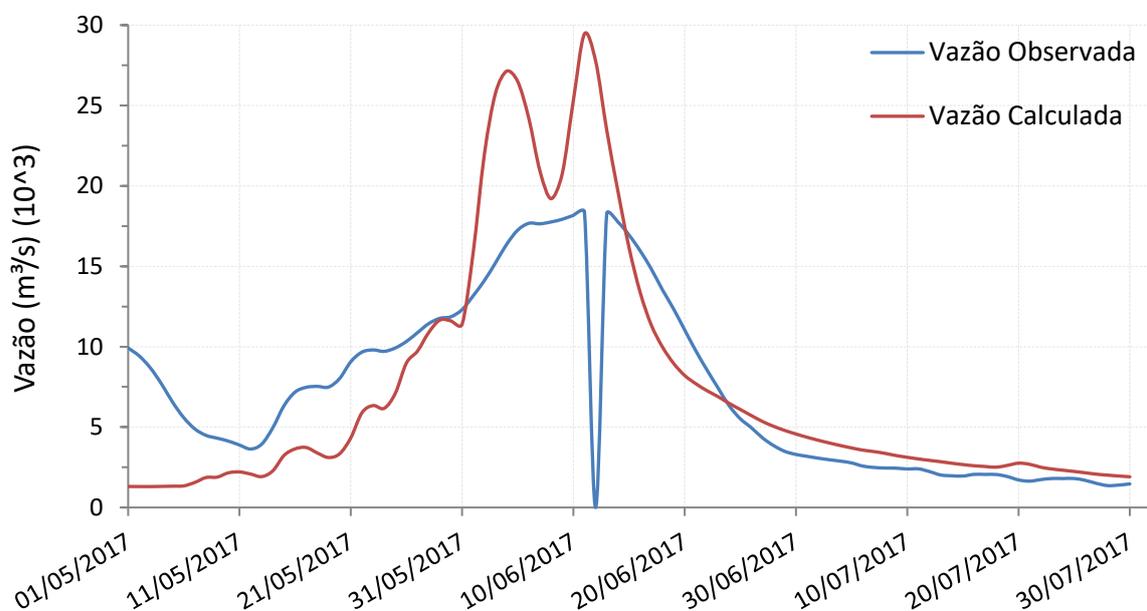


Figura 31 - Resultado da validação para o posto de Itaqui (75900000) sem preenchimento da falha.

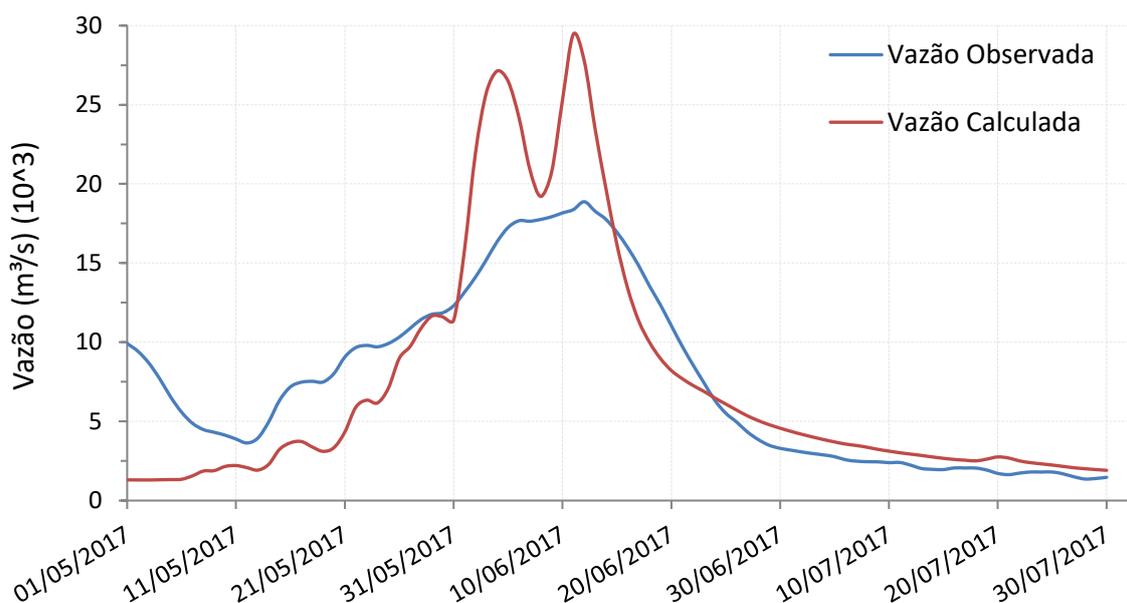


Figura 32 - Resultado da validação para o posto de Itaqui (75900000) com o preenchimento da falha.

5.2. TESTES ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE DE PREVISIBILIDADE

Para a análise de previsibilidade realizou-se a simulação da vazão com um horizonte de previsão de cinco dias para 15 eventos distintos. Os eventos de cheia avaliados ocorreram nas seguintes datas: junho de 2017; julho de 1983; dezembro de 2015; julho de 2014; novembro de 2009; junho de 2005; novembro de 2008; outubro de 2002; outubro de 1997; junho de 1992; junho de 1990; setembro de 1989; outubro de 2015; abril de 1998 e abril de 1992. Optou-se por realizar a análise com um número elevado de eventos a fim de considerar uma maior variabilidade nos padrões de chuva, permitindo verificar se a distribuição espacial da precipitação influencia na previsibilidade de cada estação.

Dessa maneira, avaliou-se a previsão com chuva zero com antecedência diária em relação ao pico de vazão simulado com uma chuva perfeita conforme descrito no item 4.6. A Figura 33 apresenta um exemplo dos hidrogramas obtidos durante essa análise, os quais podem ser visualizados integralmente para cada evento no APÊNDICE D. Na Figura 33, Qsim refere-se a vazão simulada com chuva perfeita, enquanto que d-1 representa a vazão simulada com a chuva zerada em um dia de antecedência em relação ao pico de vazão do evento, d-2 representa a vazão simulada com a chuva zerada em dois dias de antecedência em relação ao pico de vazão do evento, e assim sucessivamente. Para o caso apresentado pela Figura 33, o índice NSE e E_{RP} para um dia de antecedência é de 0,99 e -0.4% ,

respectivamente, enquanto que para dois dias de antecedência os mesmos índices decaem para 0,31 e $-9,1\%$, e para três dias de antecedência a previsão já fica inferior em relação aos índices NSE e E_{RP} de $-3,71$ e $-54,0\%$, respectivamente.

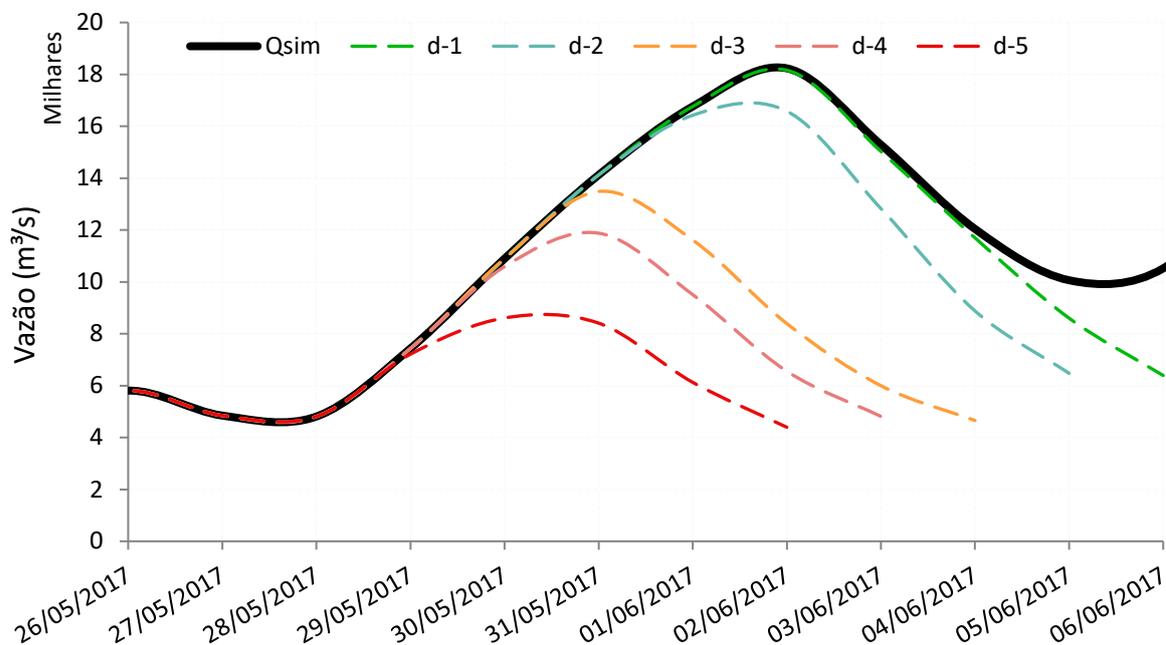


Figura 33 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para estação 74100000 (Iraí) no evento de junho de 2017.

Outro exemplo é apresentado na Figura 34, a qual analisa o evento histórico de julho de 1983 para o posto de Uruguaiana (77150000). Para esse evento percebe-se que os índices de desempenho possuem valores considerados excelentes para até quatro dias de antecedência possuindo um erro relativo ao pico de vazão de apenas $-0,8\%$, havendo um pequeno decréscimo na previsão com cinco dias de antecedência, com valor de $-6,4\%$ de erro relativo ao pico de vazão (Tabela 5).

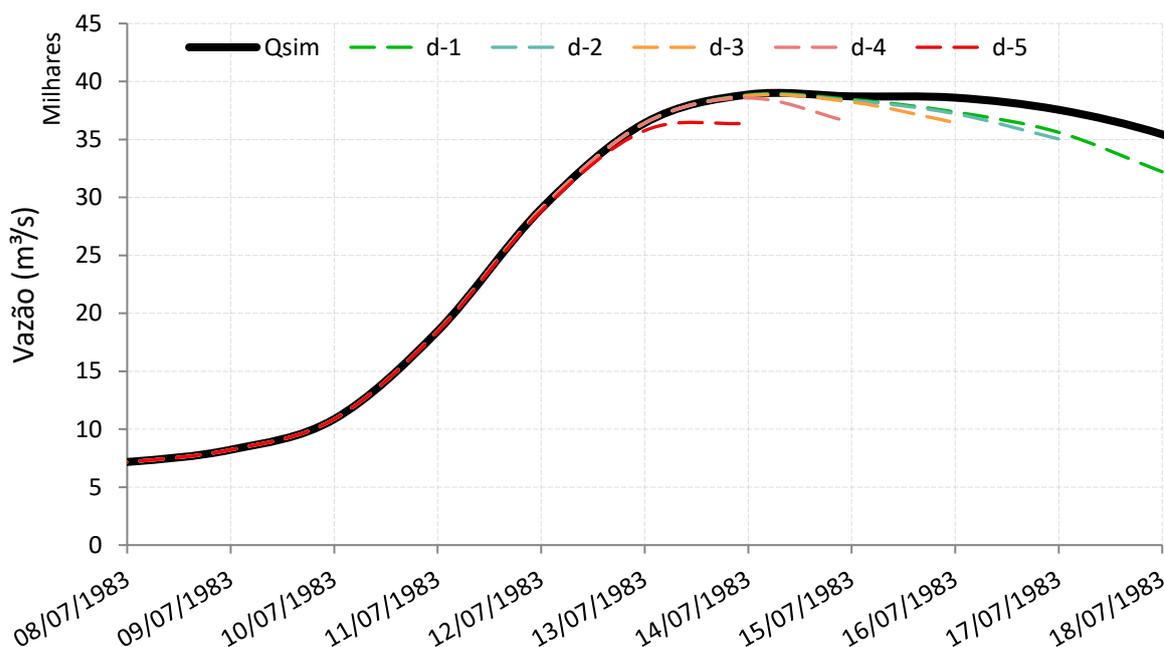


Figura 34 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para estação 77150000 (Uruguaiana) no evento de julho de 1983.

Tabela 5 – Índices de eficiência da análise de previsibilidade do posto de Uruguaiana (77150000) para o evento histórico de julho de 1983.

Tempo de Antecedência [dias]	NSE	NSE_{LOG}	ΔV [%]	ERP [%]
1	1,000	1,000	0,0	-0,1
2	1,000	1,000	-0,3	-0,2
3	0,979	0,983	-1,1	-0,3
4	0,902	0,921	-2,5	-0,8
5	0,724	0,793	-6,7	-6,4

A Tabela 6 apresenta os resultados gerais da análise de previsibilidade, na qual pode-se constatar que os índices de eficiência, fixados para um mesmo tempo de antecedência, apresentam uma melhora significativa na medida em que analisamos as estações localizadas mais à jusante. Por exemplo, para um tempo de antecedência de três dias, a estação de Iraí (74100000), localizada mais à montante, possui índice ERP de aproximadamente -41% , a estação de Porto Lucena (74800000), possui aproximadamente -18% , a de Itaquí (75900000), possui aproximadamente -3% e, por fim, a estação de Uruguaiana (77150000), localizada mais à jusante, possui índice ERP de aproximadamente -2% . Esse contexto, na íntegra, denota que a previsibilidade possui elevada influência da localização geográfica em

que cada estação está instalada, caracterizando-se por aumentar no sentido de montante para a jusante.

Tabela 6 - Resultado dos coeficientes da análise de previsibilidade.

Código	Nome da Estação	Tempo de Antecedência [dias]	NSE	NSE_{LOG}	ΔV [%]	ERP [%]
74100000	Iraí	1	0,98	0,98	-3,1	-0,4
		2	0,31	-0,07	-19,0	-16,7
		3	-2,53	-4,89	-38,0	-42,1
		4	-5,17	-9,60	-50,7	-70,4
		5	-6,51	-12,44	-59,6	-78,0
74800000	Porto Lucena	1	1,00	0,99	-1,3	-0,1
		2	0,86	0,81	-7,0	-2,2
		3	-0,46	-0,66	-20,8	-18,4
		4	-2,88	-3,19	-33,0	-42,9
		5	-4,93	-5,63	-40,8	-54,5
75550000	Garruchos	1	1,00	1,00	-0,5	0,0
		2	0,95	0,95	-3,9	-0,2
		3	0,26	0,13	-13,5	-7,6
		4	-1,77	-1,75	-25,5	-31,2
		5	-2,86	-4,03	-33,4	-47,5
75780000	Passo São Borja	1	1,00	1,00	-0,4	-0,1
		2	0,97	0,98	-2,7	-0,8
		3	0,45	0,49	-7,5	-8,0
		4	-1,62	-1,85	-18,1	-21,1
		5	-2,25	-4,11	-31,7	-43,4
75900000	Itaqui	1	1,00	1,00	-0,1	0,0
		2	1,00	0,99	-1,4	-0,4
		3	0,88	0,91	-4,5	-2,6
		4	-0,13	-0,30	-11,6	-13,4
		5	-0,85	-1,12	-22,9	-29,0
76800000	Passo Mariano Pinto	1	1,00	0,99	-1,7	0,0
		2	0,54	0,43	-13,0	-3,8
		3	-2,23	-3,92	-33,0	-48,1
		4	-7,23	-16,50	-40,5	-60,6
		5	-6,10	-14,98	-44,4	-66,8
77150000	Uruguaiana	1	1,00	1,00	-0,1	0,0
		2	1,00	1,00	-0,4	-0,2
		3	0,95	0,96	-2,1	-1,5
		4	0,49	0,66	-5,9	-8,9
		5	0,04	0,08	-11,0	-14,4

A fim de avaliar os eventos coletivamente, também optou-se por gerar gráficos de ensemble das métricas analisadas. Determinado tipo de gráfico permite a visualização do comportamento global de cada índice de eficiência para cada estação. Assim sendo, são plotados os resultados de todos os eventos em um tom monocromático e, quanto à mediana, esta é apresentada em vermelho, como evidenciado nas Figura 35 a Figura 38, as quais apresentam os resultados obtidos para o posto de Uruguaiana (77150000). Os demais gráficos de ensemble produzidos para as outras estações podem ser visualizados no APÊNDICE E. Nesse estudo, optou-se pela utilização da mediana para representação estatística dos resultados, visto que ela não sofre distorção por valores extremamente altos ou baixos, sendo uma medida mais fidedigna do que a média na presença de outliers. Dessa forma, verifica-se que a medida que o tempo de antecedência aumenta, há um decréscimo da previsibilidade, como era esperado.

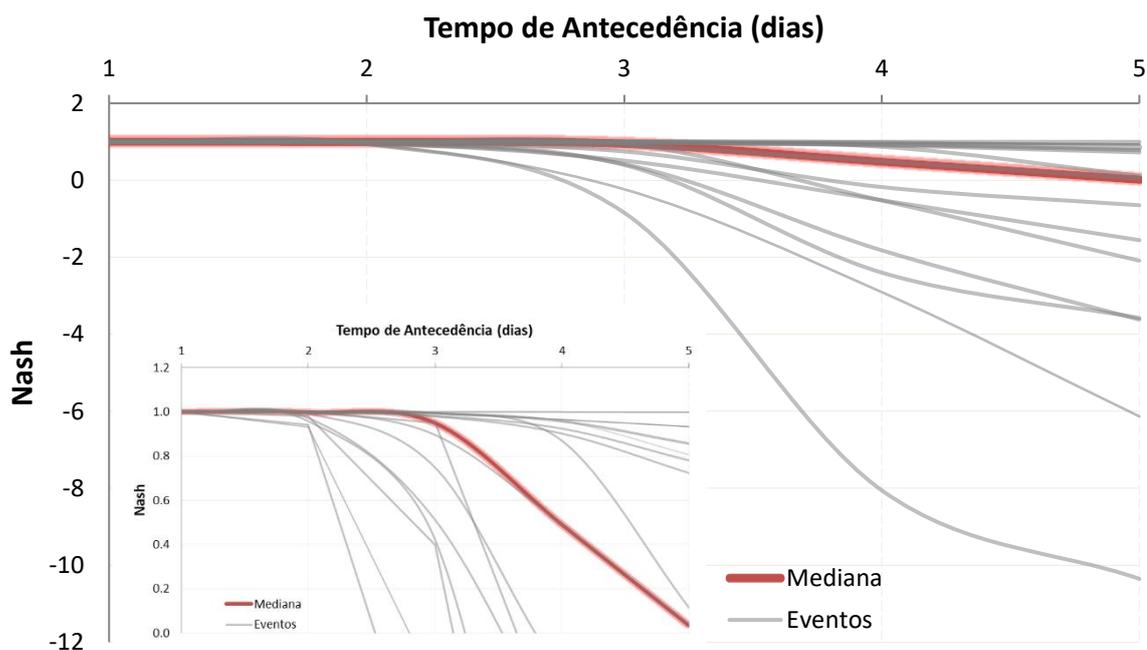


Figura 35 – Ensemble do índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe da análise de previsibilidade da estação de Uruguaiana (77150000).

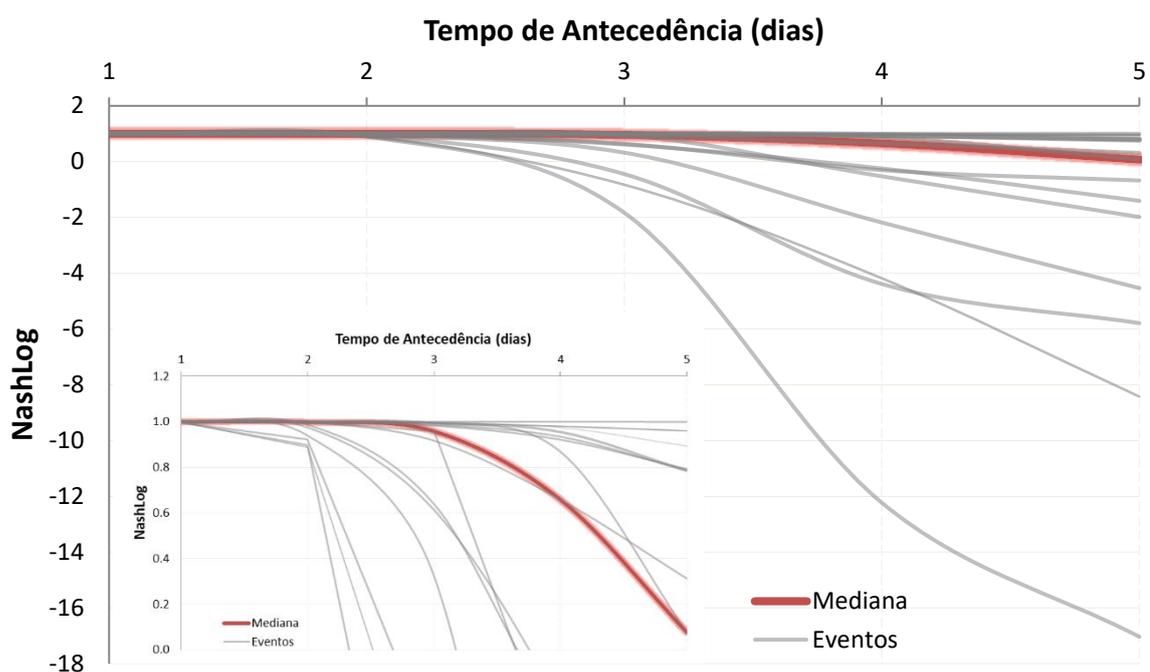


Figura 36 - Ensemble do índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe modificado da análise de previsibilidade da estação de Uruguaiana (77150000).

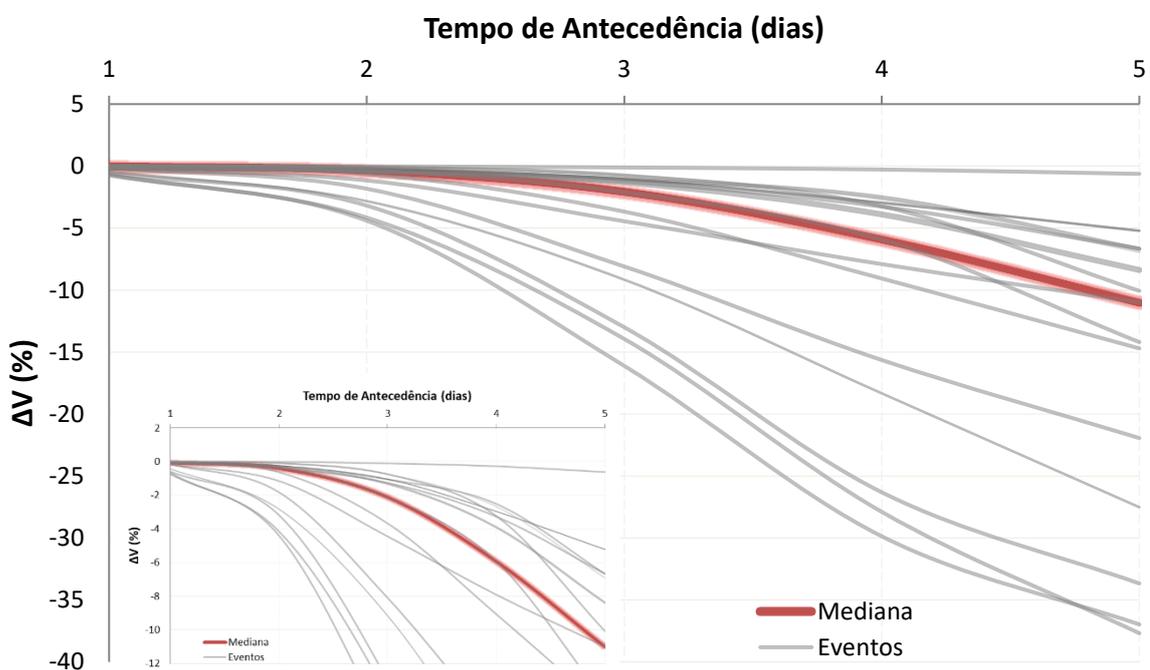


Figura 37 – Ensemble do erro de volume da análise de previsibilidade da estação de Uruguaiana (77150000).

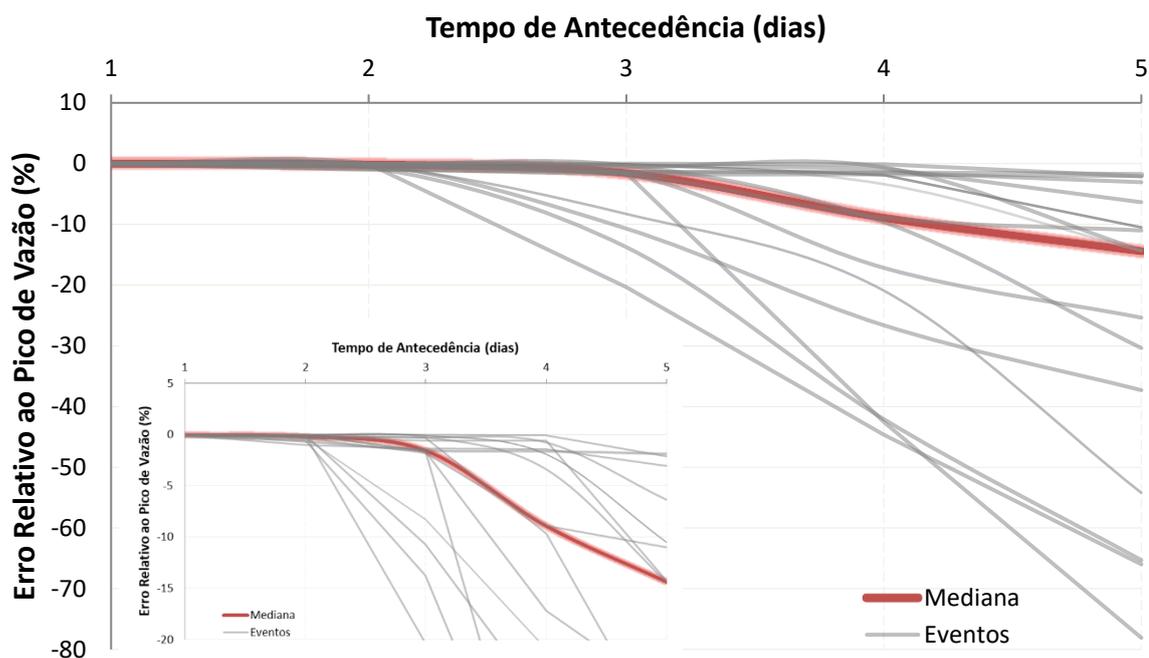


Figura 38 – Ensemble do erro relativo em relação ao pico de vazão da análise de previsibilidade da estação de Uruguiana (77150000).

Avaliando as Figura 35 e Figura 36, verifica-se que os índices NSE e NSE_{LOG} possuem comportamento similar, praticamente mantendo um valor constante com até três dias de antecedência para depois começar a decair. Entretanto, para o erro de volume e o erro relativo ao pico de vazão, a mediana possui uma taxa de incremento um pouco maior (Figura 37 e Figura 38), destacando-se que para os dois primeiros dias a previsão foi considerada adequada, porém ressalta-se que para os demais dias aumentam as incertezas na previsão

Ainda referente à estação de Uruguiana (77150000), verifica-se, através da Figura 35, que há dois grupos distintos de eventos: um grupo que possui valores considerados ótimos para o índice NSE com um tempo de antecedência de cinco dias; e outro em que o NSE possui valores abaixo de zero com um tempo de antecedência de três dias. Tais comportamentos distintos são reflexo da distribuição espacial da precipitação na bacia do rio Uruguai. Nesse sentido, ao avaliar somente os eventos cuja distribuição espacial da precipitação predominantemente ocorreram nas Sub-bacias do Alto e Médio Uruguai, a previsibilidade para Uruguiana mantém valores considerados ótimos mesmo para quatro dias de antecedência (Tabela 7). Por outro lado, ao considerar somente os eventos cuja propagação da onda de cheia é proveniente do rio Ibicuí, a previsibilidade possui um decréscimo para dois dias de antecedência (Tabela 8). Consequentemente, pode-se afirmar que a distribuição espacial da precipitação influencia de forma significativa a previsibilidade

dessa estação. Logo, essa diferença de comportamento pode ser melhor visualizada nas Figura 39 a Figura 42.

Tabela 7 - Análise dos eventos cuja propagação da onda de cheia é proveniente do rio Uruguai para a estação de Uruguaiana (77150000).

Tempo de Antecedência [dias]	NSE	NSE _{LOG}	ΔV [%]	ERP [%]
1	1,000	1,000	0,0	0,0
2	1,000	1,000	-0,3	-0,2
3	0,993	0,994	-1,1	-0,6
4	0,924	0,934	-3,2	-1,6
5	0,780	0,786	-6,9	-10,5

Tabela 8 - Análise dos eventos cuja propagação da onda de cheia é proveniente do rio Ibicuí para a estação de Uruguaiana (77150000).

Tempo de Antecedência [dias]	NSE	NSE _{LOG}	ΔV [%]	ERP [%]
1	0,999	0,998	-0,5	0,0
2	0,965	0,930	-3,0	-0,1
3	0,410	-0,061	-11,1	-9,5
4	-2,109	-3,182	-22,3	-34,3
5	-3,598	-5,163	-30,6	-59,8

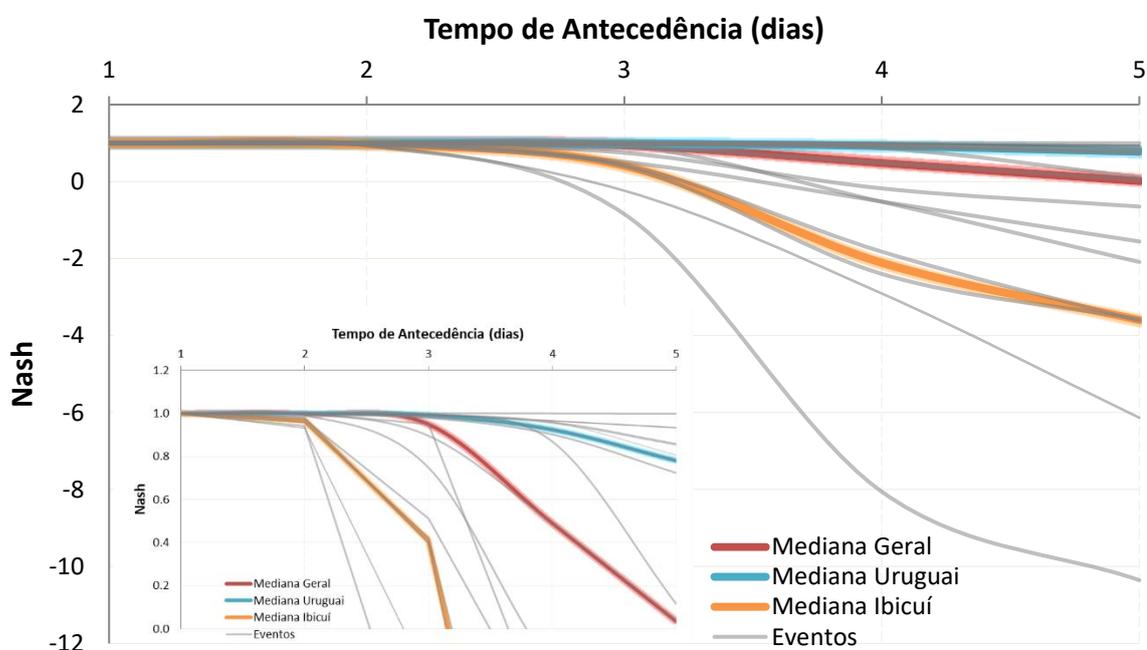


Figura 39 - Ensemble do índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe da análise de previsibilidade da estação de Uruguaiana (77150000), destacando eventos cuja onda de cheia é proveniente do rio Ibicuí (Laranja) e do rio Uruguai (Azul).

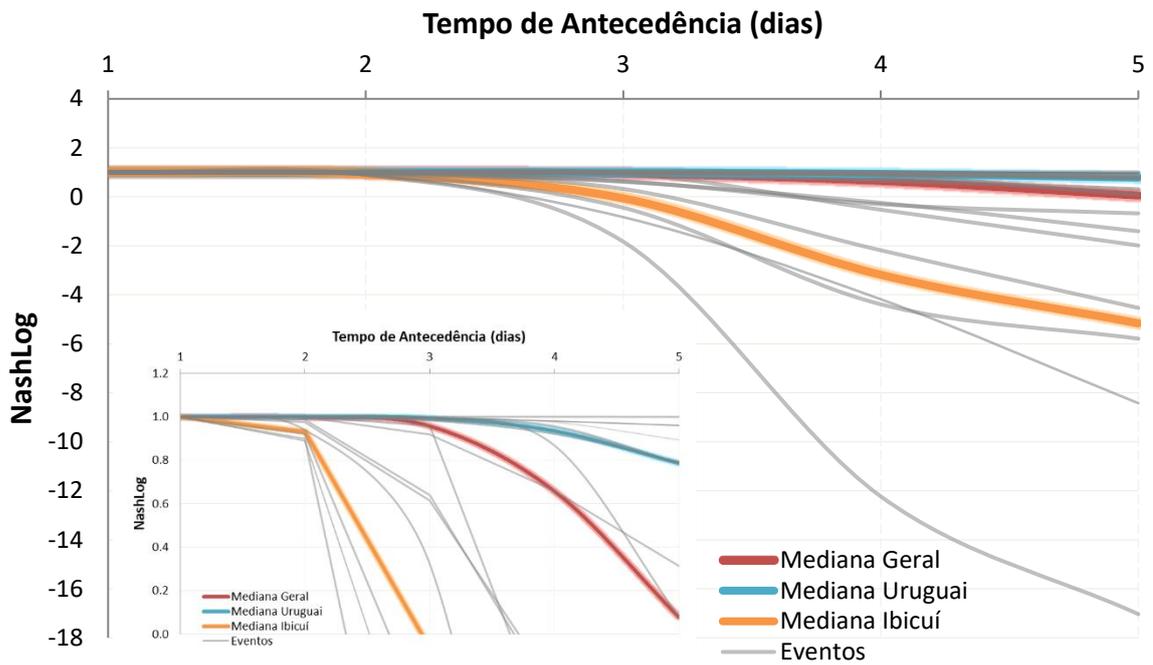


Figura 40 - Ensemble do índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe Modificado da análise de previsibilidade da estação de Uruguaiana (77150000), destacando eventos cuja onda de cheia é proveniente do rio Ibicuí (Laranja) e do rio Uruguai (Azul).

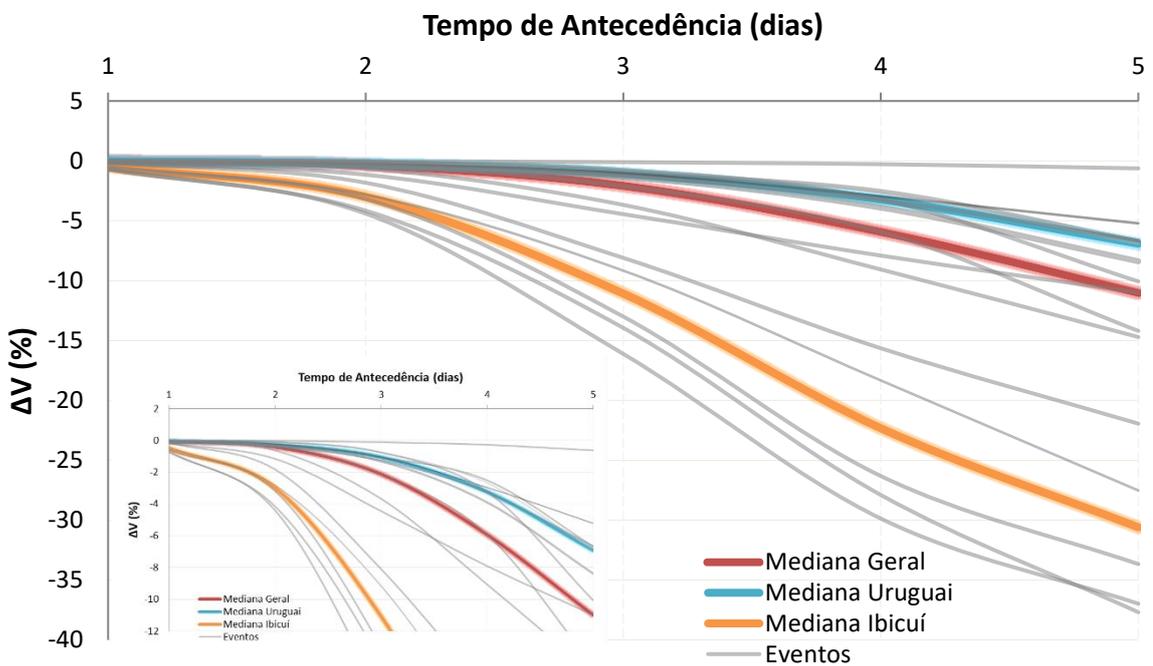


Figura 41 - Ensemble do erro de volume da análise de previsibilidade da estação de Uruguaiana (77150000), destacando eventos cuja onda de cheia é proveniente do rio Ibicuí (Laranja) e do rio Uruguai (Azul).

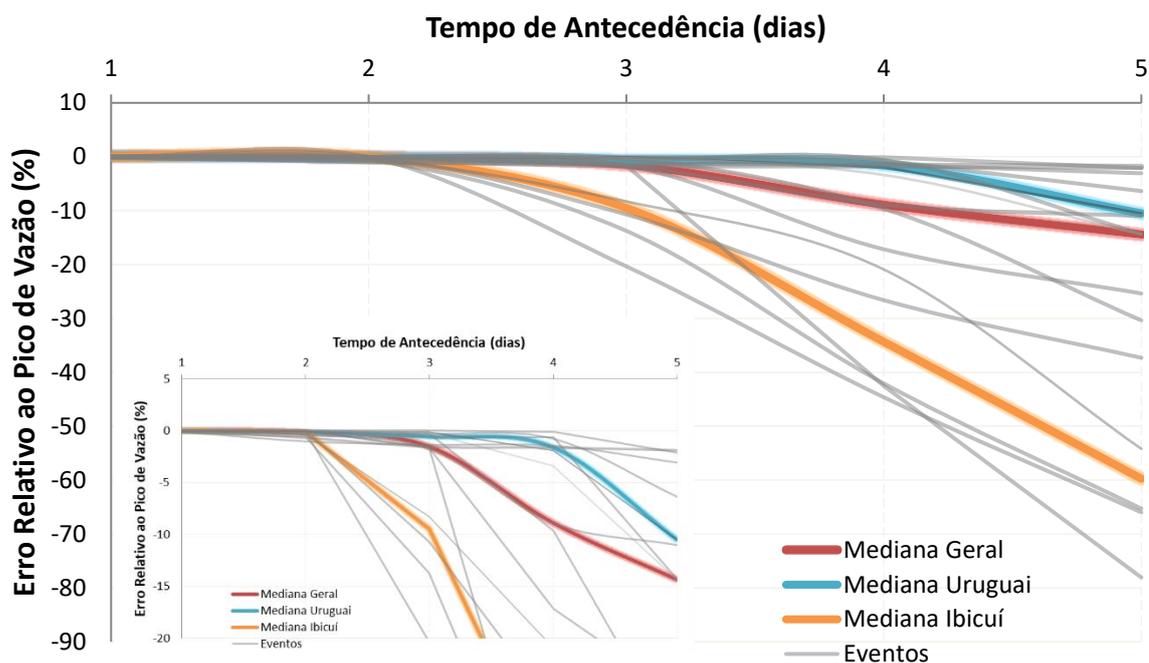


Figura 42 - Ensemble do erro relativo ao pico de vazão da análise de previsibilidade da estação de Uruguaiana (77150000), destacando eventos cuja onda de cheia é proveniente do rio Ibicuí (Laranja) e do rio Uruguai (Azul).

Por fim, os resultados apresentados constituem uma ferramenta de auxílio na tomada de decisão dos gestores, uma vez que ao aplicar os resultados apresentados nesta monografia em um contexto de sistema de alerta contra eventos críticos, em que a informação mais valiosa é a cota máxima que determinado evento atingirá, será possível definir um limiar para a previsibilidade utilizando o índice ERP. Logo, adotando-se, por exemplo, um limiar de -5% no índice ERP como aceitável, tornar-se-á factível a definição da previsibilidade de cada estação, conforme exposto na Tabela 9 e na Figura 43. Dessa forma, a Figura 43 evidencia o incremento da previsibilidade, uma vez que quanto mais à jusante o posto fluviométrico estiver localizado, maior será o incremento, efeito o qual está representado pela seta no mapa. Nesse caso, ressalta-se ainda que, na Tabela 9 a previsibilidade para a estação de Uruguaiana (77150000) foi calculada utilizando o resultado de todos os eventos, não obstante, ao realizar a análise separando-os de acordo com a distribuição espacial da precipitação, a previsibilidade seria de quatro dias para eventos cuja propagação da onda de cheia é proveniente do rio Uruguai; e de dois dias para eventos cuja propagação da onda de cheia é proveniente do rio Ibicuí.

Tabela 9 - Previsibilidade das estações da Bacia do Rio Uruguai adotando valor de máximo de -5% do erro relativo ao pico de vazão.

Código	Nome da Estação	Previsibilidade [dias]
74100000	Iraí	1
74800000	Porto Lucena	2
75550000	Garruchos	2
75780000	Passo São Borja	2
75900000	Itaqui	3
76800000	Passo Mariano Pinto	2
77150000	Uruguiana	3

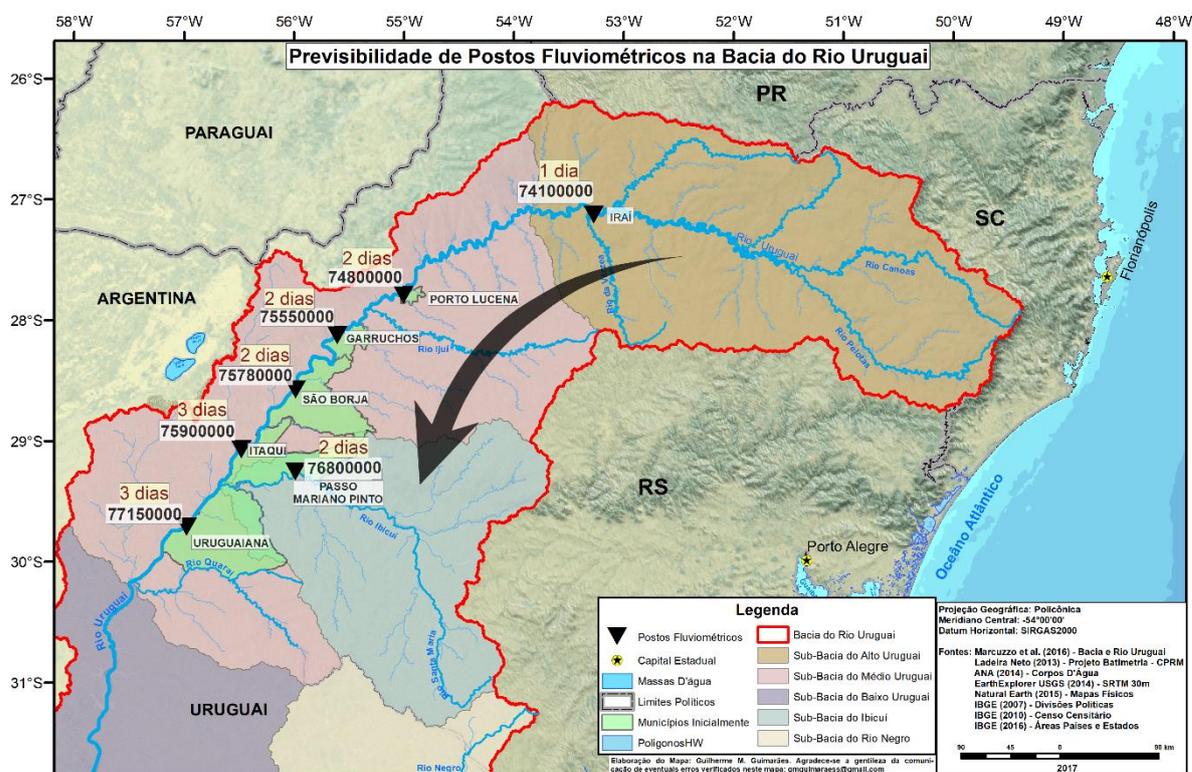


Figura 43 - Previsibilidade das estações da Bacia do Rio Uruguai adotando valor de máximo de -5% do erro relativo ao pico de vazão.

6. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi avaliada a previsibilidade teórica de sete postos fluviométricos na previsão de cheias de curto a médio prazo na bacia do rio Uruguai, utilizando o modelo hidrológico MGB-IPH calibrado para a geração das previsões, com a finalidade de auxiliar na tomada de decisão em eventos críticos. Assim, a metodologia utilizada permitiu a verificação da previsibilidade de forma quanti e qualitativa para 15 eventos de cheia que ocorreram entre os anos de 1980 a 2017, bem como uma análise geral do período através da calibração e da validação do modelo hidrológico.

Quanto à calibração do modelo, destaca-se o longo período utilizado, somando-se quase 37 anos de dados avaliados. De uma forma geral, o modelo hidrológico apresentou ótimos índices de eficiência, com índice de Nash-Sutcliffe superior à, aproximadamente, 0,74 para todos os postos fluviométricos analisados e o maior erro de volume encontrado possuiu magnitude de aproximadamente 10%. Em relação à validação do modelo, houve um decréscimo de qualidade do modelo hidrológico, havendo uma queda substancial nos índices de eficiência para alguns postos fluviométricos, como no caso das estações de Itaquí (75900000) e Passo São Borja (75780000). Tal perda de qualidade pode ser explicada em parte pelo curto período utilizado durante a validação (três meses), visto que o modelo hidrológico é altamente dependente das condições iniciais do sistema e necessita de um tempo maior para ser ajustado. Portanto, pretende-se no futuro aumentar o período de tempo utilizado para a validação do modelo, uma vez que o sistema de alerta hidrológico da CPRM onde este modelo deverá ser aplicado está previsto para entrar em fase de operacionalização em 2018.

Nota-se, ainda referente à calibração e à validação do modelo, que em âmbito geral, houve uma superestimação da vazão de pico para grandes eventos de cheia aliado a um pequeno efeito de antecipação. Uma hipótese levantada para o efeito de superestimação da vazão de pico é referente aos dados diários de vazão média utilizado como dados de entrada no modelo ao invés de dados das 7 e 17h, assim sendo, os picos de vazão observados em alguns eventos podem estar sendo subestimados. Nesse sentido, a inclusão do maior valor de vazão observado (das 7 ou das 17h) poderia diminuir essa discrepância e melhorar os resultados do modelo hidrológico. Além disso, os efeitos de superestimação da vazão de pico e de antecipação podem estar associados ao método Muskingum-Cunge de propagação de vazões, que apesar de apresentar bons resultados em diversas aplicações, tal método não consegue representar adequadamente sistemas com baixa declividade e planícies de

inundação, gerando hidrogramas com picos de vazão elevados. Nesse contexto, resultados semelhantes foram obtidos por Pontes *et al.* (2015) que realizaram uma comparação dos métodos Muskingum-Cunge e Inercial de propagação de vazões para a bacia do rio Araguaia também utilizando o MGB-IPH. Por conseguinte, os postos fluviométricos localizados em regiões de planícies de inundação apresentaram igualmente efeitos de antecipação e de superestimação dos picos de vazão quando utilizado o método Muskingum-Cunge, os quais foram aperfeiçoados e melhor representados utilizando o método Inercial.

Em relação a análise de previsibilidade, foram analisados 15 eventos com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária em relação ao pico de vazão simulado com uma “chuva perfeita”, ao invés da comparação com as vazões observadas. Isso se justifica para uma análise mais objetiva, desconsiderando os possíveis erros do modelo hidrológico que seriam propagados na análise de previsibilidade. Quanto aos resultados obtidos, verifica-se tanto a influência da localização espacial das estações quanto da distribuição espacial da precipitação na bacia. Nesta perspectiva, há um incremento da previsibilidade quanto mais à jusante o posto fluviométrico estiver localizado, com a estação de Uruguaiana apresentando os melhores resultados nesse quesito. Ainda, a influência da distribuição espacial da precipitação pode ser analisada comparando os eventos cuja propagação da onda de cheia é proveniente do rio Ibicuí com os eventos em que a onda de cheia provém do rio Uruguai. Desse modo, a estação de Uruguaiana apresentou uma previsibilidade relativamente alta (quatro dias de antecedência) nos eventos em que a distribuição espacial da precipitação predominou nas Sub-bacias do Alto e Médio Uruguai. Em suma, as estações do Médio Uruguai apresentaram boa previsibilidade para em média dois a três dias de antecedência. Por fim, salienta-se que os resultados apresentados constituem uma ferramenta que poderá auxiliar gestores na tomada de decisão em eventos críticos.

7. RECOMENDAÇÕES

Ressalta-se que o modelo hidrológico em seu estado atual não está em condições de operacionalização para utilização em um sistema de alerta hidrológico, devido à utilização de dados diários de entrada no modelo, ao invés de dados horários proveniente de estações telemétricas. Porém, preteriu-se a utilização de dados horários no modelo justamente pela disponibilidade de dados das séries históricas desde 1980, condição sem a qual não seria possível realizar a análise de previsibilidade proposta no trabalho.

Por conseguinte, evidencia-se a importância de um trabalho que dê continuidade a este visando empregar somente dados de entrada provenientes das estações telemétricas, utilizando os mesmos parâmetros já calibrados, a fim de verificar se haverá decréscimo nos índices de eficiência. Consequentemente, seria possível avaliar a necessidade de instalação de novas estações telemétricas ou até mesmo a realocação de estações telemétricas já instaladas, ensejando uma melhor representação da distribuição espacial da precipitação na bacia.

Ademais, a incorporação do método Inercial de propagação de vazões, conforme descrito anteriormente, pode beneficiar o modelo hidrológico, aumentando os índices de eficiência, e, portanto, também deve ser avaliada a sua implementação. Além disso, recomenda-se efetuar as análises de previsibilidade considerando a previsibilidade real ao invés da teórica, utilizando técnicas de assimilação de dados em tempo real, como já utilizado por Meller *et al.* (2012). Nesse sentido, o erro relativo ao pico de vazão seria comparado à vazão observada, e não à simulação de referência com a chuva perfeita. Por fim, recomenda-se também incorporar a ferramenta de previsibilidade desenvolvida nesse projeto na interface operacional do modelo MGB-IPH a fim de permitir que qualquer indivíduo realize este tipo de análise para as bacias hidrográficas de interesse.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, K. N. **Incertezas e Impactos de Mudanças Climáticas sobre o Regime de Vazões na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai**. 2016. 237 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/143109>>. Acesso em 15 jan. 2017.

ADAMS, T. E.; PAGANO, T. C. **Flood Forecasting: A Global Perspective**. 1. ed. [s. l.]: Elsevier, 2016.

ADAMS, T. E. Flood Forecasting in the United States NOAA/National Weather Service. In: ADAMS, T. E.; PAGANO, T. C. **Flood Forecasting: A Global Perspective**. 1. ed. [s. l.]: Elsevier, 2016, p. 249 – 310.

ALFIERI, L. *et al.* Operational early warning systems for water-related hazards in Europe. **Environmental Science & Policy**, v. 21, p. 35-49, 2012. Disponível em: <<https://tinyurl.com/kz9yz9k>>. Acesso em 22 abr. 2017.

ALLASIA PICCILLI, D. G. **Avaliação da previsão hidroclimática no Alto Paraguai**. 2007. 342 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/13826>>. Acesso em 10 mar. 2017.

ALVARES, C.A et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: <http://www.lerf.eco.br/img/publicacoes/Alvares_et_al_2014.pdf>. Acesso em 17 abr. 2017.

AMES, D. P. **Getting Started with the MapWinGIS ActiveX Control**. EUA, 2006.

ANDREOLLI, I. **Previsão de vazão em tempo real no rio Uruguai com base na previsão meteorológica**. 2003. 182 f. Tese de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: < <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4409/000411505.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 15 mar. 2017

ANTUNES, T. A. **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Alto Canoas através do modelo SWAT**. 2015. 130 f. Tese (Mestrado em Engenharia Florestal) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2015. Disponível em: < <http://tede.udesc.br/handle/handle/1952> >. Acesso em 04 abril 2017.

BAYER, D. M. **Efeitos das mudanças de uso da terra no regime hidrológico de bacias de grande escala**. 2014. 172 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/95694>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

BEVEN, K. Changing ideas in hydrology – The case of physically-based models. **Journal of Hydrology**. v. 105, n. 1 e 2. 1989. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169489901017>>. Acesso em: 12 dez. 2017

BLÖSCHL, G; ZEHE, E. On hydrological predictability. **Hydrological Processes**. v. 19, n. 19, p. 3923 a 3929, 2005. Disponível em:<<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.6075/full>>. Acesso em: 12 dez. 2017.

BOWKER, P. et al. **Improving the flood performance of new buildings**. 1 ed. London: RIBA, 2007.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Hidroweb. Sistema de informações hidrológicas**. 2013. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 19 out. 2017

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil, Período 1961 à 1990**. Brasília, 2009. 7 p. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/webcdp/climatologia/normais/imagens/normais/textos/apresentacao.pdf>>. Acesso em 20 ago. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. **Caderno da região hidrográfica do Uruguai**. Brasília, 2006. 128 p. Disponível em: < http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao03032011023025.pdf>. Acesso em 12 ago. 2017.

BRAVO, J. M. et al. Avaliação dos Benefícios de Previsões de Vazão na Operação de Reservatórios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 1, p. 197 – 213, 2008a. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v13n1.p197-213>>. Acesso em 15 mar. 2017.

BRAVO, J. M. et al. Otimização de regras de operação de reservatórios com incorporação da previsão de vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 1, p. 181-196, 2008b. Disponível em: < https://www.researchgate.net/profile/Walter_Collischonn/publication/242587420_Otimizacao_de_Regras_de_Operacao_de_Reservatorios_com_Incorporacao_da_Previsao_de_Vazao/links/5807837308ae07cbaa541bc5.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2017.

BUFFON, P. **Modelagem física de uma região do fundo oceânico para o entendimento dos padrões de preenchimento de minibacias por correntes de densidade**. 2014, 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/149581>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

CARLI, H. **Sistemas complexos, séries temporais e previsibilidade**. 2011, 108 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Física Armando Dias Tavares. Disponível em: <http://www.posif.uerj.br/admin/dissertacoes/arquivos/Dis_Carli.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2017.

CHAGAS, A. et al. The Warning Flood System in Taquari River Basin. In: VI INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOOD MANAGEMENT. São Paulo, SP, **Anais ...** 2014. Disponível em: <<http://www.abrh.org.br/icfm6/proceedings/papers/PAP014965.pdf>>. Acesso em 29 jan. 2017.

COLLISCHONN, W. et al. The MGB-IPH model for large scale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878 a 895, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>>. Acesso em 25 mar. 2017.

COLLISCHONN, W. et al. **Manual de Exemplo de Aplicação do Modelo MGB-IPH 2017 Utilizando o IPH-Hydro Tools**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, fevereiro 2017. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/wp-content/uploads/2017/01/manual_MGB.20.02.pdf>. Acesso em 12 mar. 2017.

COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/2500>>. Acesso em 25 mar. 2017.

COLLISCHONN, W. et al. Previsão sazonal de vazão na bacia do rio Uruguai 2: Previsão climática-hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 61-72, 2005. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Walter_Collischonn/publication/236588590_Previsao_Sazonal_de_Vazao_na_Bacia_do_Rio_Uruguai_2_Previsao_Climatica-Hidrologica/links/0c9605314cece1a08d000000/Previsao-Sazonal-de-Vazao-na-Bacia-do-Rio-Uruguai-2-Previsao-Climatica-Hidrologica.pdf>. Acesso em 15 mar. 2017

COMMISSION FOR THE GEOLOGICAL MAP OF THE WORLD: COMISION DE LA CARTA GEOLOGICA DEL MUNDO: COMISSÃO DA CARTA GEOLÓGICA DO MUNDO. **Geologic map of South America**: Mapa geológico de America del Sur: Mapa geológico da América do Sul. Brasília: CPRM; DNPM; UNESCO, 2001. Escala 1:5.000.000. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/2542>>. Acesso em: 06 dez. 2017.

COMITE INTERGOVERNAMENTAL COORDENADOR DOS PAÍSES DA BACIA DO PRATA; CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa Hidrogeológico da Bacia do Prata**: Mapa hidrogeológico de la Cuenca Del Plata. Brasília: CPRM, 2015. Escala 1:2.500.000. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/17606?show=full>>. Acesso em: 06 dez. 2017.

CPRM, 2017. Serviço Geológico do Brasil. Acesso em 12 mar. 2017. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/sace/>>.

CPRM, 2014. Mapa Geológico do estado de Santa Catarina. Acesso em 4 dez. 2017. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/17996>>.

CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS (CRED), **Number of flood by second administrative unit level, 2000 – 2015**. Belgium, 2016. Disponível em: <http://emdat.be/sites/default/files/maps_created_2017/CHINA_floods.jpg>. Acesso em: 20 abr. 2017.

Da SILVA, B. C. et al. Previsão hidroclimática de vazão de curto prazo na bacia do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 31-47, 2007. Disponível em: <http://www.ons.com.br/download/previsao_vazoes/artigos_sessao/AT_Sess%C3%A3o10.pdf> Acesso em: 15 mar. 2017.

DEMUTH, N.; RADEMACHER, S. Flood Forecasting in Germany – Challenges of a Federal Structure and Transboundary Cooperation. In: ADAMS, T. E.; PAGANO, T. C. **Flood Forecasting: A Global Perspective**. 1. ed. [s. l.]: Elsevier, 2016, p. 125 – 151.

DEBASTIANI, A. B. et al. Modelagem Chuva-Vazão Mensal Utilizando Redes Neurais Artificiais. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **São Paulo, Anais**, 2015. Disponível em: <http://www.evolvedoc.com.br/sbrh/detalhes-81_modelagem-chuva-vazao-mensal-utilizando-redes-neurais-artificiais>. Acesso em 17 mar. 2017.

DIAS, T. L.; CATALDI, M.; FERREIRA, V. Aplicação de técnicas de redes neurais e modelagem atmosférica para elaboração de previsões de vazão na Bacia do Rio Grande (MG). **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro , v. 22, n. 1, p. 169-178, fev. 2017 . Disponível em: <<https://tinyurl.com/hkfkxml>>. Acesso em: 14 mar. 2017.

DINIZ, J. A. O.; BOMFIM, L. F. C.; FREITAS, M. A. de (Coord.). Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo: Sistema de Informações Geográficas - SIG. Recife: CPRM , 2014. Escala 1:1.000.000. Programa de Cartografia Hidrogeológica. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?inford=756&sid=9>>. Acesso em: 15 mai. 2017.

DUAN, W. *et al.* Spatiotemporal evaluation of water quality incidents in Japan between 1996 and 2007. **Chemosphere**, n. 6, v. 93, p. 946 – 953, 2013a. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653513008060>>. Acesso em 21 abr. 2017.

DUAN, W. *et al.* Spatial and temporal trends in estimates of nutrient and suspended sediment loads in the Ishikari River, Japan, 1985 to 2010. **Science of The Total Environment**, v. 461 a 462, p. 499 a 508, 2013b. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969713005652>>. Acesso em 21 abr. 2017.

EARTH explorer. Desenvolvido por U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2014. Permit your search in area: type in an address or place name, enter coordinates or click the map to define your search area (for advanced map tools, view the help documentation), and/or choose a date range. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 6 mar. 2017.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. Ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006.

ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS**. Sistema de Informação Geográfica para área de trabalho de computador, versão 10.1. 2013. Disponível em: <<https://www.arcgis.com/features/>>. Acesso em: 09 abr. 2017.

FAN, F. M. **Acoplamento entre modelos hidrológicos e Sistemas de Informação Geográfica: Integração do Modelo MGB-IPH**. 2011. 179 f. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) – Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/114609>>. Acesso em: 26 jan. 2017.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, 2014. Disponível em: <<http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=161&SUMARIO=4350>>. Acesso em 31 mar. 2017.

FAN, F. M. *et al.* Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema de Previsão Hidrológica Distribuída para a Região da UHE Três Marias. In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Bento Gonçalves, RS, 2013. **Anais...** ABRH, 2013. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/36e3b7763d2d995048470c6e61e0ee2e_4451e852963eb5a7638ed482e4eb279d.pdf>. Acesso em 30 mar. 2017.

FAN, F. M. *et al.* Flood Forecasting on The Tocantins River Using Ensemble Rainfall Forecasts and Real-Time Satellite Rainfall Estimates. In: 6th INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOOD MANAGEMENT, 2014a, São Paulo/SP, **Proceedings...** Disponível em: <<http://www.abrh.org.br/icfm6/proceedings/papers/PAP014692.pdf>>. Acesso em 01 abril 2017.

FAN, F. M. et al. Operational Flood Forecasting System of The Uruguay River Basin Using the Hydrological Model MGB-IPH. In: 6th INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOOD MANAGEMENT, 2014b, São Paulo/SP, **Proceedings...** Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Paulo_Pontes/publication/304994246_OPERATIONAL_FLOOD_FORECASTING_SYSTEM_OF_THE_URUGUAY_RIVER_BASIN_USING_THE_HYDROLOGICAL_MODEL_MGB-IPH/links/577e527708aeae3b2834c1c.pdf>. Acesso em 31 mar. 2017.

FAN, F. M. et al. Ensemble streamflow forecasting experiments in a tropical basin: The São Francisco river case study. **Journal of Hydrology**, v. 519, part D, p. 2906 – 2919, 2014c. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169414003126>>. Acesso em 01 abril 2017.

FAN, F. M. et al. Flood forecasting on the Tocantins River using ensemble rainfall forecasts and real-time satellite rainfall estimates. **Flood Risk Management**, v. 9, n. 3, p. 278 – 288, 2015a. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfr3.12177/abstract>>. Acesso em 01 abril 2017.

FAN, F. M. et al. Previsão de Vazão por Ensemble para a UHE Aimorés no Rio Doce. In: XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2015b, Brasília, DF. **Anais... ABRH**, 8 f. Disponível em: <http://www.evolvedoc.com.br/sbrh/detalhes-352_previsao-de-vazao-por-ensemble-para-a-uhe-aimores-no-rio-doce>. Acesso em 01 abril 2017.

FAN, F. M. et al. Um Mapa de Unidades de Resposta Hidrológica para a América do Sul. In: XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XXI. 2015, Brasília/DF. **Anais...** Porto Alegre ABRH 2015c. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/wp-content/uploads/2015/09/xxisbrh_blocao_20150524_FAN.pdf>. Acesso em 06 abril 2017.

FAN, F. M. **Previsão por conjunto de vazões afluentes a reservatórios em grandes bacias hidrográficas brasileiras**. 2015. 424 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/127309>>. Acesso em: 26 jan. 2017.

FAN, F. M. et al. On the Use of Deterministic Streamflow Forecasts Persistence for Decision Making. **Revista brasileira de meteorologia**. São Paulo, v. 31, n. 2, p.218 - 228, jun. 2016. Disponível em <<https://tinyurl.com/kgv8ulh>>. Acesso em 11 mar 2017.

FAN, F. M. et al. Evaluation of upper Uruguay river basin (Brazil) operational flood forecasts. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 22, n. 37, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.0217160027>>. Acesso em: 04 dez. 2017.

FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. Hydrological Forecasting Practices in Brazil. In: ADAMS, T. E.; PAGANO, T. C. **Flood Forecasting: A Global Perspective**. 1. ed. [s. l.]: Elsevier, 2016, p. 41 – 66.

FINCK, J. S. **Estudo preliminar de sistema de alerta para a parte brasileira da bacia do rio uruguai utilizando modelo de previsão cota-cota**. 2018, 160 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 2018.

GERMANO, A. de O. et al. Cheia de 2014 Na Bacia do Rio Madeira. In: XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XXI. 2015, Brasília/DF. **Anais...** Porto Alegre ABRH 2015. Disponível em: <http://www.evolvedoc.com.br/sbrh/detalhes-852_cheia-de-2014-na-bacia-do-rio-madeira>. Acesso em 06 abril 2017.

GOERL, R.F.; KOBİYAMA, M. Considerações sobre as inundações no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XVI. 2005, João Pessoa. **Anais...** Porto Alegre: ABRH 2005. Disponível em: <http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ABRH2005_inundacoes.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2017.

GUHA-SAPIR, D.; BELOW, R.; HOYOIS, P. **EM-DAT: International Disaster Database**, Université Catholique de Louvain, Bruxelas, Bélgica. Disponível em: <www.emdat.be>. Acesso em 26 mar. 2017.

GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F.; MOREIRA, J. C. Comparação de métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidroelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 13 a 20, 2007. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/previsao_vazoes/artigos_sessao/AT_Sess%C3%A3o03.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2017

GUIMARÃES, G. M. ; FINCK, J. S. ; MARCUZZO, F. F. N. . Espacialização Pluviométrica da Precipitação Média Mensal na Parte Brasileira da Bacia do Rio Uruguai. In: Congresso da ABES / FENASAN 2017, 2017, São Paulo. **Anais do Congresso da ABES / FENASAN 2017**. São Paulo: ABES, 2017. v. 1. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/18201>>. Acesso em: 20 nov. 2017.

GUPTA, H. V. *et al.* Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 4, n. 2, p. 135 a 143, 1999. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%291084-0699%281999%294%3A2%28135%29>>. Acesso em: 5 dez. 2017.

HIRABAYASHI, Y. et al. Global Projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate. **Hydrological Sciences Journal**, v. 53, n. 4. p. 754 – 772, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1623/hysj.53.4.754>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

JARVIS, A. et al. Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database. 2008. Disponível em: <<http://srtm.csi.cgiar.org>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

KOBIYAMA, M. et al. Papel da comunidade e da universidade no gerenciamento de desastres naturais. I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 2004, Florianópolis: GEDN, 2004. p.834 a 846. Disponível em: <<http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/Sibraden2004%205-65%20%28gestao%29.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

KOBIYAMA, M. et al. **Prevenção de Desastres Naturais: Conceitos Básicos**. 1. ed. Curitiba, PR: Organic Trading, 2006.

KOTTEK, M., J. et al. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift** v. 15 n. 3 (2006), p. 259 - 263. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>>. Acesso em: 5 abr. 2017.

LIU, Z. The Development and Recent Advances of Flood Forecasting Activities in China In: ADAMS, T.E.; PAGANO, T. C. **Flood Forecasting: A Global Perspective**. 1. ed. [s. l.]: Elsevier, 2016, p. 67 – 86.

LORENZ, E. N. The predictability of a flow which possesses many scales of motion. **Tellus**, v. 21, n. 3, p. 289 a 307, 1969. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.2153-3490.1969.tb00444.x/epdf>>. Acesso em 25 mar. 2017.

LUO, P. P. *et al.* Spatiotemporal trend analysis of recent river water quality conditions in Japan. **Journal of Environmental Monitoring**, n. 10, v. 13, p. 2819 – 2829, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2433/158662>>. Acesso em 21 abr. 2017.

MACHADO, F. W. **Modelagem Chuva-Vazão Mensal Utilizando Redes Neurais Artificiais**. 2005. 174 f. Tese (Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, área de concentração Engenharia Hidrológica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2005. Disponível em: <https://docs.ufpr.br/~bleninger/dissertacoes/093-Fernando_Weigert_Machado.pdf>. Acesso em 17 mar. 2017.

MARCUZZO, F. F. N. Bacia hidrográfica do rio Uruguai: altimetria e áreas. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, 22., 2017, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ABRH, 2017. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/18489>>. Acesso em: 12 dez. 2017.

MATOS, A. J. S. et al. Assessment of a Real-Time Flood Forecasting at the Doce River Basin: Summer 2013 Event. In: VI INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOOD MANAGEMENT. São Paulo, SP, **Anais...** 2014. Disponível em: <<http://www.abrh.org.br/icfm6/proceedings/papers/PAP015040.pdf>>. Acesso em 12 mar. 2017.

MATOS, A. J. S. et al. Sistema de Alerta da Bacia do Rio Doce – Sistema WEB-SACE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XXI. 2015, Brasília, DF. **Anais...** ABRH, 8 p., 2015. Disponível em: < <https://tinyurl.com/lrgehpn>>. Acesso em 12 mar. 2017.

MEIRELLES, F. M; KOBIYAMA, M; et al. **Diagnóstico Preliminar:** Descritivo dos eventos ocorridos em Rolante. Porto alegre. 26 f. Departamento de Recursos Hídricos da Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável e Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. [s. n.], 2017. Disponível em: <http://www.rs.gov.br/upload/20170125183225diagnostico_preliminar_gt_rolante_revfinal.pdf>. Acesso em 12 mar. 2017.

MELLER, A. **Previsão de Cheias por Conjunto em Curto Prazo.** 2012. 224 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/70057>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

MELLER, A. et al. Assimilação de Dados de Vazão na Previsão de Cheias em Tempo-Real com o Modelo Hidrológico MGB-IPH. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 209 a 224, 2012. Disponível em: <<https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=94&SUMARIO=1144>>. Acesso em: 18 jan. 2018.

MELLER, A. et al. Previsão de Cheias por Conjunto em Curto Prazo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 3, p. 33 a 49, 2014. Disponível em: <<https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=168&SUMARIO=4781>>. Acesso em 01 abril 2017.

MICROSOFT EXCEL OFFICE, versão 2010: Gerenciador de planilhas eletrônicas. [S.l.]: Microsoft Corporation, 2010. Programa. 1 CD-ROM. 2014. Disponível em: <<http://office.microsoft.com/pt-br/>>. Acesso em: 19 jul. 2017.

MOORE, R. J. et al. Forecasting for Flood Warning. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 337, n. 1-2, p. 203-217, 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2004.10.017>>. Acesso em: 12 jan. 2017.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE. **American society of agricultural and biological engineers**, v. 50, n. 3, p. 885 a 900, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.13031/2013.23153>>. Acesso em 4 dez. 2017.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Report of a Workshop on Predictability & Limits to Prediction in Hydrologic Systems**. Washington, DC: The National Academies Press, 2002. Disponível em: <<https://www.nap.edu/catalog/10337/report-of-a-workshop-on-predictability-limits-to-prediction-in-hydrologic-systems>>. Acessado em: 12 dez. 2017.

NETO, G. G. R.; PAZ, A. R. Previsão de Vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Ji-Paraná (RO) Usando Redes Neurais Artificiais. In: XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. São Paulo, **Anais...** 2015. Disponível em: <<http://www.evolvedoc.com.br/sbrh/download-2015-UEFQMDE5MTMxLnBkZg==>>. Acesso em 17 mar. 2017.

PAGANO, T. C. et al. Australian Bureau of Meteorology Flood Forecasting and Warning. In: ADAMS, T.E.; PAGANO, T. C. **Flood Forecasting: A Global Perspective**. 1. ed. [s. l.]: Elsevier, 2016, p. 3 – 40.

PAPPENBERGER, F. et al. The monetary benefit of early flood warnings in Europe. **Environmental Science & Policy**, v. 51, p. 278-291, ago. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2015.04.016>>. Acesso em 13 mar. 2017.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modelling using limited data and a GIS based approach. **Journal of Hydrology**, v. 406, n. 3, 4, p. 170 a 181, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.007>>. Acesso em 01 abril 2017.

PAIVA, R. C. D. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias estudo de caso: bacia do rio Solimões**. Tese (Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), 181 f. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/18927>>. Acesso em: 02 abr. 2017.

PAIVA, R. C. D. **Hidrologia da bacia Amazônica**: compreensão e previsão com base em modelagem hidrológica-hidrodinâmica e sensoriamento remoto. 2012. 167 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre em cotutela Universidade de Toulouse 3 Paul Sabatier, Laboratório de Ambiental de Geociências, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/78884>>. Acesso em: 26 fev. 2017.

PAIVA, R. C. D. et al. On the sources of hydrological prediction uncertainty in the Amazon. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 9, p. 3127 – 3137, 2012. Disponível em: <<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/16/3127/2012/>>. Acesso em 01 abril 2017.

PAIVA, R. C. D. et al. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modelling of the Amazon River basin. **Water Resources Research**, v. 49, n. 3, p. 1226 – 1243, 2013. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wrcr.20067/full> >. Acesso em 01 abril 2017.

PAZ, A. R. et al. Análise de Sensibilidade da Evapotranspiração Anual Calculada pelo Modelo Hidrológico MGB-IPH Relativa ao Parâmetro Capacidade de Armazenamento do Solo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XX, 2013, Bento Gonçalves, RS. **Anais...** ABRH, 8f., 2013. Disponível em: <http://www.ct.ufpb.br/~adrianor paz/artigos/Paz_et_al_SBRH_2013.pdf>. Acesso em 23 mar. 2017.

PEDROLLO, M. et al. Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Caí: Concepção e implantação do sistema. In: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Maceió, AL. **Anais...** 2011. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/Evento_Alerta_Pedrollo.pdf>. Acesso em 29 jan. 2017.

PEDROLLO, M. C. R.; SOTÉRIO, P. W.; GERMANO, A. O. Metodologia para definição de cotas de referência em sistemas de alerta e previsão hidrológica. In: XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS São Paulo. **Anais**. Disponível em: <http://evoluedoc.com.br/xxiisbrh/detalhes-748_estudo-tecnico-para-instalacao-e-operacao-de-um-sistema-de-alerta-hidrologico-na-bacia-do-rio-uruguai>. Acesso em: 27/12/2017.

PEDROLLO, M. et al. Operation of the Hydrological Warning System in the Caí River Basin Preliminary Studies. In: VI INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOOD MANAGEMENT. São Paulo, SP, **Anais...** 2014. Disponível em: <<http://www.abrh.org.br/icfm6/proceedings/papers/PAP014968.pdf>>. Acesso em 29 jan. 2017.

PONTES, P. R. M. et al. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 888 a 904, 2015. Disponível em: <<https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=156&SUMARIO=5115>>. Acesso em: 18 dez. 2017.

PONTES, P. R. M. et al. MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling & Software**, v. 94, p. 1 a 20, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.029>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

REFSGAARD, J. C. Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. **Journal of Hydrology**, v. 198, n.1-4, p. 69-97, 1997. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03329-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03329-X)>. Acesso em 05 dez. 2017.

REIS, J. B. C. **Monitoramento e alerta de inundação no município de Itajubá (MG) através de modelos matemáticos**. 2014, 95 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG. 2014. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/terrama2/lib/exe/fetch.php?media=docs:papers:dissertacao_joao_uni_fei.pdf>. Acesso em 07 abril 2017.

RIGHI, E.; ROBAINA, L. E. S. Enchentes do Rio Uruguai no Rio Grande do Sul Entre 1980 e 2005: Uma Análise Geográfica. **Sociedade & Natureza**, v. 22, n. 1, p. 35 – 54, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/sn/v22n1/04.pdf>>. Acesso em 15 jan. 2017.

SCHUSTER, R. C. **Desenvolvimento de um modelo hidrológico de transformação chuva-vazão e propagação de vazão em reservatórios**. 2014, 53 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Ambiental, UFRGS/IPH, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/149583>>. Acesso em 22 mar. 2017.

SCHWANENBERG, D. et al. Short-Term Reservoir Optimization for Flood Mitigation under Meteorological and Hydrological Forecast Uncertainty. **Water Resources Management**, v. 29, n 5, p. 1635 – 1651, 2015. Disponível em: <<http://rdcu.be/qxHg>>. Acesso em 31 mar. 2017.

SENE, K. **Flood Warning: Forecasting and Emergency Response**. 1. ed. Berlin: Springer, 2011.

SILVA, J. K. **Identificação de instabilidades hidráulicas em sistemas de drenagem urbana**: Investigação experimental do conduto forçado Álvaro Chaves. 2015, 97 f. Tese (Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/129793>>. Acesso em 14 de abril de 2017.

SIQUEIRA, V. A. **Previsão de Cheias por Conjunto em Curto a Médio Prazo: Bacia do Taquari-Antas/RS**. Tese (Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), 168 f. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/147137>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

SIQUEIRA, V. A. et al. Ensemble flood forecasting based on operational forecasts of the regional Eta EPS in the Taquari-Antas basin. **RBRH**, v. 21, n. 3, p. 587 – 602, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011616004>>. Acesso em 25 mar. 2017.

SIQUEIRA, V. A. et al. IPH-Hydro Tools: uma ferramenta open source para determinação de informações topológicas em bacias hidrográficas integrada a um ambiente SIG. **RBRH**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 274-287, 2016b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p274-287>>. Acessado em: 15 jan. 2018.

SMITH, P. J. et al. On the Operational Implementation of the European Flood Awareness System (EFAS). In: ADAMS, T. E.; PAGANO, T. C. **Flood Forecasting: A Global Perspective**. 1. ed. [s. l.]: Elsevier, 2016, p. 313 – 348.

SOUSA, W. S.; de SOUSA, F. Rede neural artificial aplicada à previsão de vazão da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 173 a 180, 2010. Disponível em: <<http://plutao.sid.inpe.br/attachment.cgi/dpi.inpe.br/plutao/2010/11.11.17.27.50/doc/v14n02a08.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

TOMINAGA, L. K. (2009). Desastres Naturais. Por que Ocorrem? In: TOMINAGA, L. K.;

SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres Naturais: Conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 196p

TSHIMANGA, R. M. et al. A Regional Perceptive of Flood Forecasting and Disaster Management Systems for the Congo River Basin. In: ADAMS, T. E.; PAGANO, T. C. **Flood Forecasting: A Global Perspective**. 1. ed. [s. l.]: Elsevier, 2016, p. 87 – 124.

TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W. Previsão de Vazão em Curto Prazo com Base na Precipitação: Modelos Conceituais. In: WORKSHOP PREVISÃO DE VAZÕES, 2007, Rio de Janeiro, RJ. **Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)**... Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/previsao_vazoes/artigos_sessao/AT_Sess%C3%A3o06.pdf>. Acesso em 20 mar. 2017.

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. rev. e ampl. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

WILDNER, W. *et al.* **Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Sul**. Relatório Técnico. CPRM, 2008. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/10301>>. Acesso em: 12 nov. 2017.

YAO, C.; YANG, Z. Parameters optimization on dhsvm model based on a genetic algorithm. **Frontiers of Earth Science in China**, Springer, v. 3, n. 3, p. 374 a 380, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11707-009-0040-6>>. Acesso em: 4 dez, 2017.

YU, W. *et al.* Improving the accuracy of flood forecasting with transpositions of ensemble NWP rainfall fields considering orographic effects. **Journal of Hydrology**, v. 539, p. 345 - 357, ago. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.047>>. Acesso em: 14 mar. 2017.

YU, W.; NAKAKITA, E.; JUNG, W. Flood Forecast and Early Warning with High-Resolution Ensemble Rainfall from Numerical Weather Prediction Model. **Procedia Engineering**, v. 154, p. 498 a 503, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.544>>. Acesso em 15 mar. 2017.

ZEHE, E.; BLÖSCHL, G. Predictability of hydrologic response at the plot and catchment scales: Role of initial conditions. **Water Resources Research**, v. 40, n.10, 2004. Disponível em:<<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2003WR002869/full?wv1URL=/doi/10.1029/2003WR002869/full®ionCode=BR-RS&identityKey=4612088c-ab1d-432c-b5f7-0915cb3ec0e2>>. Acesso em: 12 dez. 2017.

APÊNDICE A – LISTA DE MAPAS PARA REALIZAÇÃO DE DOWNLOAD

Quadro 1 - Figuras com os mapas em PDF deste estudo com melhor resolução (500dpi).

Figuras / Mapas	Endereços (“links”) para baixar utilizando o navegador de internet
Figura 6 - Localização da Bacia do Rio Uruguai	https://goo.gl/gkiRrd
Figura 7 - Caracterização da Região Hidrográfica do Uruguai com Definição das Sub-bacias de Estudo	https://goo.gl/4Kbroj
Figura 8 - Caracterização Geológica da Bacia do Rio Uruguai (Adaptado segundo Comissão da Carta Geológica do Mundo, 2001).	https://goo.gl/hbnFmo
Figura 9 - Caracterização Hidrogeológica da Bacia do Rio Uruguai (Adaptado de Diniz et al. 2014).	https://goo.gl/bjCvm1
Figura 10 - Mapa hipsométrico da Bacia do Rio Uruguai.	https://goo.gl/8FNN6q
Figura 11 - Mapa de declividade da Bacia do Rio Uruguai.	https://goo.gl/ZG1hyA
Figura 12 - Caracterização climática segundo Classificação de Köppen.	https://goo.gl/E1gP7M
Figura 13 - Precipitação média anual na parte brasileira da Bacia do Rio Uruguai.	https://goo.gl/4XcPKY
Figura 14 - Caracterização Populacional da Região Hidrográfica do Uruguai e principais municípios acometidos por enchentes.	https://goo.gl/6EzuC9
Figura 15 - Municípios inicialmente atendidos pelo sistema de alerta hidrológico desenvolvido pela CPRM na Bacia do Rio Uruguai.	https://goo.gl/dbh54B
Figura 17 - Postos pluviométricos utilizados na modelagem hidrológica.	https://goo.gl/HECsoK
Figura 18 - Postos fluviométricos utilizados na modelagem hidrológica.	https://goo.gl/rm7ARg
Figura 19 - Postos climáticos utilizados na modelagem hidrológica.	https://goo.gl/qFxxkC
Figura 20 - Caracterização das URHs da Bacia do Rio Uruguai	https://goo.gl/bV4LSg
Figura 21 - Mapa das minibacias geradas.	https://goo.gl/YY4xuQ
Figura 23 - Postos fluviométricos utilizados para a análise de previsibilidade.	https://goo.gl/p75rm5
Figura 43 - Previsibilidade das estações da Bacia do Rio Uruguai adotando valor de máximo de - 5% do erro relativo ao pico de vazão.	https://goo.gl/itgSJH
Figura 82 - Distribuição Espacial dos Postos Pluviométricos e Fluviométricos da Bacia do Rio Uruguai em Território Brasileiro.	https://goo.gl/zC3kPi

APÊNDICE B – HIDROGRAMAS APRESENTANDO RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO

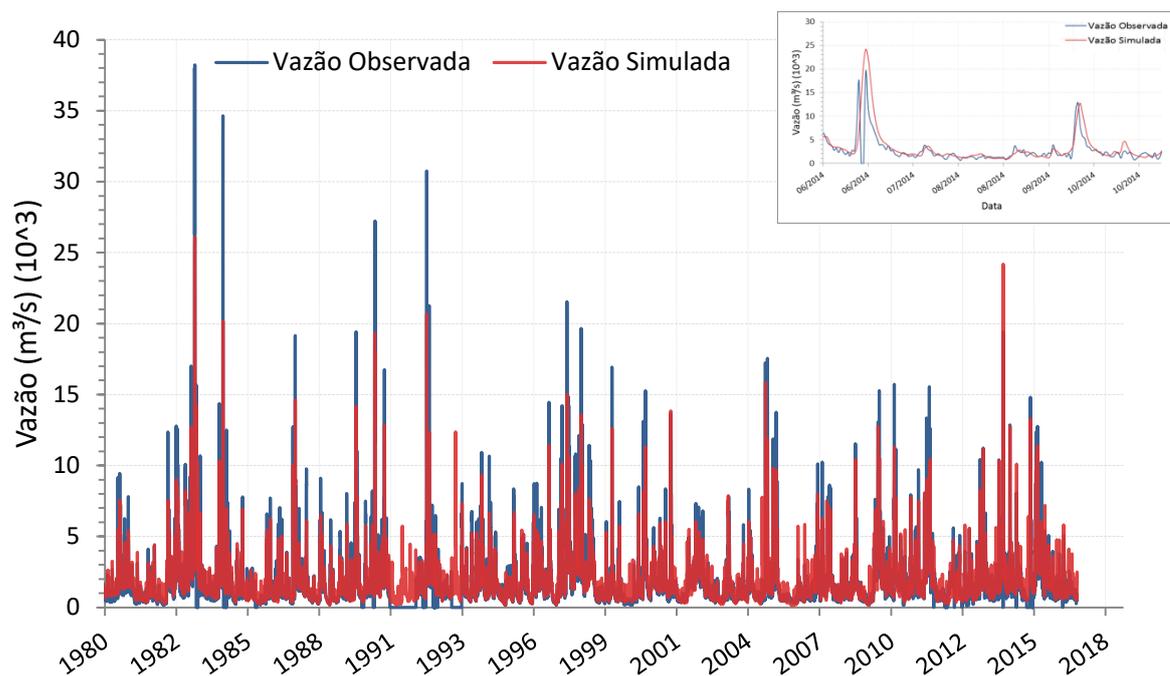


Figura 44 - Resultado da calibração para o posto de Iraí (74100000).

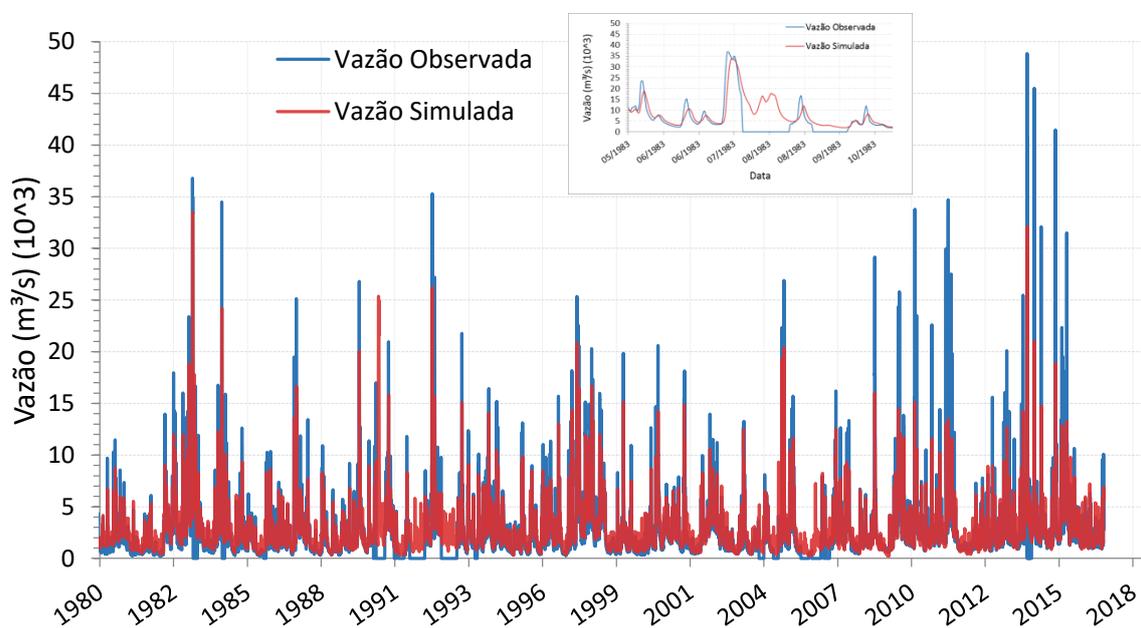


Figura 45 - Resultado da calibração para o posto de Porto Lucena (74800000).

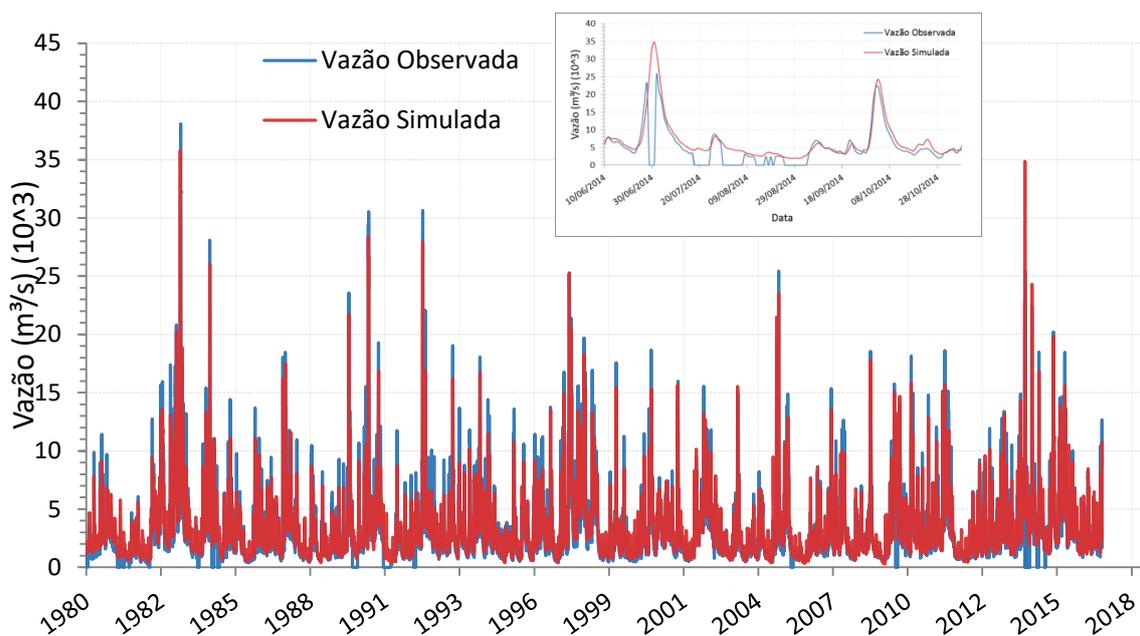


Figura 46 - Resultado da calibração para o posto de Garruchos (75550000).

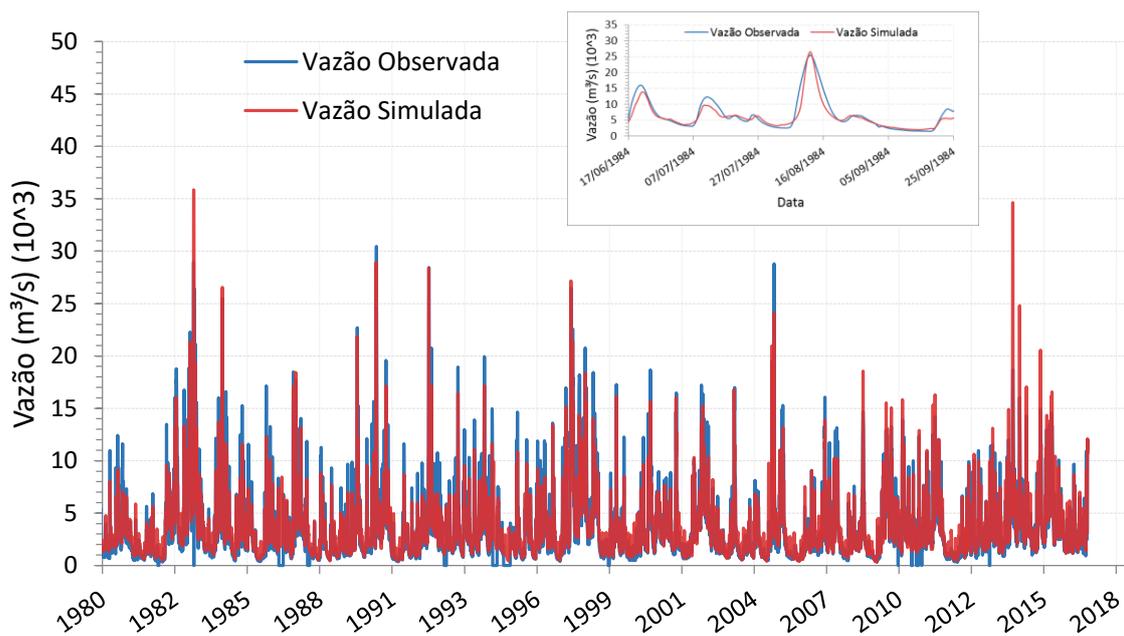


Figura 47 - Resultado da calibração para o posto de São Borja (75780000).

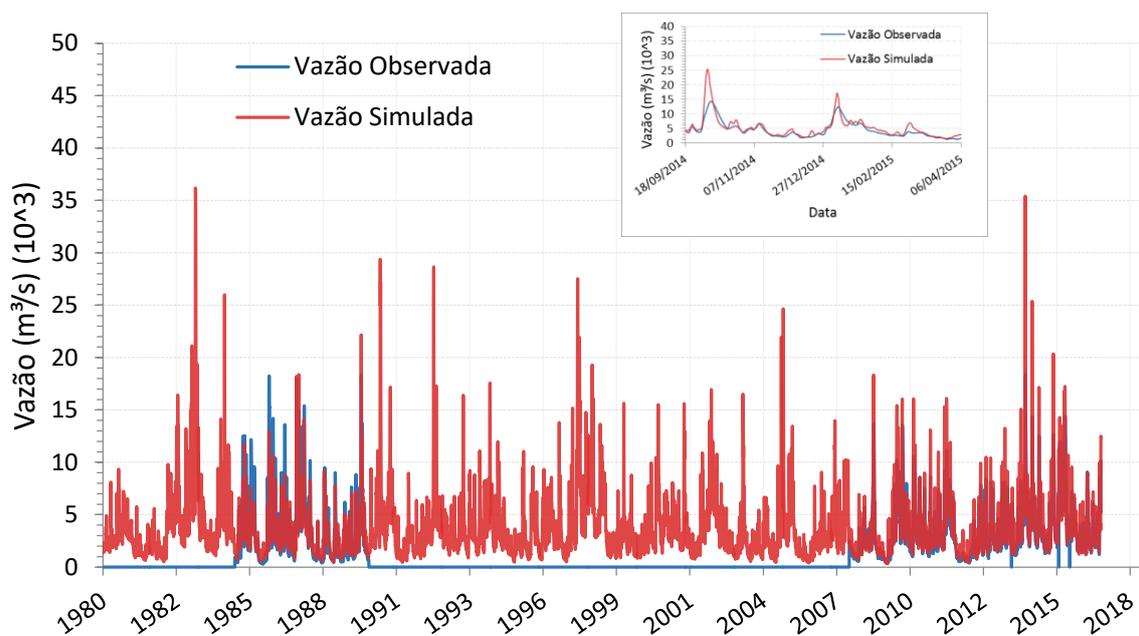


Figura 48 - Resultado da calibração para o posto de Itaqui (75900000).

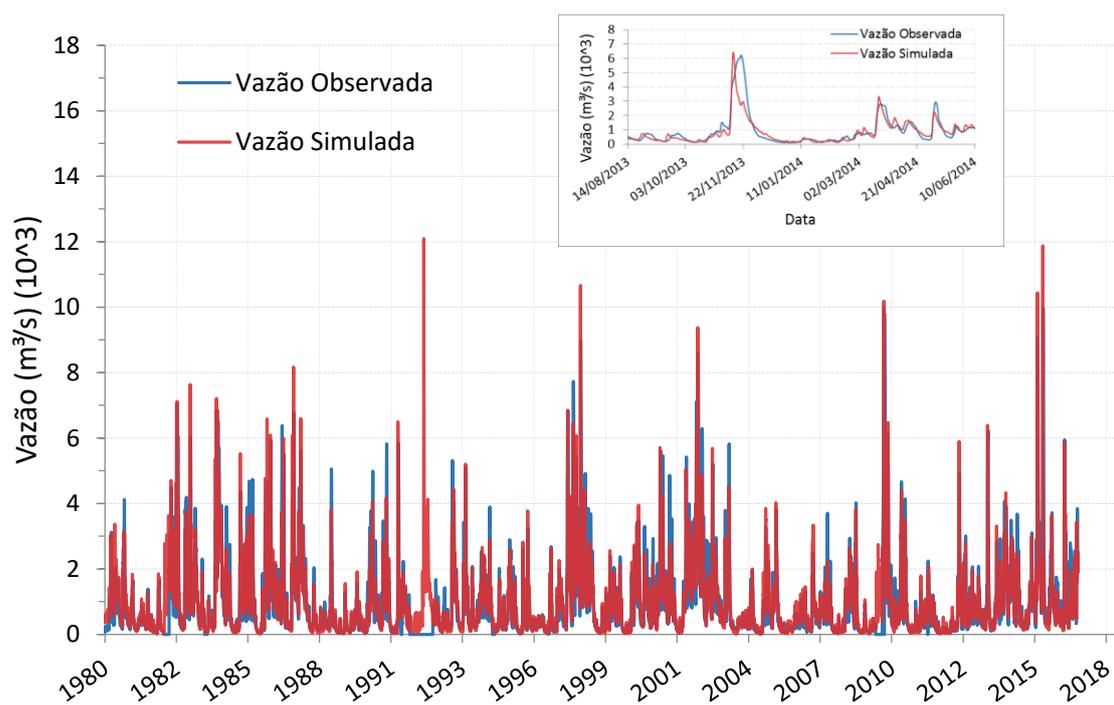


Figura 49 - Resultado da calibração para o posto Passo Mariano Pinto (76800000).

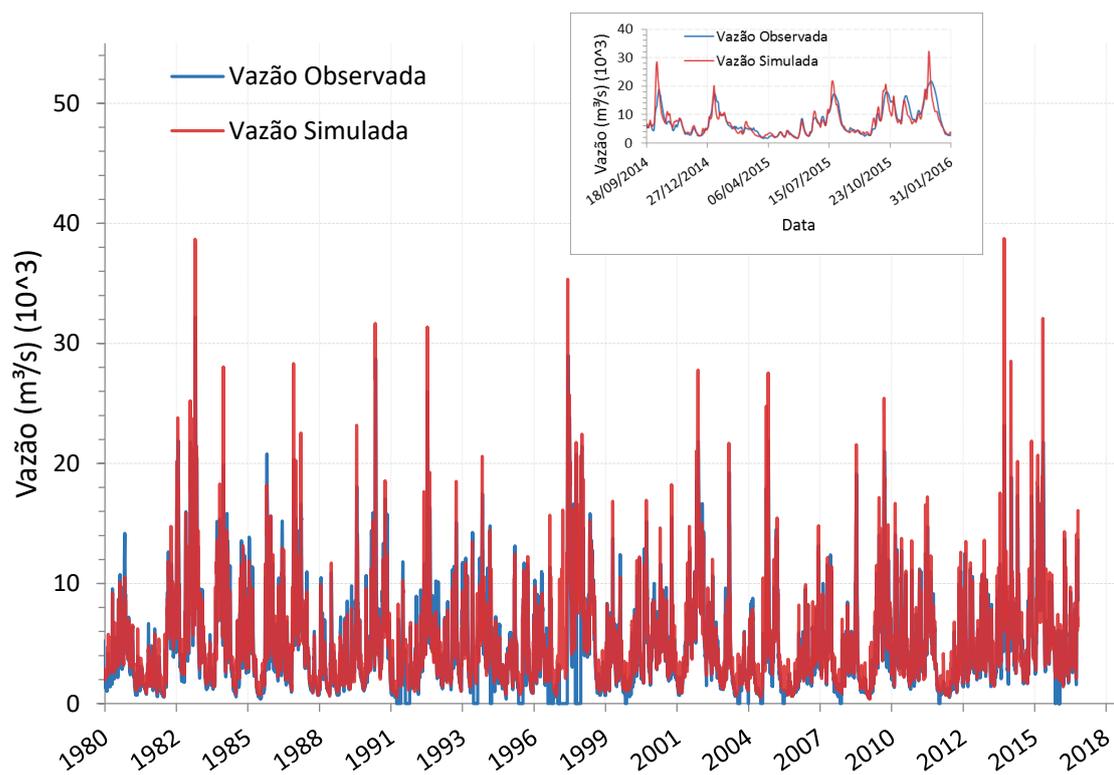


Figura 50 - Resultado da calibração para o posto de Uruguaiana (77150000).

APÊNDICE C – HIDROGRAMAS APRESENTANDO RESULTADOS DA VALIDAÇÃO

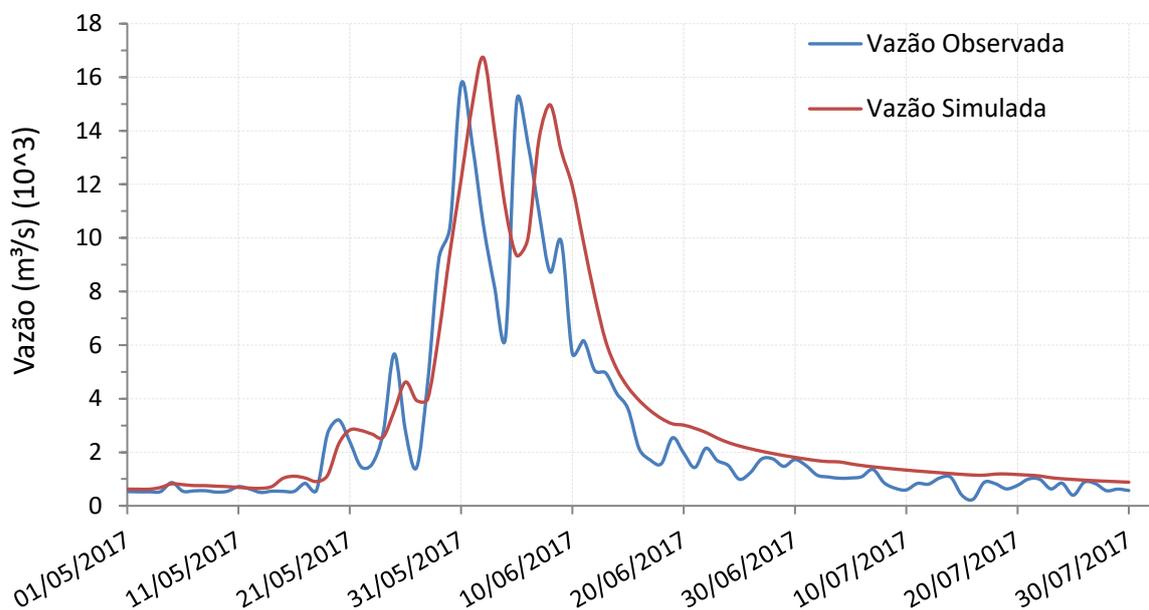


Figura 51 - Resultado da validação para o posto de Iraí (74100000).

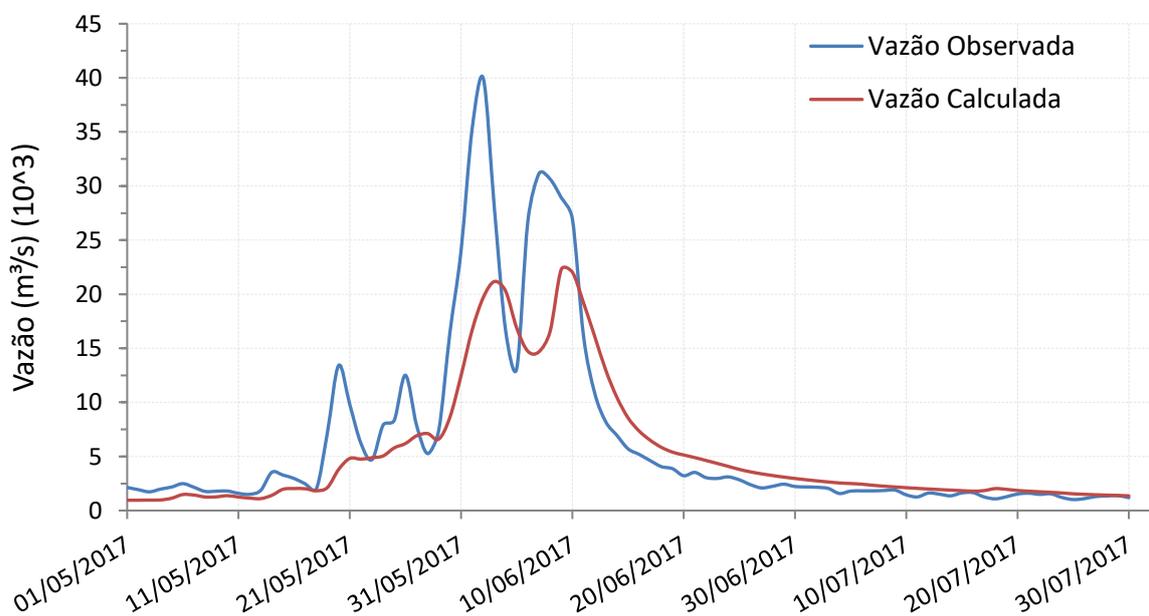


Figura 52 - Resultado da validação para o posto de Porto Lucena (74800000).

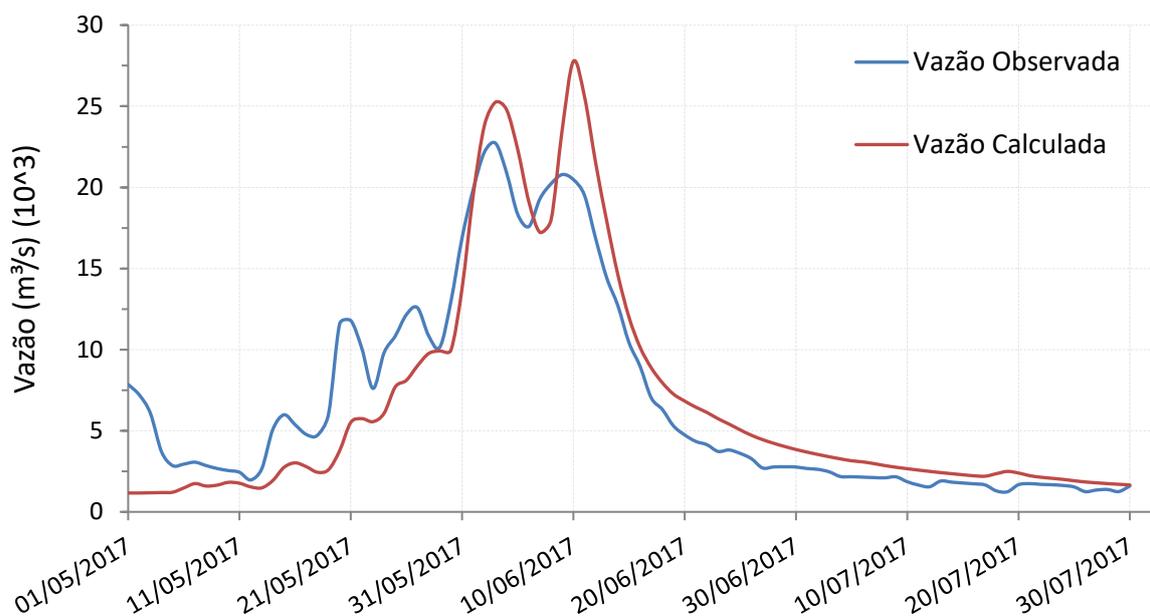


Figura 53 - Resultado da validação para o posto de Garruchos (75550000).

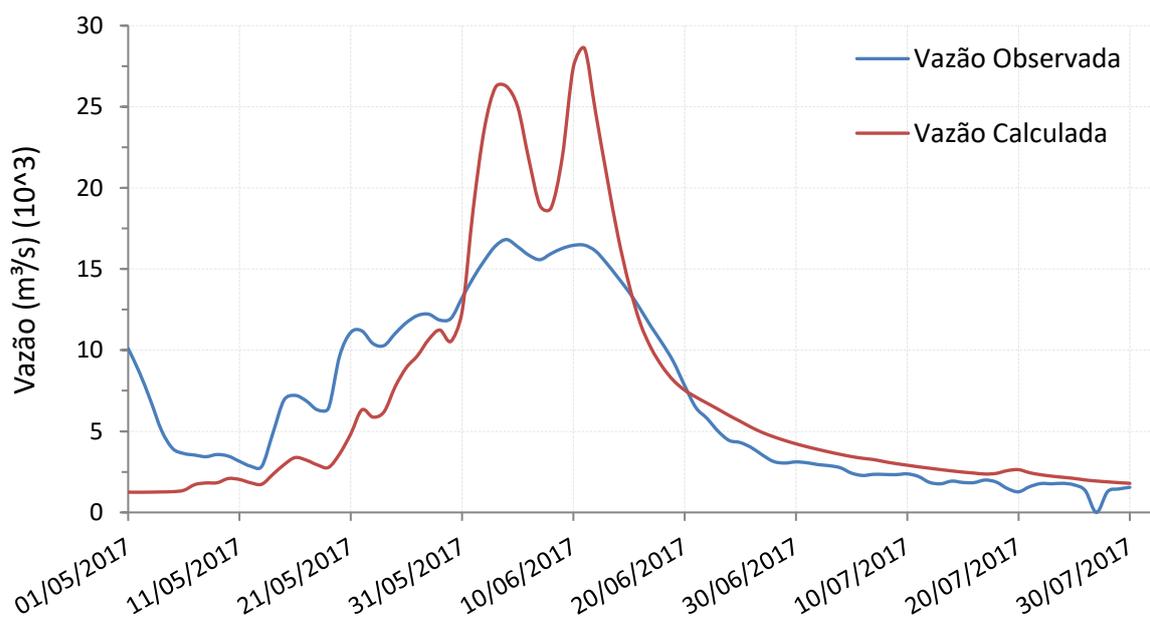


Figura 54 - Resultado da validação para o posto de Passo São Borja (75780000).

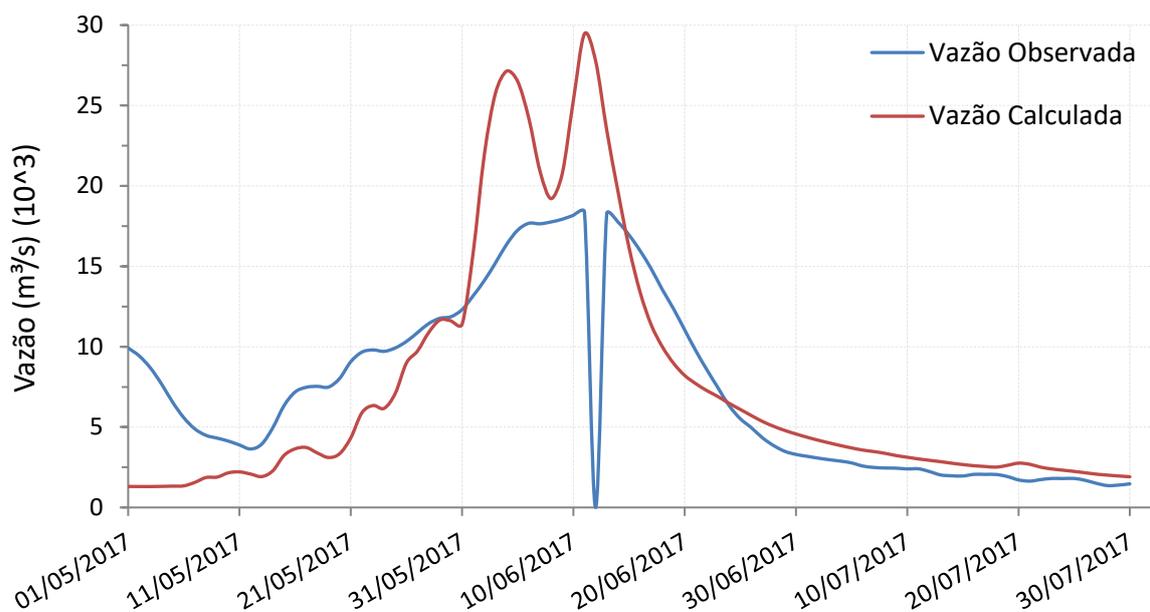


Figura 55 - Resultado da validação para o posto de Itaqui (75900000) sem preenchimento da falha.

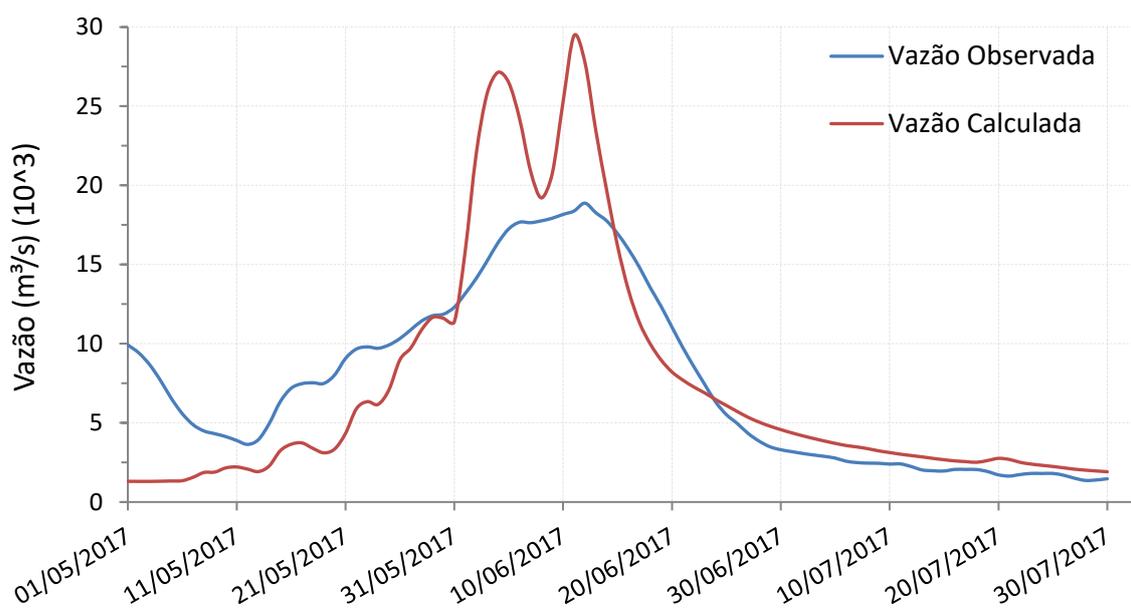


Figura 56 - Resultado da validação para o posto de Itaqui (75900000) com preenchimento da falha.

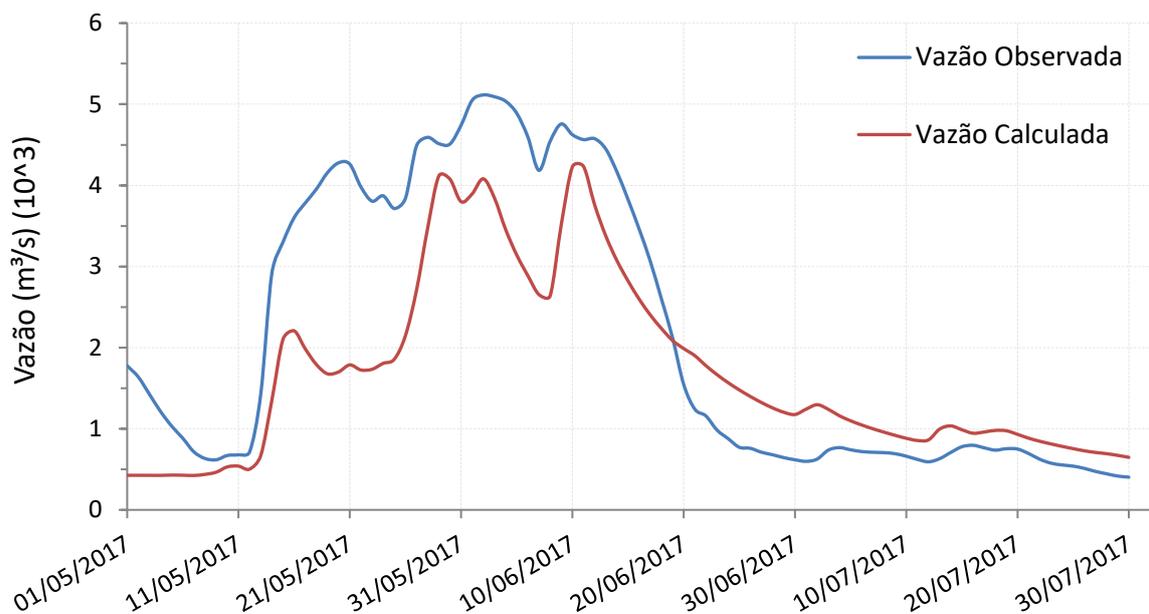


Figura 57 - Resultado da validação para o posto de Passo Mariano Pinto (76800000).

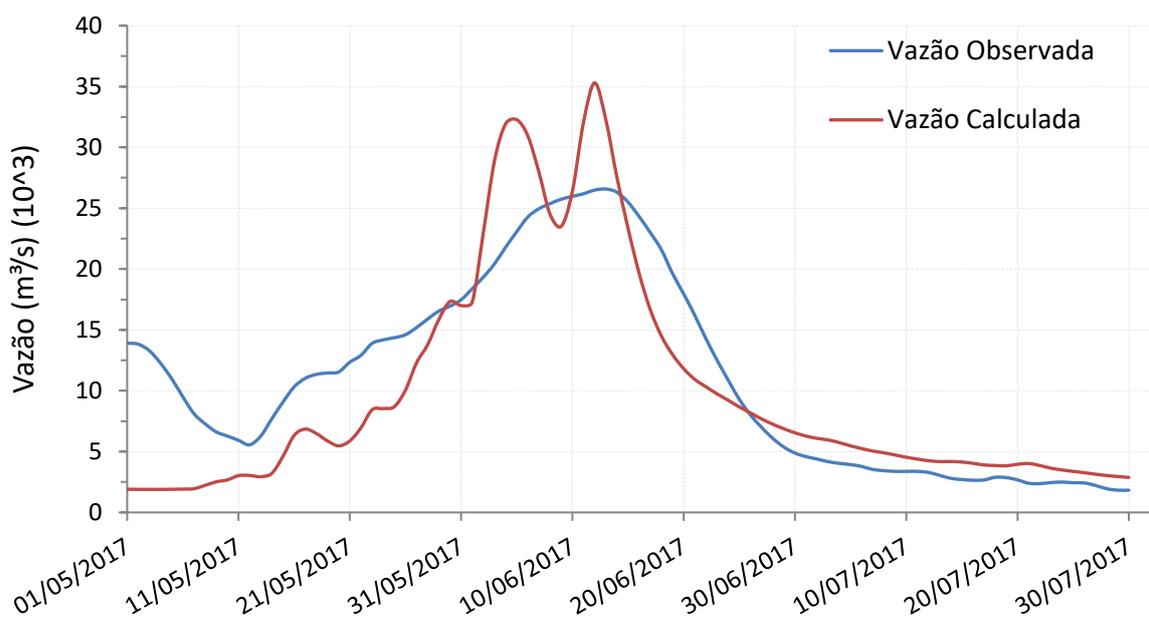


Figura 58 - Resultado da validação para o posto de Uruguiana (77150000).

APÊNDICE D – HIDROGRAMAS DA ANÁLISE DE PREVISIBILIDADE

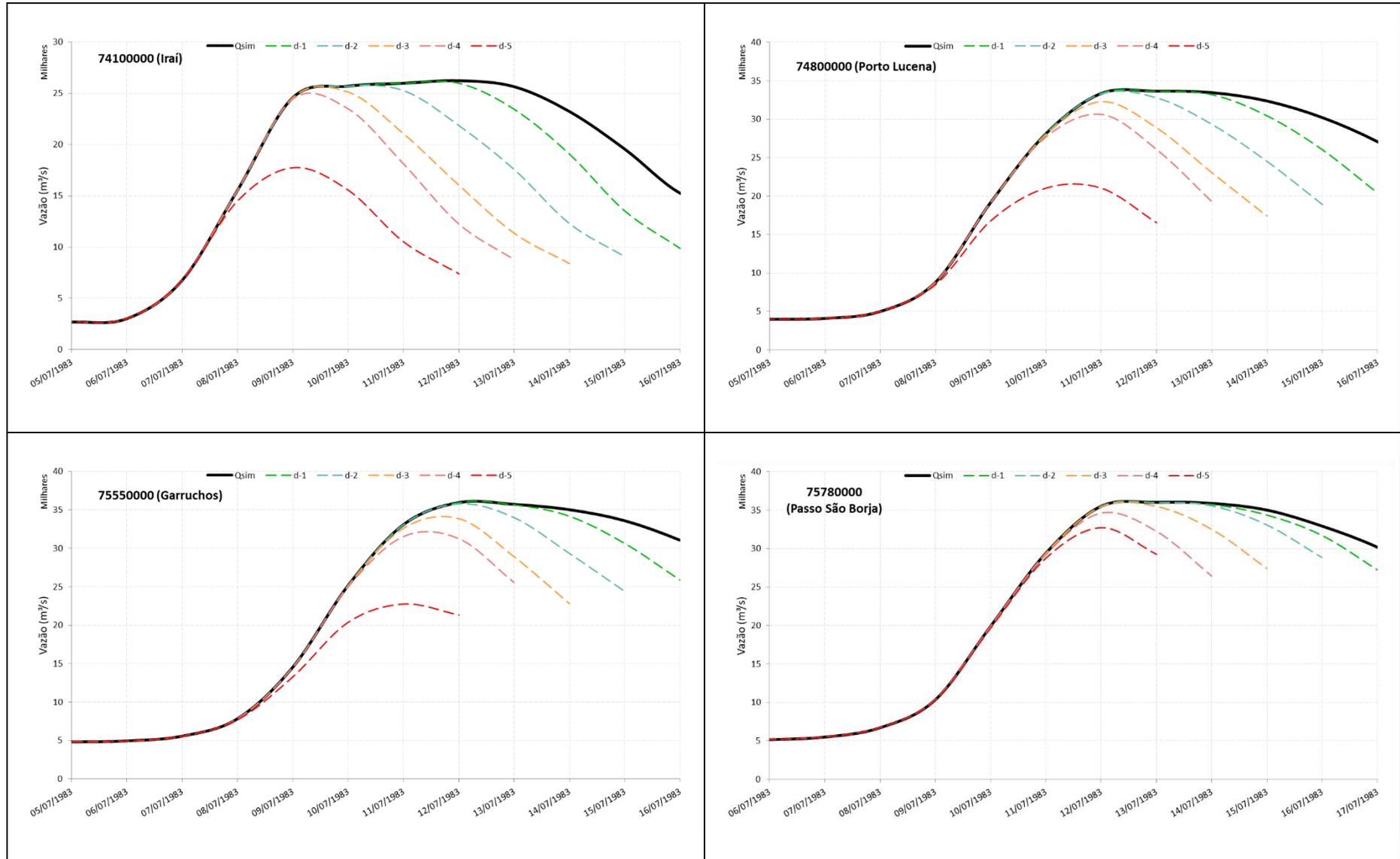
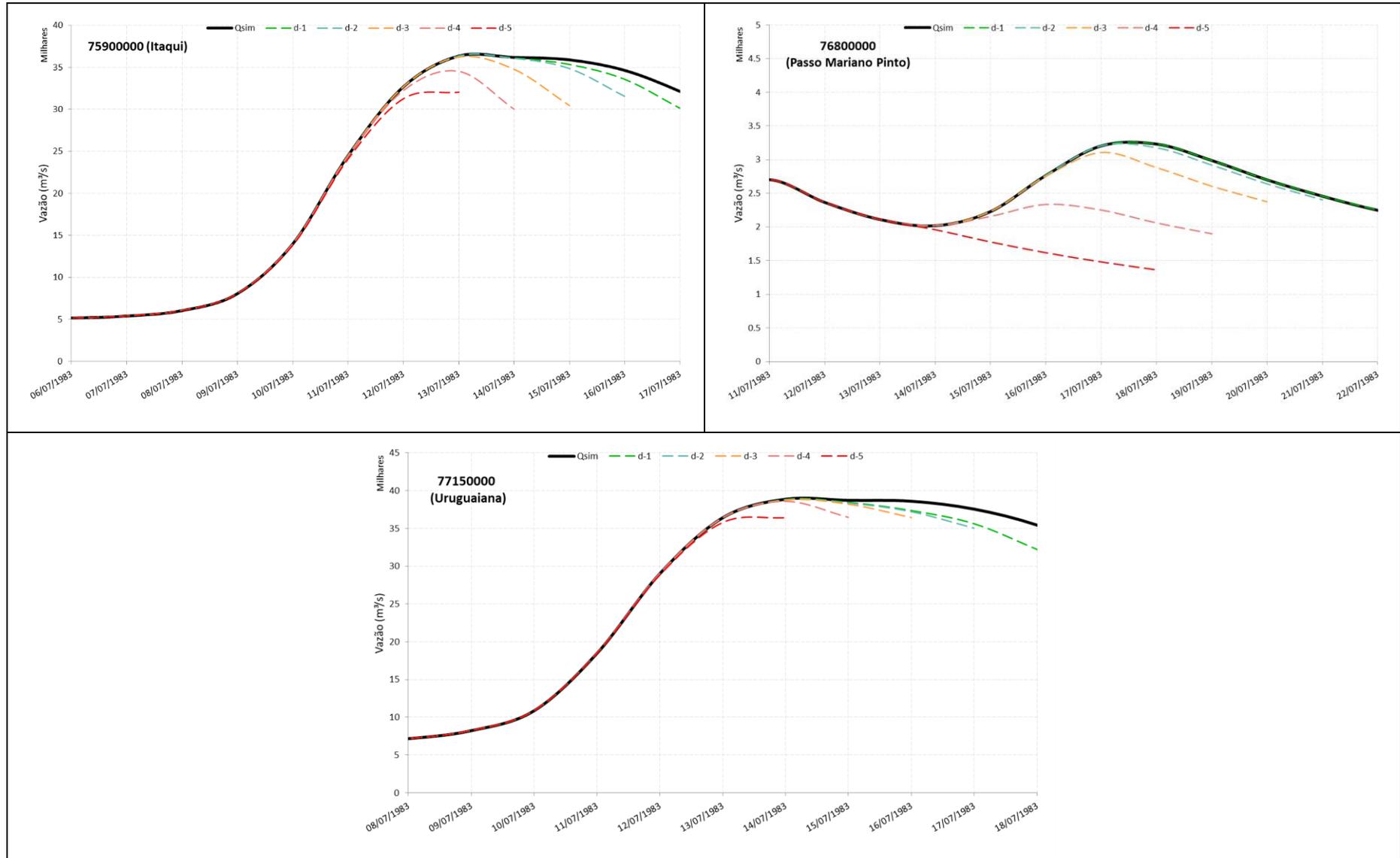


Figura 59 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de julho de 1983.



Continuação da Figura 59 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de julho de 1983.

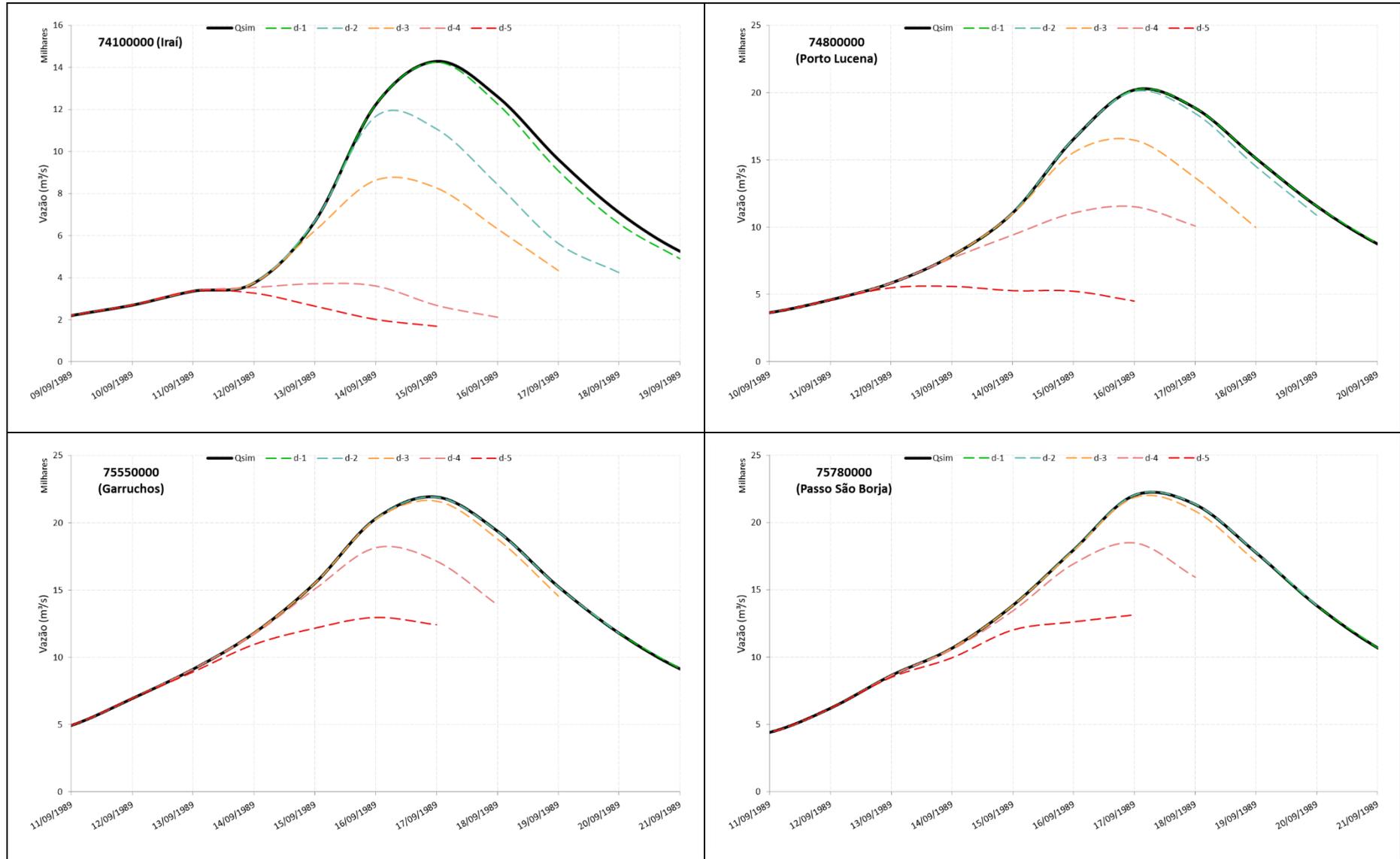
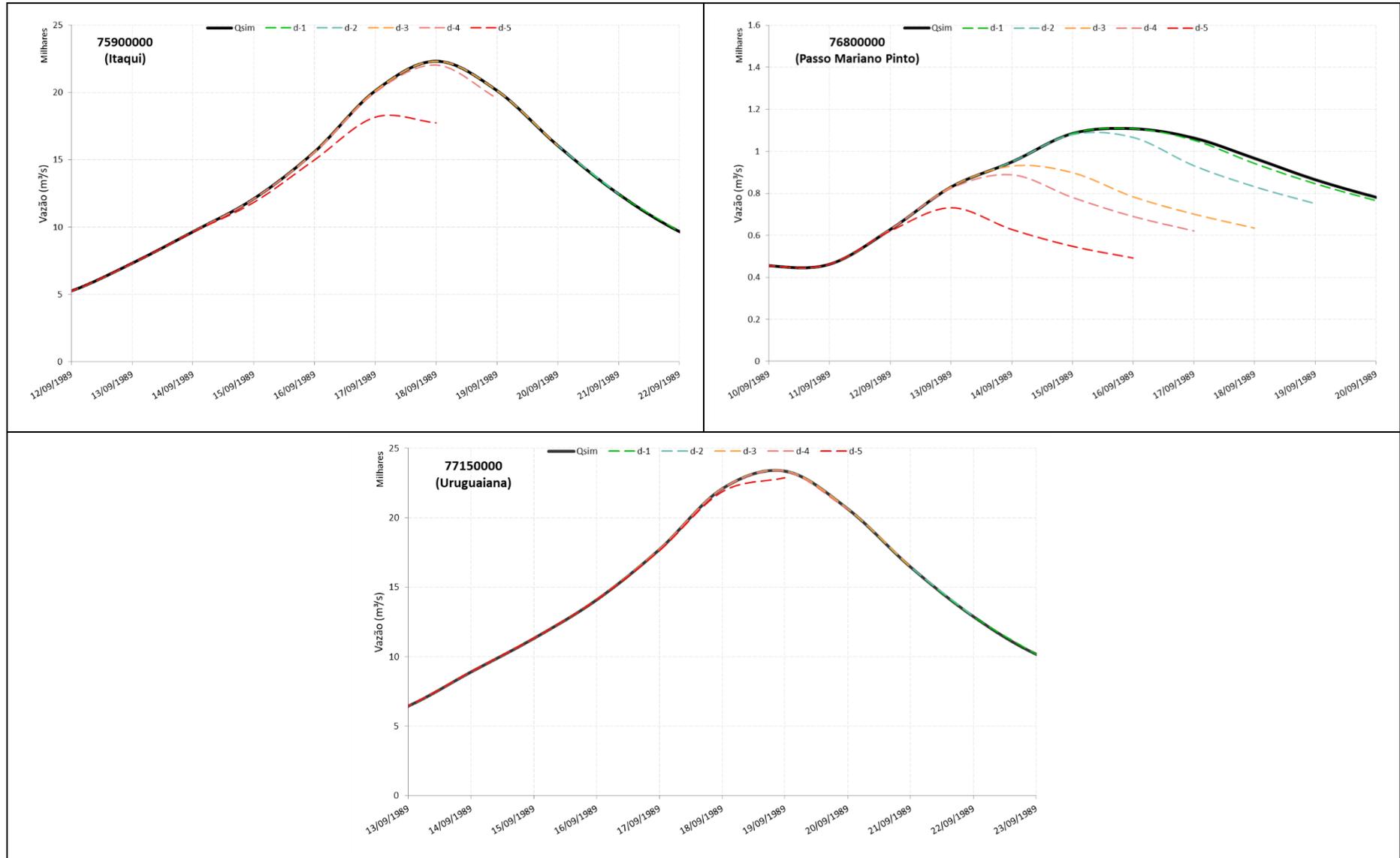


Figura 60 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de setembro de 1989.



Continuação da Figura 60 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de setembro de 1989.

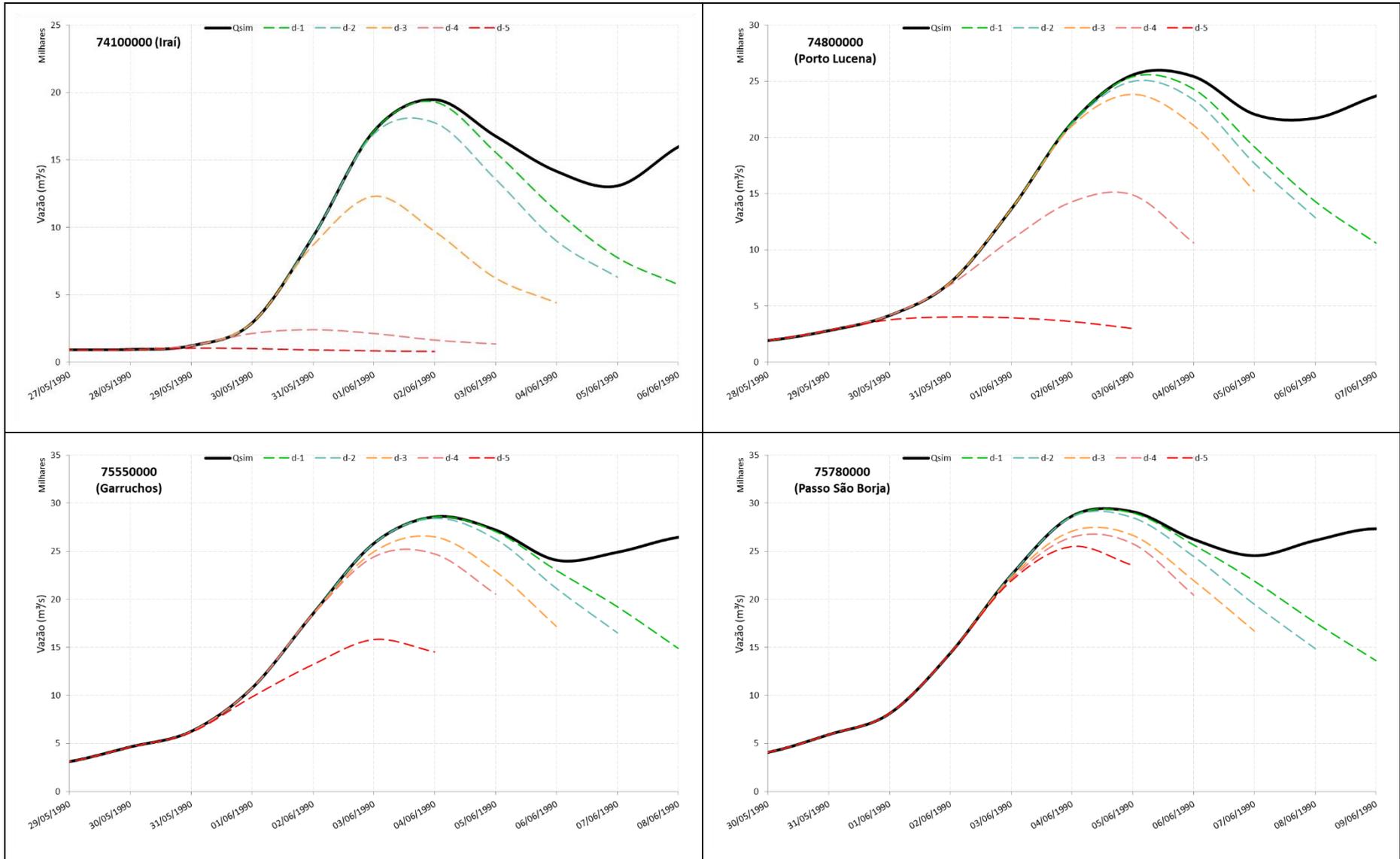
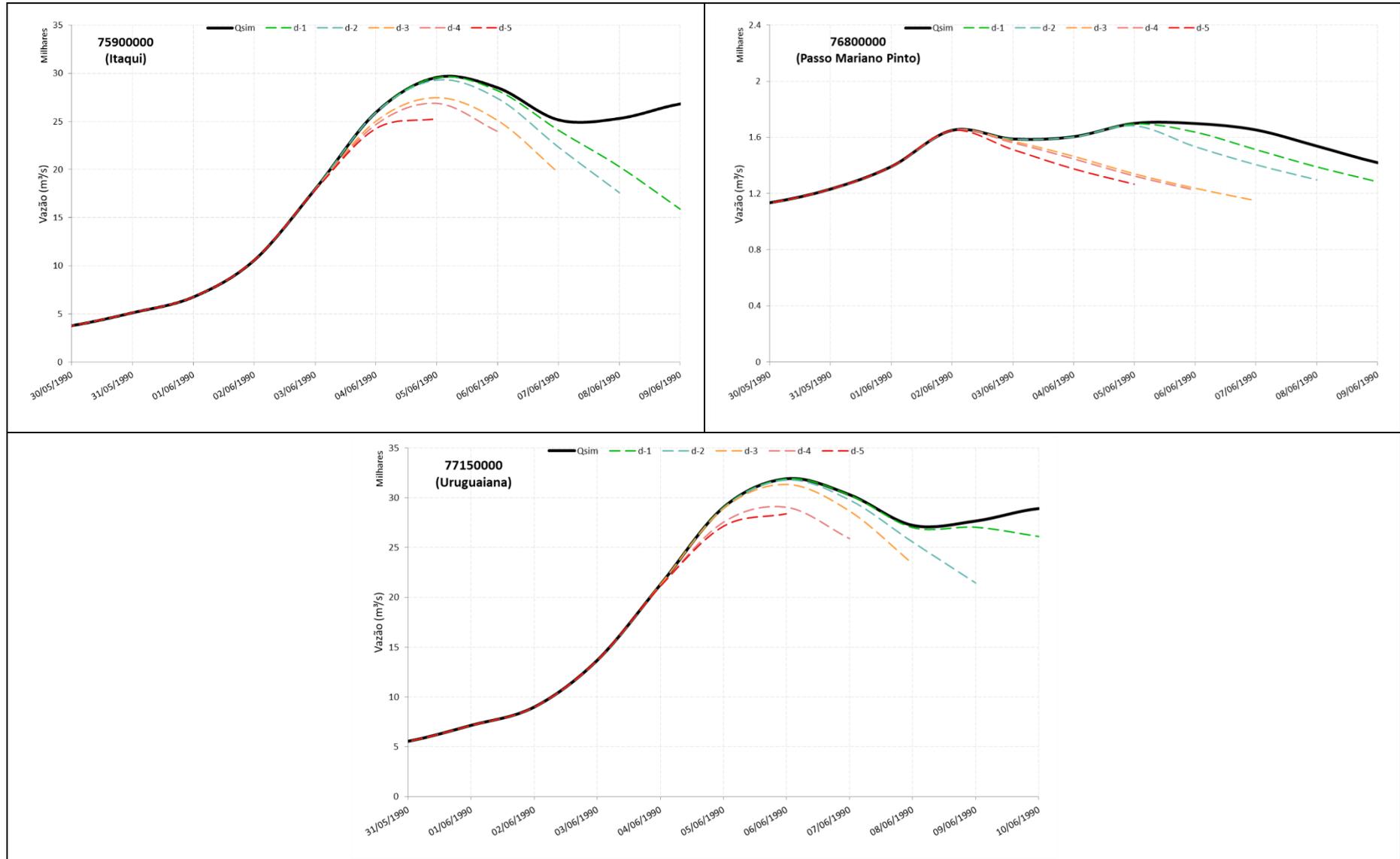


Figura 61 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de junho de 1990.



Continuação da Figura 61 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de junho de 1990.

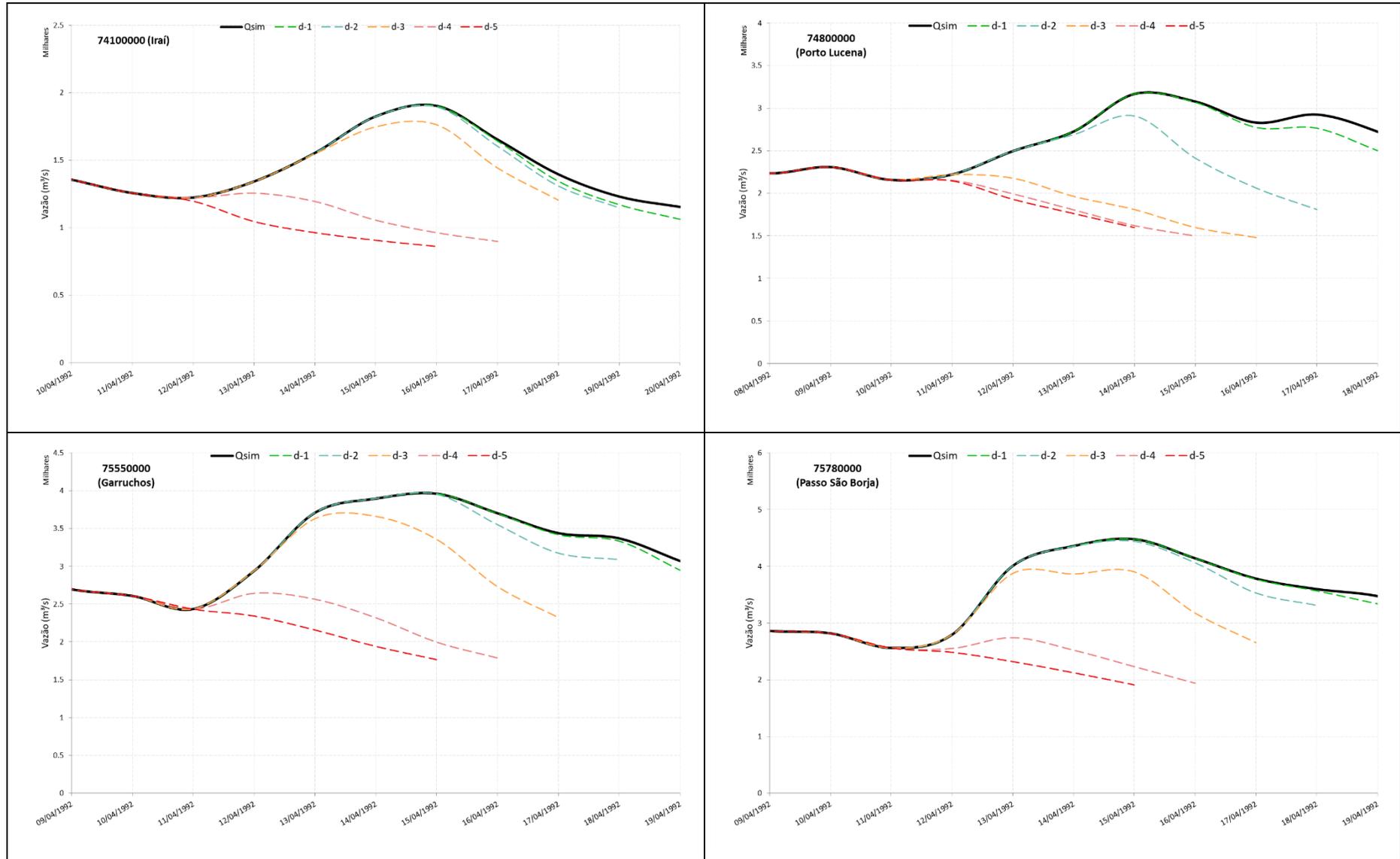
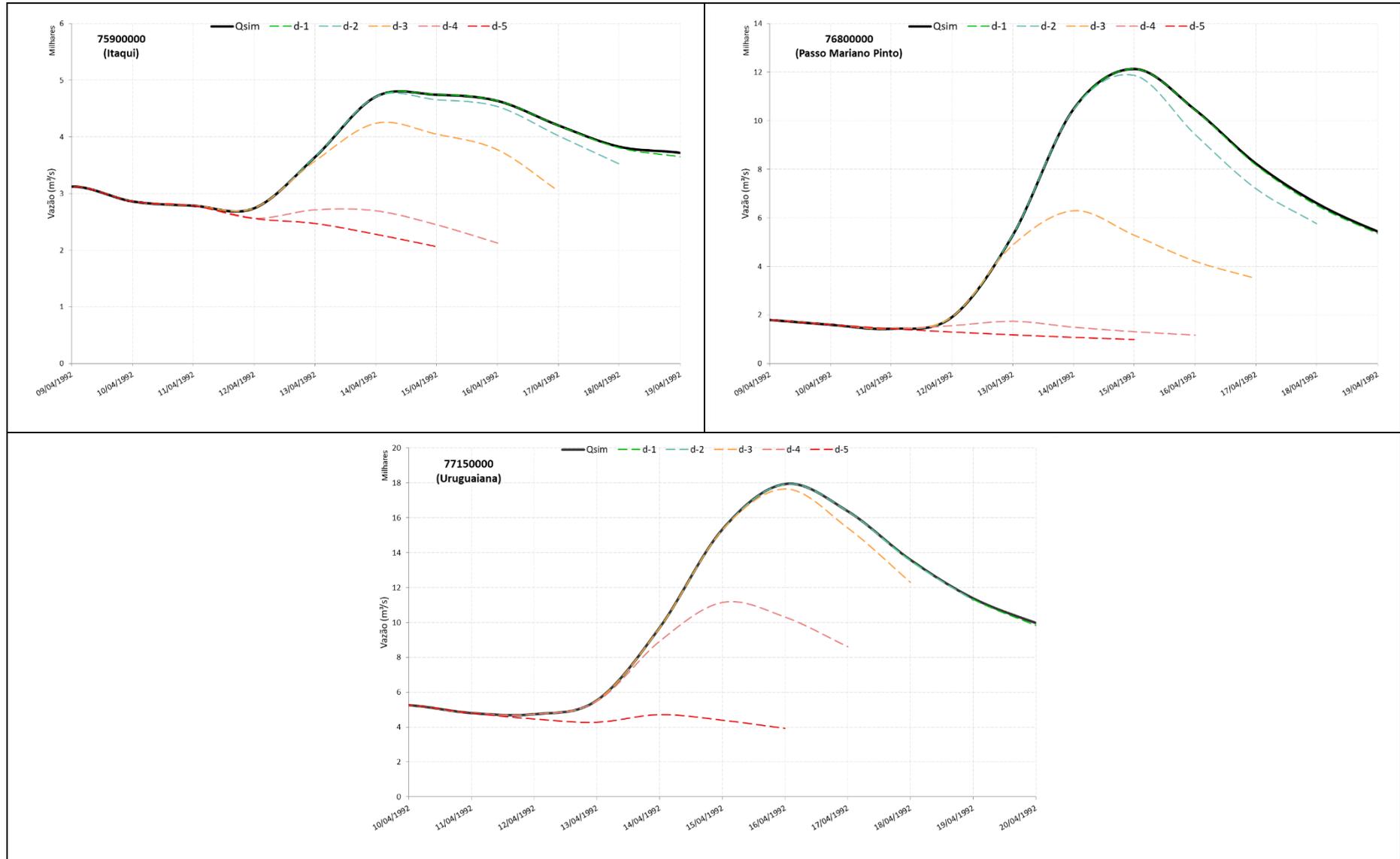


Figura 62 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de abril de 1992.



Continuação da Figura 62 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de abril de 1992.

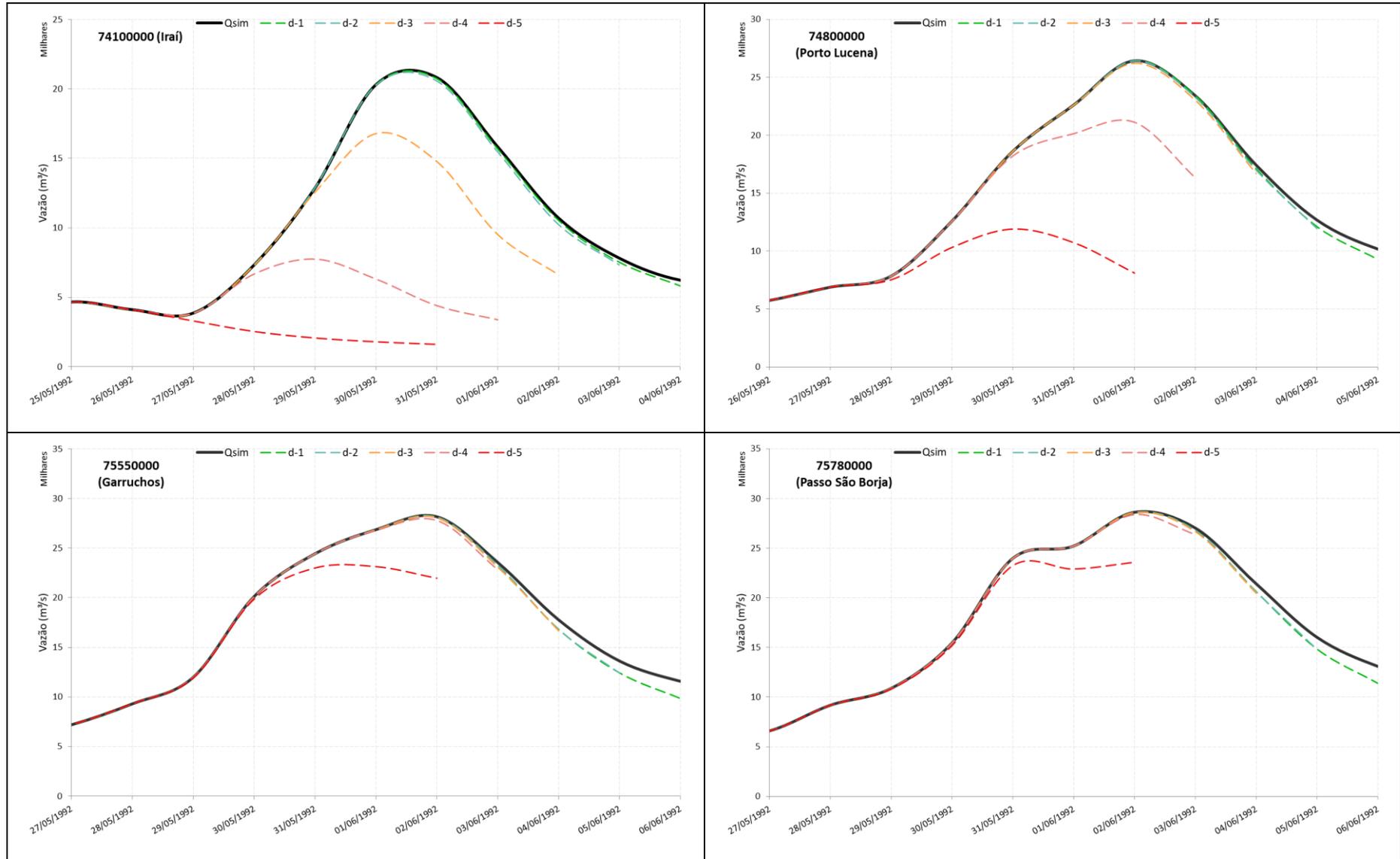
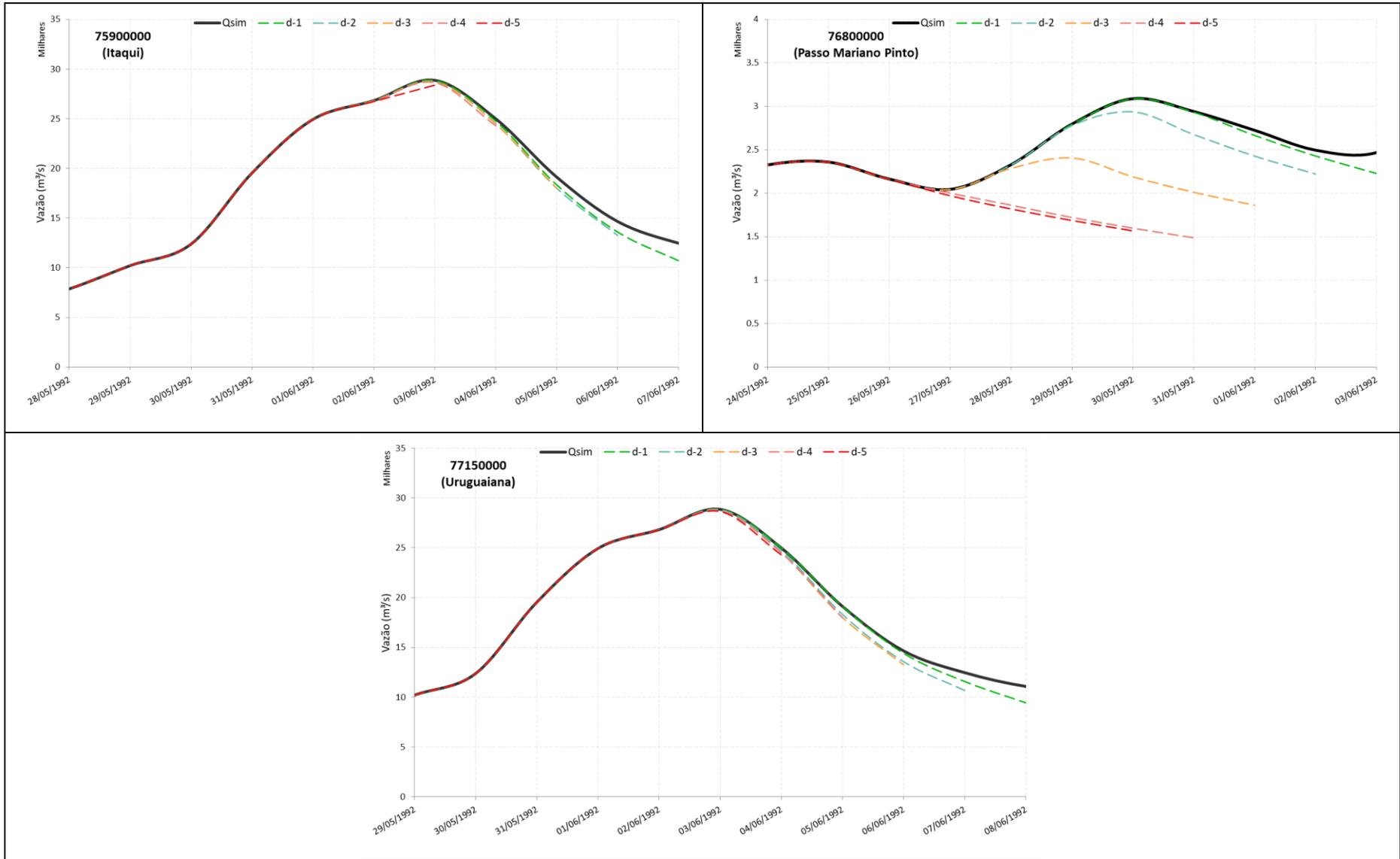


Figura 63 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de junho de 1992.



Continuação da Figura 63 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de junho de 1992.

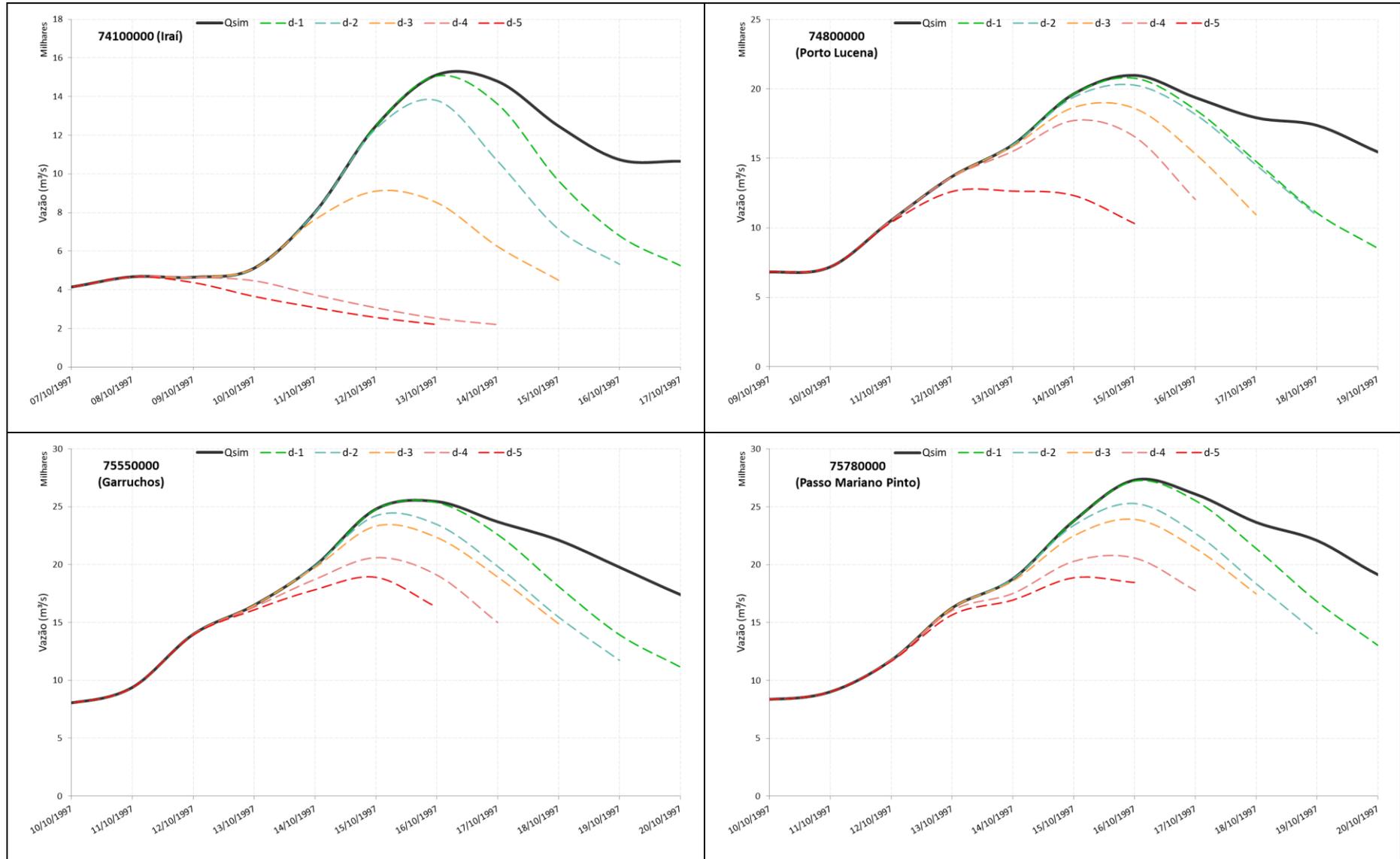
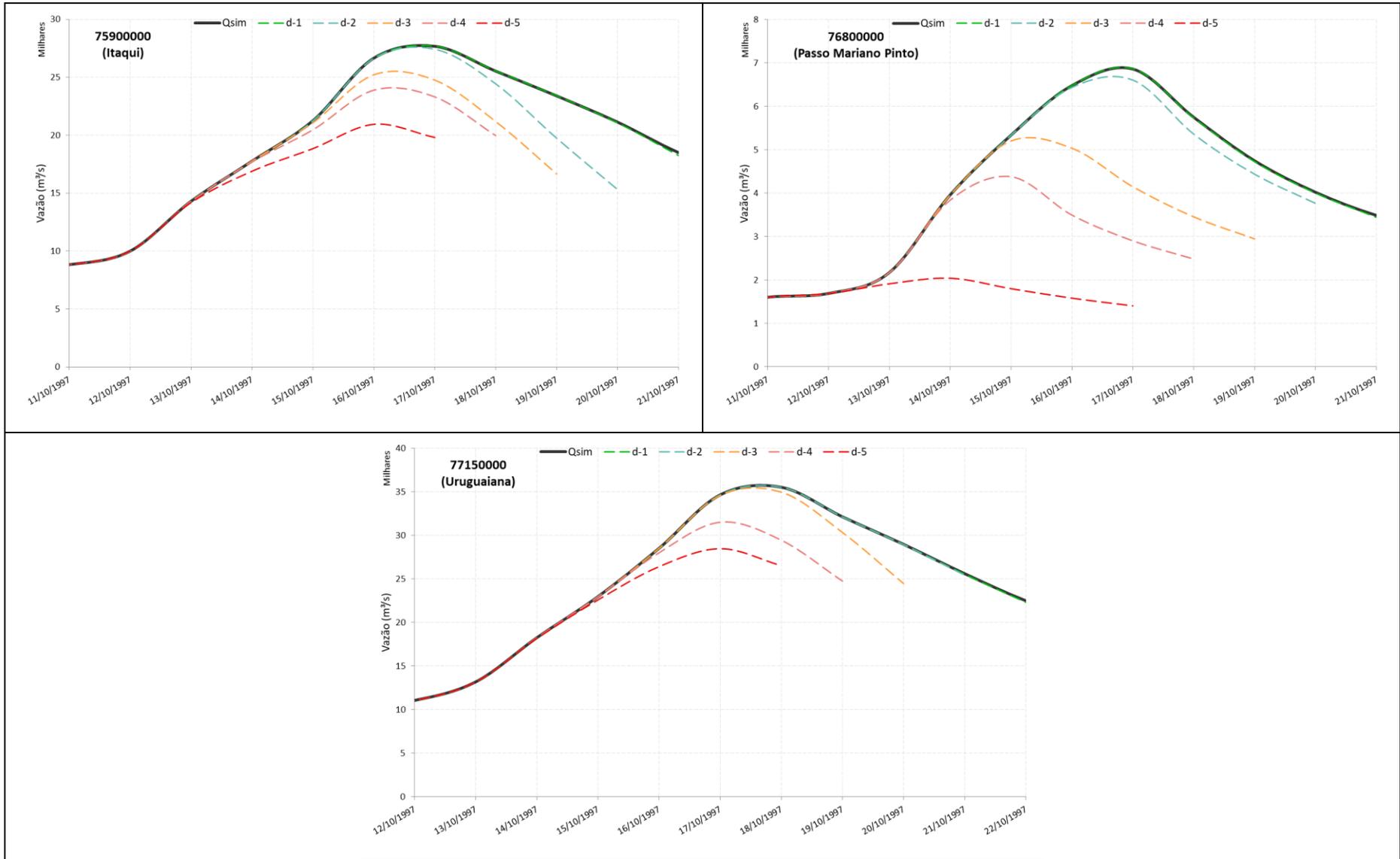


Figura 64 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de outubro de 1997.



Continuação da Figura 64 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de outubro de 1997.

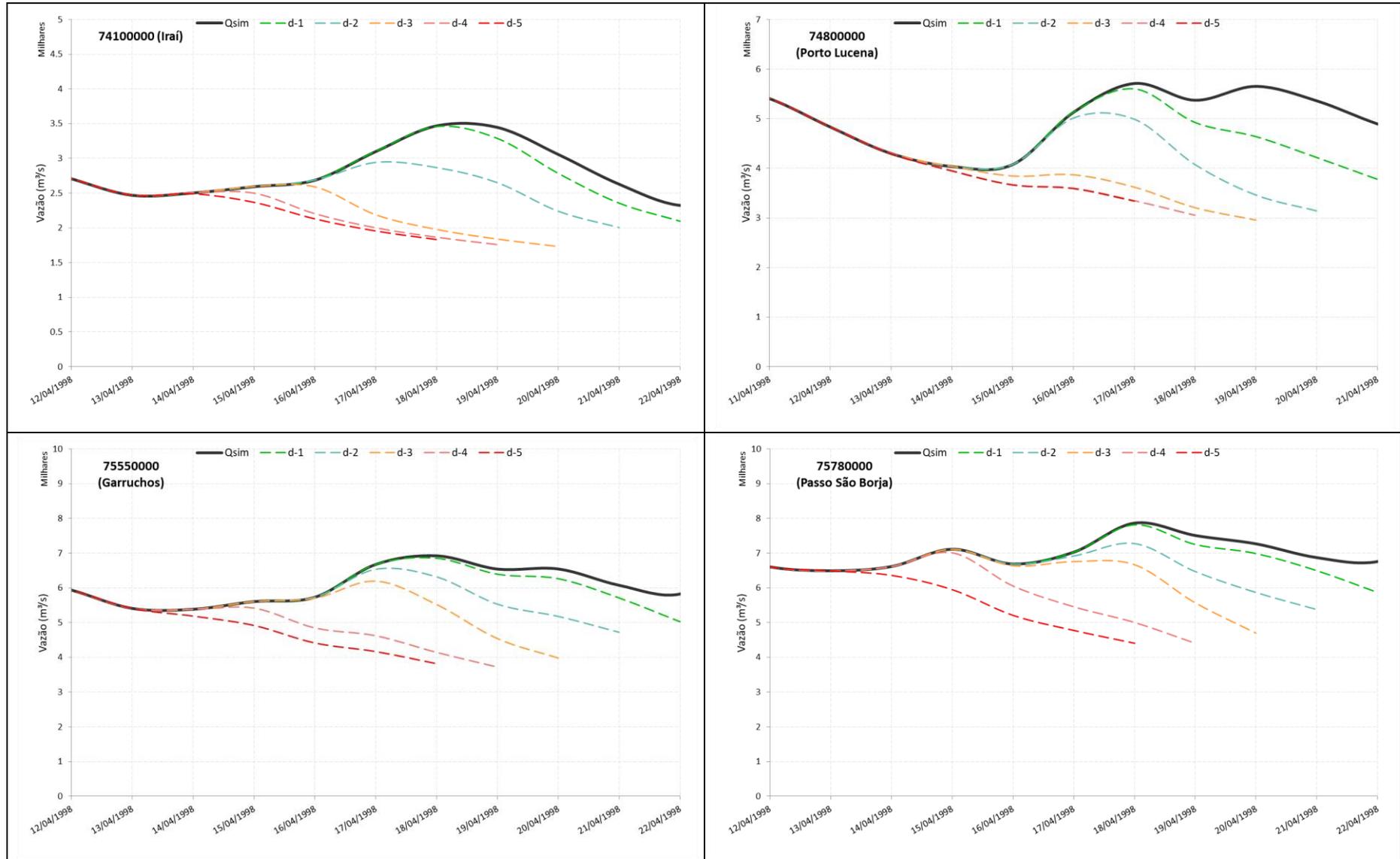
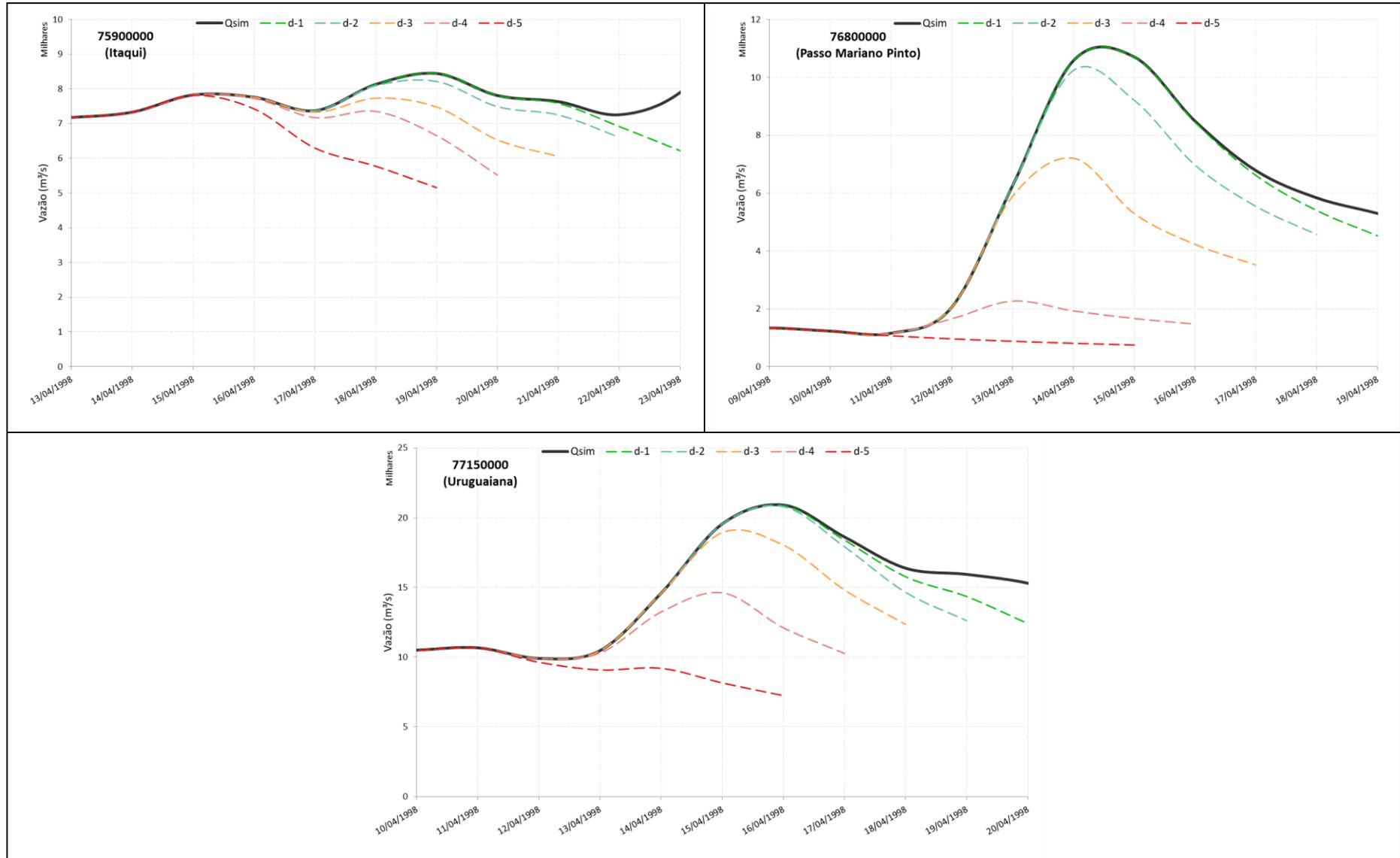


Figura 65 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de abril de 1998.



Continuação da Figura 65 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de abril de 1998.

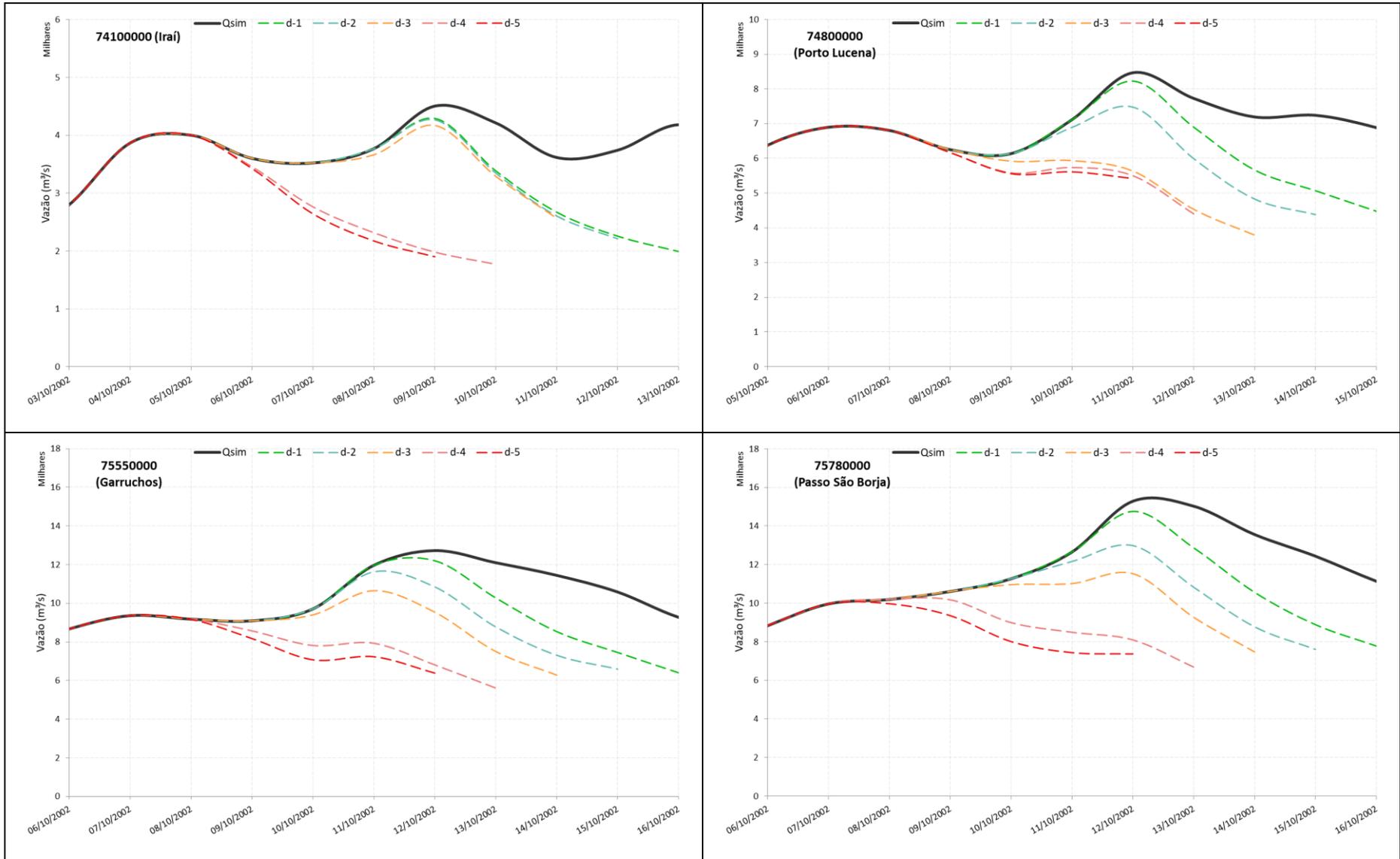
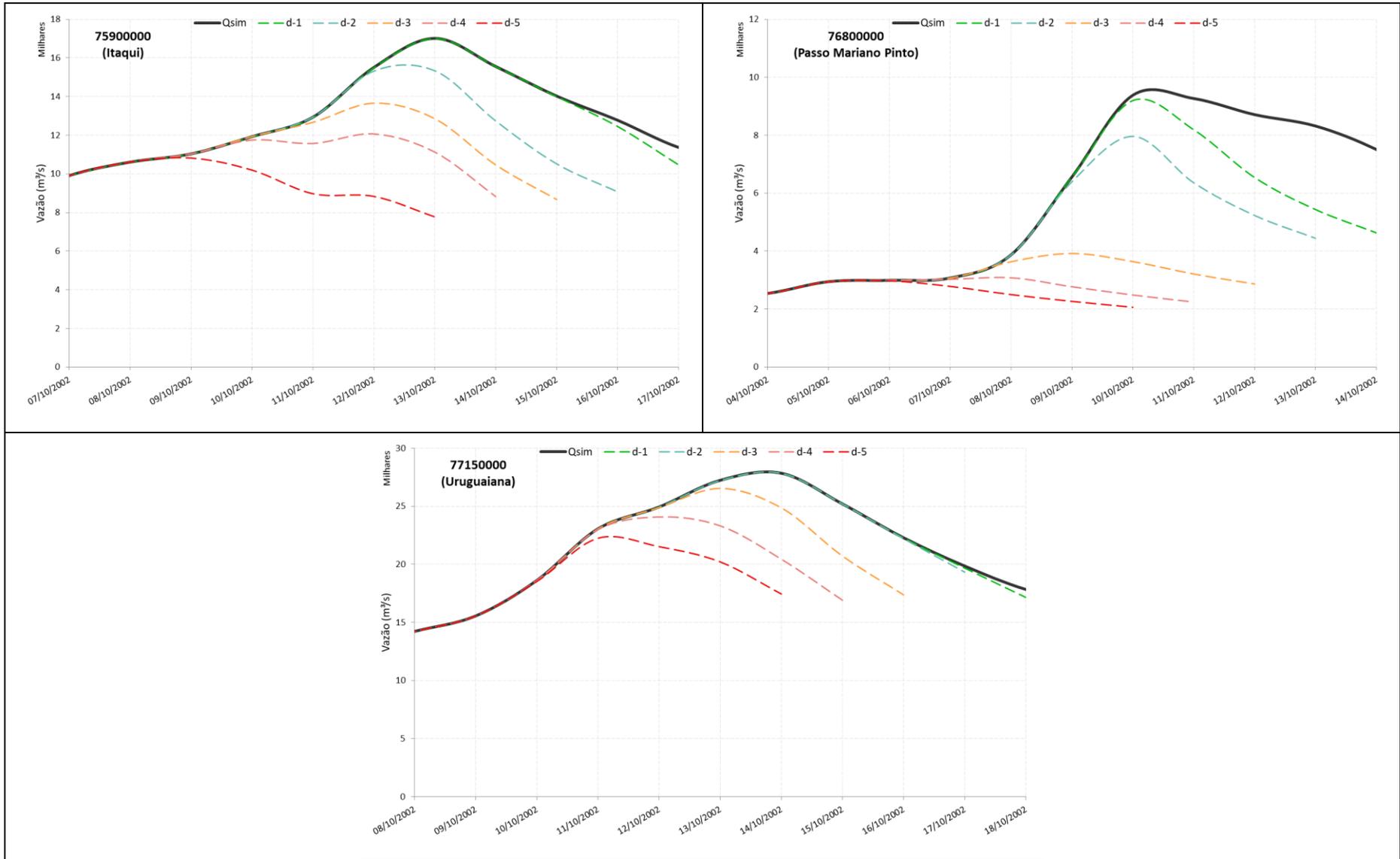


Figura 66 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de outubro de 2002.



Continuação da Figura 66 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de outubro de 2002.

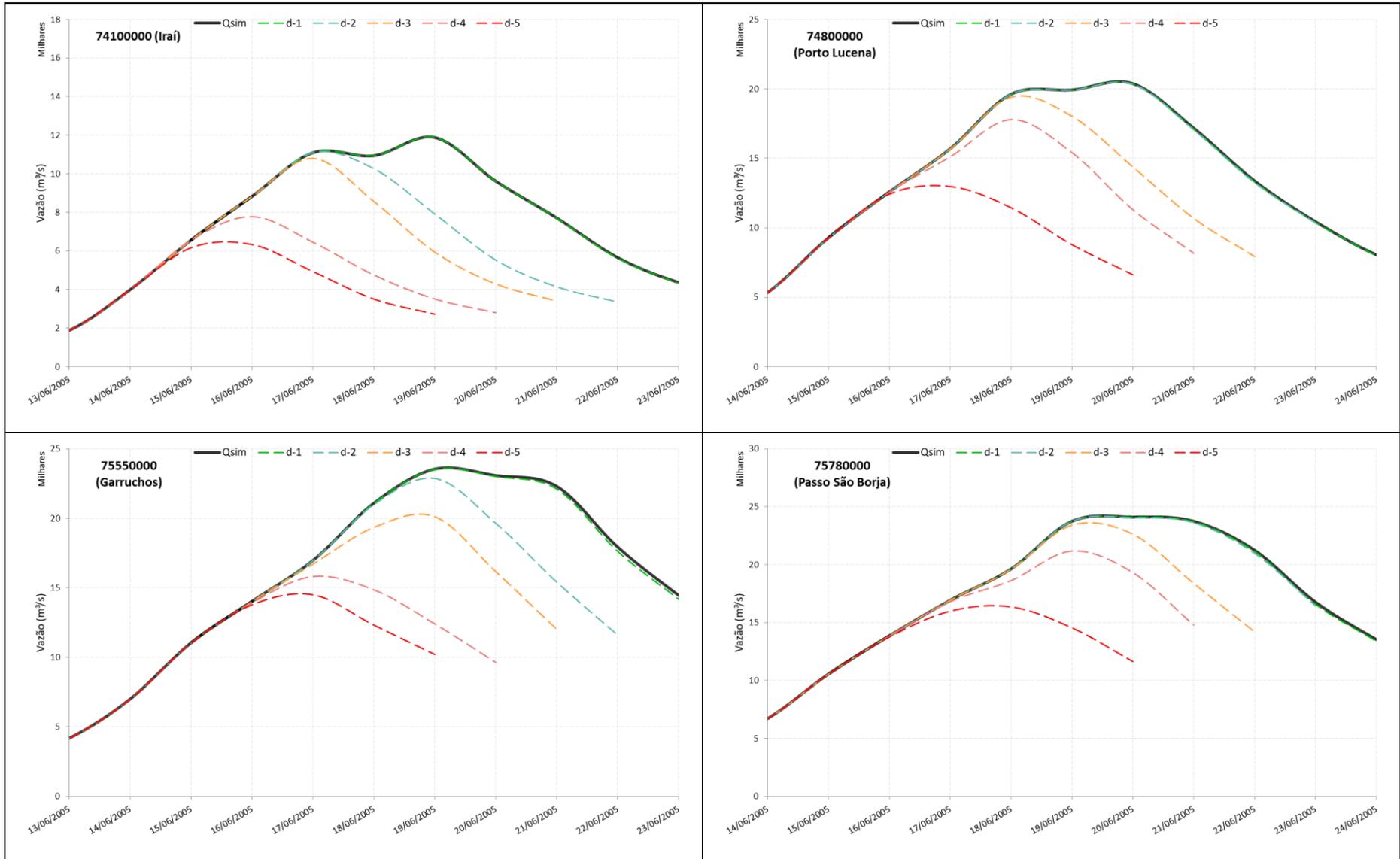
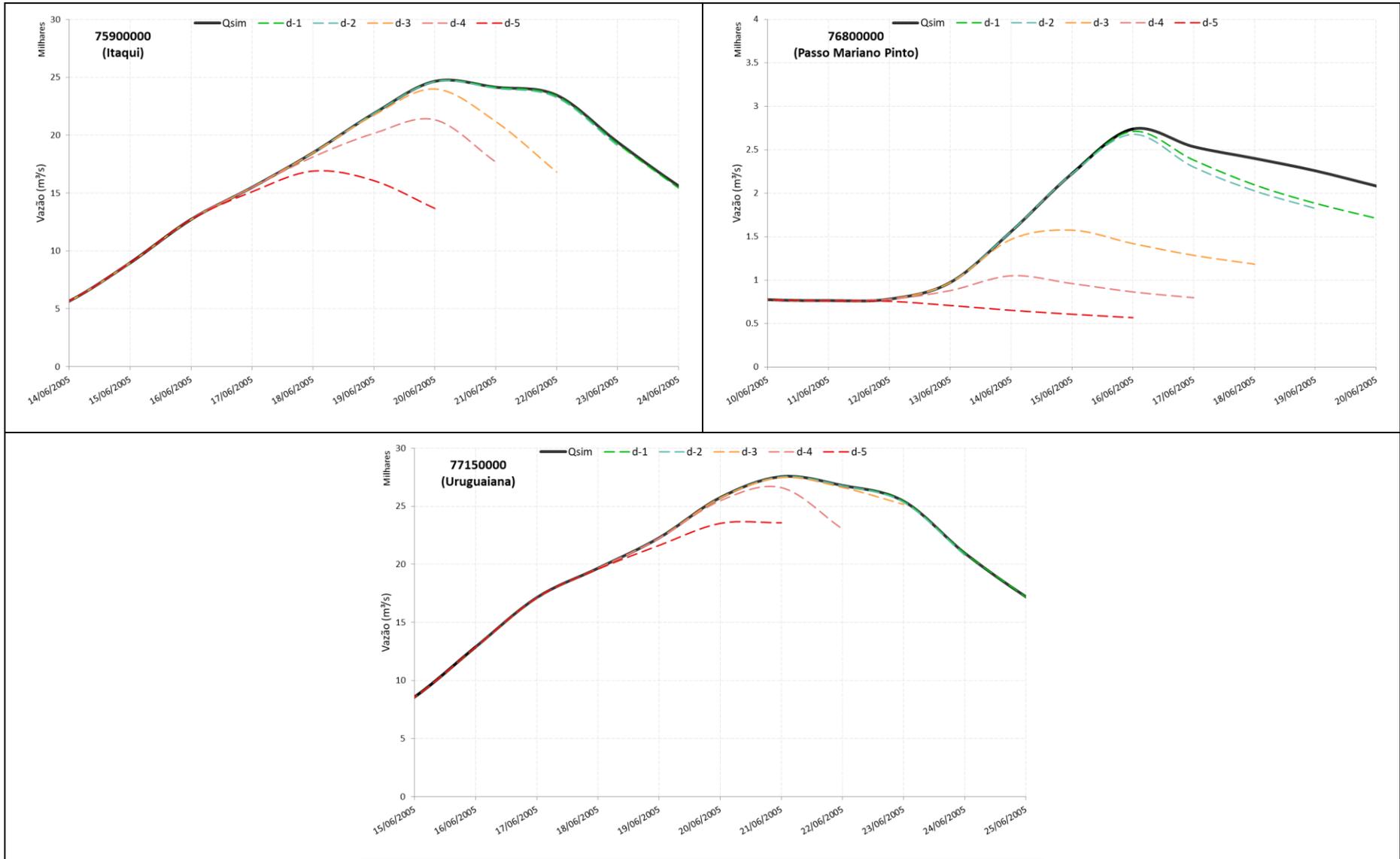


Figura 67 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de junho de 2005.



Continuação da Figura 67 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de junho de 2005.

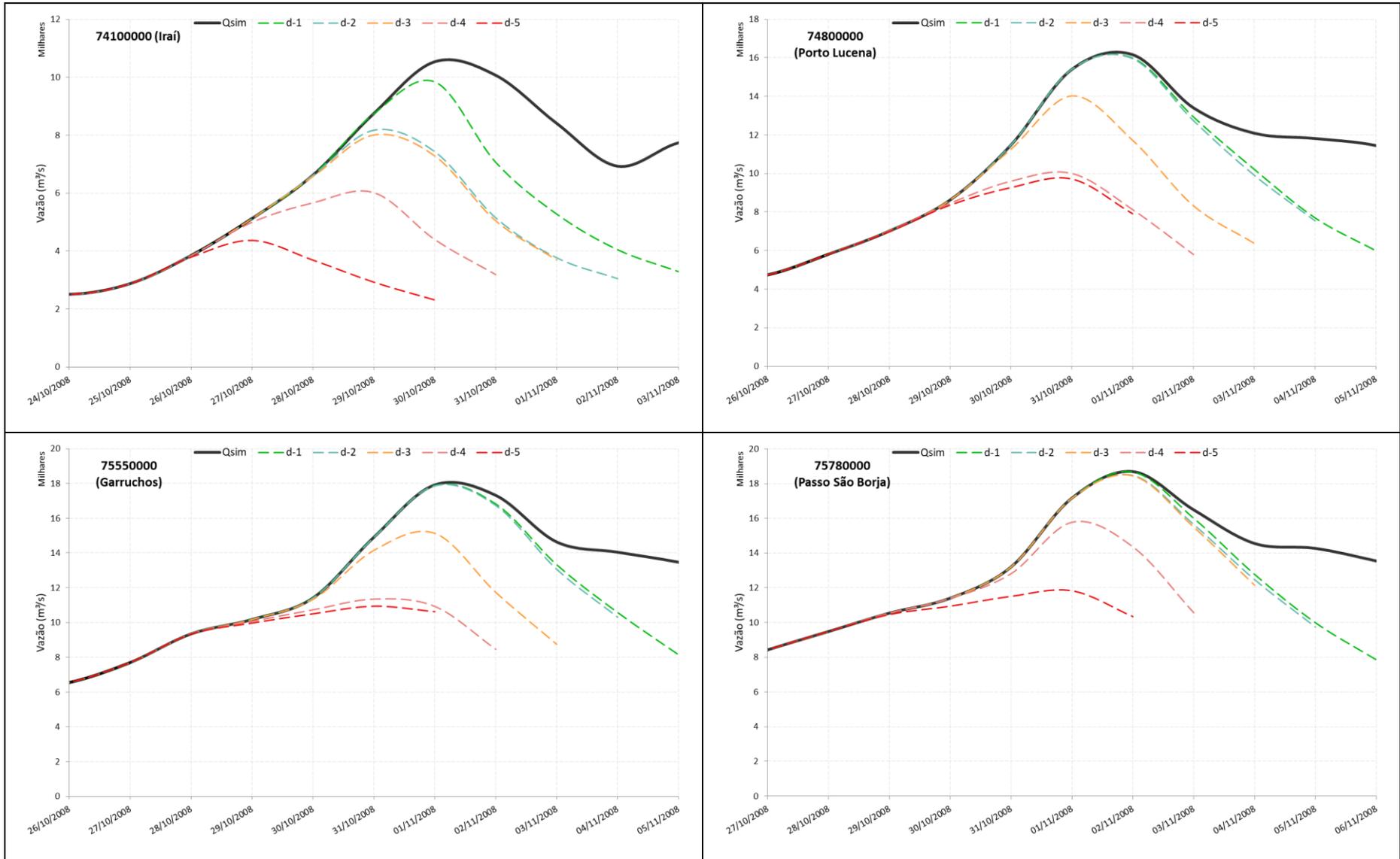
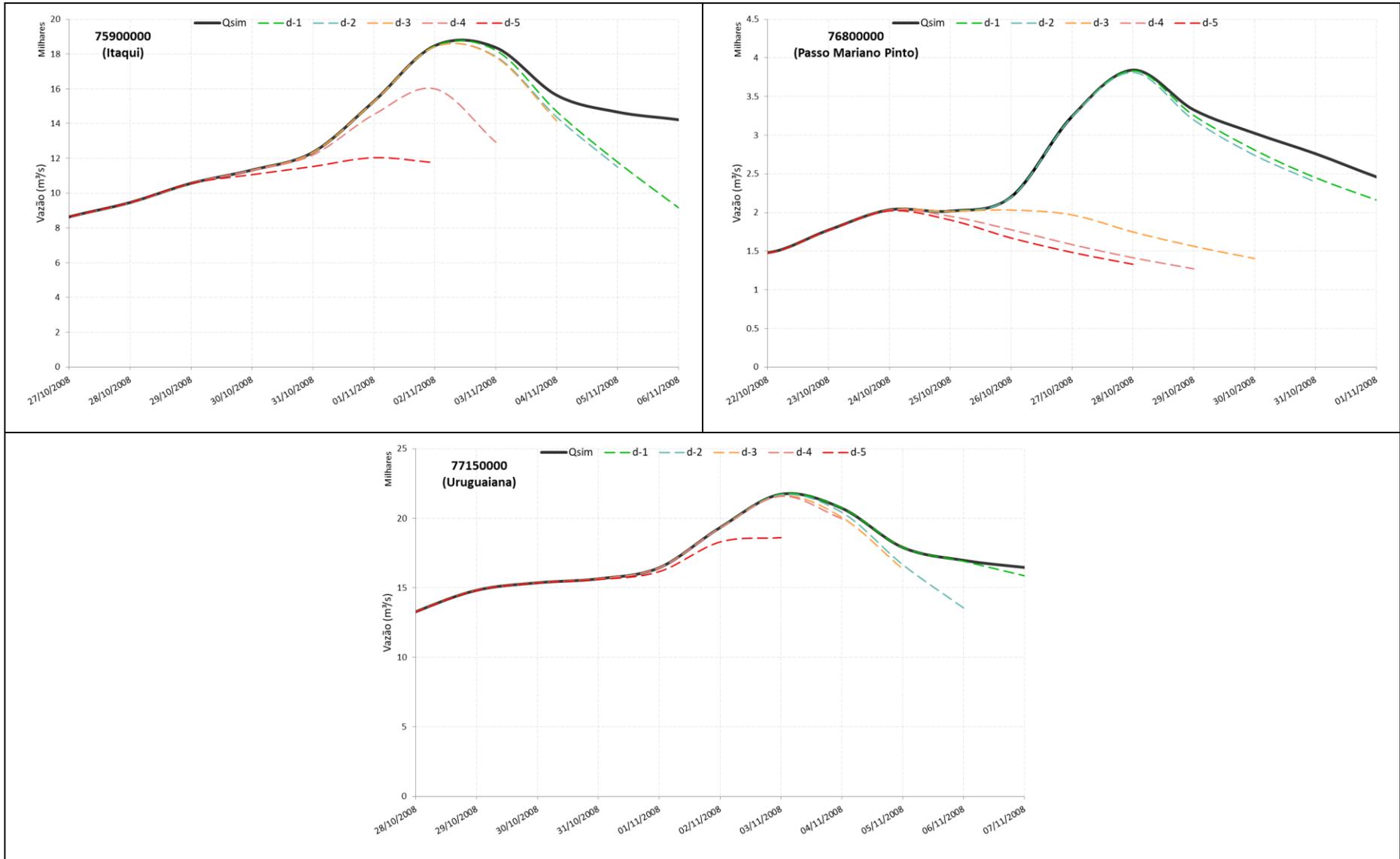


Figura 68 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de novembro de 2008.



Continuação da Figura 68 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de novembro de 2008.

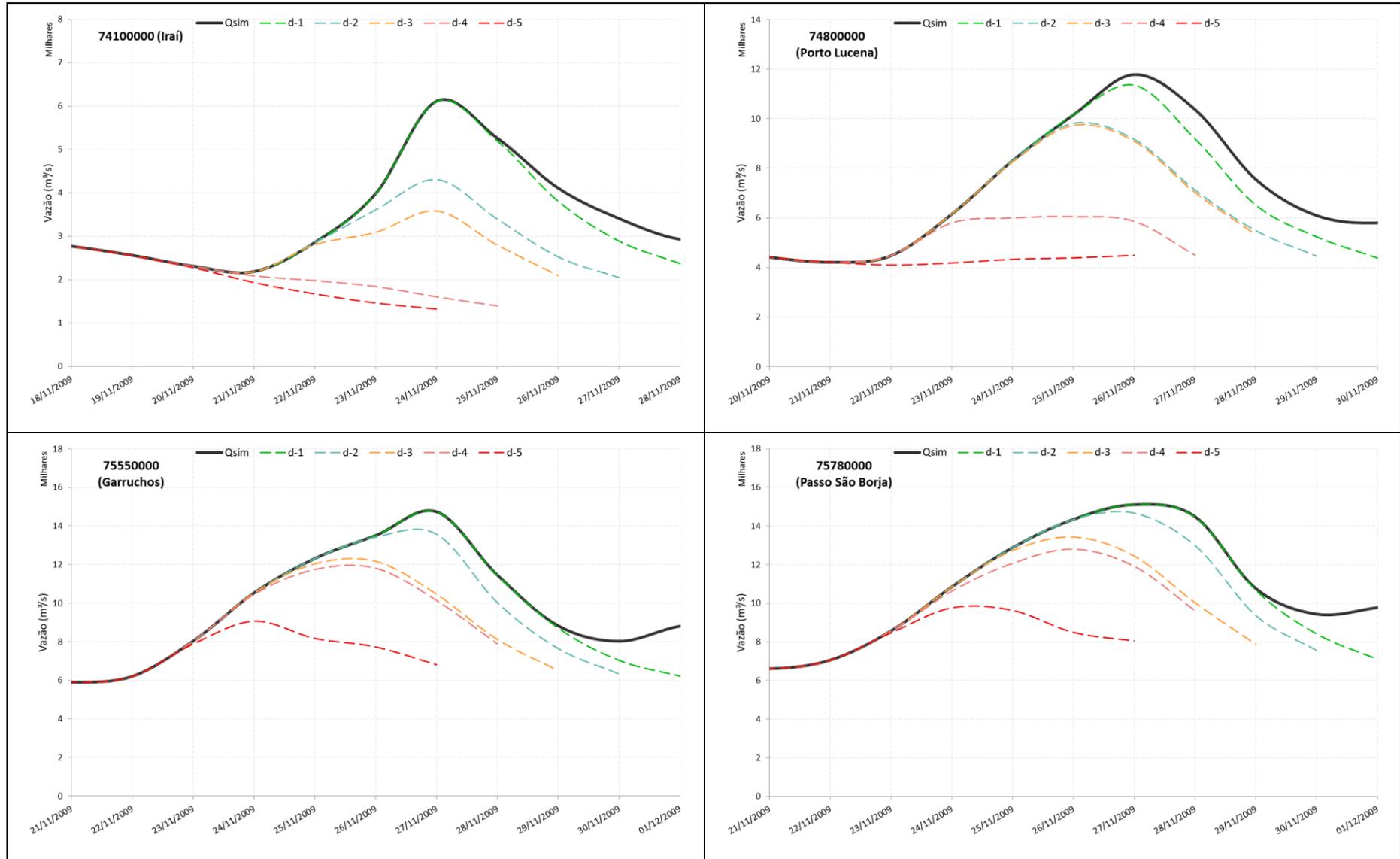
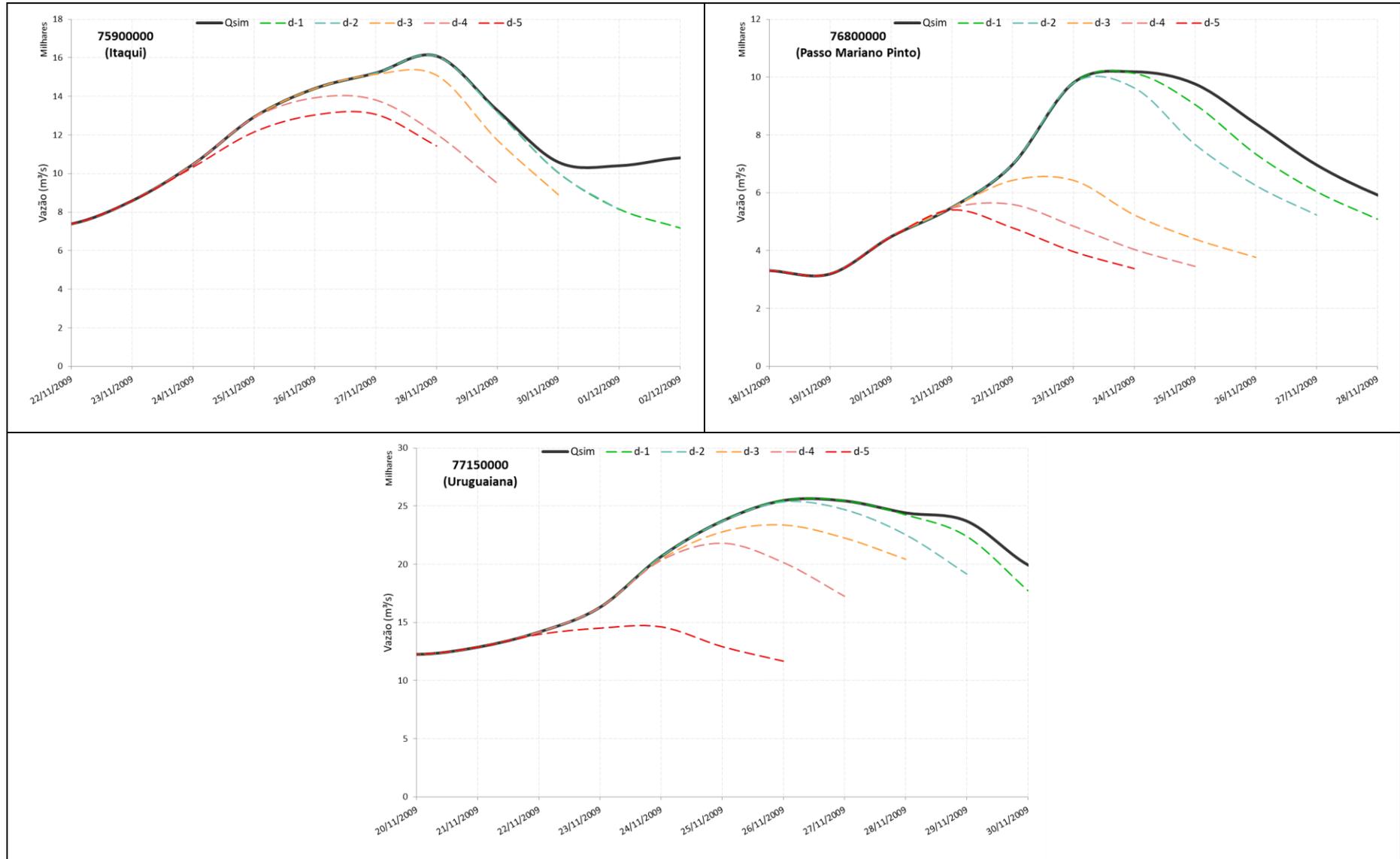


Figura 69 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de novembro de 2009.



Continuação da Figura 69 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de novembro de 2009.

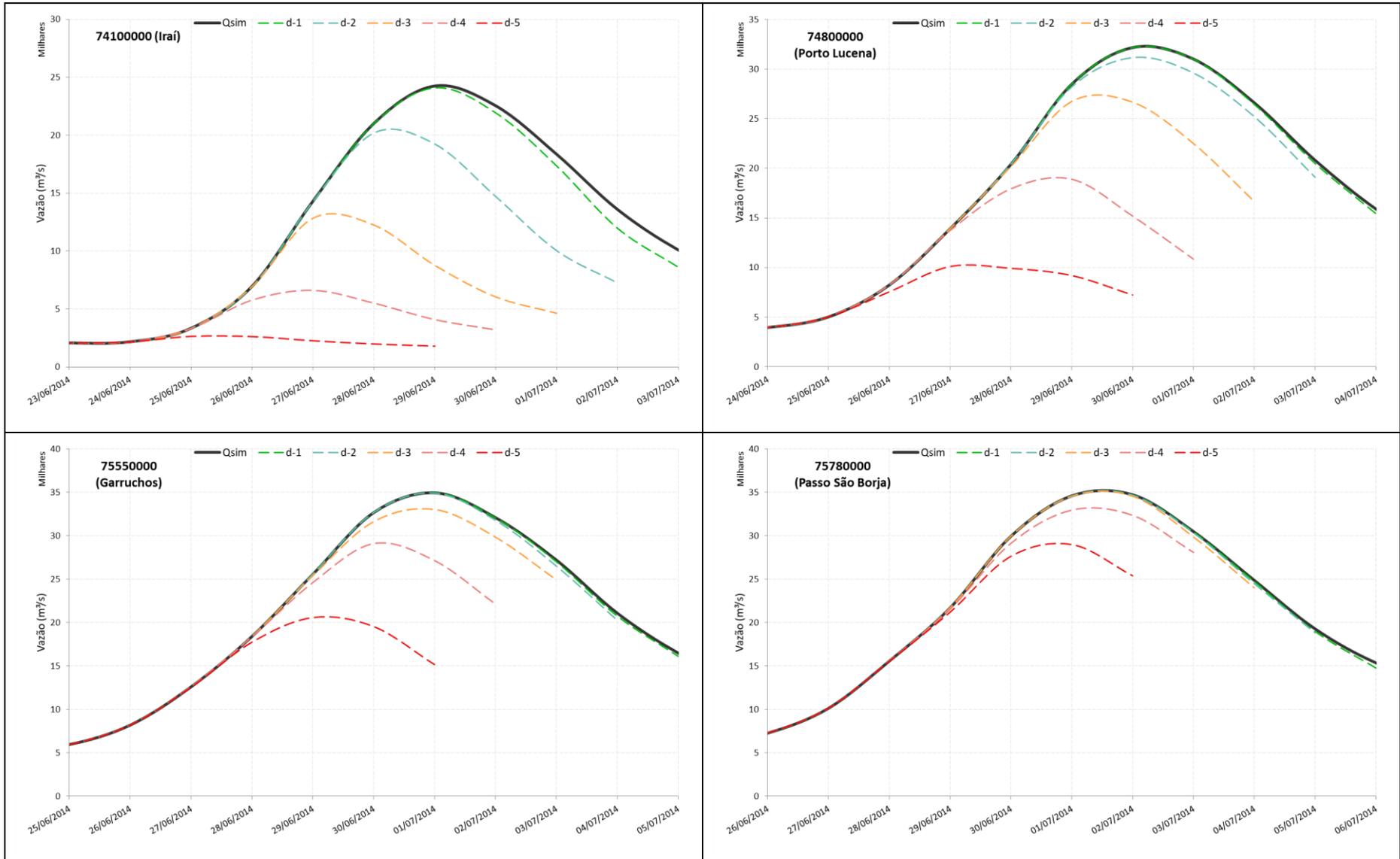
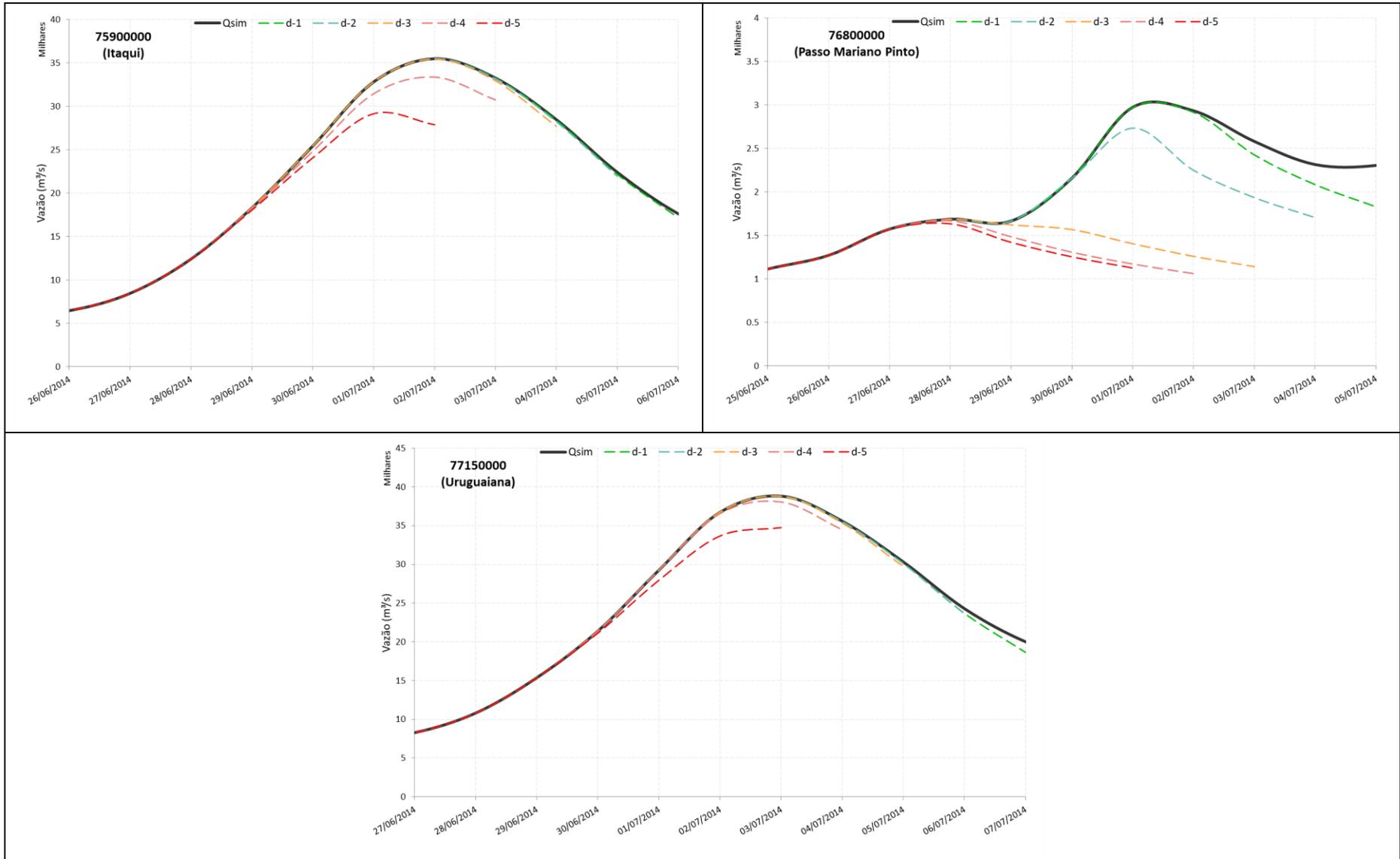


Figura 70 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de julho de 2014.



Continuação da Figura 70 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de julho de 2014.

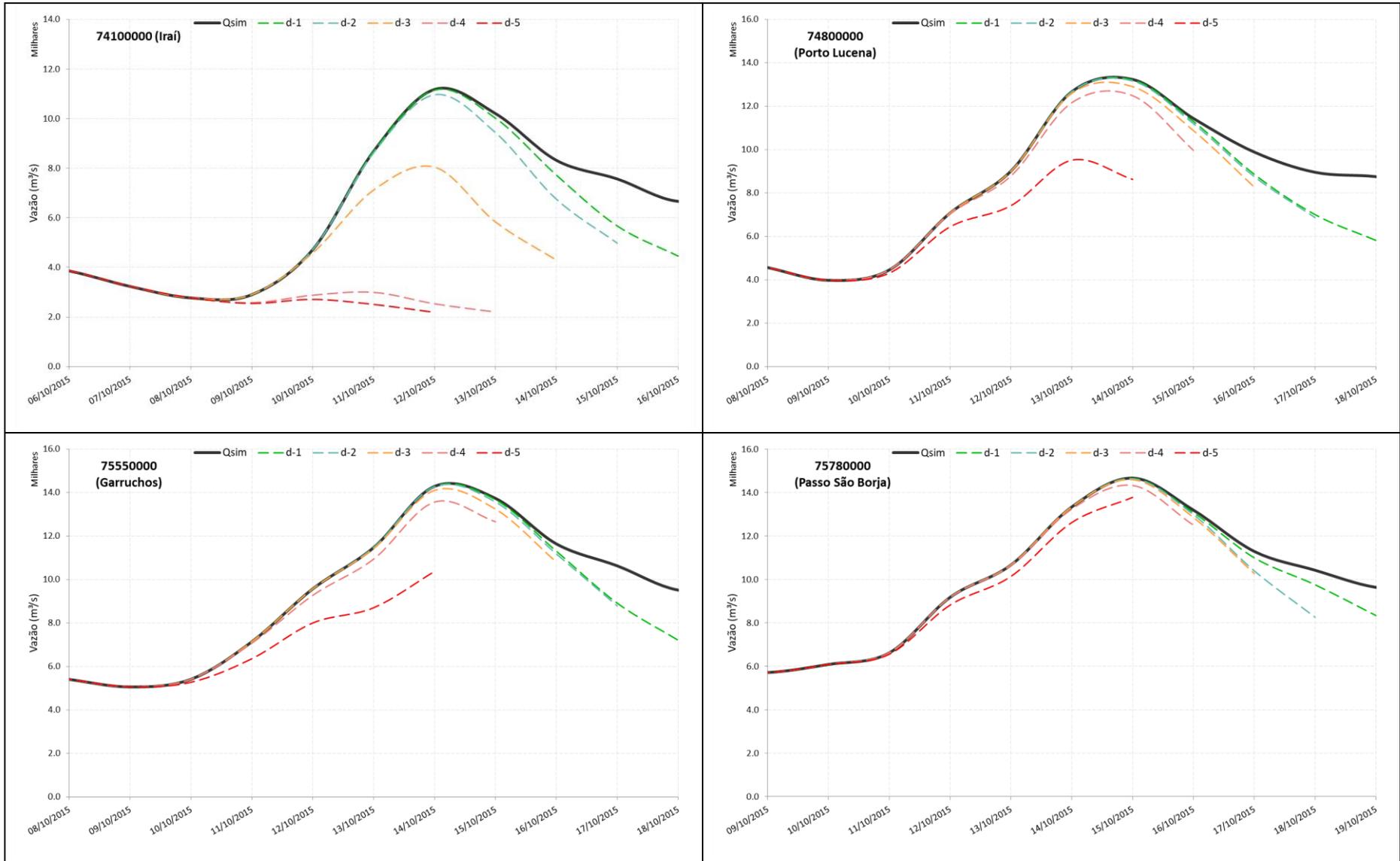
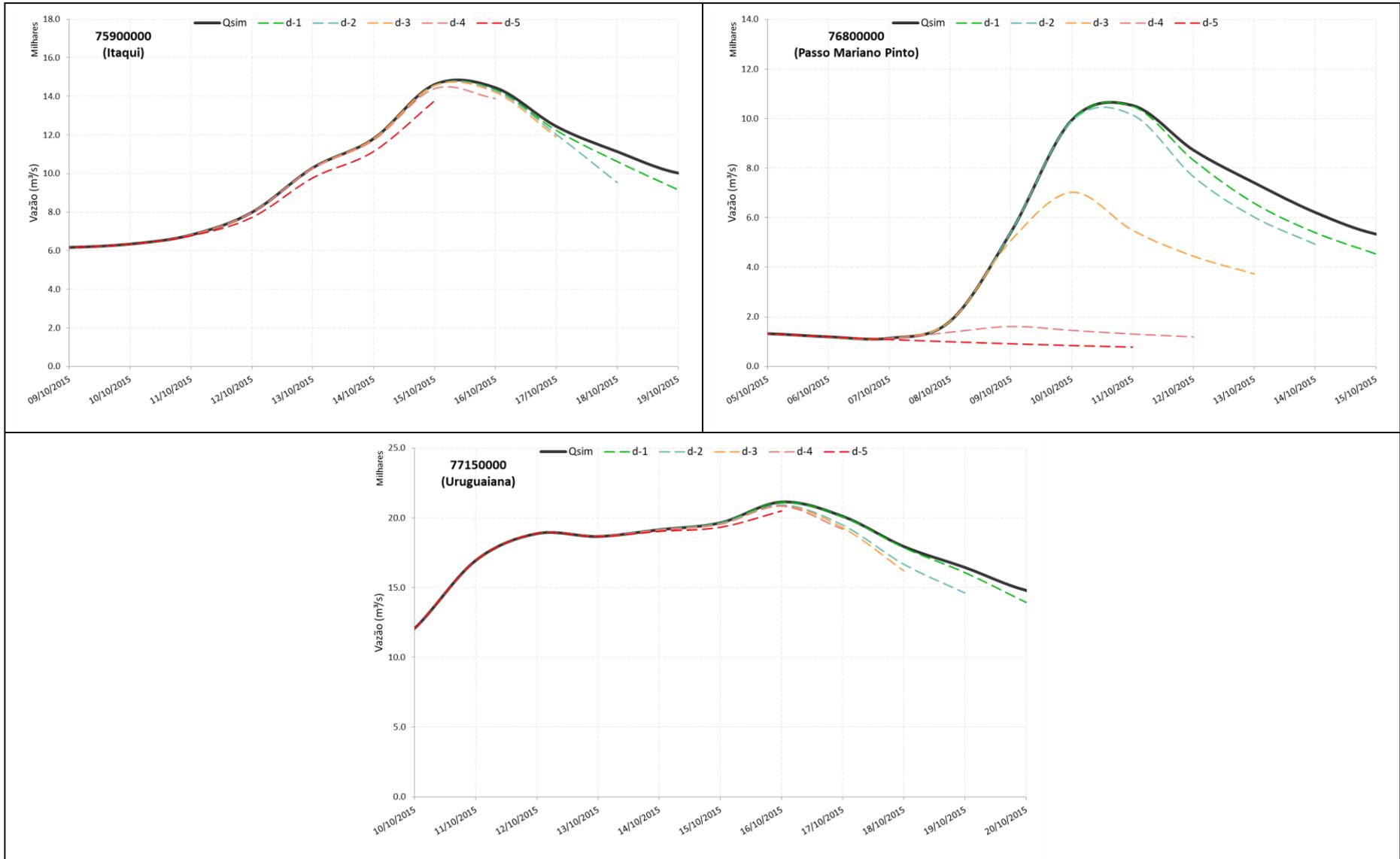


Figura 71 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de outubro de 2015.



Continuação da Figura 71 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de outubro de 2015.

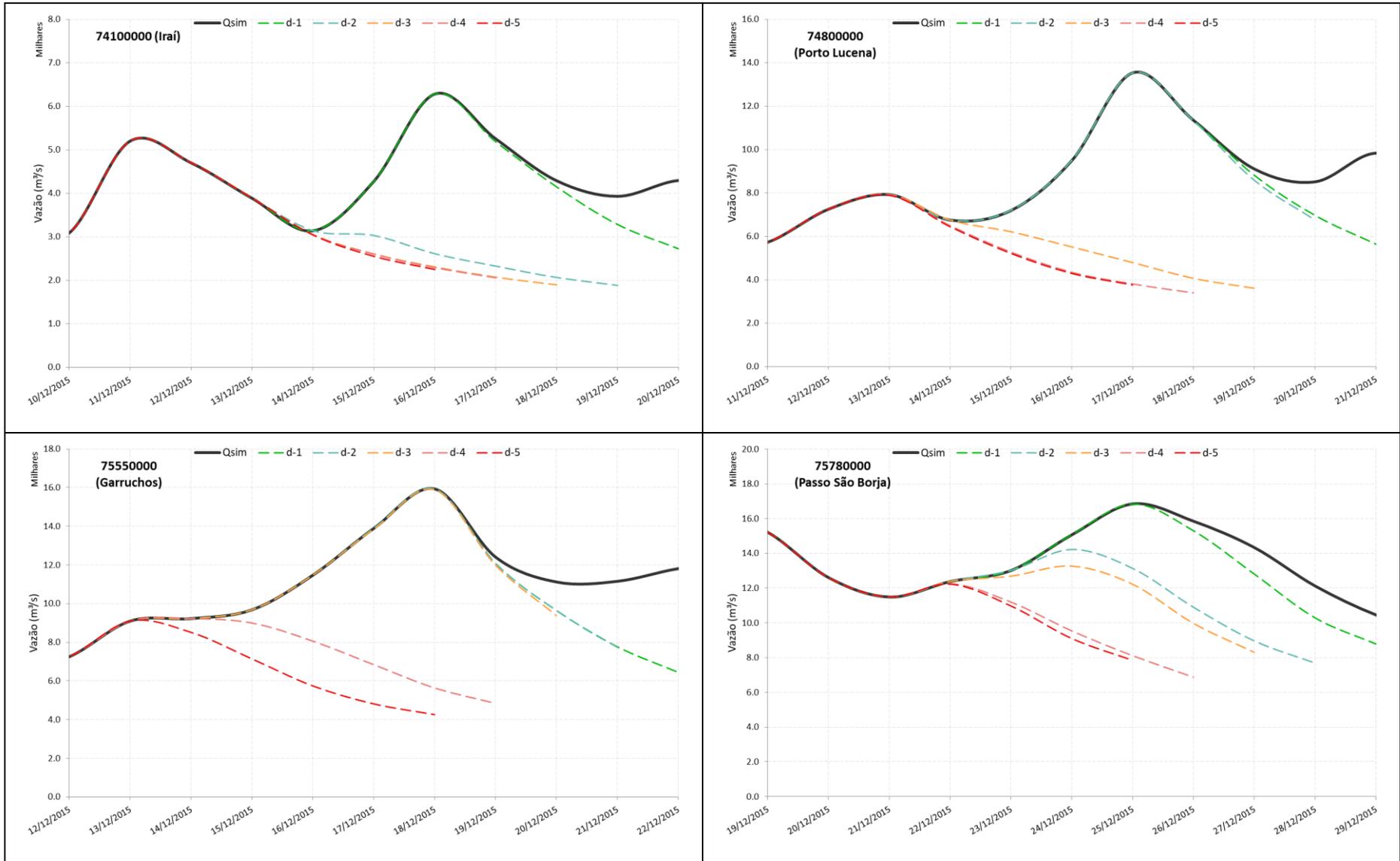
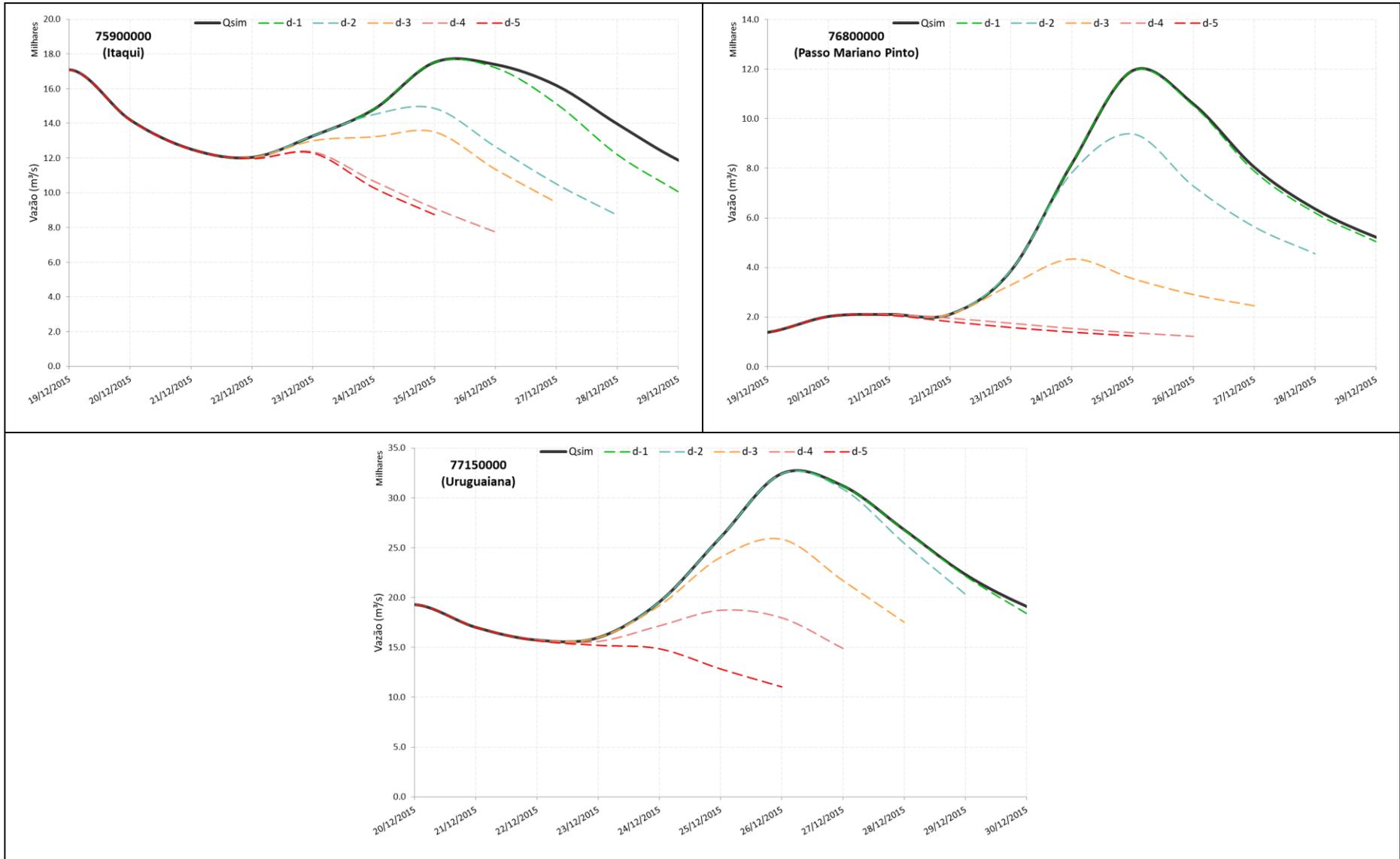


Figura 72 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de dezembro de 2015.



Continuação da Figura 72 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de dezembro de 2015.

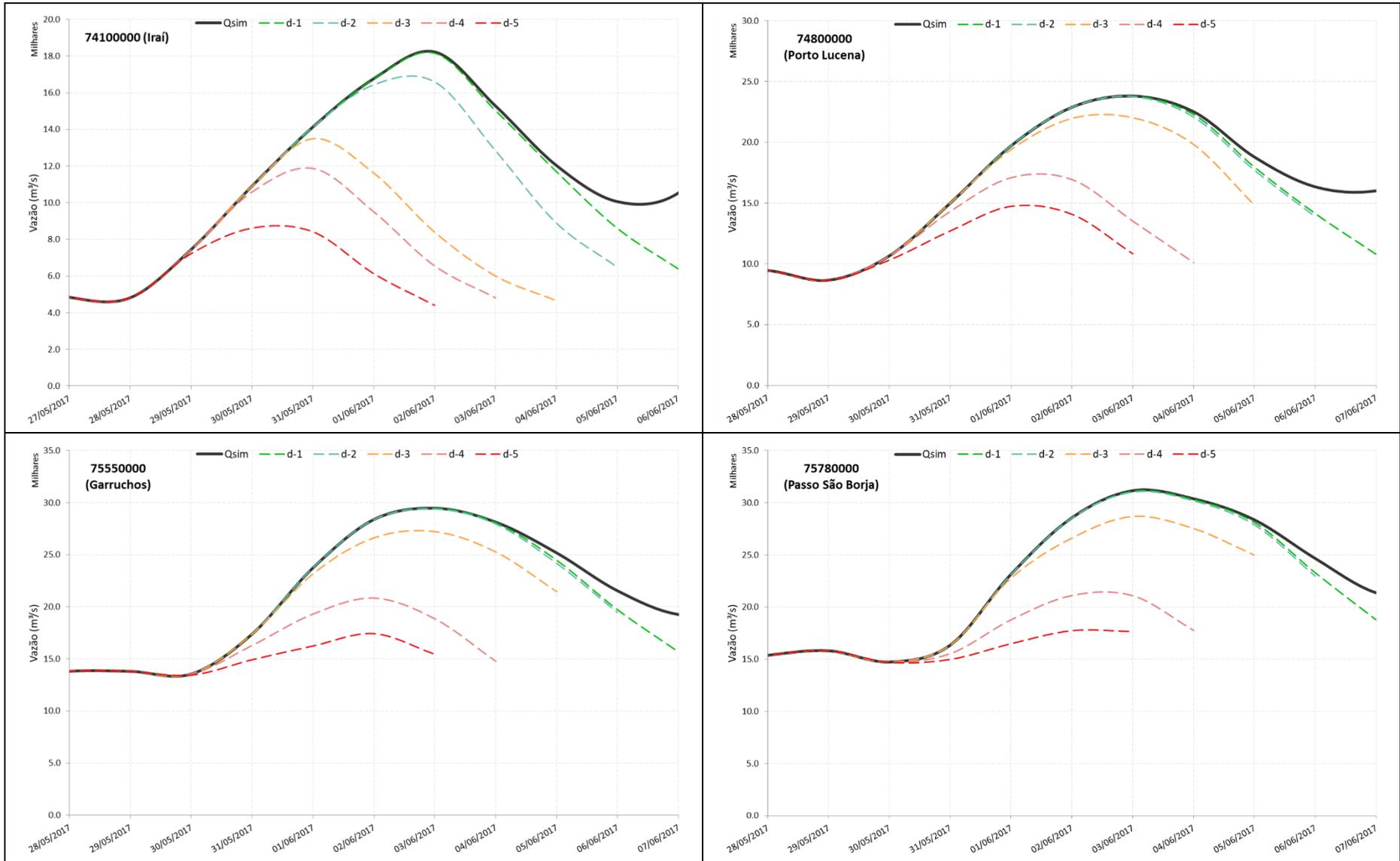
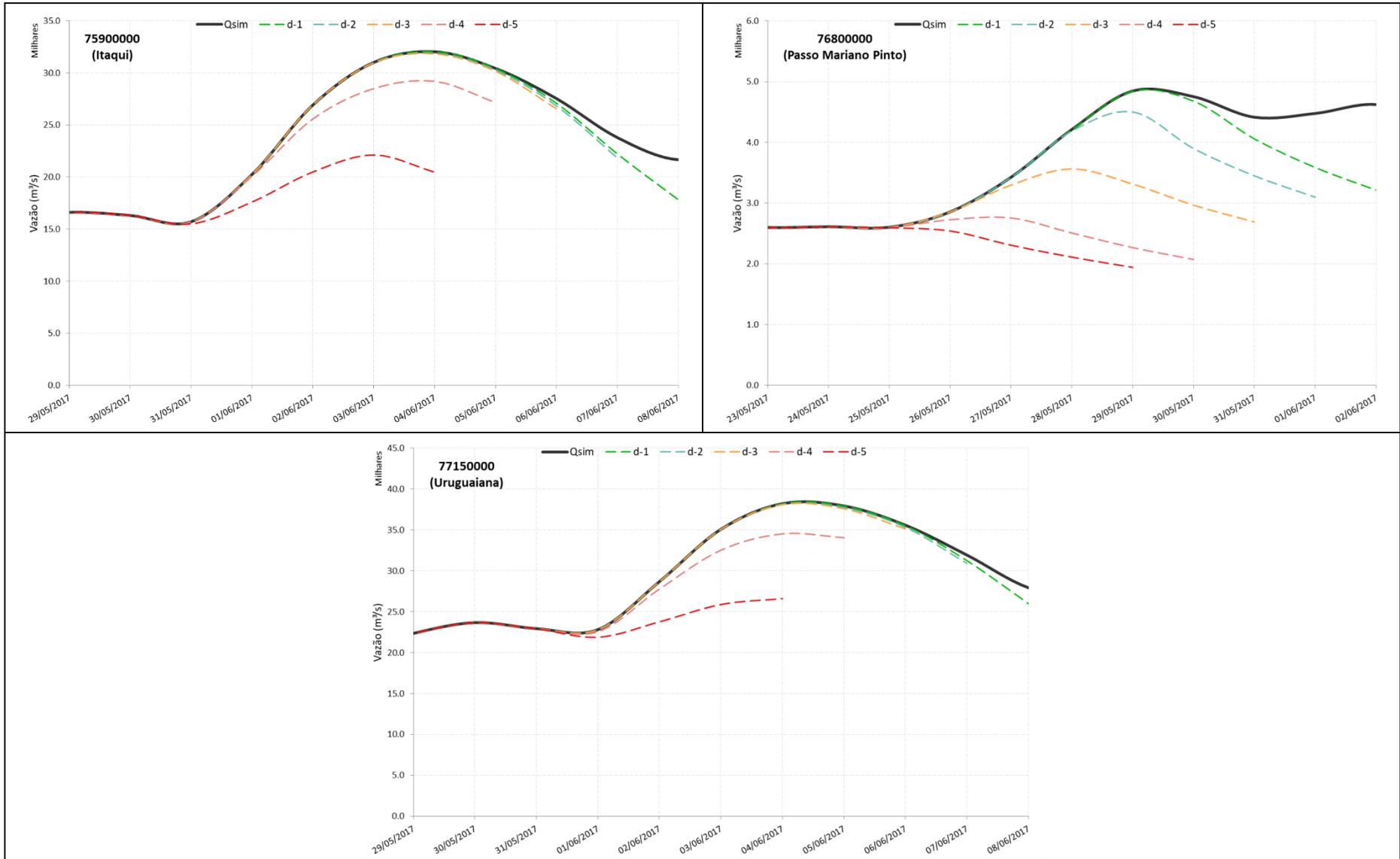


Figura 73 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de junho de 2017.



Continuação da Figura 73 - Previsões com chuva zero com horizonte de previsão de cinco dias e antecedência diária para o evento de junho de 2017.

**APÊNDICE E – GRÁFICOS DE ENSEMBLE DA ANÁLISE DE
PREVISIBILIDADE**

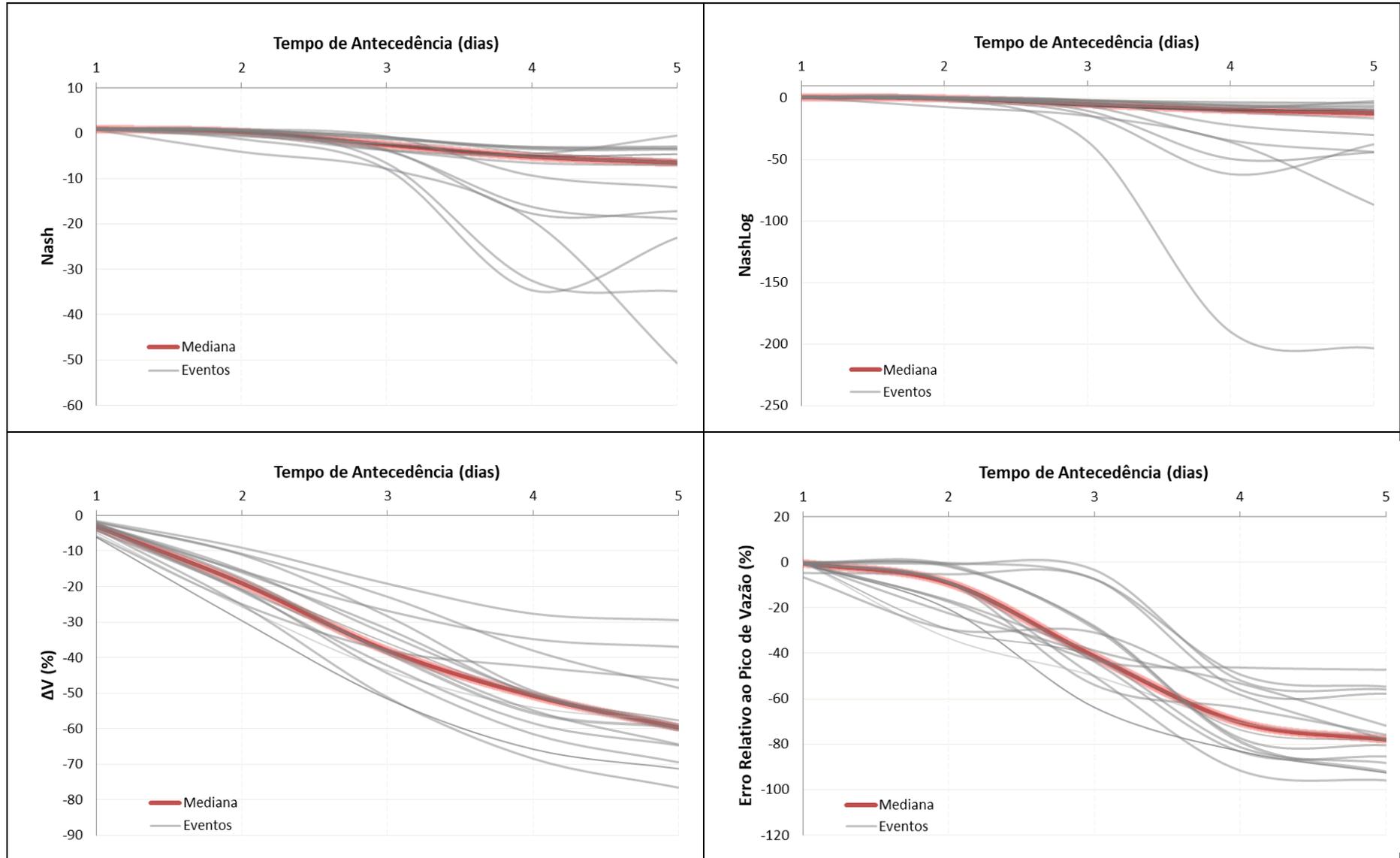


Figura 74 - Ensemble dos resultados da análise de previsibilidade para a estação 74100000 (Irã).

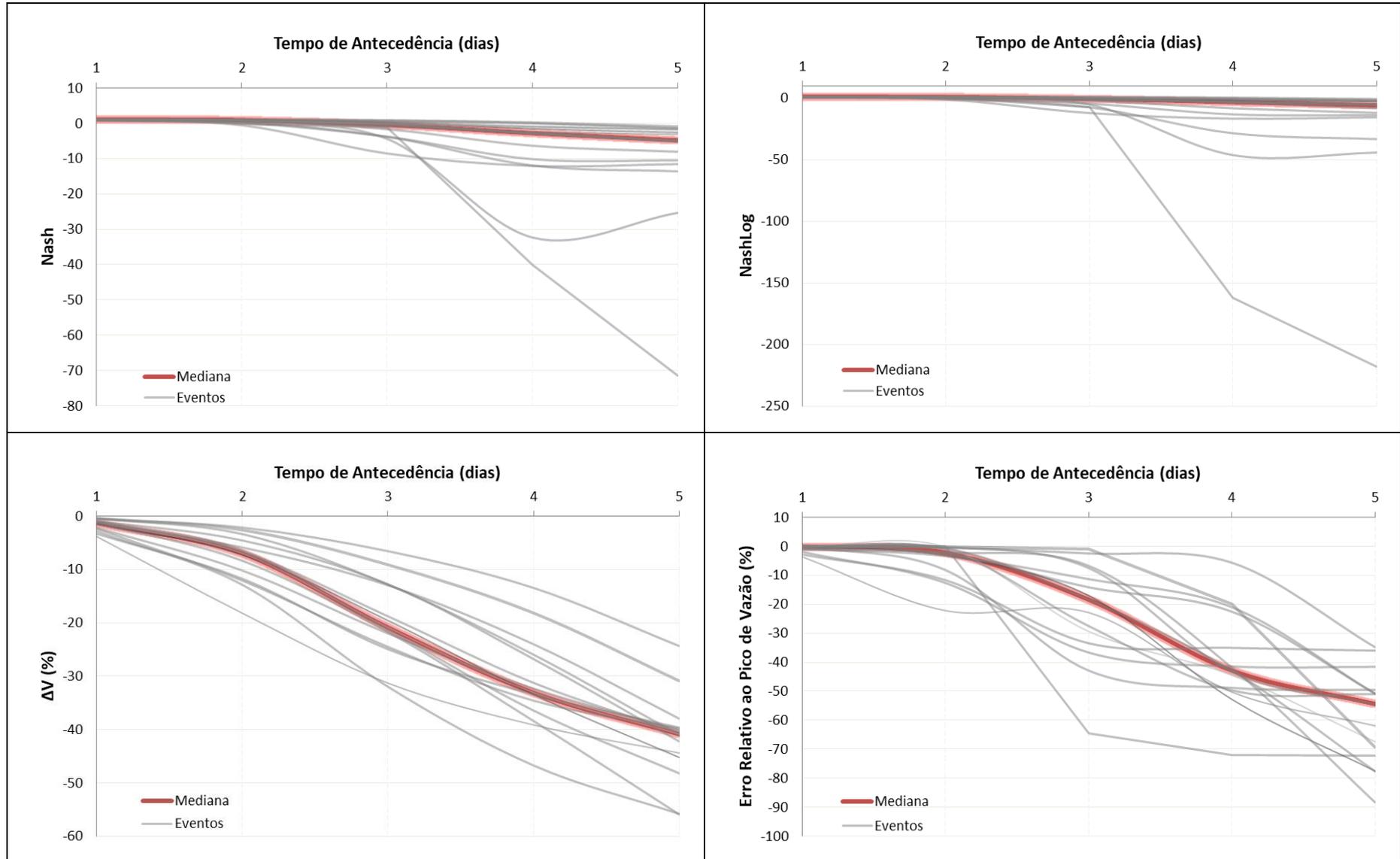


Figura 75 - Ensemble dos resultados da análise de previsibilidade para a estação 74800000 (Porto Lucena).

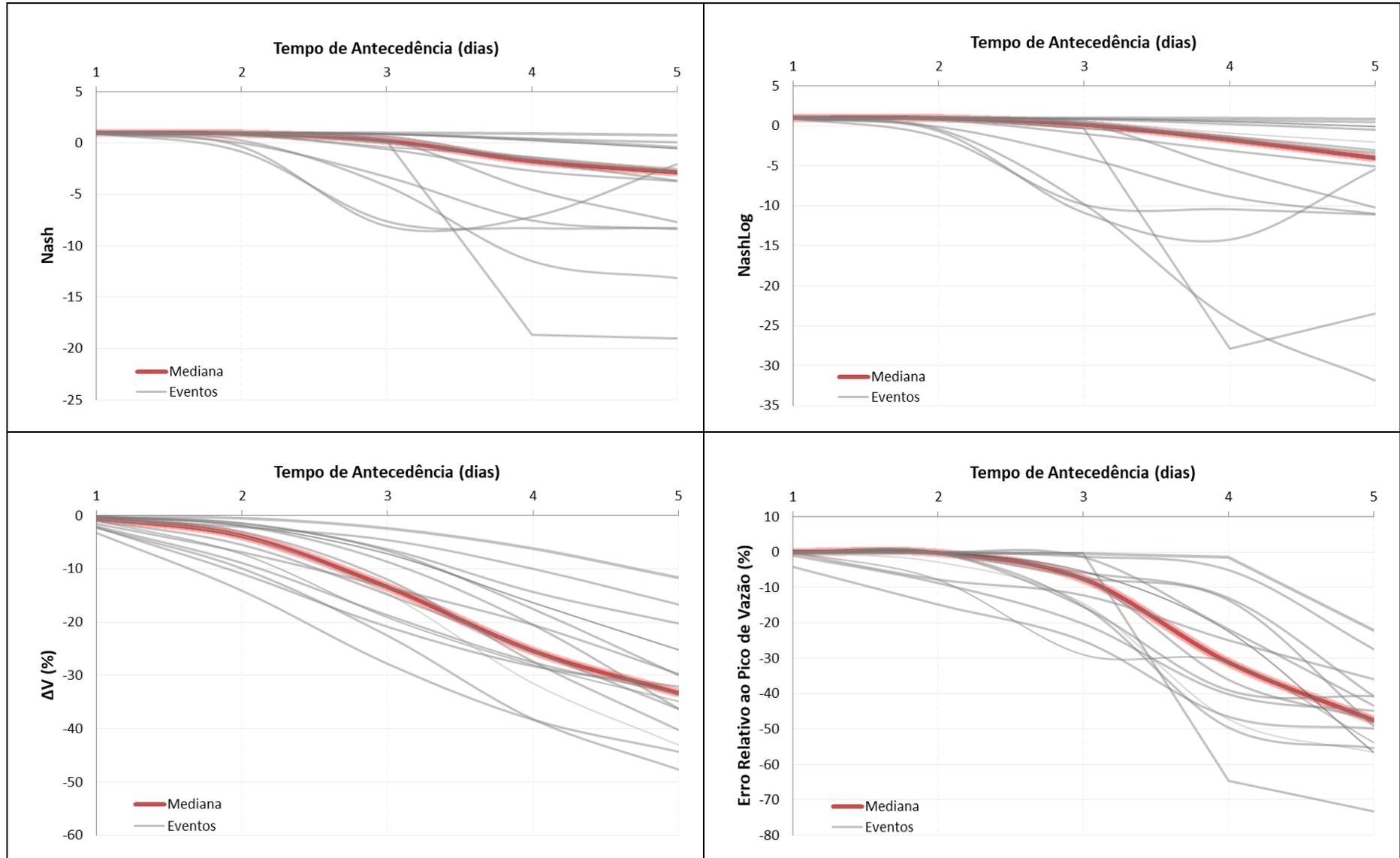


Figura 76 - Ensemble dos resultados da análise de previsibilidade para a estação 75550000 (Garruchos).

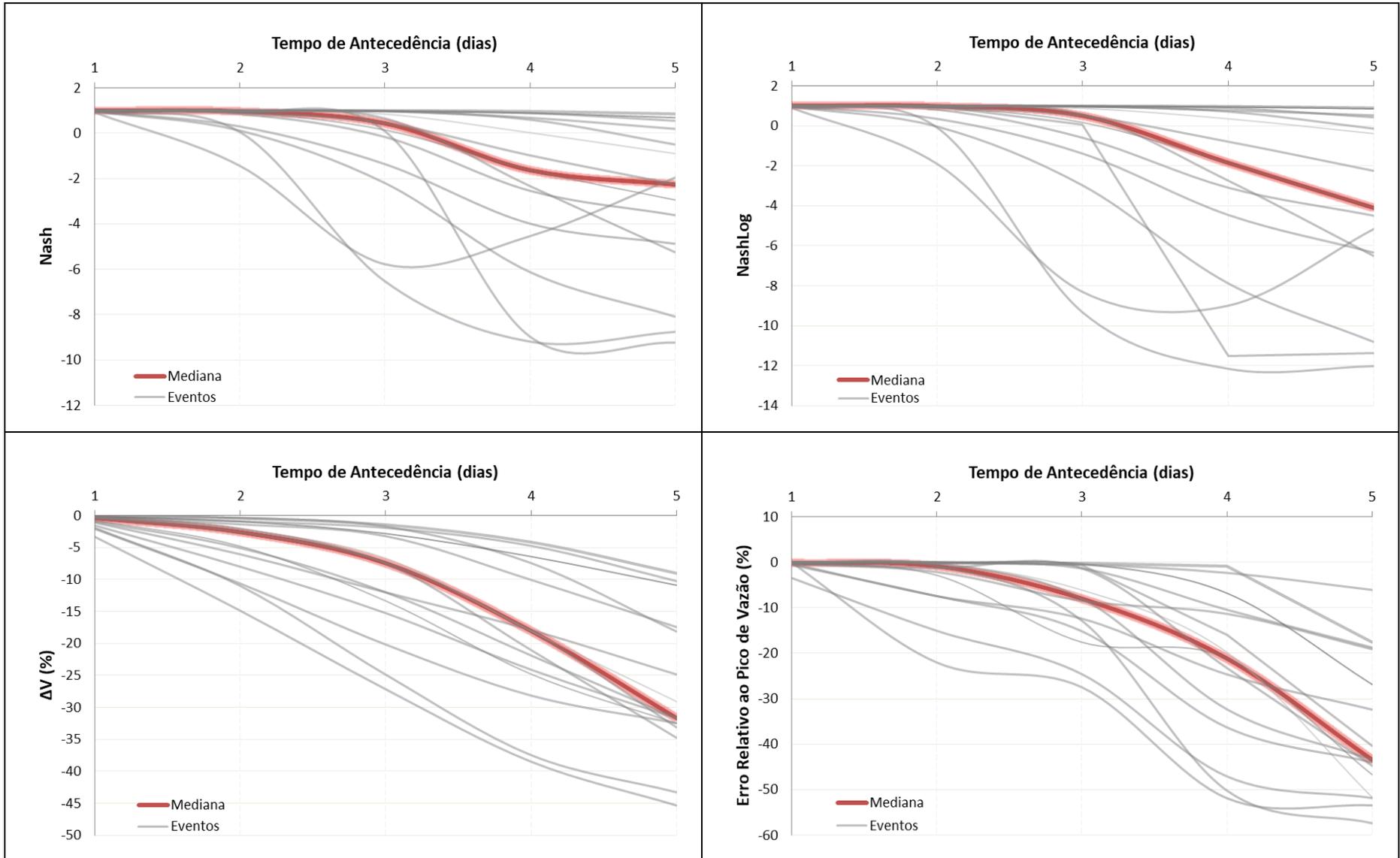


Figura 77 - Ensemble dos resultados da análise de previsibilidade para a estação 75780000 (São Borja).

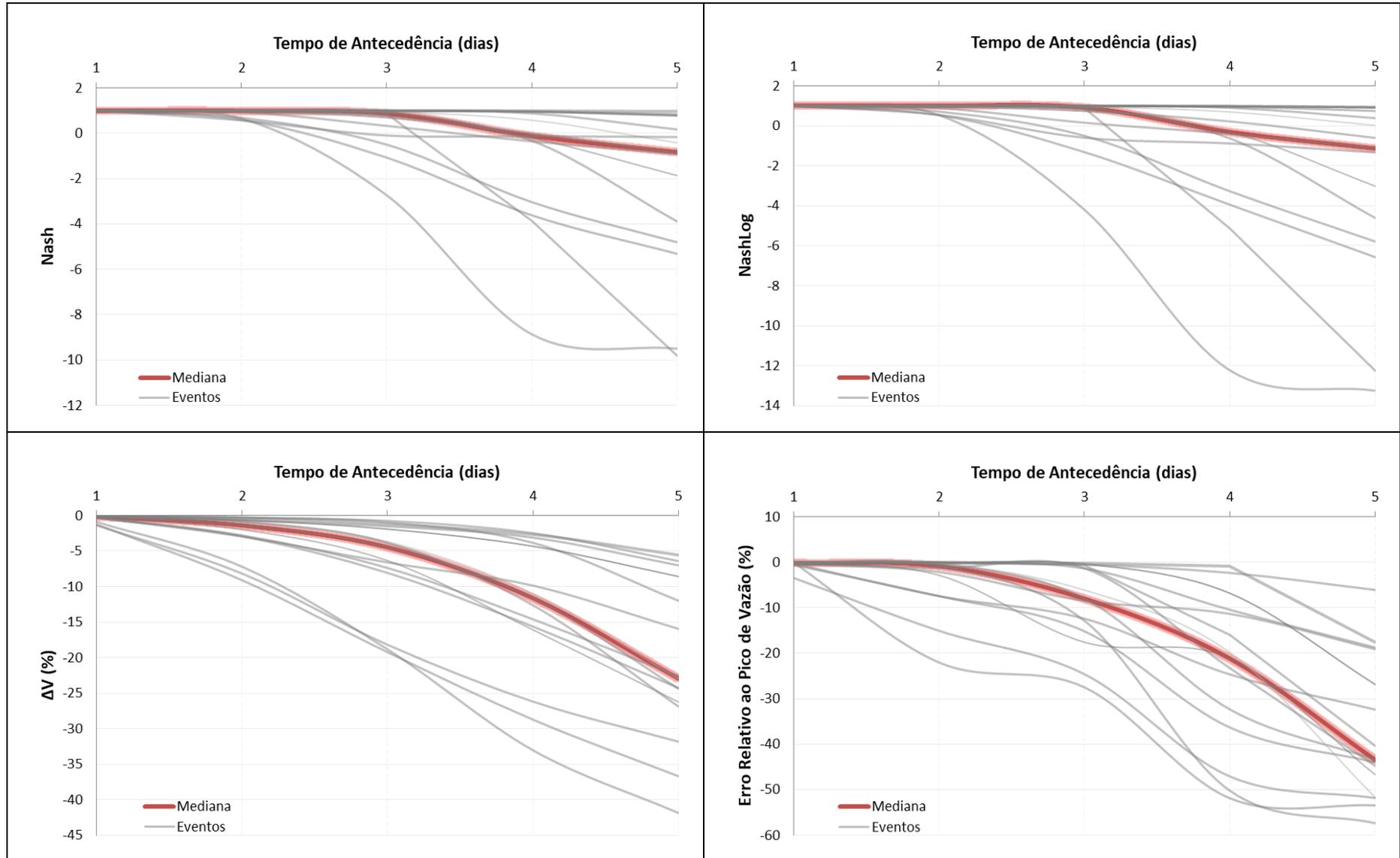


Figura 78 - Ensemble dos resultados da análise de previsibilidade para a estação 75900000 (Itaqui).

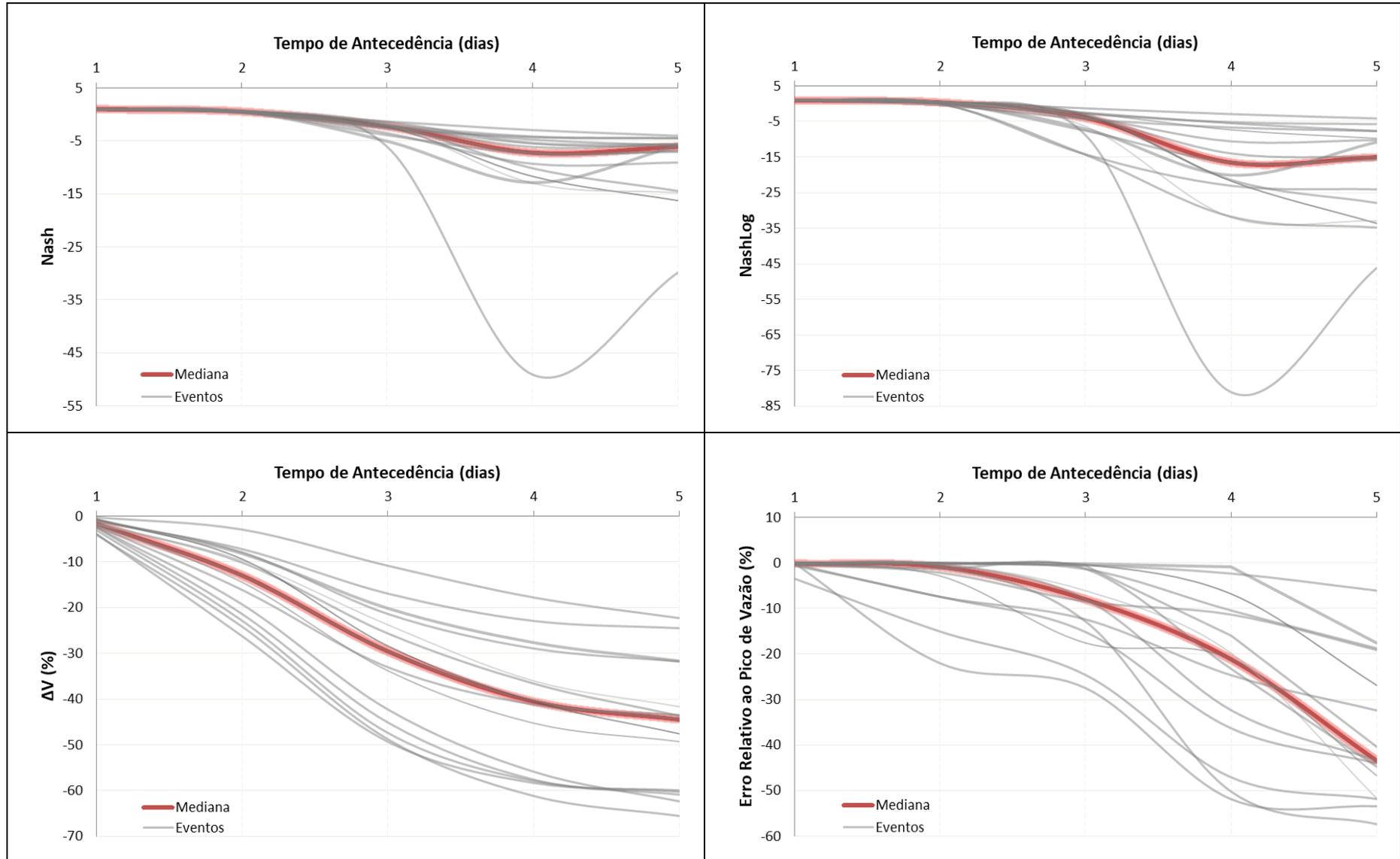


Figura 79 - Ensemble dos resultados da análise de previsibilidade para a estação 76800000 (Passo Mariano Pinto).

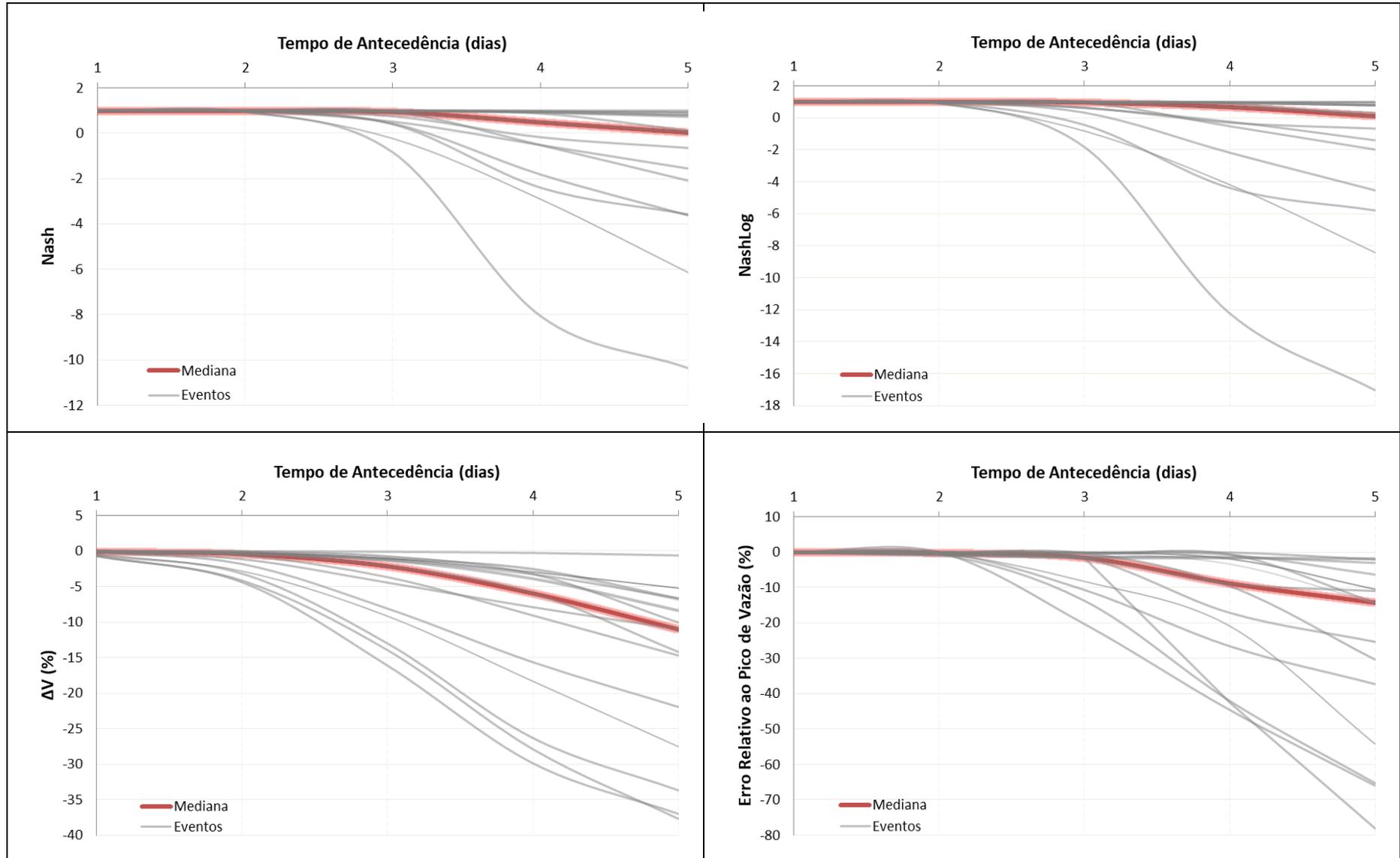


Figura 80 - Ensemble dos resultados da análise de previsibilidade para a estação 77150000 (Uruguiana).

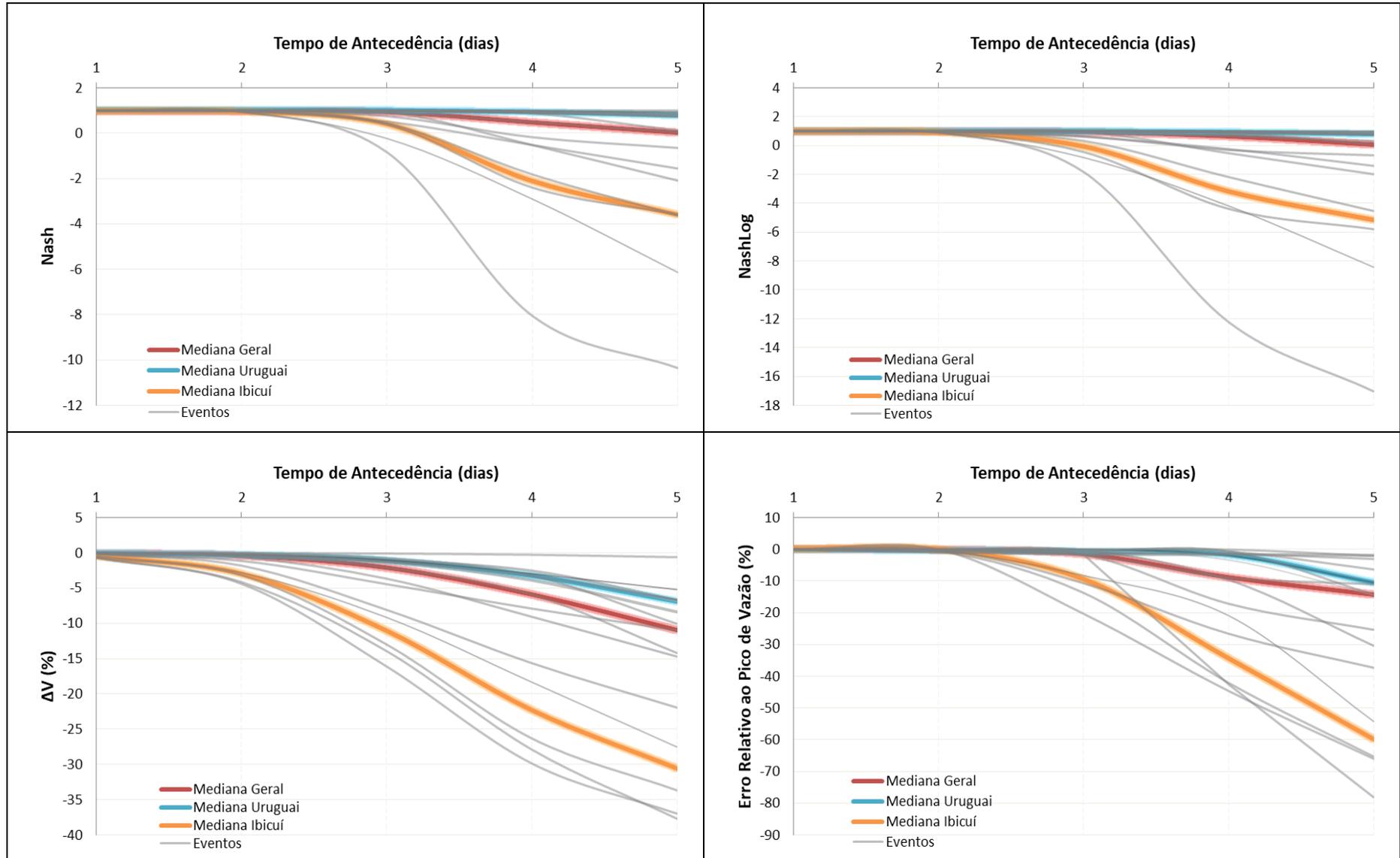


Figura 81 - Ensemble dos resultados da análise de previsibilidade para a estação 77150000 (Uruguaiana), destacando eventos cuja onda de cheia é proveniente do rio Ibicuí (Laranja) e do rio Uruguai (Azul)..

**APÊNDICE F – MAPA DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E
PLUVIOMÉTRICAS EM FOLHA A2**

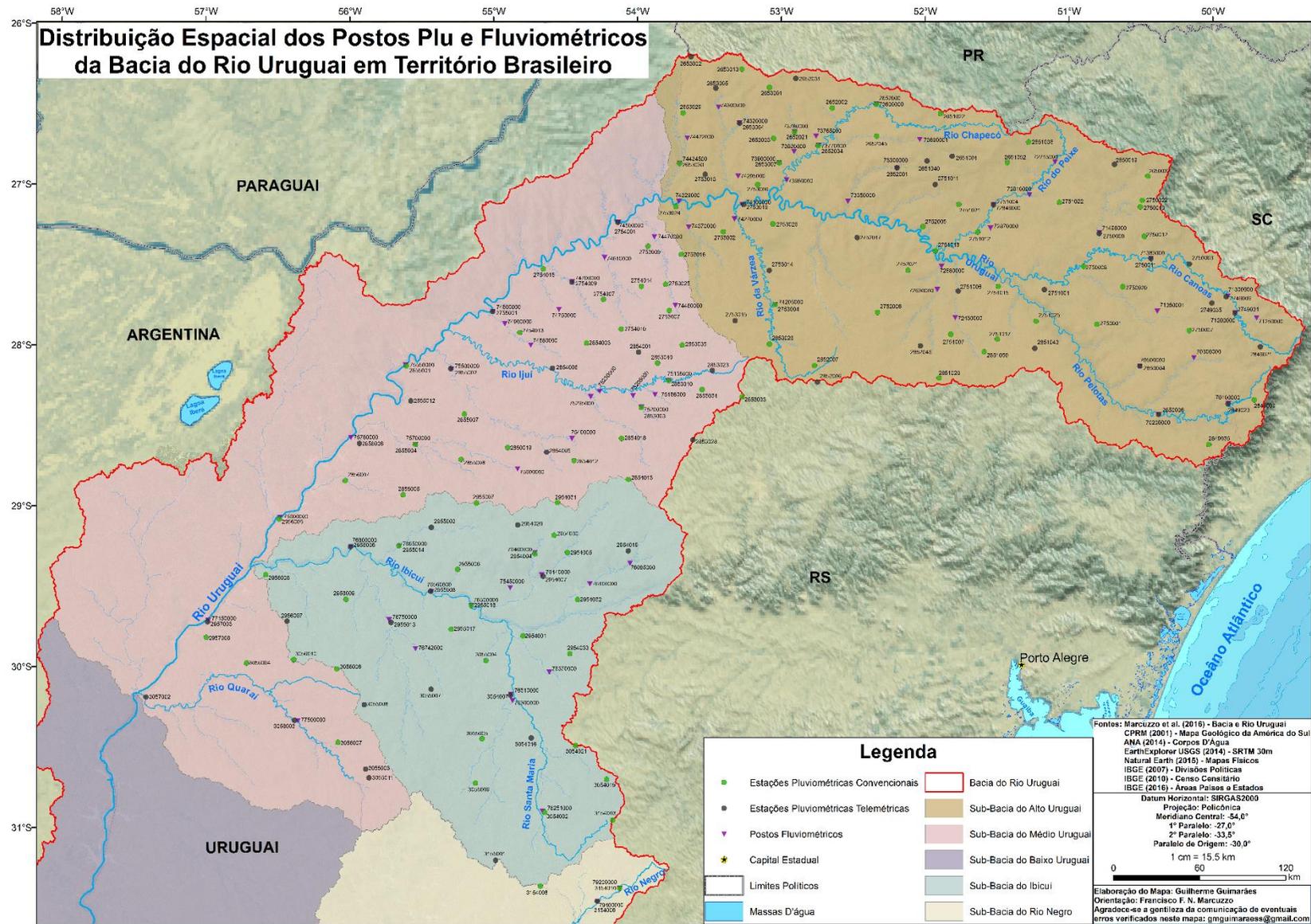


Figura 82 - Distribuição Espacial dos Postos Pluviométricos e Fluviométricos da Bacia do Rio Uruguai em Território Brasileiro.

ANEXO A – LISTA DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS

Quadro 2 - Lista das estações pluviométricas utilizadas.

Número	Código	Nome	Latitude (°)	Longitude (°)
1	02851050	Capão do Cedro	-28.0878	-51.5444
2	02751006	Paim Filho	-27.7125	-51.7378
3	02751017	Clemente Argolo	-28.0058	-51.4544
4	02853034	Panambi	-28.3444	-53.5417
5	02652045	Praia do Ouro Verde	-26.7553	-52.3272
6	02750008	Passo Caru	-27.5417	-50.8569
7	02750007	Painel	-27.9222	-50.0992
8	02750020	São José do Cerrito	-27.6617	-50.5783
9	02753014	Liberato Salzano	-27.5992	-53.0714
10	02849035	Silveira	-28.6264	-49.9339
11	02955017	São João	-29.8319	-55.3433
12	02651052	Salto Veloso	-26.9067	-51.4097
13	02751022	Irakitan	-27.1458	-51.0389
14	02750003	Encruzilhada II	-27.5078	-50.1128
15	02853003	Conceição	-28.4561	-53.9717
16	02755001	Porto Lucena	-27.8544	-55.0236
17	02651040	Ponte Serrada	-26.9056	-51.9717
18	02653001	Campo Ere - EMPASC	-26.4578	-53.0794
19	02752017	Itatiba do Sul	-27.3889	-52.4544
20	02852007	Colônia Xadrez	-28.1892	-52.7458
21	02754014	São Martinho	-27.7028	-53.9731
22	02651022	Santo Agostinho	-26.6086	-51.8817
23	02653029	Paraíso	-26.6208	-53.6817
24	02751007	Sananduva	-27.9828	-51.7836
25	02750009	Passo Marombas	-27.3339	-50.7533
26	02751018	Marcelino Ramos	-27.4647	-51.9031
27	02752006	Erebango	-27.8542	-52.3047
28	02754001	Alto Uruguai	-27.3019	-54.1394
29	02751025	Pinhal da Serra	-27.8908	-51.1836
30	02853035	Nova Ramada	-28.0667	-53.6833
31	02653030	Raigão Alto	-26.9350	-53.7064
32	02651036	Quilômetro 30	-26.7758	-51.2628
33	02652002	Marata	-26.5836	-52.6403
34	02751012	Capinzal	-27.3422	-51.6083
35	02653004	Ponte do Sargento	-26.6828	-53.2867
36	02754009	Tucunduva	-27.6742	-54.4625
37	02751011	Irani	-27.0511	-51.9122
38	02754015	Porto Mauá	-27.5900	-54.6636
39	02650032	Santa Cecília	-26.9675	-50.4217
40	02754010	Esquina Araujo	-27.9681	-54.1164

Continuação do Quadro 2 - Lista das estações pluviométricas utilizadas.

Número	Código	Nome	Latitude (°)	Longitude (°)
41	02957008	Cabanha Alceu Neves	-29.8533	-57.1072
42	02853033	Santa Barbara do Sul	-28.3883	-53.2586
43	02653007	Saudades	-26.9283	-53.0075
44	02653002	Dionísio Cerqueira	-26.2692	-53.6275
45	02749009	Rio Bonito	-27.7039	-49.8472
46	02749035	Bocaina do Sul	-27.7464	-49.9450
47	02749031	Vila Canoas	-27.8042	-49.7800
48	02849009	Bom Jardim da Serra	-28.3397	-49.6214
49	02849023	Despraiado	-28.3692	-49.8078
50	02854005	Passo Major Zeferino	-28.7336	-54.6478
51	02852006	Carazinho	-28.2933	-52.7242
52	02854006	Passo Viola	-28.2111	-54.6031
53	02854012	Coimbra	-28.7878	-54.4525
54	02753026	Planalto	-27.3083	-53.0483
55	02850019	Bossoroca	-28.7028	-54.9244
56	02854018	Jóia	-28.6492	-54.1133
57	02652001	Bonito	-26.9508	-52.1817
58	02652021	Jardinópolis	-26.7361	-52.9003
59	02753013	Iporã	-27.0014	-53.5256
60	02753016	Miraguai	-27.5008	-53.6925
61	02854001	Boa Vista	-28.1111	-53.9931
62	02855001	Garruchos	-28.1878	-55.6369
63	02851043	Esmeralda	-28.0592	-51.1881
64	02653003	Modelo	-26.7753	-53.0464
65	02750001	Campo Belo do Sul	-27.8989	-50.7536
66	02750010	Ponte Alta do Norte	-27.1611	-50.4689
67	02750011	Ponte Alta do Sul	-27.4819	-50.3850
68	02753019	Iraí	-27.1889	-53.2533
69	02750022	Ponte Alta do Norte - CIFSUL	-27.1208	-50.4567
70	02753004	Linha Cescon	-27.8117	-53.0278
71	03056010	Olho D'Água	-30.0039	-56.4797
72	02855007	Santo Antônio das Missões	-28.4925	-55.2308
73	02855008	Itacumbi	-28.7739	-55.2572
74	02650019	Lebon Régis	-26.9017	-50.6592
75	02653013	Palma Sola	-26.3456	-53.2717
76	02753024	Barra do Guarita	-27.2033	-53.7297
77	02652031	São Lourenço do Oeste	-26.4003	-52.8956
78	02753006	Palmitos	-27.0644	-53.1569
79	02751015	Barracão	-27.6786	-51.4547
80	02856007	Cunha	-28.8975	-56.0850
81	02955008	Manoel Viana	-29.5939	-55.4858
82	03054007	Rosário do Sul	-30.2469	-54.9175

Continuação do Quadro 2 - Lista das estações pluviométricas utilizadas.

Número	Código	Nome	Latitude (°)	Longitude (°)
83	03054016	Granja Umbu	-30.5144	-54.7703
84	03055007	São Carlos	-30.2042	-55.4919
85	02653005	São José do Cedro	-26.4650	-53.4536
86	02753025	Campo Novo	-27.6875	-53.8019
87	02652034	Porto Faé Novo	-26.8192	-52.7353
88	02752005	Concórdia	-27.3144	-51.9933
89	02753015	Palmeira das Missões	-27.9133	-53.3108
90	02850004	Coxilha Rica	-28.1522	-50.4408
91	02854003	Girua	-28.0542	-54.3614
92	03054002	Dom Pedrito	-30.9781	-54.6758
93	02855012	Samburá	-28.4056	-55.6103
94	02750012	Ponte do Rio Antinhas	-27.3453	-50.4358
95	02751021	Jaborá	-27.1728	-51.7439
96	02856006	Passo São Borja	-28.6664	-55.9797
97	02855004	Passo do Novo	-28.6781	-55.5811
98	02855005	Fazenda Santa Cecília do Butui	-28.9897	-55.6742
99	02754013	Campina das Missões	-27.9875	-54.8336
100	02751004	Joaçaba	-27.1717	-51.5003
101	02752021	Gaurama	-27.5872	-52.0933
102	03054021	Cerro Batovi	-30.5633	-54.4492
103	02849021	Urubici	-28.0072	-49.5922
104	02954007	Jaguari	-29.5069	-54.6775
105	02954033	Bom Retiro	-29.9897	-54.4886
106	02954005	Furnas do Segredo	-29.3589	-54.5019
107	02652000	Abelardo Luz	-26.5561	-52.3308
108	02850006	Invernada Velha	-28.4494	-50.2964
109	03054019	Ibaré	-30.7744	-54.2247
110	02853023	Condor	-28.2256	-53.4703
111	02956006	Passo Mariano Pinto	-29.3089	-56.0553
112	02955014	Passo da Cachoeira	-29.3078	-55.7089
113	02955002	Cachoeira Santa Cecília	-29.1961	-55.4753
114	02956005	Itaqui	-29.1275	-56.5625
115	02751001	Anita Garibaldi	-27.6922	-51.1294
116	02853028	Anderson Clayton	-28.6578	-53.6058
117	02955006	Ponte do Miracatu	-29.4592	-55.2911
118	02954019	Quevedos	-29.3514	-54.0669
119	02852046	Itapejara	-28.0575	-51.9961
120	02954001	Cacequi	-29.8786	-54.8253
121	02956008	João Arregui	-29.4711	-56.6678
122	02956007	Plano Alto	-29.7653	-56.5214
123	03055004	Saica	-30.0294	-55.0936
124	02955007	Unistalda	-29.0475	-55.1511

Continuação do Quadro 2 - Lista das estações pluviométricas utilizadas.

Número	Código	Nome	Latitude (°)	Longitude (°)
125	03056004	Fazenda Junco	-30.0189	-56.8214
126	02954031	Esquina dos Lima	-29.0481	-54.5708
127	03057002	Barra do Quaraí	-30.2133	-57.5533
128	03154006	Estância do Espantoso	-31.5339	-54.2947
129	03154003	Torquato Severo	-31.0283	-54.1789
130	03155001	Três Venda	-31.2753	-55.0372
131	03154008	Serrilhada	-31.4375	-54.7117
132	03154010	Fazenda São Jorge	-31.4533	-54.1300
133	03055003	Fazenda Encerra	-30.6956	-55.9744
134	03055011	Alto Quaraí	-30.7503	-55.9514
135	03055005	Santa Rita	-30.5164	-55.1267
136	03055009	BR-293	-30.7917	-55.1792
137	03056007	Caty	-30.5256	-56.1722
138	02853026	Chapada	-28.0586	-53.0661
139	02854013	São Bernardo	-28.9053	-54.0650
140	02853010	Passo Faxinal	-28.2894	-53.7794
141	02955016	Jacaqua	-29.6869	-55.1958
142	02954020	Santiago	-29.1867	-54.8558
143	02955013	Alegrete	-29.7844	-55.7739
144	02954030	Florida	-29.2517	-54.5983
145	02954004	Ernesto Alves	-29.3661	-54.7356
146	02956009	Fazenda Três Capões	-29.6358	-56.0947
147	03056006	Harmonia	-30.0686	-56.1703
148	02651001	Campina da Alegria	-26.8733	-51.7964
149	02853040	Mauá	-28.1792	-53.8578
150	02855002	Passo do Sarmiento	-28.2089	-55.3233
151	03056003	Quaraí	-30.3833	-56.4833
152	03055008	Passo da Guarda	-30.2939	-55.9756
153	02954032	Ponte Toropi II	-29.6533	-54.4314
154	02753002	Frederico Westphalen	-27.3500	-53.4000
155	02753007	Santo Augusto	-27.8500	-53.7667
156	02753009	Três Passos	-27.3667	-53.7500
157	02754007	Três de Maio	-27.7833	-54.2333
158	02851020	Passo das Pedras	-28.2500	-51.8500

ANEXO B – LISTA DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS

Quadro 3 - Lista das estações fluviométricas utilizadas.

Número	Código	Nome	Latitude (°)	Longitude (°)	Área de Drenagem (km ²)
1	70100000	Despraiado	-28.3694	-49.8025	533
2	70200000	Invernada Velha	-28.4394	-50.3019	2820
3	70300000	Fazenda Mineira	-28.0900	-50.0611	1170
4	70500000	Coxilha Rica	-28.1614	-50.4428	550
5	71200000	Vila Canoas	-27.8039	-49.7792	1010
6	71250000	Ponte do Rio João Paulo	-27.8297	-49.6269	489
7	71300000	Rio Bonito	-27.7022	-49.8400	2000
8	71350001	Encruzilhada II	-27.5078	-50.1128	3230
9	71383000	Ponte Alta do Sul	-27.4858	-50.3917	4610
10	71498000	Passo Marombas	-27.3339	-50.7539	3680
11	72430000	Passo do Granzotto	-27.8786	-51.7547	1620
12	72630000	Passo Santa Tereza	-27.7067	-51.8853	2800
13	72680000	Passo Colombelli	-27.5619	-51.8578	3660
14	72715000	Rio das Antas	-26.8958	-51.0756	801
15	72810000	Tangará	-27.0881	-51.2581	2010
16	72849000	Joaçaba I	-27.1594	-51.4811	3710
17	72870000	Barra do Rio Pardo	-27.3156	-51.5267	420
18	73300000	Bonito	-26.9486	-52.1825	654
19	73350000	Barca Irani	-27.1656	-52.5228	1500
20	73600000	Abelardo Luz	-26.5603	-52.3264	1840
21	73690001	Coronel Passos Maia	-26.7722	-52.0256	740
22	73765000	Passo Quilombo	-26.7600	-52.7503	266
23	73770000	Porto Fae Novo	-26.8181	-52.7347	5550
24	73780000	Jardinópolis	-26.7369	-52.9014	642
25	73820000	Passo Pio X	-26.8594	-52.9044	1010
26	73900000	Saudades	-26.9256	-53.0075	418
27	73960000	Barra do Chapecó Aux.	-27.0400	-52.9544	8240
28	74100000	Iraí	-27.1736	-53.2292	61900
29	74205000	Linha Cescon	-27.8131	-53.0294	437
30	74270000	Passo Rio da Várzea	-27.2786	-53.3203	5340
31	74295000	Linha Jatai	-27.0133	-53.2953	300
32	74300000	Guatapara de Baixo	-26.5881	-53.4536	814
33	74320000	Ponte do Sargento	-26.6822	-53.2861	609
34	74329000	Itapiranga	-27.1717	-53.7094	72300
35	74370000	Palmitinho	-27.3328	-53.6444	2020
36	74422000	Bandeirante	-26.7753	-53.6675	521
37	74424500	Raigão Alto	-26.9333	-53.7061	2090
38	74460000	Ponte do Rio Turvo	-27.8247	-53.7303	502
39	74470000	Três Passos	-27.3922	-53.8808	1540
40	74500000	Alto Uruguai	-27.3019	-54.1397	82300
41	74610000	Cascata Burica - Nova	-27.5225	-54.2333	2260
42	74700000	Tucunduva	-27.6742	-54.4625	1140
43	74750000	Linha Cascata	-27.8450	-54.5561	329
44	74800000	Porto Lucena	-27.8528	-55.0256	95200
45	74880000	Passo São João	-28.0631	-54.7558	817

Continuação do Quadro 3 - Lista das estações fluviométricas utilizadas.

Número	Código	Nome	Latitude (°)	Longitude (°)	Área de Drenagem (km²)
46	74900000	Linha União	-27.9308	-54.9392	1260
47	75155000	Passo Faxinal	-28.2869	-53.7808	1940
48	75186000	Ponte Nova do Potiribu Jusante	-28.3708	-53.8792	613
49	75200000	Conceição	-28.4544	-53.9731	811
50	75205000	Ponte Nova do Conceição	-28.3847	-54.0314	970
51	75230000	Santo Angelo	-28.3553	-54.2683	5440
52	75295000	Colônia Mousquer	-28.3897	-54.3308	2160
53	75400000	Passo do Dias	-28.6569	-54.4589	932
54	75450000	Passo Santa Maria	-28.5792	-54.9150	3240
55	75500000	Passo do Sarmento	-28.2119	-55.3197	5230
56	75550000	Garruchos	-28.1822	-55.6431	116000
57	75600000	Passo das Turmas	-28.8372	-54.8550	378
58	75700000	Passo do Novo	-28.6828	-55.5794	3710
59	75780000	Passo São Borja	-28.6244	-56.0369	125000
60	75900000	Itaqui	-29.1186	-56.5544	131000
61	76085000	Cachoeira 5 Veados	-29.4289	-54.0542	1540
62	76100000	Vila Clara	-29.5561	-54.3422	2790
63	76251000	Dom Pedrito	-30.9703	-54.6933	462
64	76300000	Ponte Ibicui da Armada	-30.2808	-54.9031	6010
65	76310000	Rosário Do Sul	-30.2428	-54.9169	12100
66	76370000	Azevedo Sodré	-30.1056	-54.6375	1220
67	76440000	Jaguari	-29.4989	-54.6892	2320
68	76460000	Ernesto Alves	-29.3625	-54.7353	926
69	76500000	Jacaqua	-29.6869	-55.1958	27800
70	76560000	Manoel Viana	-29.5942	-55.4814	29400
71	76650000	Passo da Cachoeira	-29.3094	-55.7058	2560
72	76742000	Passo do Osório	-29.9511	-55.6003	1160
73	76750000	Alegrete	-29.7686	-55.7872	5940
74	76800000	Passo Mariano Pinto	-29.3092	-56.0547	42500
75	77150000	Uruguaiana	-29.7486	-57.0892	190000
76	77500000	Quaraí	-30.3847	-56.4656	4570
77	79200000	Fazenda São Jorge	-31.4533	-54.1300	704
78	79400000	Estância do Espantoso	-31.5339	-54.2944	1180

ANEXO C – LISTA DOS POSTOS CLIMÁTICOS UTILIZADOS

Quadro 4 - Lista dos postos climáticos utilizados.

Número	Código	Nome	Latitude (°)	Longitude (°)
1	00083826	Foz do Iguaçu	-25.550	-54.567
2	00083858	Xanxerê	-26.850	-52.400
3	00083860	Palmas	-26.483	-51.983
4	00083864	Porto União	-26.233	-51.067
5	00083865	Irineópolis	-26.250	-50.800
6	00083867	Rio Negro	-26.100	-49.800
7	00083872	Indaial	-26.900	-49.217
8	00083880	Palmeira das Missões	-27.883	-53.433
9	00083881	Iraí	-27.183	-53.233
10	00083883	Chapecó	-27.117	-52.617
11	00083885	Marcelino Ramos	-27.450	-51.900
12	00083887	Campos Novos	-27.383	-51.200
13	00083891	Lages	-27.817	-50.333
14	00083897	Florianópolis	-27.583	-48.567
15	00083898	Camboriú	-27.000	-48.633
16	00083907	São Luiz Gonzaga	-28.400	-55.017
17	00083909	Santo Ângelo	-28.300	-54.250
18	00083912	Cruz Alta	-28.633	-53.600
19	00083914	Passo Fundo	-28.217	-52.400
20	00083915	Guaporé	-28.917	-51.900
21	00083916	Lagoa Vermelha	-28.217	-51.500
22	00083918	Vacaria	-28.550	-50.700
23	00083919	Bom Jesus	-28.667	-50.433
24	00083920	São Joaquim	-28.300	-49.933
25	00083921	Araranguá	-28.883	-49.517
26	00083922	Orleans	-28.333	-49.333
27	00083923	Urussanga	-28.517	-49.317
28	00083924	Laguna	-28.483	-48.800
29	00083927	Uruguaiana	-29.750	-57.083
30	00083929	Itaqui	-29.117	-56.533
31	00083931	Alegrete	-29.683	-55.517
32	00083936	Santa Maria	-29.700	-53.700
33	00083953	Santana do Livramento	-30.833	-55.600
34	00083957	São Gabriel	-30.333	-54.317
35	00083980	Bagé	-31.333	-54.100