

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**PREVISÃO DE CHEIAS POR CONJUNTO PARA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO SAPUCAÍ**

Cinthia Mara Santos Martins

Itajubá, 30 de agosto de 2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

Cinthia Mara Santos Martins

Previsão de cheias por conjunto para bacia hidrográfica do rio Sapucaí

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, para obtenção do Título de Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Modelagem matemática aplicada ao meio ambiente e recursos hídricos.

Orientador: Prof.^a Dra. Nívea Adriana Dias Pons.

Co-orientador: Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva.

Itajubá, 30 de agosto de 2017

AGRADECIMENTOS

É com muita satisfação que apresento este trabalho, que com certeza não poderia ter sido executado sem o auxílio de muitas pessoas e instituições, aos quais eu gostaria muito de agradecer:

- A minha orientadora Nívea Adriana Dias Pons e meu co-orientador Benedito Cláudio da Silva, por toda a dedicação, ensinamentos, orientação e paciência, o que tornou possível a realização deste trabalho.
- Aos demais professores do Instituto de Recursos Naturais, pela dedicação e disponibilidade que sempre me atenderam.
- Aos pesquisadores do CPETEC/INPE que realizaram as previsões de precipitação com modelos atmosféricos.
- Aos meus colegas de Mestrado, pelo apoio e amizade.
- A CAPES pela concessão da bolsa de estudo.
- Ao CNPq pelos recursos do projeto “Desenvolvimento de protótipo de um sistema de prognóstico de vazão por conjunto em bacias de resposta rápida em apoio a prevenção de desastres naturais”. Edital MCTI/CNPq/FNDCT-Ação Transversal N ° 65/2013 - Pesquisa e Desenvolvimento em Meteorologia e Climatologia.
- A FAPEMIG pelos recursos do projeto “Integração de Modelo Atmosférico e Hidrológico para Previsão de Vazão em Tempo Real”. Edital Universal 2014

E, em especial, à Deus, que está do meu lado em todos os momentos. Aos meus pais, Ana Maria e Albertino, os responsáveis por eu chegar até aqui. A minha irmã Luciana e meu cunhado Luís Fernando, por todo o incentivo e ajuda. Ao meu sobrinho por toda a alegria e doçura, tornando meus dias mais leves, e, finalmente, ao meu marido Thiago por toda paciência e compreensão nos momentos mais difíceis e por todo seu amor.

RESUMO

A bacia do rio Sapucaí está inserida em uma região suscetível a inundações, devido à associação dos fatores ambientais, climáticos e antrópicos. Dentre os métodos para mitigar os prejuízos provocados pelas inundações, o sistema de alerta contra cheias pode ser considerado como um dos mais efetivos, pois quando comparado a outras medidas apresenta um custo relativamente baixo. Mas, para isso é necessário a utilização de modelos hidrológicos, ajustado de acordo com as características da bacia, para obter um resultado confiável da previsão de vazão. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal ajustar o modelo de previsão de vazão para os municípios de Itajubá-MG e Santa Rita do Sapucaí-MG, ambos pertencentes a bacia hidrográfica do rio Sapucaí. Para que isso seja possível, é necessário o aprimoramento da integração entre os modelos hidrológicos e atmosféricos. O modelo hidrológico MGB-IPH foi ajustado à bacia do rio Sapucaí. A calibração foi feita entre 01/01/1980 a 31/12/1989 e, de maneira geral, o resultado foi considerado satisfatório, o que mostra a eficácia do modelo quanto as variações temporais ocorridas no passado. Esta etapa foi verificada através da comparação entre os dados vazão observadas com as vazões calculadas pelo modelo. O modelo apresentou dificuldade no ajuste de bacias com menores áreas de drenagem, o que era esperado, visto que o modelo é voltado para grandes bacias, além disso, também encontrou dificuldade de representar os picos de vazão. As previsões tiveram início em 1999 e apresentou resultados satisfatórios. Com as análises estatísticas empregadas, foi possível perceber que o erro da previsão aumentou com o aumento da antecedência da previsão e, que os resultados da previsão são melhores para sub-bacias maiores. Com isso, conclui-se que, de maneira geral, as previsões de vazão por conjunto é um método promissor, que podem ser utilizadas como informação para melhorar ou criar um sistema de alerta contra cheias.

Palavras chave: previsão de vazão, modelo hidrológico, calibração, rio Sapucaí

ABSTRACT

The basin of the Sapucaí River is located in a region susceptible to floods due to association to environmental, climatic and anthropic factors. Among the methods to mitigate harm caused by floods, the alert system against flooding can be considered one of the most effective, for when it is compared to other measurements it is possible to notice the difference of costs, which is relatively low. However, it is necessary the usage of hydrological models, adjusted accordingly to the characteristics of the basin in order to obtain reliable results of the flow forecast. Within this context, this paper has as its main goal adjusting the model of flow forecast to Itajubá and Santa Rita do Sapucaí, both cities in the South region of the state of Minas Gerais, which belong to the hydrographic basin of the Sapucaí River. For that, it is necessary the improvement of integration of hydrological and atmospheric models. The hydrological model MGB-IPH has been adjusted to the Sapucaí River basin. The calibration was done from January 1st 1980 to December 31st 1989 and, on the whole, the result was considered satisfactory, which shows the efficacy of this model compared to the temporary variations occurred in the past. This step has been verified through comparing observed data of the flow with the flow calculated by the model. The model showed some difficulty in the adjustment of basins with smaller draining areas, which was expected, as this model focus on bigger basins, and it has also found difficulties to represent the flow peaks. The forecasts started in 1999 and showed satisfactory results. Through statistical analysis it was possible to notice that forecast flow error have risen with the increase of previewed forecast, and the results of non-previewed forecasts are more accurate for bigger sub-basins. Thus, in general lines, it is possible to come to the conclusion that flow forecasting is a promising method that can be used to improve or create information for alert systems against floods.

Keywords: flow forecast, hydrological model, calibration, Sapucaí River

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Esquema de um sistema baseado em propagação de ondas de cheias	18
Figura 3.2: Esquema de um sistema baseado em modelo de transformação chuva-vazão	19
Figura 3.3: Esquema de um sistema baseado em previsões quantitativas de precipitação	20
Figura 3.4: Exemplificação da previsão determinística com mudanças nas condições iniciais	22
Figura 3.5: Esquema de uma previsão por conjunto	23
Figura 3.6: Esquema dos aspectos da classificação dos modelos hidrológicos.....	29
Figura 4.1: Esquema da metodologia geral aplicada no estudo	34
Figura 4.2: Localização da bacia do Sapucaí	35
Figura 4.3: Municípios pertencentes à Bacia do Rio Sapucaí	36
Figura 4.4: Vulnerabilidade à inundação da bacia do Rio Sapucaí.....	37
Figura 4.5: Imagens de inundações históricas de Itajubá	39
Figura 4.6: Localização dos postos fluviométricos	40
Figura 4.7: Localização dos postos pluviométricos	41
Figura 4.8: Localização dos postos de clima.....	43
Figura 4.9: Articulações das imagens utilizadas para bacia do Rio Sapucaí.....	44
Figura 5.1: Mapa pedológico da bacia do rio Sapucaí	53
Figura 5.2: Reclassificação do mapa pedológico da bacia do rio Sapucaí.....	54
Figura 5.3: Mapa de uso e ocupação da bacia do rio Sapucaí.....	55
Figura 5.4: Mapa das unidades de resposta hidrológicas da bacia do rio Sapucaí.....	56
Figura 5.5: Bacia do Sapucaí discretizada em minibacias	57
Figura 5.6: Divisão da bacia do Sapucaí em sub-bacias.....	58
Figura 5.7: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Itajubá	60
Figura 5.8: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Santa Rita do Sapucaí	61
Figura 5.9: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Paraguaçu	61
Figura 5.10: Previsão para o posto de Itajubá com até 5 dias de antecedência.....	63
Figura 5.11: Falsos picos do membro Kain-Fritsch	64
Figura 5.12: Identificação do pico pelo membro Kain-Fritsch	64
Figura 5.13: Antecipação dos picos de cheia do posto de Santa Rita do Sapucaí.....	65
Figura 5.14: Previsão para o posto de Paraguaçu com 1 dia de antecedência.....	66
Figura 5.15: Previsão para o posto de Paraguaçu com 2 dias de antecedência.....	66

Figura 5.16: Previsão para o posto de Paraguaçu com 3 dias de antecedência	67
Figura 5.17: Previsão para o posto de Paraguaçu com 4 dias de antecedência	67
Figura 5.18: Previsão para o posto de Paraguaçu com 5 dias de antecedência	68
Figura 5.19: Erro médio absoluto para cada antecedência de previsão.....	69
Figura 5.20: Erro médio relativo para cada antecedência de previsão	69
Figura 5.21: Diagrama de Dispersão vazão observada x vazão prevista para sub-bacia de Itajubá.....	70
Figura 5.22: Diagrama de Dispersão vazão observada x vazão prevista para sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí.....	71
Figura 5.23: Diagrama de Dispersão vazão observada x vazão prevista para sub-bacia de Paraguaçu.....	72
Figura 5.24: Resultado do CM para sub-bacia de Itajubá	74
Figura 5.25: Resultado do CM para sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí	74
Figura 5.26: Resultado do CM para sub-bacia de Paraguaçu.....	75
Figura 5.27: Representação das vazões limite para a sub-bacia de Itajubá.....	76
Figura 5.28: Representação das vazões limite para a sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí.....	76
Figura 5.29: Representação das vazões limite para a sub-bacia de Paraguaçu	77
Figura 5.30: Resultado do Brier Score para sub-bacia de Itajubá	78
Figura 5.31: Resultado do Brier Score para sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí.....	78
Figura 5.32: Resultado do Brier Score para sub-bacia de Paraguaçu.....	79
Figura 5.33: Resultado do Brier Skill Score para sub-bacia de Itajubá.....	80
Figura 5.34: Resultado do Brier Skill Score para sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí	80
Figura 5.35: Resultado do Brier Skill Score para sub-bacia de Paraguaçu	80
Figura B.1: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de São Bento do Sapucaí	95
Figura B.2: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Cambuí	95
Figura B.3: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Delfim Moreira..	96
Figura B.4: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Bairro de Santa Cruz	96
Figura B.5: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Itajubá.....	97
Figura B.6: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Brazópolis.....	97
Figura B.7: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de São João de Itajubá	98

Figura B.8: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Conceição dos Ouros	98
Figura B.9: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Ponte do Rodrigues	99
Figura B.10: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Santa Rita do Sapucaí	99
Figura B.11: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Vargem do Cervo	100
Figura B.12: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Careçu.....	100
Figura B.13: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de UHE Furnas Rio Sapucaí	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Histórico das inundações em Itajubá.	38
Tabela 4.2: Estações fluviométricas escolhidas para análise da bacia do Rio Sapucaí.....	41
Tabela 4.3: Estações pluviométricas escolhidas para análise da bacia do Rio Sapucaí	42
Tabela 4.4: Estações meteorológicas escolhidas para análise da bacia do Rio Sapucaí	43
Tabela 4.5: Casos selecionados para realizar a previsão	47
Tabela 5.1: Desempenho do modelo MGB para a bacia do Rio Sapucaí.....	59
Tabela 5.2: Resultado do coeficiente de eficiência de cada membro comparado a média do conjunto de previsões	73
Tabela 5.3: Vazões limites adotadas para a análise do Brier Score	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA: Agência Nacional de Águas

BS: *Brier Score*

BSS: *Brier Skill Score*

CM: Coeficiente de Eficiência

CMA: *Canadian Meteorological Centre*

CPRM: Serviço Geológico do Brasil

CPTEC: Centro de Previsões de Tempo e Estudos Climáticos

DD: Diagrama de Dispersão

DWD: *German National Weather Service*

ECMWF: *European Center for Medium Range Weather Forecasting*

EFAS: *European Flood Alert System*

EMA: Erro Médio Absoluto

EM-DAT: Banco de Dados Internacional de Desastres

EMR: Erro Médio Relativo

EPS: *Ensemble Prediction System*

FCA: Fator de Correção

FUNCEME: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IGAM: Instituto Mineiro de Gestão de Águas

INMET: Instituto Nacional De Meteorologia

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MCGA: Modelo de Circulação Geral Atmosférico (modelo meteorológico global rodado no CPTEC/INPE).

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

MNT: Modelo Numérico do Terreno

MSC: *Meteorological Center of Canada*

NCEP: *US National Centers for Environmental Prediction*

SEMAD: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

TIGGE: THORPEX Interactive Grand Global Ensemble

URH: Unidades de Resposta Hidrológica

WRF: *Weather and Research Forecasting*

ZACAS: Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. Objetivo Geral.....	15
2.2. Objetivos Específicos	15
3. REVISÃO LITERÁRIA	16
3.1. Previsão de Vazão.....	16
3.1.1. Previsão baseada na propagação de ondas de cheias.....	18
3.1.2. Previsão baseada em modelos de transformação chuva-vazão	19
3.1.3. Previsão baseada em previsões quantitativas da precipitação	20
3.2. Previsão de Tempo por Conjunto (Ensemble).....	21
3.2.1. Estudos com o uso de ensemble na previsão de vazão.....	24
3.2.2. Estudos com o uso de ensemble na previsão de vazão no contexto brasileiro ...	27
3.3. Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH)	28
4. METODOLOGIA	33
4.1. Descrição Geral.....	33
4.2. Bacia do Rio Sapucaí	34
4.2.1. Descrição da área de estudo.....	34
4.2.2. Histórico de inundações no rio Sapucaí	38
4.3. Dados Hidrológicos e Meteorológicos	40
4.3.1. Série de Vazão	40
4.3.2. Série de Precipitação e variáveis meteorológicas.....	41
4.4. Classificação dos Tipos de Solos e Uso e Ocupação da Bacia.....	44
4.5. Calibração do Modelo Hidrológico	44
4.6. Previsão de Precipitação por Conjunto	45
4.7. Assimilação dos Dados do Modelo Hidrológico	47
4.8. Análise Estatística da Previsão de Vazão por Conjunto	49

4.8.1.	Medidas de avaliação do erro ou precisão.....	49
4.8.2.	Brier Score e Brier Skill Score	51
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1.	Mapa de Tipos de Solos.....	52
5.2.	Mapa de Uso e Ocupação do Solo	54
5.3.	Unidades de Resposta Hidrológica	55
5.4.	Discretização da Bacia Hidrográfica	56
5.5.	Calibração do Modelo Hidrológico	59
5.6.	Previsão de Vazão.....	62
5.7.	Análise Estatística da Previsão de Vazão por Conjunto	68
5.7.1.	Avaliação do erro ou precisão	68
5.7.2.	Brier Score e Brier Skill Score	75
6.	CONCLUSÕES.....	82
	REFERÊNCIAS	85
	Apêndice A: Parâmetros Calibráveis da Bacia do Rio Sapucaí	90
	Apêndice B: Hidrogramas de Vazão Calculada x Vazão Observada.....	95

1. INTRODUÇÃO

No Brasil os problemas relacionados à inundação são constantes, o que reflete em impactos ao meio ambiente e a sociedade que está inserida no mesmo. Os impactos geram prejuízos e danos, que muitas vezes são irreparáveis. As cheias são fenômenos naturais que fazem parte do ciclo hidrológico, porém o problema ocorre quando há ocupação inadequada das margens dos rios pela população, seja para fins de habitação, comercial, industrial ou uso agrícola.

O crescimento urbano sem planejamento, associado ao uso inadequado do solo, geram problemas difíceis de resolver. À medida que a urbanização aumenta, conseqüentemente, a impermeabilização do solo também aumenta. Assim, ocorre alteração do ciclo hidrológico natural, diminuindo a infiltração e a recarga do lençol freático. Com isso, aumenta o escoamento superficial das águas pluviais, sobrecarregando o sistema de drenagem urbana, que em muitos casos não suportam o crescimento do município, podendo ser umas das causas para a ocorrência de inundação.

Com relação a área de estudo, o Sul de Minas Gerais é uma área considerada suscetível a inundação, devido a associação de vários fatores ambientais e climáticos, tais como: combinação do relevo acidentado com o tipo de solo predominante da região; frequentes passagens de frentes frias e o estabelecimento da ZACAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul). Por este motivo, um estudo integrado entre esses fatores, ambientais e climáticos, é necessário, porque somente a previsão meteorológica não é suficiente para caracterizar uma situação de risco. As condições e uso do solo (profundidade, capacidade de infiltração e escoamento) e o relevo do local influenciam na vulnerabilidade da região, com relação à enchente. Neste contexto, a modelagem hidrológica é importante para a análise de risco, fornecendo dados importantes sobre bacia hidrográfica, o que ajuda na tomada de decisão e planejamento dos recursos hídricos.

A previsão de vazão é uma estimativa do escoamento de um curso d'água, com certa antecedência. Ela permite a antecipação da ocorrência de eventos hidrológicos, que serve de apoio para a tomada de decisão, podendo diminuir ou até mesmo evitar os impactos negativos. Por isso, o aprimoramento da interação entre os modelos meteorológico e hidrológico é fundamental, pois possibilita a implantação ou aperfeiçoamento de um sistema de alerta contra cheias, além de antecipar a ocorrência de secas prolongadas, que interfere no planejamento dos recursos hídricos.

Um dos métodos mais utilizados na previsão de vazão é o modelo de transformação chuva-vazão, que tem como principal dado de entrada a precipitação observada e prevista. Porém a previsão de precipitação apresenta erros consideráveis, devido à natureza caótica da atmosfera e a sensibilidade dos modelos às condições iniciais. Então, na tentativa de diminuir essas incertezas, tem sido muito utilizada a previsão de precipitação por conjunto, que podem ser geradas a partir de diferentes modelos atmosféricos ou diferentes condições iniciais em um único modelo.

Atualmente, no contexto brasileiro, é crescente a incorporação da previsão de precipitação por conjunto na previsão de vazão, com o intuito de melhorar os resultados através da diminuição das incertezas. Então, a análise da viabilidade da aplicação deste método para a bacia do Sapucaí pode contribuir para o alerta de inundação da região, visto que é uma região vulnerável a esse tipo de evento. Neste trabalho foi proposto a utilização da integração da previsão de precipitação por conjunto ao modelo hidrológico conceitual e distribuído, aplicado a bacia do rio Sapucaí.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar a aplicabilidade da previsão de vazão de curto prazo, através da incorporação da previsão meteorológica por conjunto (ensemble), para a bacia do rio Sapucaí. Com o intuito de prever a ocorrência de cheias nos municípios de Itajubá e Santa Rita do Sapucaí.

2.2. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo principal, é necessário atingir alguns objetivos específicos, tais como:

- ✓ Avaliar o desempenho do modelo hidrológico para a simulação de uma bacia hidrográfica localizada em uma área com topografia acentuada;
- ✓ Desenvolver metodologia para incorporação das previsões de precipitação por conjunto pelo modelo hidrológico, para poder gerar as previsões de vazão;
- ✓ Analisar as previsões de vazão geradas pelo modelo hidrológico a partir de análises visuais e estatísticas.

3. REVISÃO LITERÁRIA

3.1. Previsão de Vazão

A previsão da vazão envolve a estimativa do escoamento da água com antecedência no tempo, que é uma ferramenta utilizada no gerenciamento dos recursos hídricos para minimizar as incertezas do clima (SILVA; TUCCI; COLLISCHONN, 2006). De acordo com mesmo autores, a previsão pode ser realizada em curto prazo, com antecedência de poucas horas até aproximadamente 14 dias, e em longo prazo, com antecedência de meses. Geralmente, a previsão de curto prazo é utilizada para o controle de inundações, em contrapartida, a de longo prazo é voltada para análises econômicas relacionadas aos recursos hídricos. Segundo Meller (2012), a previsão de vazão pode ser útil nas operações de obras hidráulicas como reservatórios, produção de energia, abastecimento de água, irrigação para agricultura, navegação e controle de cheias.

De acordo com ANDREOLLI (2003), a previsão pode ser utilizada para minimizar os impactos geradas pelas cheias e estiagens, além de colaborar com as operações de obras hidráulicas. O conhecimento prévio do hidrograma afluente de um determinado reservatório pode ser uma ótima ferramenta para o controle de cheias, por exemplo, pois essa informação possibilita manobra de comportas horas antes da ascensão do hidrograma, rebaixando o reservatório em tempo real.

No Brasil o setor elétrico é o que mais utiliza a previsão de vazão, como recurso para o planejamento e operação de reservatórios para geração de energia. Quando se trata de alerta de enchente, o uso da previsão de vazão ainda está no início, devido a disponibilidade limitada dos dados de vazão e precipitação em tempo real com resolução espacial e temporal adequadas (MELLER, 2012). Segundo o mesmo autor, um dos principais exemplos que utilizou a previsão de vazão para alerta de enchentes foi o Sistema de Alerta Contra Enchentes do Rio Doce, operado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) em parceria com a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM). Este sistema é operado desde 1997, beneficiando cerca de 15 municípios, localizados nos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo (PINTO et al., 2005 apud MELLER, 2012).

De acordo com Fan (2015), com o passar dos anos a previsão de cheias, associadas aos impactos sociais, econômicos e sanitários, tem crescido no cenário brasileiro, devido aos danos que as inundações vem causando ao país nas últimas décadas, o que deixou o Brasil

entre os dez lugares mais atingidos por enchente no mundo, segundo o Banco de Dados Internacional de Desastres EM-DAT.

Segundo Tucci e Collischonn (2003), a previsão de curto prazo pode ser classificada como contínua ou eventual. A previsão é considerada contínua quando é realizada ao longo do tempo, independentemente das condições hidrológicas. A previsão eventual ocorre em períodos definidos do regime hidrológico, como por exemplo, enchentes ou estiagens, ou seja, períodos críticos.

Este tipo de previsão, geralmente, é utilizada para minimizar os impactos causados pelas enchentes, tanto na fase de planejamento urbano quanto na criação de sistema de alerta. Além dessas funções, ela também pode ser usada em conjunto com atividades como geração de energia, navegação, irrigação e abastecimento de água (SILVA, 2005). De acordo com o mesmo autor, as dificuldades na previsão de vazão, geralmente ocorrem em períodos chuvosos, devido a maior incerteza, gerada pela maior variabilidade da precipitação. Em contrapartida, durante um período de estiagem, toda a água encontra-se dentro da bacia e a previsão depende, principalmente, do escoamento subterrâneo e da propagação do escoamento nos rios.

Conforme Lettenmaier e Wood (1993, apud Silva, 2005), a previsão de cheia de curto prazo, pode ser classificada também em função da antecedência desejada e as características da bacia. De acordo com Silva (2005), a antecedência da previsão baseada na precipitação depende do tempo de concentração da bacia, ou seja, quando esse tempo é pequeno a antecedência da previsão através de um modelo chuva-vazão também é pequena. Além disso, as características geológicas e pedológicas também influenciam no tipo de previsão. Os rios que pertencem a bacias com solo e rocha permeável têm variações lentas da vazão, porque há maior de infiltração de água, conseqüentemente, menor escoamento superficial. Diferentemente, em bacias como solos rasos e rochas pouco permeáveis tendem a gerar maior escoamento superficial.

Segundo Silva (2005), a previsão de longo prazo ainda está em desenvolvimento na área hidrológica, sendo muito utilizada para o planejamento e operações dos recursos hídricos, como por exemplo: irrigação, operação de reservatórios de usinas hidrelétricas, medidas contra secas e inundações e agricultura. Anteriormente, para obter uma previsão de longo prazo confiável, era necessário que a vazão futura tivesse maior dependência da água armazenada na bacia do que das condições meteorológicas futuras.

Com o passar dos anos, ampliou-se o conhecimento sobre as conexões climáticas globais e os avanços na simulação numérica de precipitação, o que aumentou a possibilidade

de usar a previsão de longo prazo. Com isso, possibilita maior planejamento das operações de reservatórios hidrelétricos, podendo até antecipar o preço da energia. Isto é muito importante para o Brasil, pois sua matriz energética é baseada em energia hidráulica (SILVA; TUCCI; COLLISCHONN, 2006).

Para previsão de vazão de curto prazo, que é o foco deste trabalho, foram desenvolvidas várias metodologias ao longo do tempo. O método a ser escolhido depende de vários fatores: escala da bacia, tempo de deslocamento da onda da cheia, recursos disponíveis e dos resultados necessários. Então, para realizar a previsão de vazão, podem ser utilizadas metodologias baseadas em: propagação de ondas de cheias, transformação de chuva em vazão e transformação de chuva em vazão com informação adicional de previsão quantitativa de precipitação (FAN, 2015). Cada um destes métodos é explicado nas seções seguintes.

3.1.1. Previsão baseada na propagação de ondas de cheias

Este método é baseado na utilização de informações de variáveis hidrológicas medidas, nível ou vazão, em pontos localizados a montante do local de interesse para a previsão. A Figura 3.1 exemplifica este sistema, no qual a onda de cheia está sendo observada na estação fluviométrica 01, que está a montante da estação fluviométrica 02, para onde a onda está sendo propagada, e onde é local de interesse na previsão de vazão. Para este método, pode ser utilizado modelo de regressão simples, modelos baseados em dados (redes neurais artificiais, por exemplo), ou modelos de propagação de vazão (TUCCI, 2005 apud FAN, 2015).

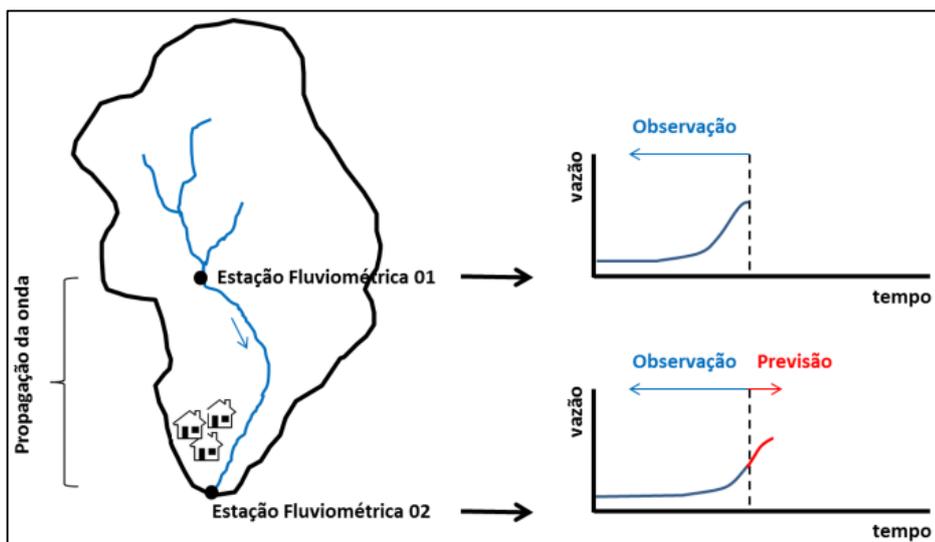


Figura 3.1: Esquema de um sistema baseado em propagação de ondas de cheias

Fonte: FAN, 2015

De acordo com Fan (2015), a principal vantagem deste método é que, geralmente, apresentam menores erros, devido a utilização de variáveis que são medidas com alta precisão, como por exemplo o nível da água ou a vazão em seções transversais do rio, sempre a montante do ponto de interesse. Porém, a desvantagem está relacionada com a antecedência máxima possível da previsão, pois esta é limitada pelo tempo de propagação da onda de cheio ao longo do trecho entre os locais de monitoramento (montante e jusante), por exemplo, em rios com grande extensão esse tempo de propagação pode durar dias ou até semanas, já rios menores, este tempo pode levar poucas horas.

3.1.2. Previsão baseada em modelos de transformação chuva-vazão

Este método pode complementar o primeiro, de propagação de ondas de cheias, pois neste caso são usados dados de precipitação, medidos em postos pluviométricos, estimados por radar ou estimados através de satélites. Esta informação de precipitação melhora as previsões de vazão, devido a incorporação de uma variável do ciclo hidrológico, diretamente relacionada com a geração de escoamento. Na Figura 3.2 pode-se observar o esquema deste sistema de previsão, onde a vazão prevista na estação 02 é resultante da combinação da propagação de onda de cheia e a vazão gerada pela chuva observada antes da previsão (FAN, 2015).

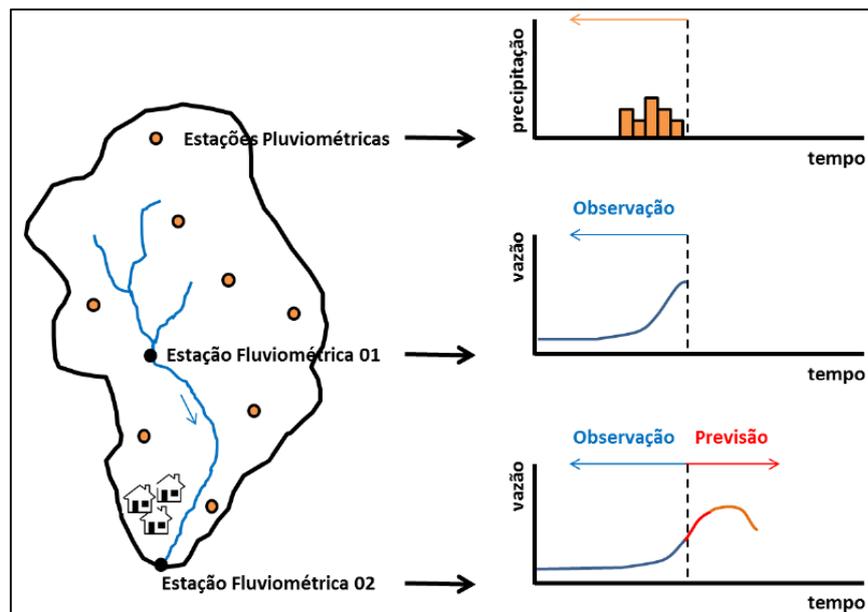


Figura 3.2: Esquema de um sistema baseado em modelo de transformação chuva-vazão
Fonte: FAN, 2015

Uma abordagem muito comum deste tipo de sistema é a utilização de modelos hidrológicos de transformação chuva-vazão do tipo conceitual, que é o caso do modelo utilizado neste trabalho, o MGB-IPH.

Segundo Fan (2015), a vantagem deste método, quando comparado ao método de propagação de onda, é a possibilidade do aumento da antecedência das previsões, que é proporcional ao tempo de concentração da bacia de estudo. No entanto, a desvantagem é o aumento da incerteza das previsões, devido a inclusão da nova variável (precipitação). O que pode ser explicado pelo fato da transformação de chuva em vazão apresentar mais erros durante a modelagem do que a de propagação de ondas, além dos dados de precipitação ser uma estimativa aproximada.

3.1.3. Previsão baseada em previsões quantitativas da precipitação

Este método pode ser utilizado quando o tempo de antecedência desejado é maior do que o tempo de concentração da bacia. Neste caso, deve-se considerar no modelo de previsão de precipitação, além da precipitação que já ocorreu, aquela que possivelmente ocorrerá no futuro. Então, para obter estes dados futuros de precipitação é necessário a previsão de precipitação, com isso as limitações dos modelos baseados apenas em dados observados são superadas. A Figura 3.3 é possível observar um exemplo deste método, no qual, nota-se que a vazão prevista na estação 02 é resultado da combinação da propagação de onda na estação 01, dados de chuva observada até o início da previsão e dados de previsão de precipitação após o início da previsão. Este tipo de configuração pode ser obtido através de um modelo hidrológico do distribuído, que também é o caso do modelo MGB-IPH (FAN, 2015).

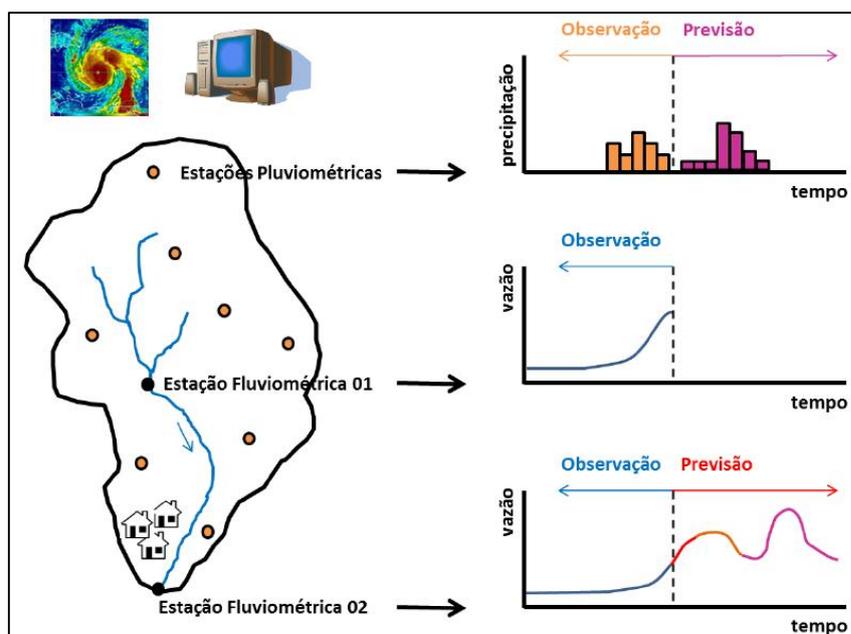


Figura 3.3: Esquema de um sistema baseado em previsões quantitativas de precipitação

Fonte: FAN, 2015

Em seu estudo, Fan (2015) afirma que a vantagem deste procedimento é aumentar a antecedência da previsão de vazão, chegando a variar entre 3 e 15 dias. Em contrapartida, a desvantagem de utilizar a previsão de precipitação está relacionada a incerteza que ela traz para o modelo hidrológico.

Para cada um desses procedimentos existem vários modelos que podem ser utilizados, combinados ou não. Os modelos conceituais podem ser utilizados em combinação com os modelos empíricos (SILVA; TUCCI; COLLISCHONN, 2006).

3.2. Previsão de Tempo por Conjunto (Ensemble)

As previsões numéricas de precipitação são de extrema importância por fornecerem informações aos setores que são sensíveis a variações atmosféricas, como agricultura, por exemplo. Além disso, permite prever eventos extremos, como cheias e períodos de seca, com antecedência, o que possibilita ações para mitigação dos impactos (SILVEIRA et al., 2011).

A precipitação prevista, assim como a observada, são os principais dados de entrada para modelos conceituais chuva-vazão, uma das ferramentas mais utilizadas para antecipar as condições futuras de vazão, ou seja, o desempenho do modelo está diretamente ligado a qualidade dos dados de precipitação, tanto em termos de volume quanto de distribuição espaço-temporal (MELLER, 2012). Segundo o mesmo autor, os diversos estudos nessa área tem contribuído para o constante avanço tecnológico, visando o aumento da resolução espacial dos modelos, melhoria na assimilação de dados e o uso da abordagem probabilística, o que tem aumentado a utilização dessas informações em conjunto com modelos chuva-vazão, com o intuito de ampliar o horizonte das previsões hidrológicas.

Segundo Fan (2015), a incerteza na previsão de precipitação é um dos principais problemas da previsão de vazão. O que pode ser explicado pelo fato das equações que descrevem os processos atmosféricos dentro do modelo meteorológico serem muito sensíveis as condições iniciais. Ou seja, se for fornecido ao modelo meteorológico condições iniciais ligeiramente diferentes, em pouco tempo eles simulam estados completamente distintos da atmosfera. A Figura 3.4 exemplifica como se comporta uma previsão determinística, quando é utilizada uma única condição inicial, porém, se a previsão for iniciada com uma condição inicial ligeiramente diferente, o resultado obtido pode ser completamente diferente.

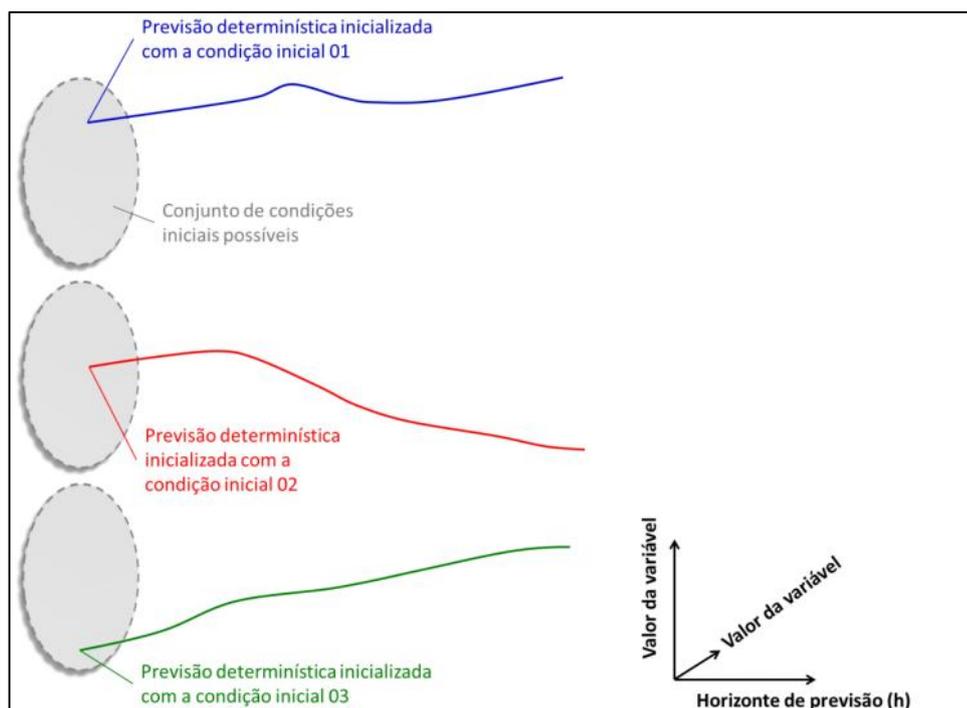


Figura 3.4: Exemplificação da previsão determinística com mudanças nas condições iniciais
 Fonte: FAN, 2015

Neste contexto, surgiu o conceito de previsão por conjunto, devido a necessidade de diminuir os erros cometidos na geração das condições iniciais da atmosfera e/ou falhas dos modelos de previsão de tempo, com a finalidade de aumentar a antecipação das previsões e melhorar as previsões (SILVEIRA et al., 2011).

De acordo com Lewis (2004, apud Calvetti, 2011), se uma perturbação em uma variável meteorológica pode crescer em uma escala exponencial, isso pode gerar erros, também com crescimento exponencial, para as previsões de precipitação, o que pode ser desconhecido no caso de previsões determinísticas. Meller (2012) cita em seu trabalho que atmosfera é um sistema não linear, muito dependente das condições iniciais, que não são perfeitamente conhecidas, o que dificulta obter previsões determinísticas precisas com longa antecedência. De acordo com o mesmo autor, neste contexto, a previsão por conjunto ou ensemble é utilizada para melhorar as previsões numéricas de precipitação, para isso, são inseridas perturbações nas condições iniciais no modelo meteorológico, gerando n cenários distintos e equiprováveis, posteriormente são utilizadas técnicas estatísticas para determinar as probabilidades e incertezas dos resultados. Na Figura 3.5 pode ser observado como é feita a previsão por conjunto, formada por diferentes condições iniciais, no qual o modelo simula várias vezes a previsão, variando a condição inicial.

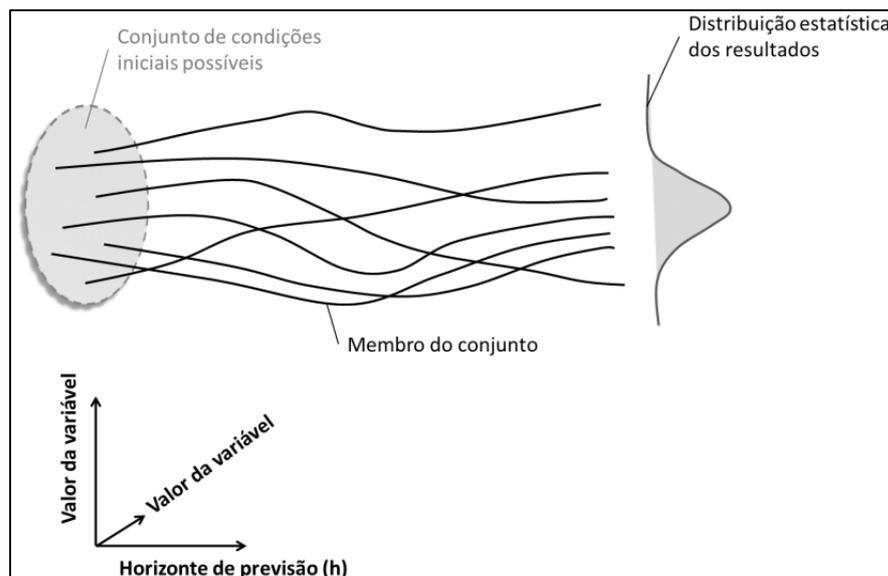


Figura 3.5: Esquema de uma previsão por conjunto

Fonte: FAN, 2015

De acordo com Fan (2015), as previsões por conjunto permitem uma interpretação mais ampla, quando comparada a determinística, pois ela possibilita a dedução da trajetória mais provável da variável, a partir da maior concentração dos membros, além de possibilitar a estimativa da probabilidade de ocorrência de eventos hidrológicos. Segundo Calvetti (2011), a previsão determinística não fornece muitas opções para tomada de decisão, já a previsão por conjunto, por fazer várias simulações, proporciona maiores informações, que contribui para elaborar uma decisão.

No cenário internacional, diversos centros como o *Meteorological Center of Canada* (MSC), o *US National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e o *European Center for Medium Range Weather Forecasting* (ECMWF) realizam previsões através de sistema previsão por ensemble ou *Ensemble Prediction System* (EPS). No contexto nacional, pode-se citar como referências o CPTEC/INPE e o Laboratório de Meteorologia Aplicada a Sistemas Regionais de Tempo – MASTER/IAG-USP (MELLER, 2012).

O sistema de previsão por ensemble (EPS) do ECMWF, que foi um dos centros pioneiros no desenvolvimento deste tipo de previsão, operacional desde 1992, utiliza o modelo meteorológico global e as incertezas nas condições iniciais são representadas por um conjunto de 50 previsões, rodadas a partir das alterações das condições iniciais e da parametrização do modelo atmosférico. Além disso, também é feita a previsão determinística, através da utilização da melhor estimativa considerada das condições iniciais e da parametrização do modelo, gerando assim, a previsão controle (FAN, 2015). De acordo com o mesmo autor, o EPS desenvolvido pelo *National Centers for Environmental Prediction*

(NCEP), que está em operação desde 1996, utiliza o modelo meteorológico global GEFS para a geração de previsão com 23 membros, através das perturbações das condições iniciais.

O CPTEC/INPE opera desde 2001 um sistema de previsão global do tempo por conjunto, que teve origem no estudo elaborado por Coutinho (1999), no qual utilizou o modelo de circulação geral atmosférico (MCGA) do CPTEC. Recentemente, o CPTEC tem avançado nas pesquisas com a utilização do modelo regional ETA para gerar as previsões por conjunto (FAN, 2015). Segundo Calvetti (2011), o sistema de previsão por conjunto do modelo ETA, integra perturbações nas condições iniciais e perturbações na física do modelo. O modelo ETA é um modelo regional, de grade regular, utilizado pelo INPE desde 1996 (SIQUEIRA et al., 2016). Uma das principais vantagens deste modelo é a coordenada vertical e a estabilidade numérica, que é útil para regiões com relevos mais complexos (MESINGER et al., 1990 apud VIEIRA JUNIOR et al., 2009).

O MASTER, baseado no conceito *multimodel super ensemble*, na qual os membros são combinados estatisticamente em uma única previsão, gerando uma previsão determinística. Neste caso, são atribuídos pesos maiores aos membros com melhores desempenhos (MELLER, 2012). De acordo com Calvetti (2011), esta técnica é conhecida como conjuntos múltiplos, que é a utilização de vários modelos para explorar o máximo possível as perturbações geradas pelas condições iniciais. Para realizar este tipo de previsão, o MASTER utiliza diversos modelos globais (ECMWF, NCEP, CPTEC, UKMO, JMA e CMS) e regionais (ETA, BRAMS, MBAR, MM5 e ARPS).

Também no Brasil, a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME opera desde 2001 um sistema de previsão de chuva por conjunto, porém com escala temporal maior, sendo mensal e sazonal. Para realizar este tipo de previsão, eles utilizam vários modelos atmosféricos: dados da previsão climática com modelo de circulação global ECHAN4.5 são usados para alimentar dois modelos regionais, o *Regional Spectral Model* – RSM e o *Regional Atmospheric Modeling System* – RAMS (REIS et al., 2007 apud FAN, 2015).

3.2.1. Estudos com o uso de ensemble na previsão de vazão

Na literatura é possível encontrar vários estudos que envolvem o uso de ensemble na previsão hidrológica, principalmente em locais onde as previsões meteorológicas são mais difíceis, gerando maior incerteza. Neste contexto, em alguns trabalhos foram feitas a comparação entre a previsão por conjunto e a previsão determinística para estudar a ocorrência de cheias. Rouling e Vannitsen (2005) estudaram a bacia do rio Demer (1775 km²)

e Ourthe (1616 km²), localizadas na Bélgica. Neste trabalho, eles analisaram 6 anos de previsões por conjunto, gerados pelo ECMWF, e o modelo hidrológico utilizado foi o *Integrated Runoff Model F. Bultot* (IRMB). Depois de comparar os resultados da previsão por conjunto com a previsão determinística, os autores concluíram que o desempenho da previsão por conjunto tem um desempenho superior significativo até o nono dia de previsão, principalmente durante o inverno.

Outro estudo, realizado por Pappenberger *et al.* (2008), analisou um caso de cheia que ocorreu em outubro de 2007 na Romênia. Para isso, foram utilizados como dado de entrada do modelo hidrológico EFAS (European Flood Alert System), as previsões atmosféricas disponíveis no banco de dados do THORPEX *Interactive Grand Global Ensemble* (TIGGE), onde são armazenadas, desde 2006, previsões de um grande número de EPS provenientes de diversos centros de previsão de todo o mundo. Com os resultados, os autores verificaram que poderia ter sido emitido um aviso com até oito dias de antecedência, o que confirmou, neste caso, o potencial da base de dados do TIGGE e da previsão por conjunto na diminuição do impacto causado por inundações.

Renner *et al.* (2009) realizaram um estudo para analisar as previsões por conjunto para a bacia do rio Reno entre os postos de Maxau e Lobith (localizada na fronteira entre Holanda e Alemanha), totalizando uma área de estudo de 160.000 km². A previsão de vazão foi realizada pelo modelo hidrológico HBV, e os dados meteorológicos utilizados, com o intuito de comparação, foram: o EPS global gerado pelo ECMWF e o EPS regional do COSMO-LEPS. Os resultados foram avaliados de acordo com limiares baseados em percentis das vazões observadas, ao invés de utilizarem os limiares de alerta. Este método de avaliação foi adotado devido ao curto período de dados observados, o que dificultou a verificação dos eventos extremos. Com a avaliação, os autores verificaram que a previsão utilizando o EPS regional apresentou resultados melhores do que a previsão utilizando o EPS global, mostrando a necessidade, segundo os autores, da elaboração de modelos regionais de alta resolução.

Alguns autores ainda avaliaram o desempenho da abordagem multimodelo nas previsões hidrológicas, como é o caso do estudo realizado por Velásquez *et al.* (2010), no qual foi analisado o desempenho da utilização de 17 modelos hidrológicos com os dados atmosféricos por ensemble, para realizar a previsão de vazão de 1061 bacias de cabeceira na França. Com os resultados obtidos, concluíram que, mesmo com algumas dificuldades e imperfeições, o uso de múltiplos modelos hidrológicos tem desempenho superior quando comparada ao uso de um modelo para realizar as previsões.

Em um outro trabalho, elaborado por Bao et al. (2011), foram realizadas previsões por conjunto para a bacia do rio Xixian (8.826 km²), localizada na China. Neste estudo os autores optaram por utilizar dados de cinco sistemas de previsão por ensemble (EPS) disponíveis no banco de dados TIGGE (CMC, CMA, ECWMF, UKMO e NCEP). Esses dados meteorológicos foram adicionados ao modelo hidrológico Grid-Xinjiang, gerando previsões para um horizonte de 10 dias. Com este estudo, os autores concluíram que o uso da base de dados TIGGE acoplada ao modelo hidrológico gerou resultados satisfatórios, podendo ser considerada como um método promissor na emissão de alerta contra cheias.

No estudo de Schellekens et al. (2011) foi realizada a previsão de cheias para a bacia do rio Tâmis, localizado no Reino Unido. Neste caso, os autores analisaram o desempenho da previsão de vazão para um horizonte de 3 dias, utilizando o EPS regional MOGREPS (*Met Office Global and Regional Ensemble Prediction System*), com 24 membros e resolução de 24 km. A previsão de vazão foi gerada pelo modelo hidrológico chamado TCM (*Thames Catchment Model*). Com os resultados obtidos, os autores concluíram que a previsão de chuva por conjunto gerada pelo MOGREPS contribuiu para melhorar os resultados das previsões de vazão, confirmando, neste caso, que o desempenho da previsão por ensemble foi superior à previsão determinística.

Outro trabalho realizado na China, por Zhao et al. (2012), avaliou a previsão de cheia por conjunto da bacia do rio Huaine, através da utilização dos dados disponíveis na base do TIGEE. Neste estudo foram escolhidos três sistemas de previsão por ensemble: *US National Centers for Environmental Prediction-NCEP* (21 membros), *European Center for Medium Range Weather Forecasting-ECMWF* (51 membros) e o *Canadian Meteorological Centre-CMA* (15 membros). Para comparar, ainda foi utilizada uma previsão determinística gerada pelo *German National Weather Service (DWD)*. Todos estes dados foram inseridos no modelo hidrológico chamado *three-layer variable infiltration capacity (VIC-3L)*. Com os resultados, os autores conseguiram mostrar que o desempenho da previsão por conjunto foi superior a previsão determinística em todos os casos. Quando compararam o desempenho dos três EPS aplicados neste estudo, o ECMWF foi o que apresentou os melhores resultados e a previsão utilizando todos os três EPS juntos o resultado foi superior do que qualquer um dos EPS separadamente.

No estudo de Alfieri et al. (2014), foi utilizado o modelo EFAS para realizar a previsão de vazão na Europa. Com os métodos de avaliação do resultado, os autores conseguiram mostrar que o modelo tem destreza para representar médias e pequenas bacias da

região para um horizonte de até 10 dias de previsão, porém, para as bacias menores e localizadas em áreas com relevo acidentado, os resultados não foram satisfatórios.

Mais recente, um estudo elaborado por Ye, Shao e Li (2016) para o analisar inundações do rio Yi, também utilizou previsões disponíveis na base de dados TIGGE. Neste caso foram escolhidos três EPS: ECMWF, NCEP e CMA. Esses dados foram inseridos no modelo hidrológico distribuído TOPX. Os resultados mostraram que a interação entre os modelos hidrológicos e meteorológicos contribuiu, de forma satisfatória, para a previsão de vazão, resultando em valores previstos próximos dos observados. Além disso, os autores ainda concluíram que com o acoplamento dos modelos hidrológicos e meteorológicos foi possível prever com precisão a ocorrência dos picos e a probabilidade de ocorrência de cheia, o que proporcionou base teórica para tomada de decisão.

3.2.2. Estudos com o uso de ensemble na previsão de vazão no contexto brasileiro

Embora as pesquisas sobre previsão de vazão por conjunto estejam crescendo, no Brasil ainda é muito recente. Um dos primeiros trabalhos abordando este assunto foi o de Calveti (2011), no qual foram avaliadas as previsões para a bacia do rio Iguaçu (24.000 km²). Neste caso, o autor utilizou o modelo hidrológico TopModel e o modelo atmosférico WRF (*Weather and Research Forecasting*). Com o modelo WRF foram geradas as previsões de precipitação por conjunto, composta por 10 membros e resolução de 5 km. Os resultados mostraram que a previsão por conjunto teve um desempenho superior ao da previsão determinística.

Meller (2012) utilizou o modelo hidrológico MGB-IPH para realizar a previsão de cheias por conjunto em curto prazo da bacia do rio Paraopeba (12.150 km²). Neste caso, a previsão por conjunto foi gerada através do uso das previsões de precipitação da base de dados do Laboratório de Meteorologia Aplicada a Sistemas Regionais de Tempo (MASTER-IAG/USP) acoplado ao modelo hidrológico. Para efeito de comparação, foi utilizada a previsão determinística, baseada em uma previsão de precipitação obtida através da combinação ótima de saída de vários modelos atmosféricos. Os resultados foram analisados através de termos determinísticos e probabilísticos, sendo que as previsões determinísticas foram obtidas a partir da média entre os membros do conjunto, e a previsão probabilística considerando todos os membros. Com relação as análises de excedência ou não excedência de limiares de alerta, os resultados mostraram que a previsão por conjunto obteve um

desempenho melhor do que a previsão determinística. O autor ainda concluiu que houve um aumento na proporção de previsões corretas e, conseqüentemente, diminuição da ocorrência de alarmes falsos, principalmente para os limiares de vazões mais altas, que são de extrema importância para a previsão de cheias.

Fan (2015) também utilizou o modelo MGB-IPH para realizar previsão de vazão para três bacias hidrográficas brasileiras: Alto São Francisco, Doce, e Tocantins. Para isso, o modelo hidrológico foi alimentado por dados de precipitação obtidos por três sistemas de previsão meteorológica por conjunto (ECMWF-pf, GEFS, e CPTEC-pf), além de uma previsão determinística de referência (ECMWF-fc), todos foram disponibilizados na base de dados denominada TIGGE. O resultado obtido com as previsões por conjunto dos modelos ECMWF-pf e GEFS se mostraram superiores, quando comparados a previsão determinística. Porém os resultados foram ainda melhores quando foi utilizado o “Super Ensemble”, que é a combinação dos três modelos que geraram a previsão por conjunto. O autor ainda concluiu que não foi possível a transferência dos resultados de uma bacia para outra, apesar de estarem no mesmo clima, e ainda ressaltou que há necessidade de investimentos em técnicas de previsão por conjunto, e que este é o caminho para melhorar as previsões hidrológicas.

Mais recentemente, em um estudo, elaborado por Siqueira et al. (2016), também foi utilizado o modelo MGB-IPH para realizar previsão de cheias por conjunto na bacia do Taquari-Antas/RS. Para isso o modelo hidrológico foi acoplado a diferentes sistemas de previsão, são eles: EPS regional ETA, de curto prazo (até 72 horas), EPS Global ECMWF de médio prazo (até 10 dias), e previsão determinística do modelo regional ETA (até 7 dias). Segundo o autor, o resultado obtido com a previsão por conjunto foi melhor, quando comparada a determinística, apresentando maior qualidade até 72 horas de antecedência. De maneira geral, a conclusão foi que as previsões por conjunto apresentam potencial para servir como informação para complementar o sistema de alerta contra cheias.

3.3. Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH)

As modificações dos recursos naturais, causada pela ação antrópica, influenciam nos processos hidrológicos, podendo resultar em eventos extremos, como inundações, estiagens, produção e transporte de sedimentos, entre outros (ANDRADE; MELLO; BESKOW, 2013). Segundo os mesmos autores, para a compreensão do funcionamento do balanço hídrico e da qualidade da água é necessário realizar estudos hidrológicos em bacias hidrográficas. Uma das ferramentas para este estudo é o modelo hidrológico, que pode ser aplicado para diversos

fins, como por exemplo: gerenciamento dos recursos hídricos, cheias em tempo real e resposta da bacia a variações climáticas.

O modelo hidrológico é definido por Tucci (1998 apud Santos, 2009) como uma ferramenta utilizada para representar os processos que ocorrem na bacia hidrográfica e prever o que poderá ocorrer no futuro. De acordo Moreira (2005 apud Marinho Filho et al., 2012), o modelo hidrológico pode ser classificado considerando diferentes aspectos (Figura 3.6). Geralmente, os modelos são classificados como: estocástico ou determinístico quando considera-se o tipo de variável utilizada na modelagem; empíricos ou conceituais quando o que importa é o tipo de relação entre as variáveis; discretos ou contínuos quando leva-se em consideração a forma de representação dos dados; concentrados ou distribuídos quando existe ou não relações espaciais e, por fim, estacionário ou dinâmicos quando existe dependência temporal.

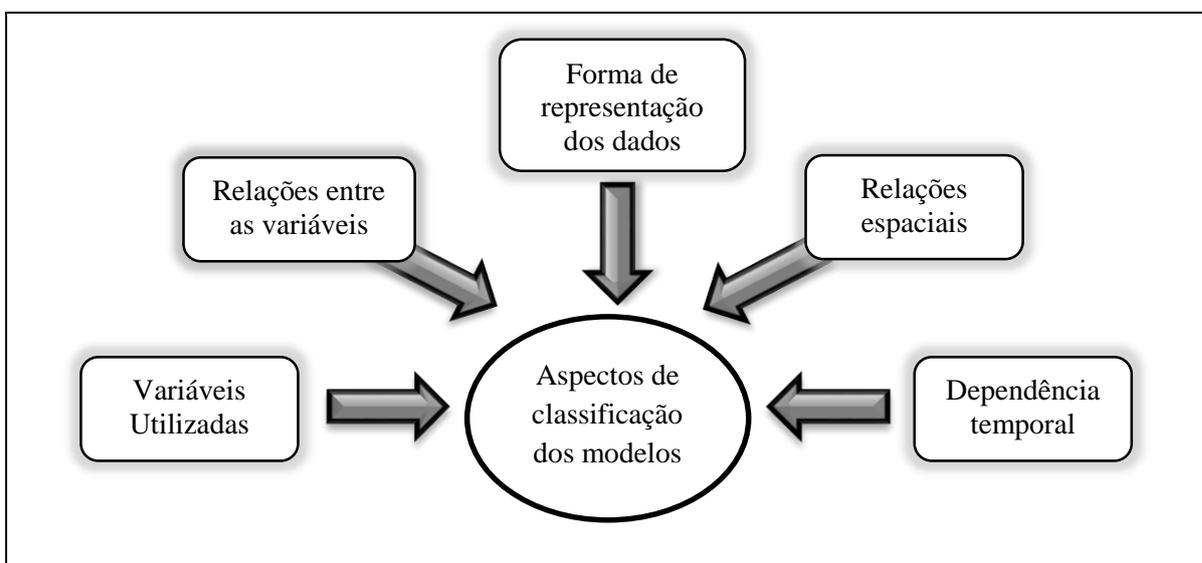


Figura 3.6: Esquema dos aspectos da classificação dos modelos hidrológicos

Fonte: Adaptado de Marinho Filho et al., 2012.

Quando pelos menos uma das variáveis de estudo apresenta comportamento aleatório, o modelo é considerado estocástico, como por exemplo: o nível futuro de um reservatório, que depende diretamente da vazão futura, uma variável aleatória com distribuição de probabilidade. Se ocorrer negligência com os conceitos de probabilidade durante a elaboração do modelo, este será denominado como determinístico. Então, mesmo que haja uma variável aleatória, o modelo pode ser determinístico quando cada dado de entrada gere um único valor de saída. Neste caso, sistema multivariados não lineares podem provocar resultados errados, que erroneamente foram interpretados como variável aleatória (MARINHO FILHO et al., 2012).

Considerando as relações entre as variáveis, o modelo pode ser chamado de empírico quando utilizam apenas relações matemáticas entre as variáveis, sem considerar os processos físicos envolvidos e são baseados em análises estatísticas. Já o modelo conceitual considera os processos físicos envolvidos no balanço hídrico (TUCCI, 1998 apud SANTOS, 2009). As vantagens da utilização de modelos empíricos é rapidez na elaboração e a facilidade na atualização dos parâmetros em tempo real. Os processos empíricos também podem ser utilizados para verificar se há ou não linearidade entre as variáveis no processo hidrológico. Os modelos conceituais, tem como principal vantagem a capacidade de extrapolação e tratamento das variantes hidrológicas (SILVA, 2005).

Segundo Silva (2005), os modelos conceituais ainda podem ser classificados como concentrado ou distribuído. O modelo concentrado não considera a variabilidade espacial das variáveis hidrológicas envolvidas, e o tempo é a principal variável, ou seja, os seus parâmetros variam somente em função do tempo. Neste caso os dados de entrada e saída representam toda a bacia modelada (CUNHA, 2004). De acordo com Marinho Filho et al. (2012), na modelagem concentrada do processo que transforma chuva em vazão de uma bacia, todas as variáveis são avaliadas em termos de média espacial, o que significa que chuva, evapotranspiração, infiltração, vazão, entre outras variáveis, são consideradas em termos médios. Além disso, os mesmos autores afirmam que todas as variáveis de entrada e saída representam toda a área de estudo. Por outro lado, Silva (2005) cita que o modelo é considerado distribuído quando as variáveis e parâmetros dependem do espaço e/ou tempo. Os modelos distribuídos permitem a melhor descrição das variabilidades espaciais dos processos e variáveis de entrada, pois ele utiliza grande quantidade de informações como dado de entrada, definindo melhor as características da bacia em estudo (CUNHA, 2004). Para isso, o modelo divide a área de estudo em sub-bacias ou em grades regulares (SILVA, 2005).

Com relação a forma de representação dos dados, os modelos podem ser discretos ou contínuos. O primeiro busca modelar períodos isolados da série, comumente o objetivo é a representação de cheias ou secas. Por outro lado, os modelos contínuos são usados para representar longos períodos da série, podendo, muitas vezes, contemplar épocas de comportamentos hidrológicos diferentes, por isso, este tipo de modelo necessita de uma estrutura com maior nível de detalhamento, desenvolvido para simular, com maior precisão, todas as diferentes fases do ciclo hidrológico (CUNHA, 2004).

Por fim, quanto a dependência temporal, o modelo pode ser classificado como estacionário, quando descrevem um fenômeno em um determinado momento, e os parâmetros

não variam com o tempo, ou dinâmico, quando pode ocorrer variação no tempo dos parâmetros (MARINHO FILHO et al, 2012).

Segundo Collischonn (2001), a estimativa de inundações, de volume necessário para regularização da vazão, o dimensionamento de canais e a estimativa de vazões mínimas ainda são problemas tradicionais. Juntamente com isto, surgiu nas últimas décadas a preocupação com problemas que se manifestam em de grande escala, como as mudanças climáticas e as alterações do uso do solo, o que motivou o desenvolvimento dos estudos voltados para hidrologia de grandes bacias.

Com isso, Collischonn et al. (2007) desenvolveram com o foco nas bacias da América do Sul, o modelo MGB-IPH (Modelo de Grandes Bacias), que é do tipo conceitual e distribuído. Este modelo utiliza equações físicas e conceituais para simular o ciclo hidrológico, sua estrutura se divide em dois módulos: balanço hídrico no solo e geração de escoamento a partir da chuva; e outro módulo de propagação de vazões ao longo da rede de drenagem (PONTES et al., 2015).

Este modelo utiliza dois tipos de parâmetros, associados ao tipo de uso do solo: fixos e calibráveis. O primeiro pode ser medido ou estimados de acordo com o tipo de vegetação, e é considerado fixo porque o modelo é pouco sensível a suas variações. Os parâmetros calibráveis são aqueles utilizados na calibração, ou seja, são alterados a cada aplicação do modelo até obter um bom ajuste entre os dados observados e calculados (COLLISCHONN, 2001).

O modelo MGB-IPH também é conhecido como modelo de transformação chuva-vazão, porque ele utiliza como dados de entrada a chuva e a vazão observada, além de dados de previsão de precipitação, resultando na vazão prevista para o futuro (PAIVA et al., 2013). De acordo com Collischonn et al. (2013), a utilização de um modelo de transformação chuva-vazão é a melhor solução para prever inundações e emitir alertas com antecedência para a comunidade em situação de risco. Os mesmos autores mostraram que este tipo de sistema de alerta no Brasil foi testado em alguns lugares do país, tais como: bacia do Rio Paraopeba, localizada no sudeste do Brasil, bacia do rio São Francisco e do rio Tocantins.

Existem outros estudos que não focam na previsão de vazão, mas utilizam o MGB-IPH, um deles é o trabalho elaborado por Fan e Collischonn (2014), que buscaram o melhoramento do modelo hidrológico, através da integração do modelo com o sistema de informação geográfica (SIG). Como este modelo é conceitual, ele exige muitos dados que são processados em algum software SIG, por isso este trabalho é de grande importância. Então, este estudo visou o acoplamento entre a plataforma de SIG MapWindow GIS[®] e o MGB-IPH,

posteriormente testaram na modelagem da bacia do rio Ijuí. Como resultado, obtiveram um grau elevado de integração entre o modelo hidrológico e a plataforma SIG, com isso foi possível criar ferramentas úteis para a manipulação e representação dos dados de entrada SIG e para o pós-processamento e análise dos resultados. Estes estudos mostram os amplos trabalhos que utilizam o modelo MGB-IPH, e os resultados positivos obtidos com ele.

4. METODOLOGIA

4.1. Descrição Geral

A metodologia proposta neste trabalho é a integração dos modelos atmosféricos e hidrológicos, através da inclusão dos dados de chuva observada até o início da previsão e a previsão de precipitação a partir deste instante. O modelo atmosférico prevê o comportamento da precipitação, tanto a quantidade quanto a variabilidade espaço-temporal, já o modelo hidrológico descreve as características físicas da bacia hidrográfica, tais como topografia, vegetação e sistema de drenagem.

O modelo atmosférico ETA, usado pelo CPTEC/INPE, a partir de informações climáticas atuais, forneceram previsões climáticas de precipitação, que foram utilizadas como dado de entrada para o modelo hidrológico, após interpolação para resolução do modelo hidrológico.

O modelo hidrológico utilizado é o MGB-IPH, que é um modelo de base física do tipo distribuído (COLLISCHONN, 2001). Com ele, serão geradas as previsões de vazão em valores médios diários. Este modelo necessita de vários dados de entrada que exigem extensa manipulação, os quais foram obtidos através de imagens de satélite, mapas de pedologia, mapas de uso e ocupação, modelo numérico do terreno e séries históricas de variáveis, como: precipitação, vazão, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar ou insolação.

Como boa parte do trabalho foi feito através de manipulação de imagens de sensoriamento remoto, foi indispensável o uso de um SIG (Sistema de Informações Geográficas). Então, ao longo deste trabalho foram utilizados alguns softwares: ArcGIS® 10.1, ENVI® 5.0, Global Mapper® 15.0, Visual Studio® e MapWindow.

Para facilitar a compreensão da metodologia aplicada neste trabalho foi elaborado um esquema (Figura 4.1) com o resumo do método proposto no estudo. No qual é possível observar que os dados hidrológicos e meteorológicos, juntamente com a caracterização física da bacia hidrográfica, serviram como dado de entrada para o modelo hidrológico, o que possibilitou realizar a simulação e calibração do modelo. Com o ajuste terminado, foram inseridas as previsões de precipitação no modelo hidrológico, para obter assim, as previsões de vazão. Por último foram feitas as análises estatísticas, para verificar o desempenho do modelo hidrológico para a bacia do rio Sapucaí.

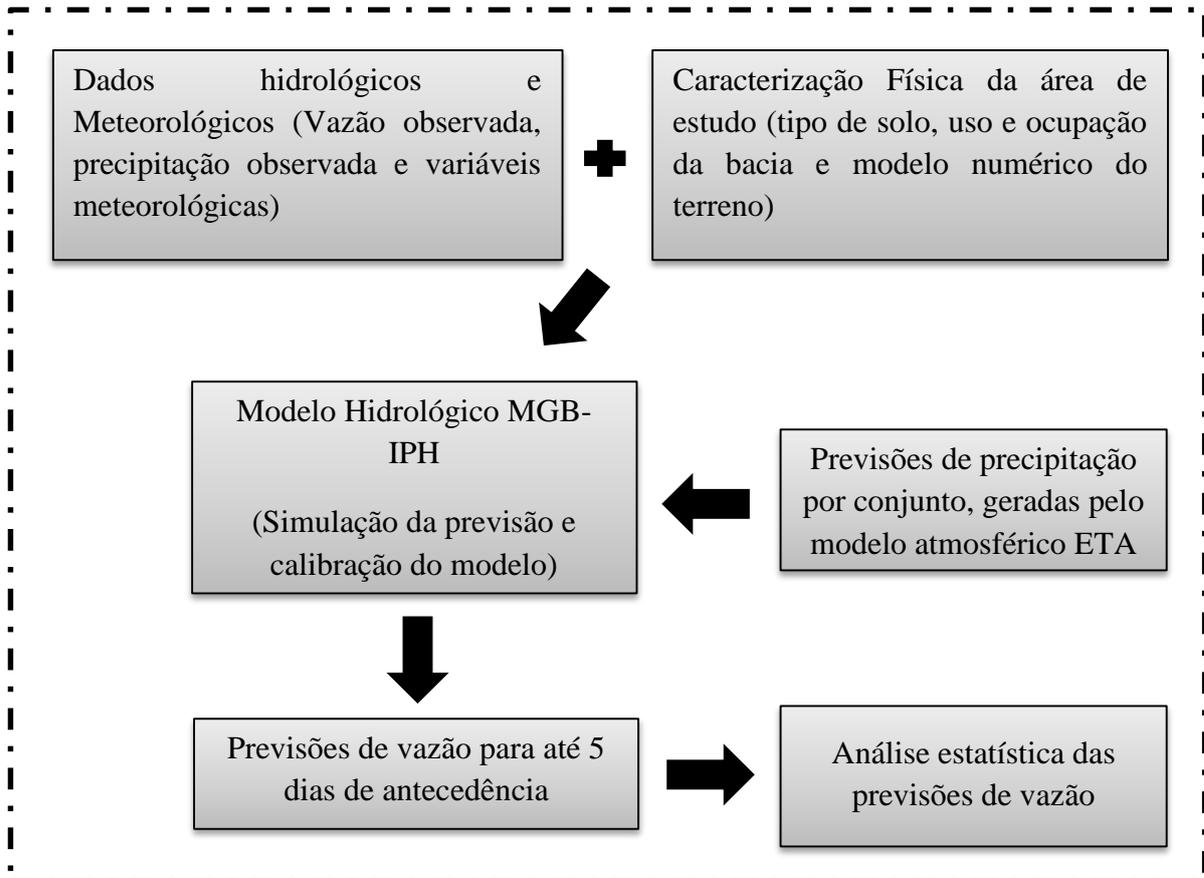


Figura 4.1: Esquema da metodologia geral aplicada no estudo

4.2. Bacia do Rio Sapucaí

4.2.1. Descrição da área de estudo

O rio Sapucaí pertence à bacia do Rio Grande, que está dividida em 14 unidades de gestão, sendo seis no estado de São Paulo, denominadas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs) e oito no estado de Minas Gerais, chamadas Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) com a sigla específica GD. Grande parte da bacia do Rio Sapucaí corresponde a UPGRH GD5 e se localiza a vertente mineira da bacia, e uma pequena porção pertence a UGRHI 01, localizada no estado de São Paulo, como pode ser observado na Figura 4.2 (IGAM, 2010).

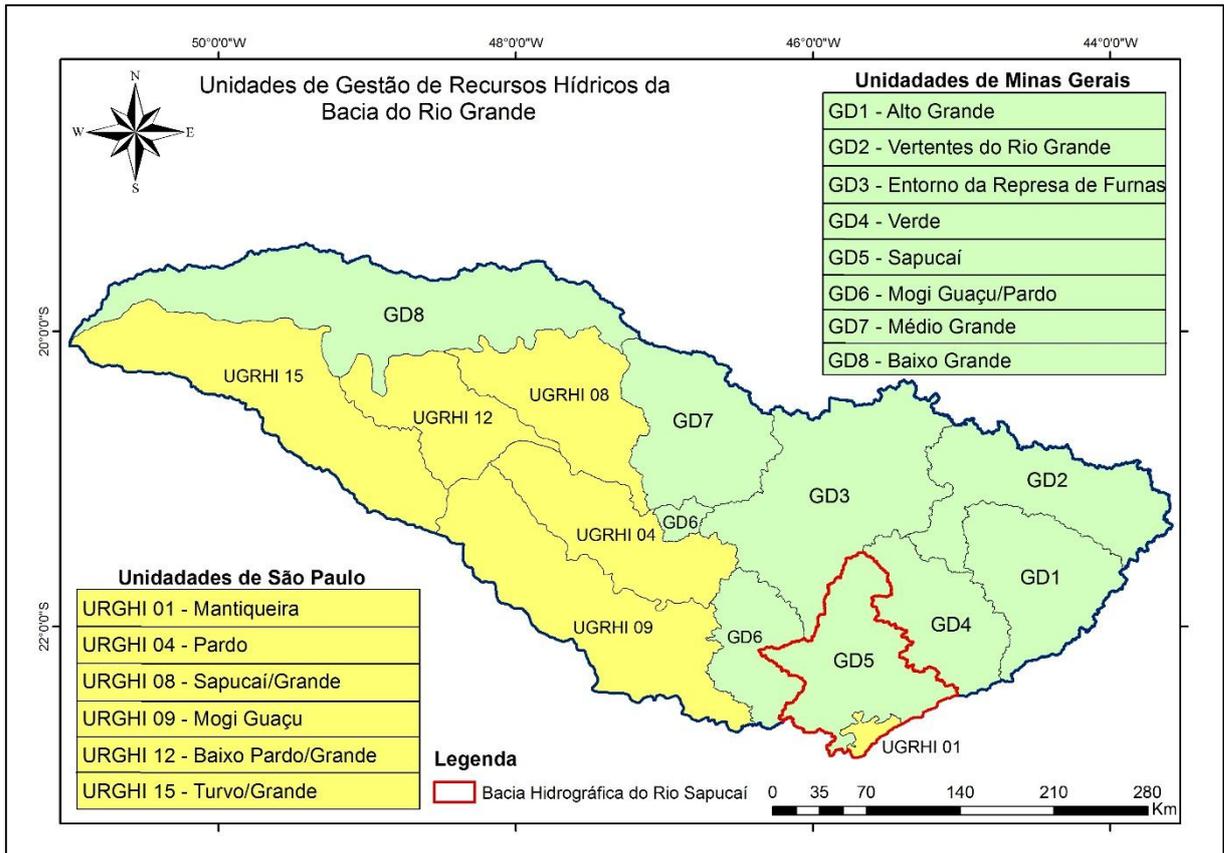


Figura 4.2: Localização da bacia do Sapucaí
Fonte: Adaptado de IGAM (2010)

De acordo com o IGAM (2010), a Bacia do Sapucaí nasce a mais de 1750 metros de altitude em Campos do Jordão, desaguando no Lago de Furnas, percorrendo aproximadamente 248 km. O curso do rio inicia-se com o nome de ribeirão Capivari, no Estado de São Paulo. Depois se junta ao afluyente córrego das Perdizes, com isso o curso principal recebe a denominação de rio Sapucaí-Guaçu, chegando a ter o nome de rio Sapucaí a aproximadamente 5 km antes da divisa dos Estados São Paulo – Minas Gerais.

A bacia do Sapucaí abrange um total de 51 municípios, sendo apenas 3 no Estado de São Paulo, e 48 no Estado de Minas Gerais. Os terrenos da bacia são ocupados predominantemente com agriculturas, pastagens e remanescentes de matas de galerias e araucárias (IGAM, 2010).

O Rio Sapucaí é dividido em três segmentos: curso superior (Alto Sapucaí), curso médio (Médio Sapucaí) e curso inferior (Baixo Sapucaí). O Alto Sapucaí inicia-se em Campos do Jordão até a confluência com o rio Bicas, próximo a Wenceslau Brás, onde começa o Médio Sapucaí e estende-se até o encontro com o Sapucaí – Mirim, no município de Pouso Alegre. Por último, o Baixo Sapucaí vai até a represa de Furnas, como pode ser visto na Figura 4.3.

Neste trabalho foi dado enfoque para os municípios de Itajubá e Santa Rita do Sapucaí, que são algumas das cidades que mais sofrem com inundações.

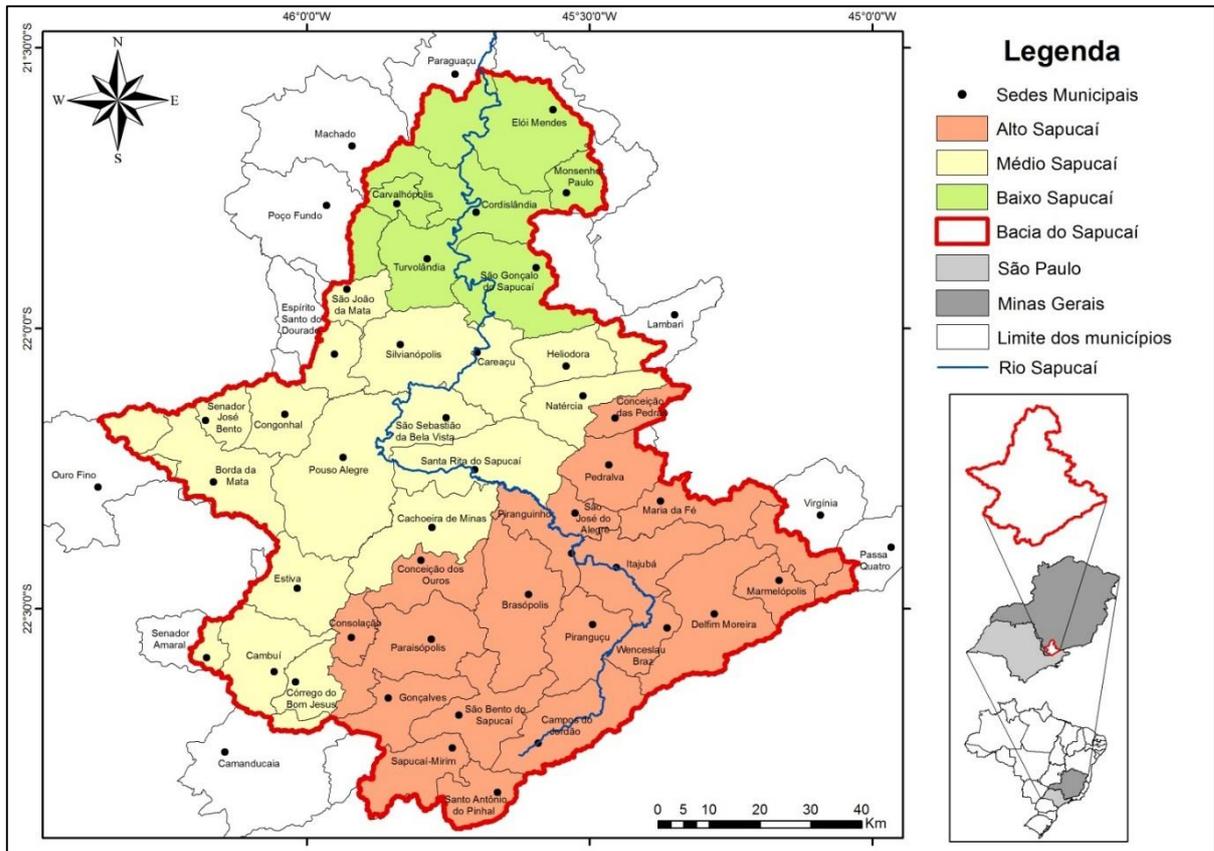


Figura 4.3: Municípios pertencentes à Bacia do Rio Sapucaí
Fonte: Adaptado de IGAM (2010)

O município de Itajubá está localizado às margens do rio Sapucaí, na região do Alto Sapucaí, com as seguintes coordenadas $22^{\circ}30'30''$ de latitude Sul e $45^{\circ}27'20''$ de longitude Oeste. Segundo o censo demográfico do IBGE (2016), a população aproxima-se de 96.523 habitantes, abrangendo uma área de aproximadamente 295 km². Santa Rita do Sapucaí também se desenvolveu às margens do rio Sapucaí e está localizada na região do médio Sapucaí, com as coordenadas $22^{\circ}15'08''$ de latitude Sul e $45^{\circ}42'12''$ de longitude Oeste. A estimativa da população para 2016, segundo o IBGE é de 41.886 habitantes, e área territorial de aproximadamente 353 km².

Os municípios de Itajubá e Santa Rita do Sapucaí já sofreram com grandes inundações, devido à alta vulnerabilidade, como mostra o estudo realizado pela SEMAD (2013). Este estudo mapeou todas as bacias hidrográficas de Minas Gerais, ressaltando a vulnerabilidade à inundações de cada rio pertencente às bacias, como pode ser observado na Figura 4.4.

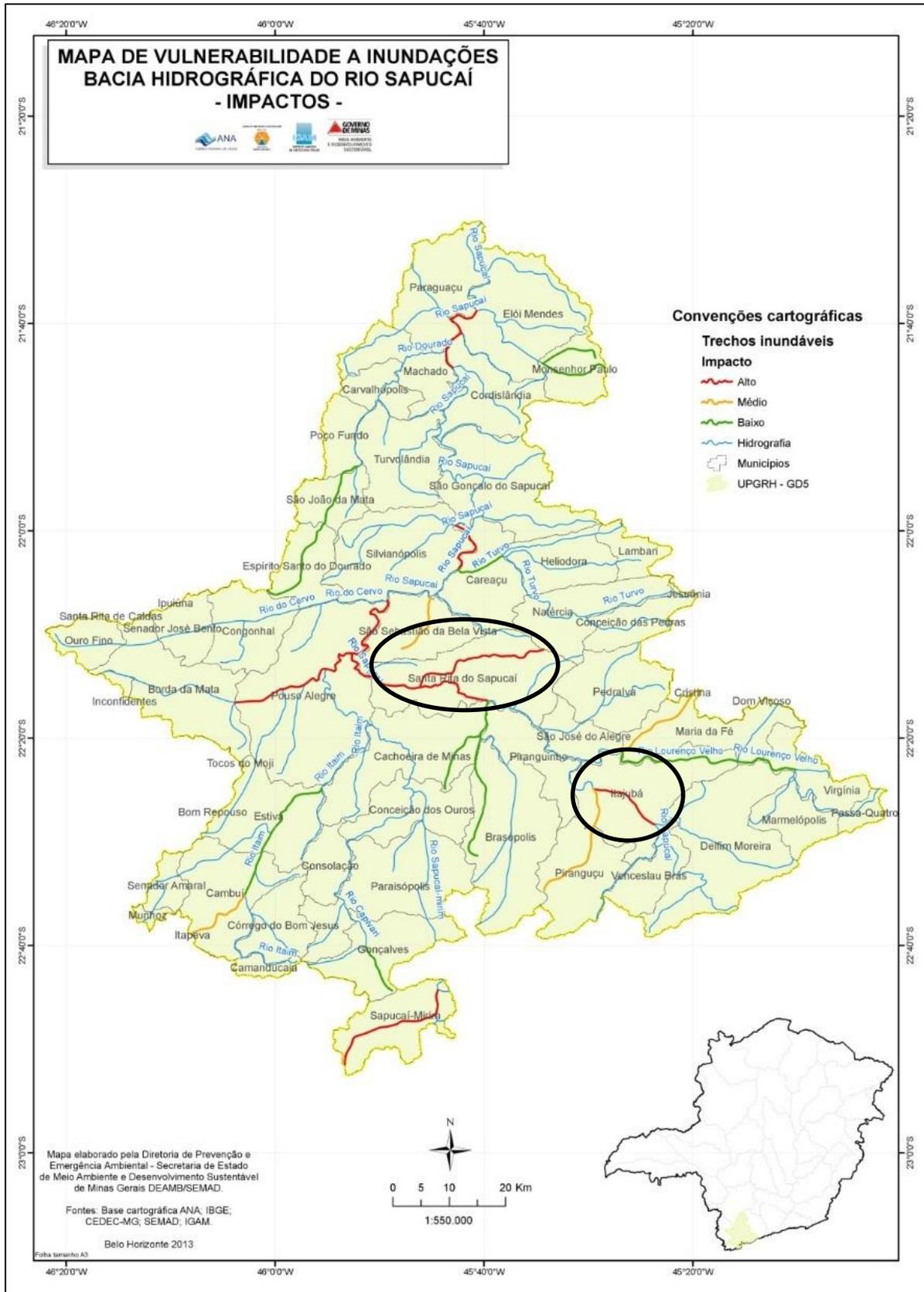


Figura 4.4: Vulnerabilidade à inundação da bacia do Rio Sapucaí.
Fonte: SEMAD, 2013

De acordo com este estudo, a grande maioria dos rios que pertencem à bacia do Sapucaí são susceptíveis a inundação. Neste contexto, a previsão de vazão é uma ferramenta para alertar sobre ocorrência de enchente na região, podendo reduzir e evitar os danos causados a população.

4.2.2. Histórico de inundações no rio Sapucaí

As inundações podem ser classificadas de acordo com a magnitude em pequena (localizada), ou grande. Na Tabela 4.1 encontra-se o histórico das cheias que ocorreram no município de Itajubá até o ano 2000, com sua respectiva magnitude (PINHEIRO, 2005).

Tabela 4.1: Histórico das inundações em Itajubá.

<i>Ano</i>	<i>Altura (m)</i>	<i>Vazão (m³/s)</i>	<i>Tempo de Retorno (anos)</i>	<i>Magnitude</i>
1874	9,55	973,3	141,79	Grande
1919	7,17	291,8	21,1	Grande
1929	8,58	635,7	1781	Grande
1930	5,62	134,8	3,2	Pequena
1945	8,47	601,3	1139	Grande
1949	4,86	104,3	2,4	Pequena
1956	4,71	99,70	2,3	Pequena
1957	8,42	586,0	934,7	Grande
1981	5,20	116,1	2,6	Pequena
1986	4,75	100,9	2,3	Pequena
1991	7,37	327,3	33,1	Grande
2000	8,30	550,3	588,9	Grande

Fonte: Adaptado de Pinheiro (2005)

O evento de 2000, umas das piores para o município, a chuva acumulada nos dias 2, 3 e 4 de janeiro atingiu valores máximos de 350 mm sobre a bacia. Neste episódio, o nível do rio Sapucaí ultrapassou a marca dos 8 metros, atingindo praticamente toda a cidade (PINHEIRO, 2005). Na Figura 4.5 encontram-se algumas imagens de inundações que ocorreram em Itajubá.

Assim como Itajubá, o município de Santa Rita do Sapucaí também sofre com as inundações recorrentes. Segundo Sarlas (2010), um dos maiores problemas que o município enfrenta, referente as enchentes, são as áreas planas próximas ao leito do rio, onde a população se fixou sem nenhum planejamento. Geralmente, quando ocorrem inundações grandes, atingem os dois municípios simultaneamente.



1945 - Praça Wenceslau Brás.
Próximo à casa do Pres. Wenceslau Brás.



1957 - Av. Cel. Carneiro Junior



1979 - Praça Wenceslau Brás
Esquina com a Avenida Cel. Carneiro Junior.



1991 - Rua Eng. Vicente Sanches.
Em frente ao Supermercado Pilar



2000 - Av. Dr. Antônio Braga Filho –
Marginal Direita Conjunto Universitário da
FEPI



2000 – Casas cobertas até o teto praticamente

Figura 4.5: Imagens de inundações históricas de Itajubá
Fonte: Pinheiro (2005).

4.3. Dados Hidrológicos e Meteorológicos

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram necessários dados de vazão, precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar. Estes dados são descritos a seguir e foram obtidos na Agência Nacional de Águas (ANA) e Instituto Nacional De Meteorologia (INMET).

4.3.1. Série de Vazão

Foram utilizados os dados vazão observada em postos fluviométricos, disponibilizados pela ANA. Estes dados foram utilizados para a calibração do modelo hidrológico. Para a seleção dos postos fluviométricos, foi adotado o critério de utilizar apenas as estações que possuíam dados a partir de 1980, além de considerar a espacialidade dos postos, pois eles deviam cobrir toda a rede de drenagem da bacia.

Inicialmente, foram encontrados 75 postos fluviométricas pertencentes a bacia do Sapucaí, porém depois de aplicar os critérios de seleção, esse número foi reduzido para 14, como pode ser observado na Figura 4.6. Os postos selecionados para este estudo estão descritos na Tabelas 4.2.

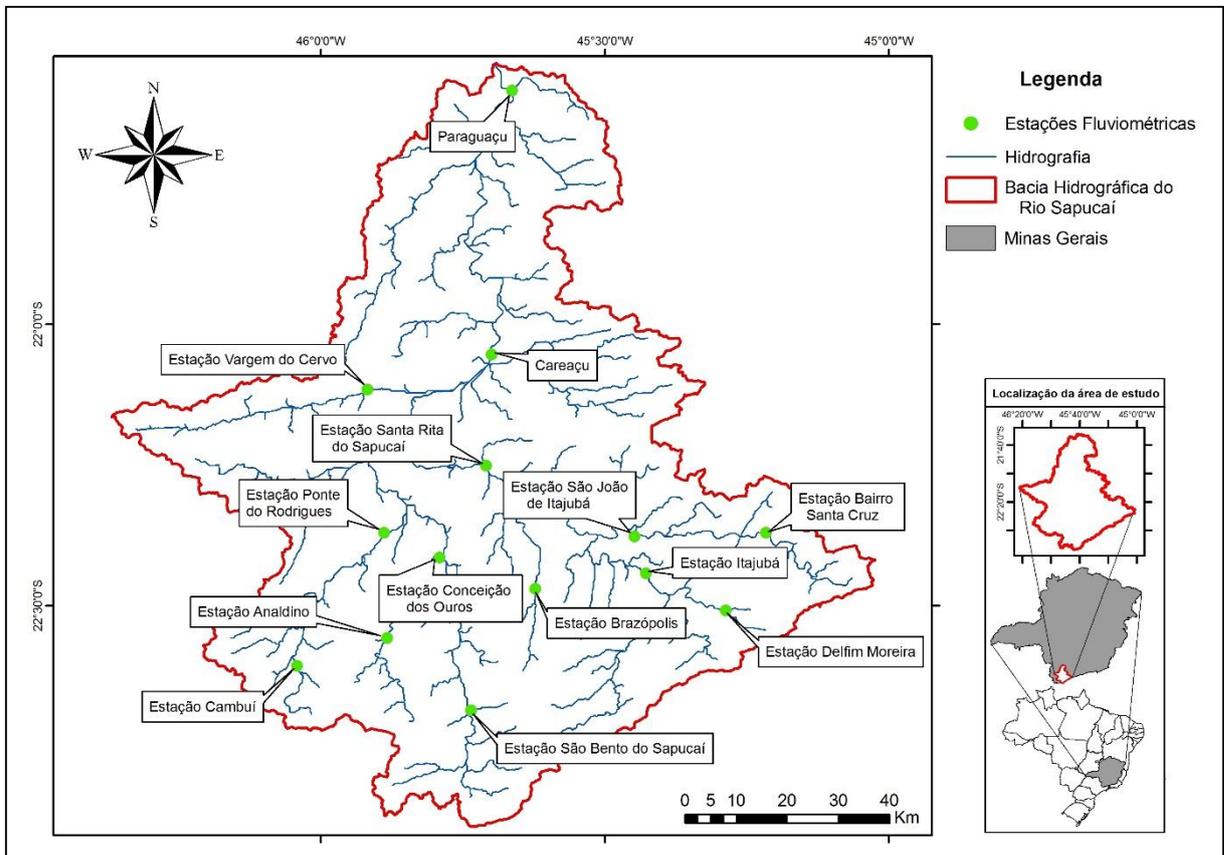


Figura 4.6: Localização dos postos fluviométricos

Tabela 4.2: Estações fluviométricas escolhidas para análise da bacia do Rio Sapucaí

<i>Estação</i>	<i>Código</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Nome da Estação</i>
1	61267000	-22.5083	-45.2869	Delfim Moreira
2	61271000	-22.4428	-45.4272	Itajubá
3	61280000	-22.3706	-45.2158	Bairro Santa Cruz
4	61285000	-22.3772	-45.4475	São João de Itajubá
5	61295000	-22.4697	-45.6219	Brazópolis
6	61305000	-22.2514	-45.7089	Santa Rita do Sapucaí
7	61320000	-22.6858	-45.7353	São Bento do Sapucaí
8	61343000	-22.5575	-45.8825	Bairro do Analdino
9	61350000	-22.4142	-45.7908	Conceição dos Ouros
10	61360000	-22.6069	-46.0417	Cambuí
11	61370000	-22.3706	-45.8881	Ponte do Rodrigues
12	61390000	-22.1167	-45.9178	Vargem do Cervo
13	61410000	-22.0542	-45.6992	Careaçu
14	61425000	-21.5861	-45.6631	Paraguaçu

4.3.2. Série de Precipitação e variáveis meteorológicas

Para seleção dos postos pluviométricos o critério adotado foi análogo aos postos fluviométricos, disponibilidade de dados dos postos e a espacialidade da bacia, ou seja, foram escolhidas apenas as estações que haviam dados de precipitação disponíveis a partir de 1980, além de abranger toda a bacia. Na bacia do rio Sapucaí foram encontradas 52 estações, mas apenas 31 continham dados de chuva. As estações utilizadas foram descritas na Tabela 4.3 e suas localizações pode ser observas na Figura 4.7.

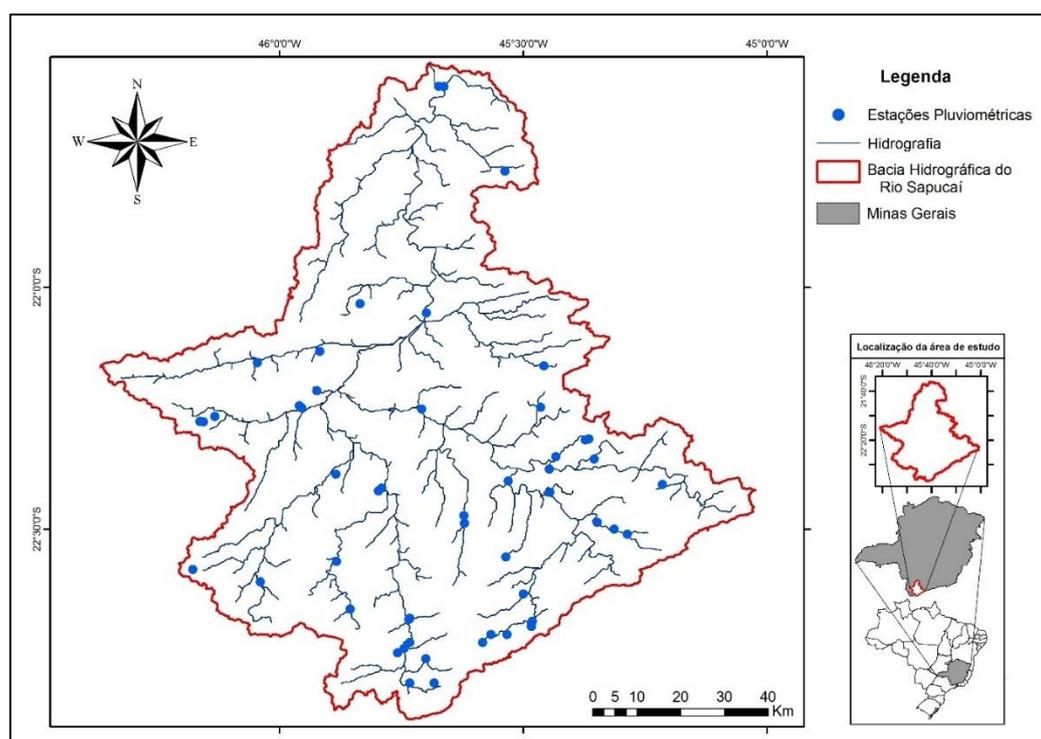


Figura 4.7: Localização dos postos pluviométricos

Tabela 4.3: Estações pluviométricas escolhidas para análise da bacia do Rio Sapucaí

<i>Código da Estação</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Operador</i>
2145017	-21.7603	-45.5378	IGAM
2145022	-21.5853	-45.6739	ANA
2145057	-21.5861	-45.6631	Furnas
2245000	-22.2514	-45.7089	IGAM
2245010	-22.6889	-45.4814	IGAM
2245011	-22.6858	-45.7353	IGAM
2245018	-22.7167	-45.5667	DAEE-SP
2245022	-22.7167	-45.5333	DAEE-SP
2245029	-22.7667	-45.7000	DAEE-SP
2245064	-22.5097	-45.2867	IGAM
2245066	-22.4142	-45.7908	IGAM
2245070	-22.4714	-45.6219	IGAM
2245074	-22.0528	-45.6989	IGAM
2245077	-22.2447	-45.9597	IGAM
2245083	-22.3756	-45.4469	IGAM
2245084	-22.5656	-45.8833	IGAM
2245085	-22.1322	-45.9178	IGAM
2245086	-22.3858	-45.8847	IGAM
2245087	-22.4069	-45.2150	IGAM
2245088	-22.3147	-45.3731	IGAM
2245089	-22.0342	-45.8353	IGAM
2245090	-22.1622	-45.4581	IGAM
2245103	-22.8167	-45.7333	DAEE-SP
2245104	-22.7453	-45.7447	IGAM
2245112	-22.7333	-45.7333	INMET
2245118	-22.3147	-45.3731	INMET
2245163	-22.6333	-45.5000	DAEE-SP
2245167	-22.7000	-45.4833	DAEE-SP
2245187	-22.6833	-45.7333	DAEE-SP
2246050	-22.6078	-46.0394	IGAM
2246127	-22.2772	-46.1639	IGAM

Para complementar foram obtidos dados precipitação de estações meteorológicas, obtidos nas estações disponibilizadas pela ANA e complementadas por dados disponibilizados pelo INMET. Como não foram encontrados dados climatológicos suficientes, optou-se por utilizar os dados das normais climatológicas para suprir a necessidade dos dados de: temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar ou insolação.

As estações encontradas para a bacia do Sapucaí concentravam-se próximo a montante, então, para que os dados abrangessem toda a bacia, foi necessário acrescentar estações que estavam localizadas fora da bacia, porém próximas. Com isso, as estações utilizadas foram: Cambuquira, Lambari, Passa Quatro, Poços de Caldas, São Lourenço, Caxambu, Campos do Jordão, Maria da Fé, Itajubá e Machado. A descrição e localização das estações utilizadas encontram-se na Tabela 4.4 e podem ser observadas na Figura 4.8.

Tabela 4.4: Estações meteorológicas escolhidas para análise da bacia do Rio Sapucaí

Código	Latitude	Longitude	Cidade	Operador
2245112	-22.7333	-45.7333	Campos do Jordão	INMET
2245118	-22.3147	-45.3731	Maria da Fé	INMET
2245121	-22.4333	-45.45	Itajubá	INMET
2145033	-21.6667	-45.9167	Machado	INMET
2145039	-21.9666	-45.3666	Lambari	INMET
2145034	-21.85	-45.3	Cambuquira	INMET
2244095	-22.3833	-44.9666	Passa Quatro	INMET
2146048	-21.7833	-46.55	Poços de Caldas	INMET
2245107	-22.1	-45.0166	São Lourenço	INMET
2144036	-21.9833	-44.95	Caxambu	INMET

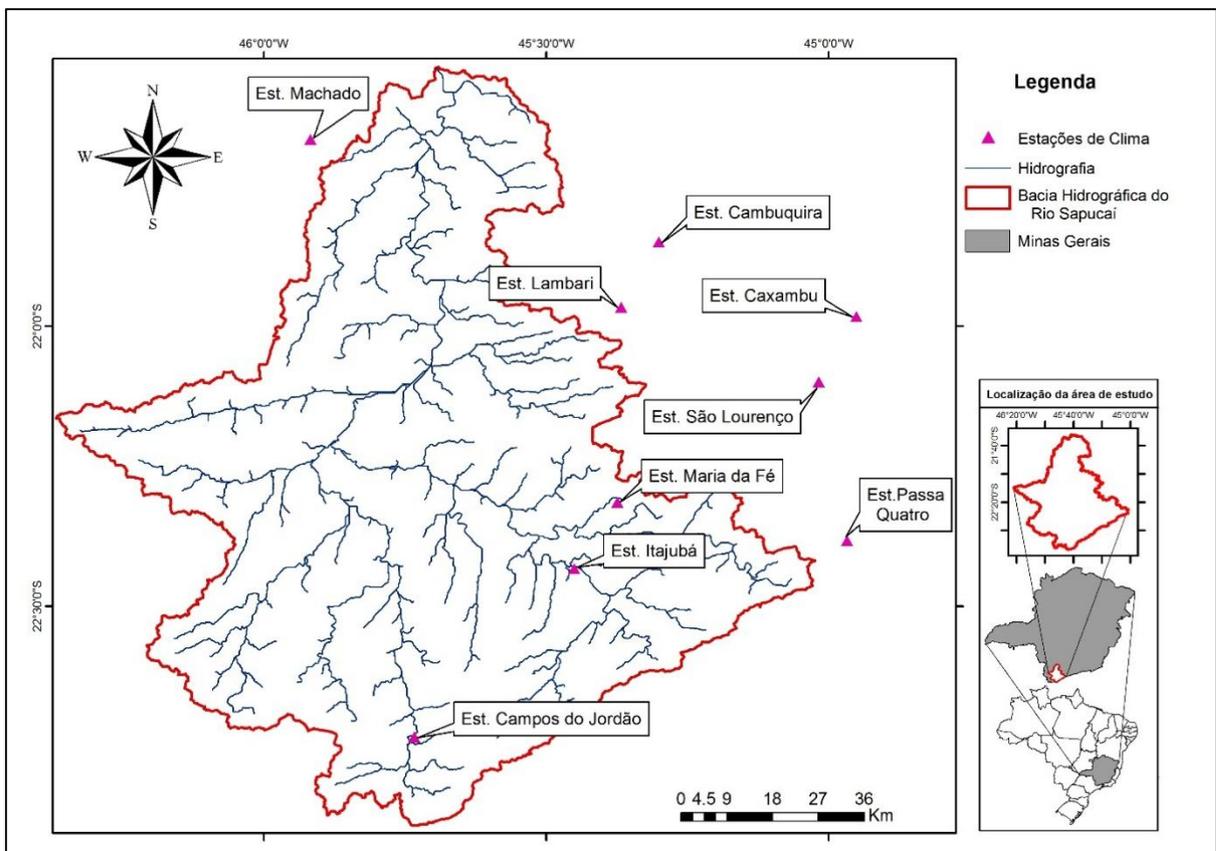


Figura 4.8: Localização dos postos de clima

4.4. Classificação dos Tipos de Solos e Uso e Ocupação da Bacia

O mapa de pedologia foi digitalizado com base no projeto RADAM Brasil, que está na escala 1:1.000.000. Posteriormente, seguindo a metodologia de Sartori et al. (2005), a classificação foi refeita, com a intenção de agrupar as classes de solos de acordo com o potencial de geração de escoamento superficial e características hidrológicas semelhantes.

O mapa de uso e ocupação do solo foi elaborado através da classificação multiespectral, optando pelo método de classificação supervisionada, realizada no software ENVI[®] 5.0. Para iniciar este processo, foram obtidas imagens do satélite Landsat 5, de resolução 30 metros, obtidas no banco de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Para cobrir toda a bacia foram utilizadas quatro cenas, como pode ser observado na Figura 4.9, com datas de 2010 e 2011. Para escolher as imagens foram considerados os anos mais recentes e a menor presença de nuvem, para não comprometer a classificação.

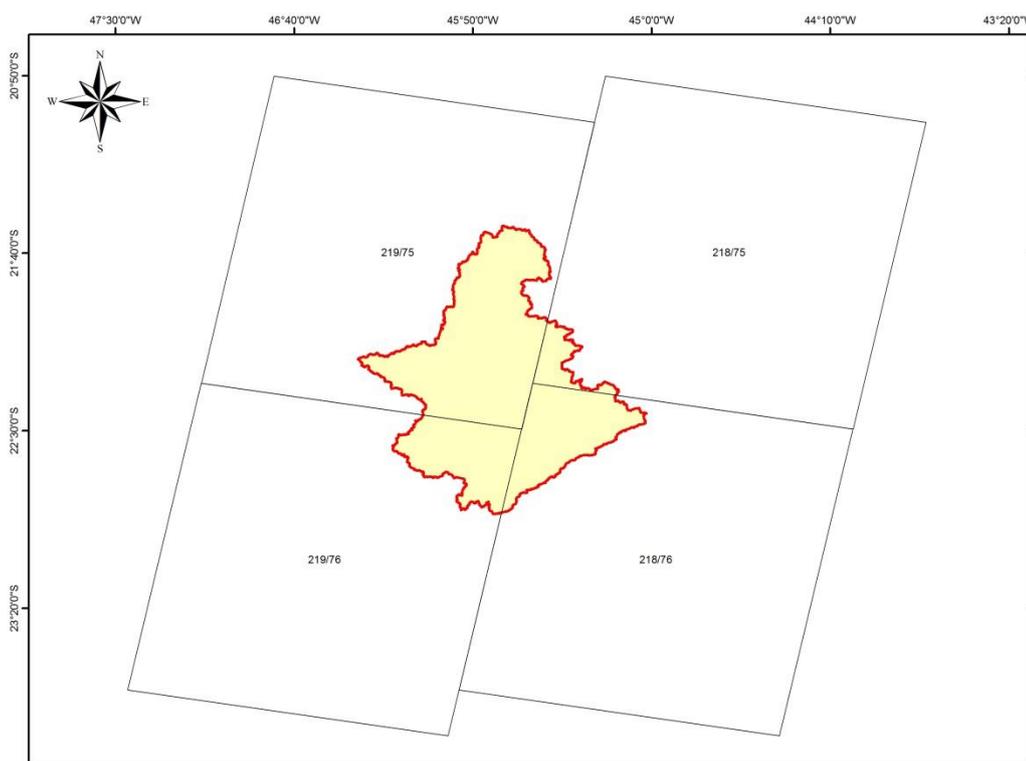


Figura 4.9: Articulações das imagens utilizadas para bacia do Rio Sapucaí

4.5. Calibração do Modelo Hidrológico

A calibração do modelo foi realizada, inicialmente, com uma abordagem manual, através da alteração dos parâmetros calibráveis, seguida de uma calibração automática multi-objetivo, baseada na técnica de algoritmos genéticos, descrita por Collischonn (2001). O modelo foi calibrado considerando os dados de vazões observadas no período de 01/01/1980 a

31/12/1989. Posteriormente, para avaliar a qualidade do ajuste, foram consideradas três coeficientes:

- ✓ Coeficiente de *Nash-Sutcliffe* das vazões diárias

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad \text{Equação 4.1}$$

- ✓ *Nash-Sutcliffe* dos logaritmos das vazões diárias

$$NS_{\log} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (\log Q_{obs} - \log Q_{cal})^2}{\sum_{t=1}^n (\log Q_{obs} - \overline{\log Q_{obs}})^2} \quad \text{Equação 4.2}$$

- ✓ Erro relativo de volume baseado na integração das vazões diárias.

$$\Delta V = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{cal}) - \sum_{t=1}^n (Q_{obs})}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs})} \quad \text{Equação 4.3}$$

Onde: t indica o intervalo de tempo; n é o número de intervalos de tempo; Q_{cal} é a vazão calculada no posto; Q_{obs} é a vazão observada; $\overline{Q_{obs}}$ é a média das vazões observadas; V é o volume; e ΔV é o erro relativo adimensional deste volume.

Como o objetivo do ajuste é a previsão de vazões de cheia, optou-se por dar um peso maior ao Coeficiente de *Nash-Sutcliffe* das vazões diárias (Equação 4.1), por proporcionar um melhor ajuste das vazões mais elevadas. Este coeficiente pode assumir valores no intervalo de $(-\infty, 1]$, sendo que a previsão é considerada perfeita quando NS é igual a 1 (OLIVEIRA; LIMA, 2016).

4.6. Previsão de Precipitação por Conjunto

O modelo atmosférico ETA, tem sido muito utilizado operacionalmente pelo INPE, com o intuito de gerar previsões de tempo focado na América do Sul desde 1996 (Chou, 1996) e previsão sazonal desde 2002 (Chou et al, 2005). Este modelo foi desenvolvido por Mesinger et al. (1988).

Segundo Siqueira (2015) a versão operacional do ETA possui resolução horizontal de 40 quilômetros, além de 38 camadas verticais, sendo disponibilizadas outras resoluções também, como por exemplo: 5, 10 e 15 quilômetros. O mesmo autor cita que o domínio do modelo cobre toda a América do Sul, situado entre as latitudes de 58°S e 16°N e longitudes e

86° e 19°W. Porém, as versões operacionais de 5 e 10 km possuem domínios mais restritos em relação às versões de 15 e 40 km, sendo que as primeiras abrangem apenas as regiões sudeste e nordeste do Brasil, respectivamente.

De acordo com Bustamante (2009), o modelo ETA, atualmente, fornece previsões de até 7 dias, com frequência de 12 horas (00 e 12 UTC). Normalmente, as condições iniciais são obtidas através da análise proveniente do NCEP, e as condições de contorno laterais são fornecidas pelo modelo global CPTEC. Como a resolução temporal do modelo é de 3 horas, a precipitação prevista é acumulada para as 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 e 21 UTC.

Para esta etapa foram utilizados os dados do modelo regional ETA, disponibilizados pelo CPTEC/INPE, com resolução de 5 quilômetros (km). Este trabalho está vinculado ao projeto intitulado como: Desenvolvimento de um sistema de prognóstico por conjunto de chuvas extremas e sua aplicação em ações de prevenção a desastres naturais, no qual o INPE faz parte. Este projeto envolve, além da bacia do rio Sapucaí, outras bacias hidrográficas, então foram escolhidas algumas datas que ocorreram eventos extremos, totalizando em 23 casos (Tabela 4.5). A previsão foi realizada sempre para cinco dias a frente, considerando quatro membros: Controle (CNTRL), Zhao, Kain-Fritsch (KF) e Kain-Fritsch com Fluxo de Momento (KFMX).

Neste trabalho, foi adotado o esquema de parametrização de Ferrier (FERRIER et al. 2002) e Zhao (ZHAO; CARR, 1997) para a microfísica da nuvem. Para a precipitação convectiva foram adotados dois esquemas: Betts-Miller-Janjic (JANJIC, 1994) e Kain-Fritsch (KAIN, 2004). As condições iniciais e de contorno foram fornecidas pelos modelos GFC e ETA com resolução de 40 quilômetros. Como resultado, foram obtidos quatro membros, com as seguintes características:

- Controle (CNTRL): parametrização de microfísica de Ferrier e convectiva de Betts-Miller-Janjic (Janjic, 1994); condições iniciais e de contorno lateral fornecidas pelo modelo ETA com 40 km de resolução horizontal;
- KF: parametrização de microfísica de Ferrier e convectiva de Kain-Fritsch (Kain, 2004) condições iniciais e de contorno lateral fornecidas pelo modelo GFS;
- KFMX: parametrização de microfísica de Ferrier e convectiva de Kain-Fritsch modificado; condições iniciais e de contorno lateral fornecidas pelo modelo GFS

- ZHAO: parametrização de microfísica de Zhao e convectiva de Betts-Miller-Janjic (Janjic, 1994); condições iniciais e de contorno lateral fornecidas pelo modelo ETA com 40 km de resolução horizontal.

Tabela 4.5: Casos selecionados para realizar a previsão

<i>Caso</i>	<i>Período do evento</i>
1	16/12/2011 a 21/12/2011
2	26/12/1999 a 05/01/2000
3	22/12/2009 a 03/01/2010
4	07/01/2011 a 12/01/2011
5	12/12/2008 a 08/01/2009
6	29/11/2009 a 13/12/2009
7	28/12/2011 a 03/03/2012
8	11/03/2008 a 20/03/2008
9	20/12/2004 a 25/12/2004
10	05/01/2004 a 10/01/2004
11	26/01/2008 a 30/01/2008
12	11/12/2005 a 16/12/2005
13	23/11/2011 a 28/11/2011
14	24/12/2010 a 31/12/2010
15	27/02/2005 a 10/03/2005
16	02/01/2003 a 21/01/2003
17	15/01/2002 a 20/01/2002
18	15/02/2002 a 20/02/2003
19	26/12/2001 a 01/01/2002
20	26/11/2001 a 01/12/2001
21	12/12/2006 a 17/12/2006
22	27/03/2000 a 01/04/2000
23	17/12/2013 a 27/12/2013

4.7. Assimilação dos Dados do Modelo Hidrológico

De acordo com Fan (2015), quando é feita a modelagem hidrológica para a previsão de vazão em tempo real, é comum que a vazão calculada pelo modelo no início da previsão não seja igual ao vazão observada no mesmo momento, gerando um erro já no início da previsão. Segundo o mesmo autor, esse erro pode estar relacionado aos erros de calibração, mudanças na bacia ao longo do tempo, além dos erros nos dados observados. Por este motivo, é necessário realizar a assimilação dos dados, comumente chamada de atualização do modelo. Esse processo é feito através da utilização das observações mais recentes para corrigir as condições iniciais do modelo hidrológico antes de cada previsão, aproximando os valores simulados dos observados.

Então, inicialmente, foi verificada a necessidade de aplicar a técnica de assimilação de dados para ajuste das condições iniciais do modelo MGB-IPH. No presente estudo, foi utilizado o procedimento de atualização do modelo apresentado por Collischonn et al. (2005) e modificado por Paz et al. (2007), no qual foram utilizados os dados de vazões observadas em tempo real para atualizar as condições iniciais do modelo, expressas por algumas variáveis de estado: vazão calculada ao longo da rede de drenagem e o volume de água armazenada nos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo de cada minibacia (MELLER, 2012). Antes de iniciar a previsão, existe um período de “aquecimento” (*warming up*), no qual as vazões observadas e calculadas são comparadas, obtendo para cada posto fluviométrico um fator de correção – FCA (Equação 4.4)

$$FCA_p = \frac{\sum_{t=t_0-t_a}^{t_0} Q_{obs}}{\sum_{t=t_0-t_a}^{t_0} Q_{cal}} \quad \text{Equação 4.4}$$

Onde: Q_{obs} e Q_{cal} são as vazões observadas e calculadas; t é o tempo de cálculo; t_0 é o intervalo de tempo no qual é iniciada a previsão; t_a é o intervalo de tempo de aquecimento do modelo e p representa a minibacia exutório da sub-bacia, na qual existe um posto fluviométrico com dados observados para realizar a atualização dos dados.

Depois de calculado, o FCA é aplicado para corrigir as vazões calculadas da rede de drenagem de cada minibacia localizada a montante do posto fluviométrico p . Além disso, ainda é feita a ponderação das vazões de acordo com a relevância do posto fluviométrico que está sendo realizada a atualização, ou seja, a representatividade é maior para minibacias mais próximas, localizadas sobre a rede de drenagem principal, e do contrário, menor para minibacias mais distantes. Essa ponderação é feita através da Equação 4.5 (SIQUEIRA, 2015).

$$Qat_{ip} = FCA_p \cdot Qcal_i \left(A_i / A_p \right)^{ebac} + Qcal_i \left[1 - \left(A_i / A_p \right)^{ebac} \right] \quad \text{Equação 4.5}$$

Onde: Qat_{ip} é a vazão atualizada na minibacia i , a montante de estação fluviométrica p ; A_i e A_p são as áreas de drenagem acumuladas a montante da minibacia i e estação p respectivamente; $ebac$ é um parâmetro de atualização que varia entre 0 e 1, o qual pode ser ajustado de modo a melhorar a concordância entre as vazões calculadas e observadas.

De acordo com Siqueira (2015), além da atualização da vazão ao longo da rede de drenagem, é necessário realizar a atualização do volume de água dos reservatórios do modelo hidrológico, no qual também é utilizado o FCA. Porém, neste caso a ponderação é referente a parcela de vazão que é oriunda do escoamento de base na minibacia. Então, durante o período de aquecimento o modelo calcula a fração da vazão na rede de drenagem proveniente de cada reservatório linear (superficial, subsuperficial e subterrâneo) e a correção é feita de acordo com a Equação 4.6 e 4.7.

$$PB_i > PB_{lim} \text{ então } VBat_{i,p} = (FCA_p)^{bx} \cdot VB_i (PB_i) + VB_i (1 - PB_i) \quad \text{Equação 4.6}$$

$$PB_i \leq PB_{lim} \text{ então } VBat_{i,p} = VB_i \quad \text{Equação 4.7}$$

Onde: $VBat_{i,p}$ é o volume atualizado no reservatório conceitual na minibacia i situada a montante do posto p ; VB_i é o volume calculado do reservatório conceitual na minibacia i ; PB_i é a fração da vazão na rede de drenagem originária do reservatório conceitual; PB_{lim} é a fração mínima de água necessária para que haja correção nos reservatórios conceituais do modelo e bx é um parâmetro de atualização com valores entre 0 e 1, o qual deve ser definido de forma a encontrar uma boa concordância entre os dados observados e calculados.

4.8. Análise Estatística da Previsão de Vazão por Conjunto

Nesta etapa de avaliação dos resultados da previsão foi feita a verificação da qualidade das previsões, de acordo com a similaridade entre os dados de vazão observada e prevista. Esta fase possibilita a identificação dos possíveis erros durante todo o processo de previsão de vazão. As medidas de desempenho para analisar os resultados da previsão foram descritos nas seções a seguir.

4.8.1. Medidas de avaliação do erro ou precisão

Para avaliar a qualidade dos resultados da previsão foram definidas algumas medidas de precisão, baseadas nos erros e/ou correspondência entre os valores de vazões previstas e observadas. Neste aspecto foram consideradas como medidas de desempenho o erro médio absoluto (EMA), o erro médio relativo (EMR), o Coeficiente de Eficiência (CM) e o Diagrama de Dispersão (DD). Todas essas medidas são amplamente utilizadas em hidrologia e é importante ressaltar que foi utilizado a média das vazões previstas com os membros, por se tratar de uma previsão por conjunto.

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n |Q_{prev} - Q_{obs}| \quad \text{Equação 4.8}$$

$$EMR = \frac{\sum_{t=1}^n |Q_{prev} - Q_{obs}|}{\sum_{t=1}^n Q_{obs}} \quad \text{Equação 4.9}$$

$$CM = 1 - \left[\frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{prev}^m)^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{prev})^2} \right] \quad \text{Equação 4.10}$$

Onde: t indica o intervalo de tempo; n é o número de intervalos de tempo; Q_{prev} é a vazão prevista pelo modelo; Q_{obs} é a vazão observada; Q_{prev}^m é o valor previsto de cada membro e N é o número total de previsões.

O erro médio absoluto (Equação 4.8) avalia a diferença absoluta entre previsões e observações correspondentes, ou seja, o valor médio de quanto as previsões tendem a desviar dos valores observados, em termos absolutos (SIQUEIRA, 2015). De acordo com Fan (2015), no caso da utilização de previsão por conjunto, é necessário sumarizar em uma única previsão determinística, então, para isso, foi realizada a média aritmética do conjunto de membros. Quanto mais próximo de zero for o EMA, melhor é a previsão, pois menores são as diferenças entre previstas e observadas.

O erro médio relativo (Equação 4.9), também interpretado como viés relativo, é a diferença média entre as vazões previstas e observadas, dividido pela média das vazões observadas, fornecendo um viés geral da previsão. Da mesma forma que o EMA, para calcular o EMR é necessário resumir as previsões em uma única previsão, utilizando assim, a média das previsões dos membros.

O Coeficiente de Eficiência - CM (Equação 4.10) compara o desempenho da média das previsões em relação a cada um dos membros de previsão (Controle, KF, KFMX e ZHAO). Valores de CM positivo indicam que determinado membro tem melhor desempenho quando comparado a média dos membros. Por outro lado, valores negativos indicam que a média das previsões tem melhor desempenho.

Por fim, o último método não é uma medida de desempenho e sim uma ferramenta para análises exploratórias. O Diagrama de Dispersão – DD é um gráfico com as previsões e observações plotadas, o que permite visualizar a o grau de associação entre as duas variáveis (NAGHETINI; PINTO, 2007 apud MELLER, 2012).

4.8.2. Brier Score e Brier Skill Score

Segundo Meller (2012), o Brier Score é o método de avaliar desempenho mais utilizado em previsões probabilísticas. Ele representa o erro médio quadrático da probabilidade de uma previsão para a ocorrência de um evento determinado. No caso de uma previsão perfeita, que acerta a ocorrência ou não ocorrência do evento determinado, o BS (Equação 4.11) sempre será zero (FAN, 2015). A faixa de variação do BS fica entre 0 e 1, sendo que os valores próximos de zero indicam melhores resultados de previsão (MELLER, 2012).

$$BS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (pp_i - po_i)^2 \quad \text{Equação 4.11}$$

Onde: n é o número de pares de previsão-observação; pp é a probabilidade de ocorrência prevista do evento e po é a probabilidade de ocorrência observada do evento, ou seja, zero para não ocorrência do evento e 1 para ocorrência do evento.

De acordo com Fan (2015), o Brier Skill Score (BSS), dado pela Equação 4.12, é uma derivação do BS, muito utilizado para comparar resultados de dois modelos. Ele é uma medida de destreza que mede o desempenho de uma previsão principal em relação a uma outra previsão definida como referência (MELLER, 2012). Este coeficiente varia entre o intervalo de $(-\infty, 1]$, quando o resultado é negativo, significa que a previsão adotada como referência tem melhor desempenho quando comparada a previsão principal, em termos de BS. De forma contrária, quando o resultado é positivo indica que o desempenho da previsão principal é superior ao da previsão de referência.

$$BSS = 1 - \frac{BS_p}{BS_{ref}} \quad \text{Equação 4.12}$$

Onde: BS_p é o valor de BS para a previsão principal e BS_{ref} é o valor de BS para a previsão adotada como referência.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Mapa de Tipos de Solos

Para a bacia do Sapucaí, as classes de solo encontradas foram: Latossolo, Argissolo, Cambissolo e Neossolo (Figura 5.1). As características dos solos influenciam no comportamento hidrológico dos mesmos, ou seja, solos mais rasos tendem a gerar maior escoamento superficial, devido a menor infiltração. De maneira inversa, solos mais profundos tem maior infiltração, conseqüentemente, menor escoamento superficial. Porém, além da profundidade, outras características devem ser consideradas, como textura e relevo, pois influenciam diretamente no comportamento hidrológico do solo.

Para realizar o agrupamento das classes de solo, foi necessário descrever as características de cada solo. A descrição dos tipos de solos a seguir foi obtida através de uma cartilha elaborada pela EMATER (2014).

- ✓ Argissolo: Compreendem os antigos Podzólicos e são caracterizados por serem solos desenvolvidos, com forte concentração de argila no horizonte B e estrutura em blocos. Quando comparado aos latossolos de mesma origem, o argissolo tende a maiores níveis de fertilização. Porém, este tipo de solo é mais susceptível a erosão, devido diferença textural entre os horizontes A e B associada ao relevo. De maneira geral, os argissolos apresentam textura média ou arenosa em superfície, e a maioria são solos profundos ou muito profundos.
- ✓ Cambissolo: Estes solos sofrem forte influência do material de origem, apresentando semelhanças com relação à textura, fertilidade e estruturas. O horizonte B, geralmente, possui menos de 1,5 metros de espessura. Em contrapartida, a espessura do horizonte C é expressiva e apresenta instabilidade mecânica, devido à predominância de silte. São solos com alto potencial de escoamento superficial, conseqüentemente, apresentam alta erodibilidade.
- ✓ Latossolo: São solos profundos, arejados e permeáveis. O horizonte A é de pouca espessura e o horizonte B é muito espesso, nunca inferior a 50 centímetros. O horizonte C apresenta características texturais e mineralógicas do material de origem. São os solos de maior grau de desenvolvimento, encontrados em relevos relativamente mais suaves e possuem boa drenagem interna, devido a sua grande porosidade. A principal limitação deste tipo de solo refere-se à fertilidade natural, conseqüência da baixa capacidade de troca catiônica e

elevada acidez trocável, porém, isto pode ser corrigido pela aplicação de corretivos e fertilizantes. No geral, devido ao baixo potencial de escoamento superficial, o latossolo apresenta baixa erodibilidade.

- ✓ Neossolo: Compreendem os antigos Litossolos, Regossolos, Solos Litólicos, Solos Aluviais e Areias Quartzosas. São solos pouco desenvolvidos, caracterizado por serem pouco profundos e não apresentam o horizonte B.

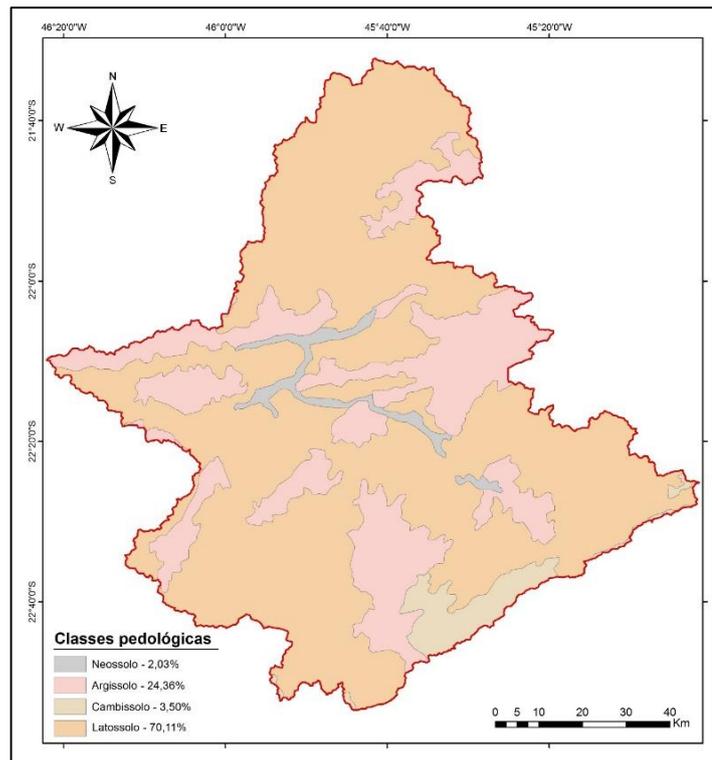


Figura 5.1: Mapa pedológico da bacia do rio Sapucaí
Fonte: Adaptado de BRASIL, 1983

Para a reclassificação, de acordo com a metodologia de Sartori *et. al.* (2005), os solos foram agrupados de acordo com o potencial de escoamento superficial, sendo considerada solo A aquele que possui baixo potencial de geração de escoamento superficial, solo B médio potencial de geração de escoamento superficial e, por fim, solo C alto potencial de geração de escoamento superficial.

Com isso, o latossolo foi classificado como solo A, que caracterizam por serem muito profundos e pela elevada capacidade de drenagem, ou seja, apresenta menor potencial de escoamento superficial. O argissolo enquadra-se no solo B, pois são solos profundo e com boa drenagem. Por fim, o solo C foi composto pelo Cambissolo e Neossolo, que são solos menos desenvolvidos e pouco profundos, portanto, considera-se que estes apresentam elevado potencial de escoamento superficial. A reclassificação final pode ser observada na Figura 5.2.

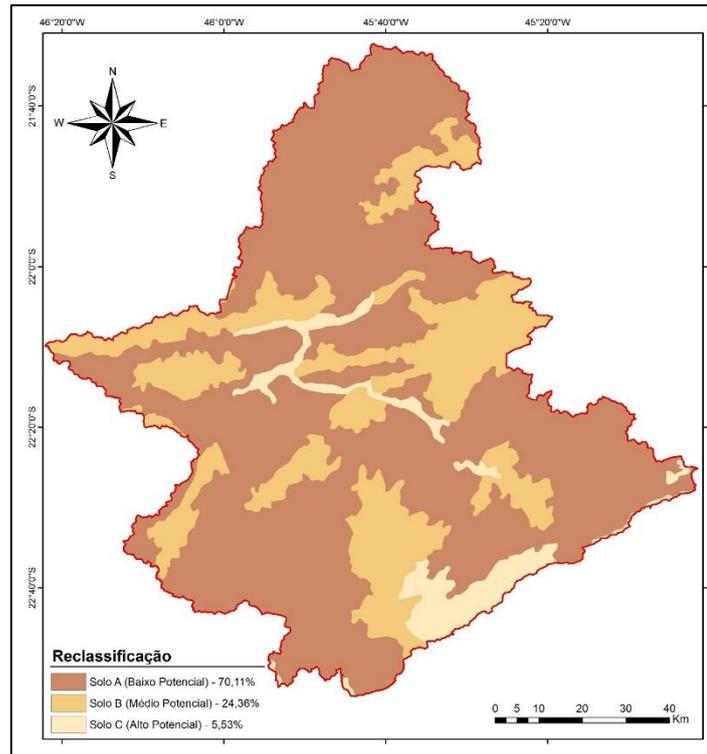


Figura 5.2: Reclassificação do mapa pedológico da bacia do rio Sapucaí

5.2. Mapa de Uso e Ocupação do Solo

Assim como no mapa de pedologia, o de uso e ocupação do solo também necessitou de uma reclassificação, pois o uso e a cobertura vegetal são bastante diversificados, mas para a aplicação do modelo hidrológico não é necessário, sendo até considerado um fator que dificulta o processamento do modelo. Portanto, as classes semelhantes foram agrupadas, resultando em um mapa (Figura 5.3) com as seguintes classes:

- ✓ Pastagem: Nesta classe foram agrupadas áreas de solo exposto, agricultura e pastagens, por apresentarem características físicas semelhantes;
- ✓ Floresta: Engloba área de vegetação com predomínio de árvores de grande porte;
- ✓ Área urbana: correspondem as áreas dos centros urbanos;
- ✓ Água: representa lagoas, lagos, rios e represas presentes na bacia.

A classificação multiespectral é eficiente na identificação da cobertura, no entanto, ocorreram alguns erros, devido às regiões de sombra que havia na imagem de satélite, por isso, foi necessário editar manualmente para fazer a correção da imagem classificada. Esse erro ocorre devido alguns “pixels” de classes diferentes serem parecidos quanto ao padrão de resposta espectral (SILVA, 2005).

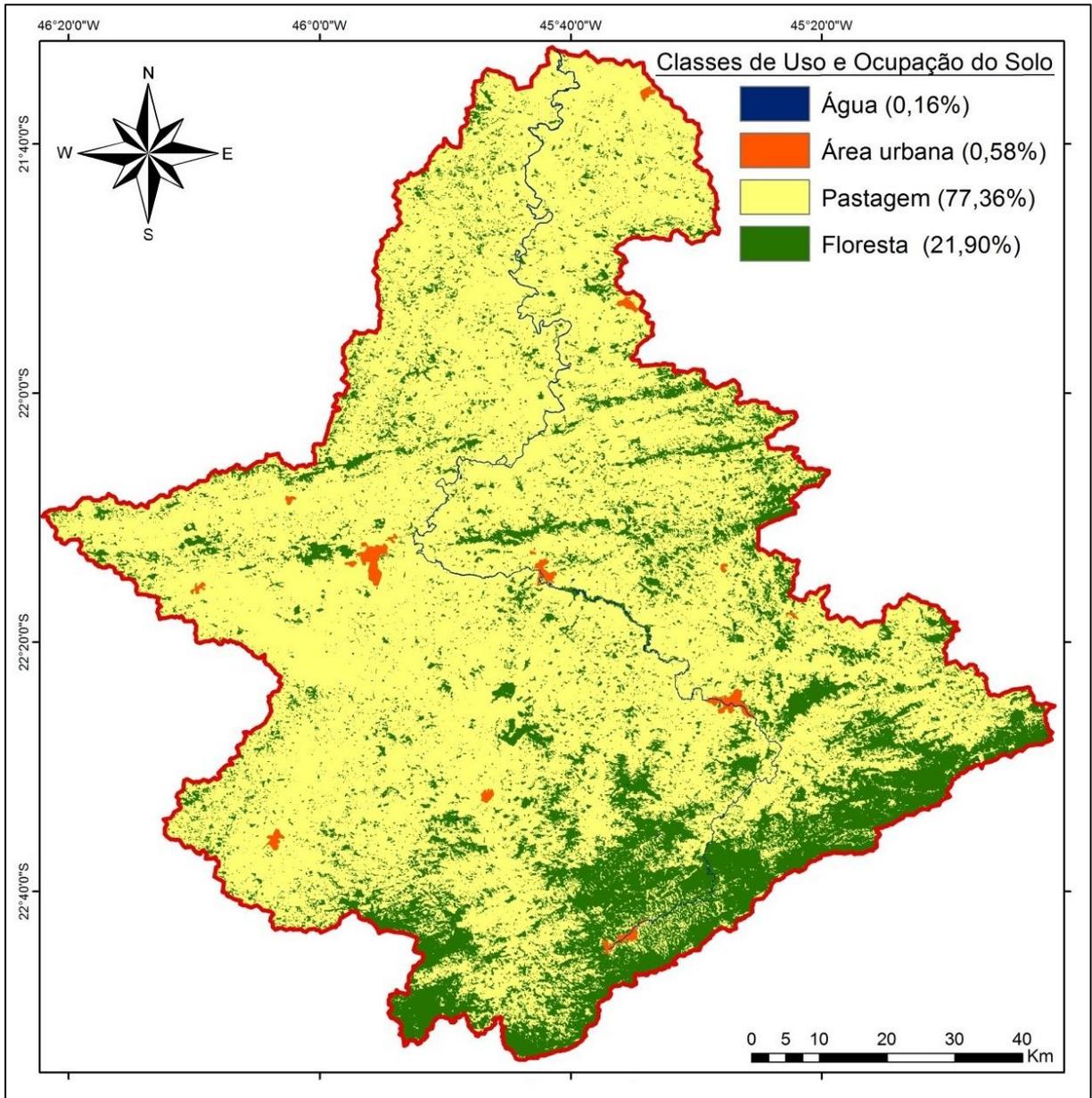


Figura 5.3: Mapa de uso e ocupação da bacia do rio Sapucaí

5.3. Unidades de Resposta Hidrológica

As unidades de resposta hidrológica (URH) são obtidas através da junção dos dois mapas anteriores: tipo de solo e uso e ocupação. Esta junção foi feita através do software ArcGIS® 10.1. Para a bacia do Sapucaí, a combinação de 3 classes de solo (A, B e C) com 4 classes de uso e ocupação (pastagem, floresta, área urbana e água), gerou um mapa de URH com 12 classes. Porém, para o funcionamento adequado do modelo MGB, é indicado que não haja mais de 10 classes, por isso foi feita a reclassificação do mapa de URH, de forma análoga aos de solo e uso e ocupação. Assim, foi gerado um mapa de URH final com 8 classes, que encontra-se na Figura 5.4.

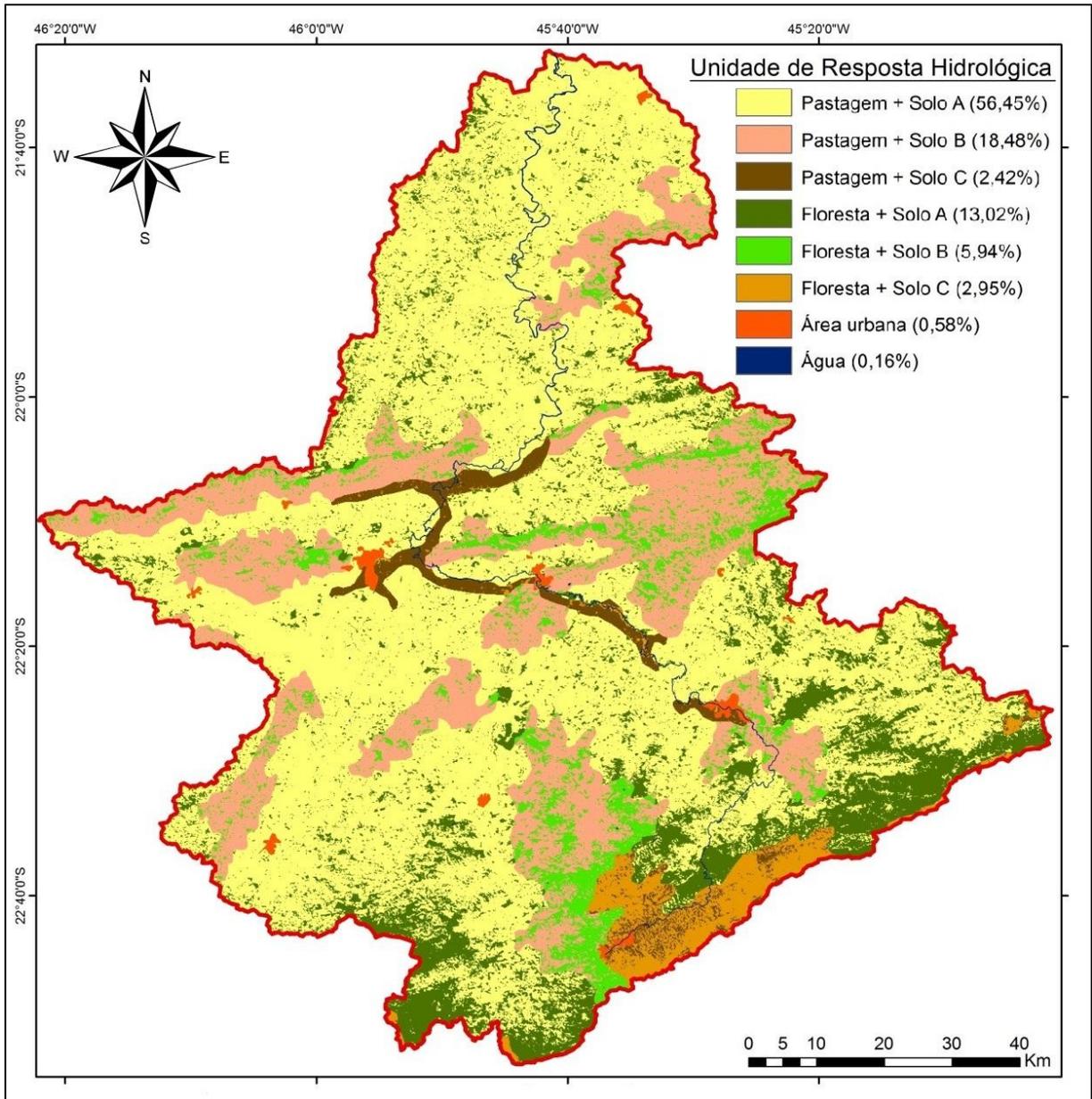


Figura 5.4: Mapa das unidades de resposta hidrológicas da bacia do rio Sapucaí

Nota-se no mapa de URH (Figura 5.4) que as classes predominantes são as que possuem o solo A, que tem baixo potencial de escoamento. Sendo a pastagem em solo A, a URH com maior ocorrência nas bacias. A menor porcentagem encontra-se nas unidades de resposta hidrológica com solo C, porém, isso não diminui sua importância, devido ao grande potencial de escoamento superficial.

5.4. Discretização da Bacia Hidrográfica

O processo chamado de discretização é a divisão da bacia em minibacias, para descrever melhor a variabilidade espacial dos processos e das variáveis de entrada. Isso é necessário porque o MGB é um modelo do tipo distribuído. Então, a bacia do Sapucaí foi

discretizada com base no modelo numérico do terreno (MNT), com resolução de 90 metros, disponibilizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

Esta etapa foi realizada por uma ferramenta chamada Archydro, que foi acoplada ao software ArcGIS® 10.1. Através do Archydro é possível extrair do MNT as informações de direções de escoamento, área de drenagem, rede de drenagem e definição de trechos de rios. Com essas informações foi possível dividir a bacia em áreas menores. Da mesma forma, foi obtido o mapa de sub-bacias, porém, neste caso foi necessário definir os exutórios. Os postos fluviométricos selecionados anteriormente foram utilizados como o exutório de cada sub-bacia, então, foi gerado um mapa com 14 sub-bacias (Figura 5.6). Por fim, a combinação deste mapa de sub-bacias com o mapa da área dividida em áreas menores, gerou o mapa final de minibacias, no qual cada posto fluviométrico é a foz de uma minibacia, como pode ser observado na Figura 5.5. Quanto mais detalhada for a rede de drenagem maior será o número de minibacias. Para a bacia do Sapucaí foram geradas 229 minibacias.

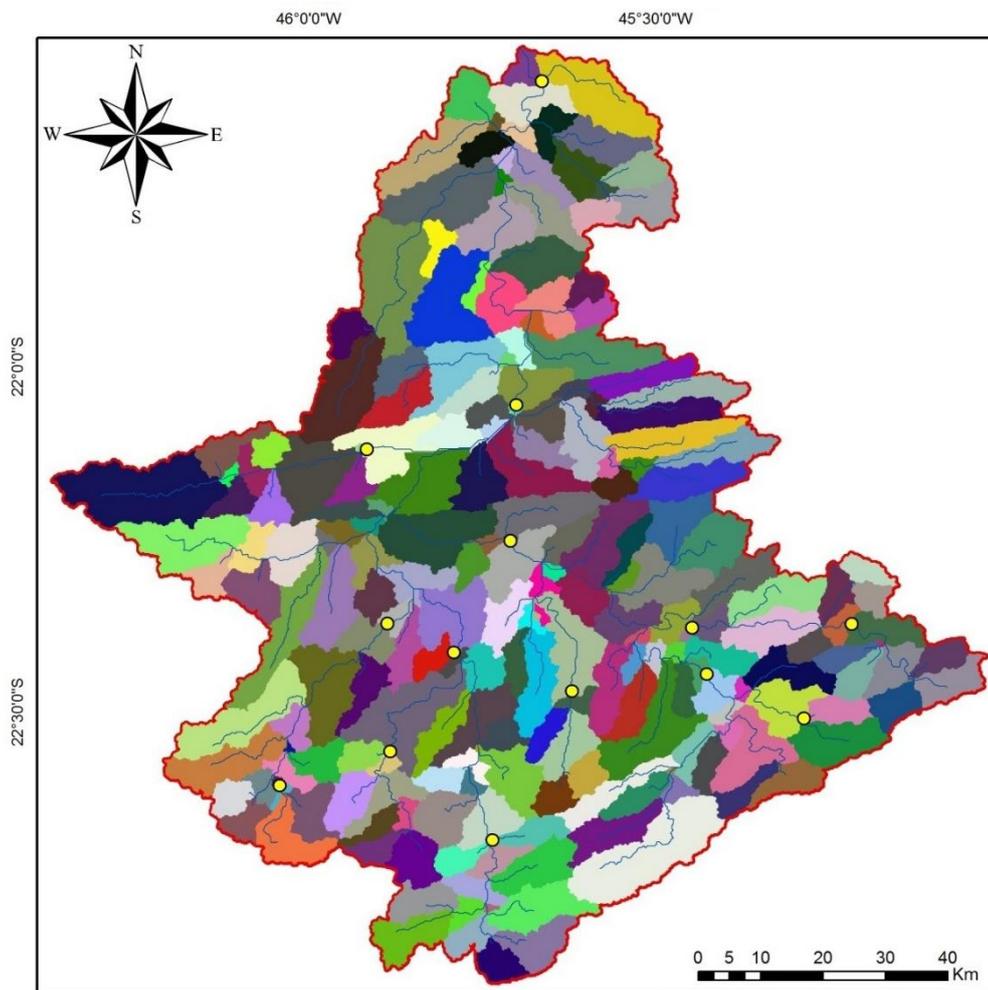


Figura 5.5: Bacia do Sapucaí discretizada em minibacias

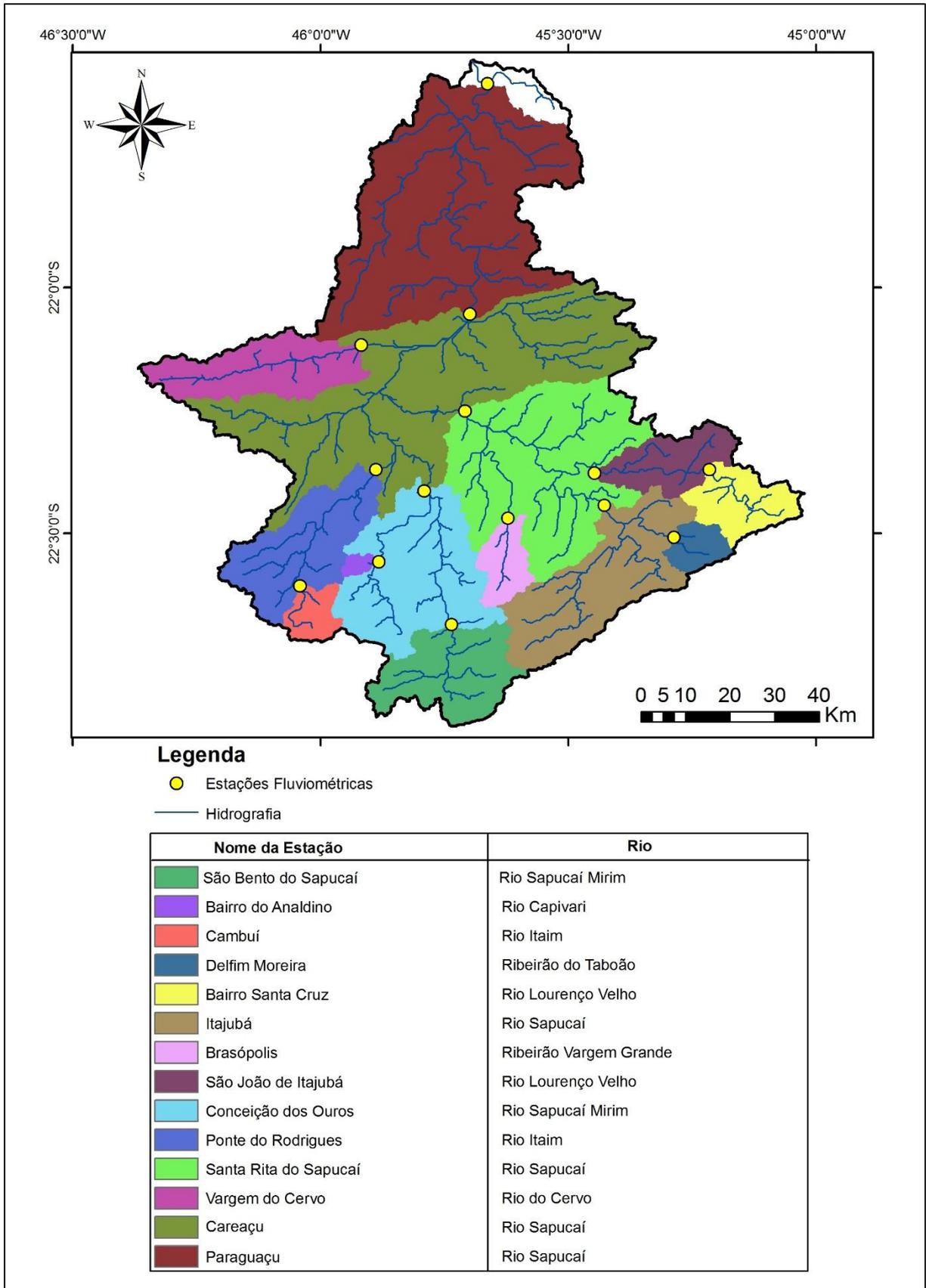


Figura 5.6: Divisão da bacia do Sapucaí em sub-bacias

5.5. Calibração do Modelo Hidrológico

O ajuste do modelo foi realizado durante o período de 01/01/1980 a 31/12/1989. Na Tabela 5.1 é apresentado para cada estação fluviométrica o resumo dos coeficientes utilizados para avaliar a qualidade do ajuste do modelo. Para complementar, no Apêndice A foram listados os valores dos parâmetros que geraram o melhor resultado do ajuste. Com a Tabela 5.1, percebe-se, de maneira geral, que o ajuste do modelo foi satisfatório para a maioria das sub-bacias, apresentando os coeficientes de *Nash-Sutcliffe* e *Nash-Sutcliffe* dos logaritmos próximos ou maiores do que 0,70, o que é considerado aceitável para calibração de modelo hidrológico.

Para as sub-bacias que possuíam menor área de drenagem o ajuste não foi considerado satisfatório, os baixos valores do *Nash-Sutcliffe* para as estações de São Bento do Sapucaí, Delfim Moreira e Bairro Santa Cruz podem ser explicados por apresentarem áreas de drenagem pequenas, o que dificulta o ajuste do modelo. Por este motivo, a sub-bacia da estação Bairro do Analdino, pertencente ao município de Paraisópolis, não foi calibrada.

Tabela 5.1: Desempenho do modelo MGB para a bacia do Rio Sapucaí

<i>Nome da Estação</i>	<i>NS</i>	<i>NS_{log}</i>	<i>ΔV (%)</i>	<i>Área de drenagem (km²)</i>
São Bento do Sapucaí	0.263	0.078	21.214	475
Cambuí	0.516	0.605	-13.799	116
Delfim Moreira	0.246	0.064	21.589	112
Bairro Santa Cruz	0.338	0.381	-16.581	268
Itajubá	0.768	0.813	1.493	860
Brazópolis	0.825	0.818	0.032	156
São João de Itajubá	0.669	0.69	-8.156	560
Conceição dos Ouros	0.712	0.719	9.147	1310
Ponte do Rodrigues	0.81	0.753	-3.072	676
Santa Rita do Sapucaí	0.669	0.81	0.04	2810
Vargem do Cervo	0.835	0.864	0.004	486
Careaçu	0.76	0.86	-9.118	7330
Paraguaçu	0.715	0.774	15.922	9410

No Apêndice B encontram-se os hidrogramas comparando as vazões calculadas pelo modelo com as vazões observadas, usada na calibração. Com estes gráficos, observou-se, de maneira geral, que o modelo foi ajustado à bacia de estudo. Porém, o modelo não conseguiu representar muito bem alguns picos, e como o alvo deste trabalho é a previsão de vazão para controle de inundações, os picos são de extrema importância.

Nas Figura 5.7, 5.8 e 5.9, encontram-se, respectivamente, os hidrogramas para os municípios de Itajubá, Santa Rita do Sapucaí e Paraguaçu. O foco deste trabalho é voltado para as duas primeiras cidades, porém, como o estudo englobou toda a bacia do Sapucaí é importante verificar a última sub-bacia, que representa quase toda a área da bacia do Sapucaí, que é de Paraguaçu. Como o modelo MGB-IPH é voltado para grandes bacias, espera-se que os resultados para a última bacia sejam melhores, pois ela tem a maior área de drenagem.

No hidrograma de Itajubá (Figura 5.7), observou-se que as curvas das vazões observadas e calculadas estão praticamente sobrepostas, comprovando que o ajuste foi satisfatório. Porém, em alguns períodos, o modelo está superestimando a vazão, e em outros momentos ele está subestimando a vazão. Nota-se que o modelo teve dificuldade de representar os picos, o que já era esperado, devido a pequena área de drenagem da sub-bacia.

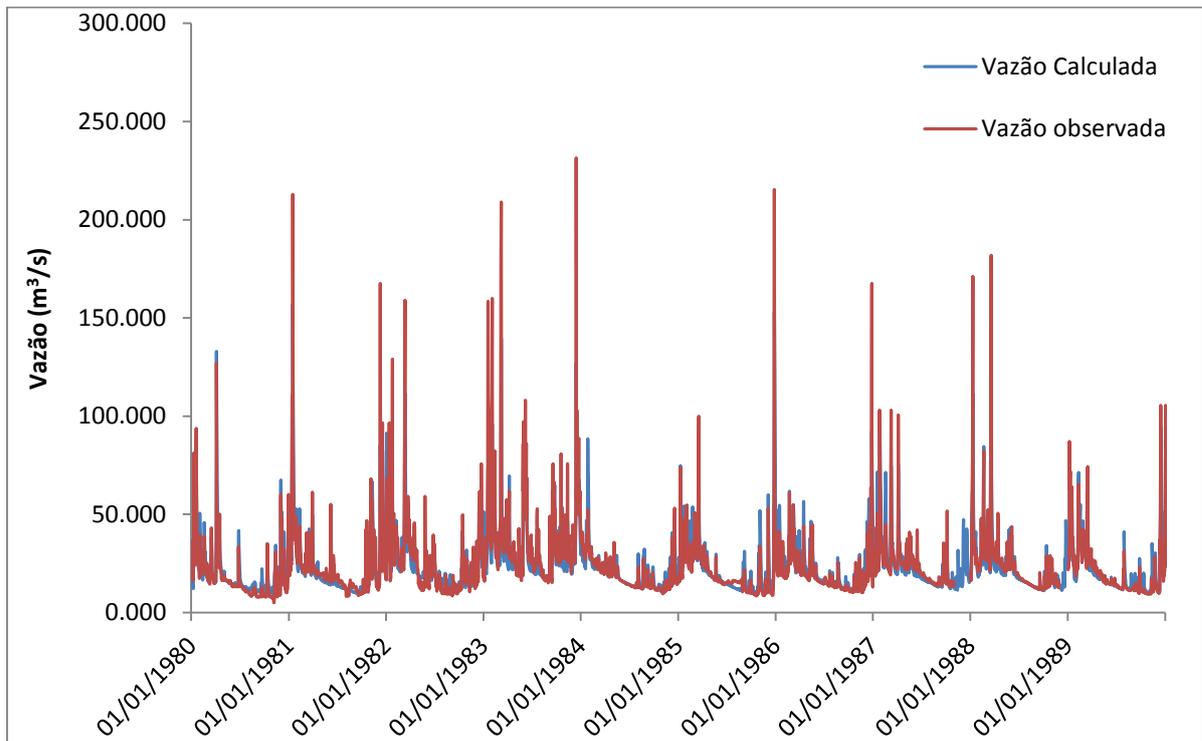


Figura 5.7: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Itajubá

Para Santa Rita do Sapucaí é possível observar no hidrograma (Figura 5.8) que as curvas das vazões observadas e calculadas estão sobrepostas, porém com ajuste um pouco inferior quando comparado ao de Itajubá. O que também pode ser confirmando pelos valores do coeficiente de *Nash-Sutcliffe*, que também ficou um pouco menor do que o de Itajubá. Mas, de maneira geral, considera-se que o ajuste para esta bacia também foi satisfatório. Assim como para Itajubá, verificou-se que o modelo em alguns períodos está superestimando ou subestimando a vazão, o que também pode ser pelo mesmo motivo da sub-bacia anterior.

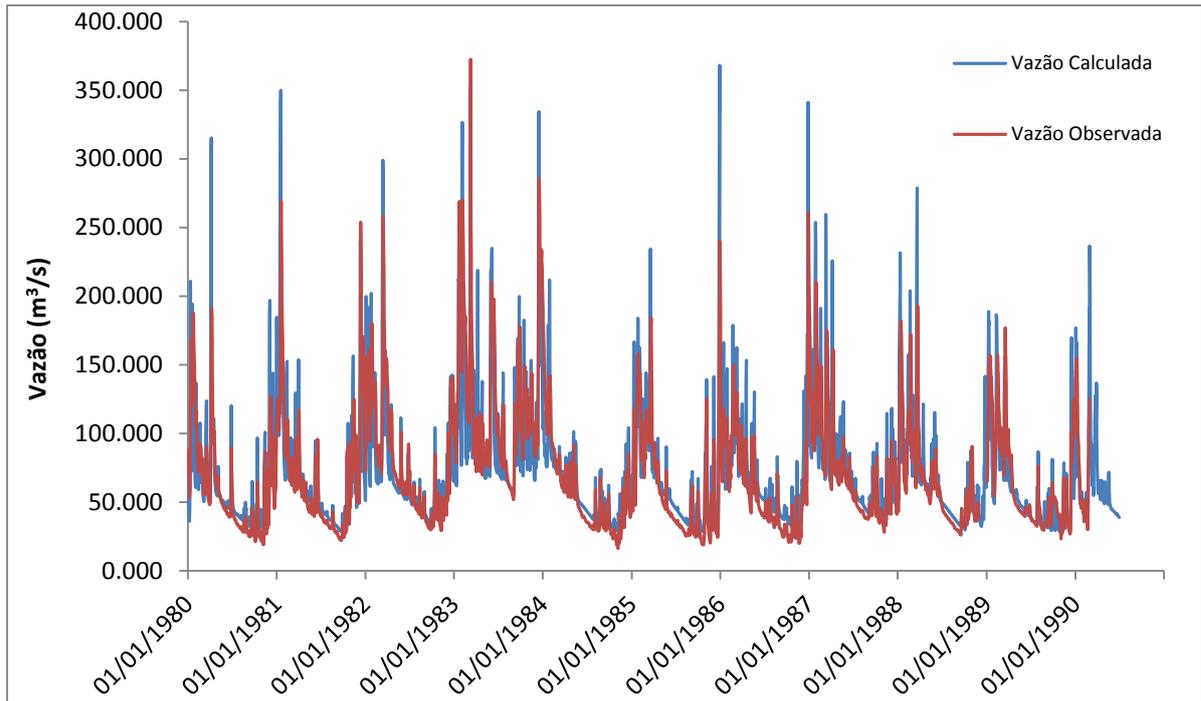


Figura 5.8: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Santa Rita do Sapucaí

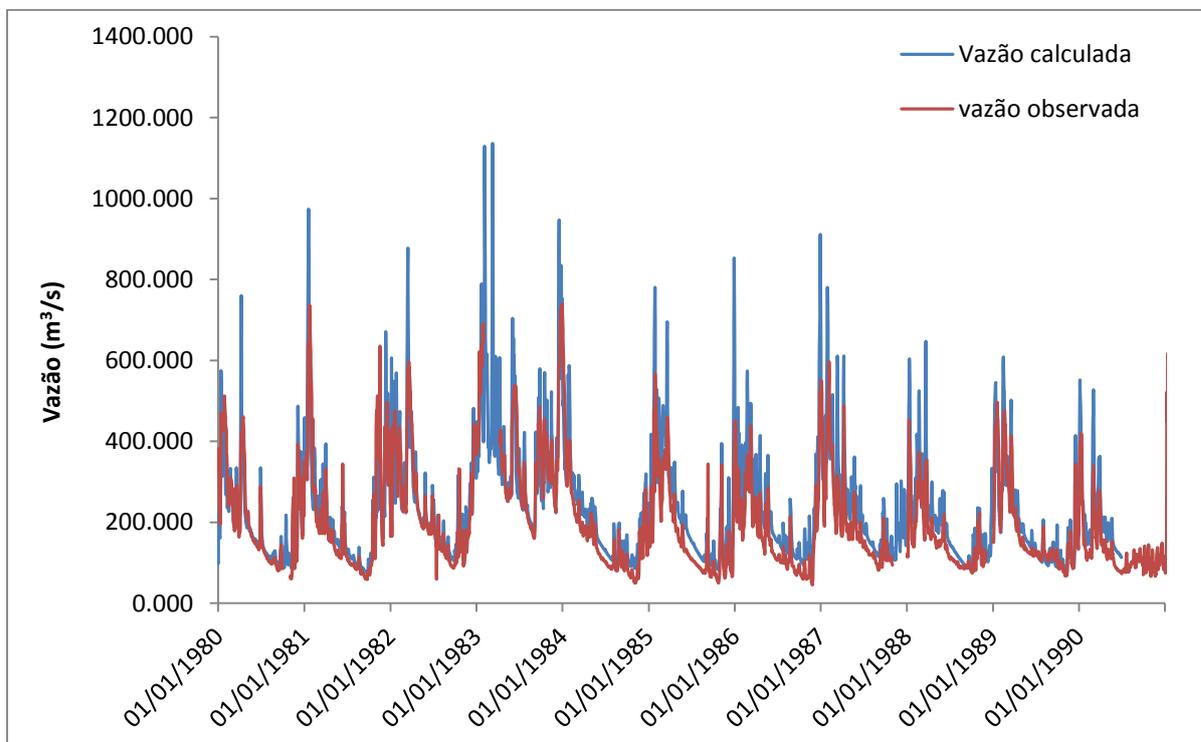


Figura 5.9: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Paraguaçu

Por fim, o resultado obtido no ajuste da sub-bacia de Paraguaçu foi parecido com o das outras sub-bacias. A calibração foi considerada satisfatória, com valor do coeficiente de *Nash-Sutcliffe* aceitável para o desempenho de um modelo hidrológico. Percebe-se, assim como as

sub-bacias anteriores, que as curvas de vazão observada e calculada praticamente se sobrepõe, porém há alguns períodos de superestimação e outros de subestimação, o que foi verificado para todas as sub-bacias. Esta inconsistência dos dados pode ser devido a deficiência do modelo, possivelmente por erros no processo de estimativa das vazões, que é feito através de balanço hídrico.

5.6. Previsão de Vazão

Nesta seção é apresentado o resultado da previsão de curto prazo realizada com o MGB-IPH, através da utilização das previsões de chuva geradas pelo modelo regional ETA. Neste estudo, as previsões de chuva são realizadas por conjunto (ensemble), por este motivos possuem quatro membros, e possuem horizonte de 5 dias, ou seja, para cada dia a previsão é realizada para cinco dias a frente.

A previsão de vazão foi realizada para os 23 casos, apresentados na Tabela 4.5, porém, os principais casos para a bacia do rio Sapucaí são: caso 2, 3 e 6. De todas as datas selecionadas dos 23 casos, nota-se que a mais antiga é de 1999, portanto, a previsão iniciou neste período. Para realizar a previsão, o modelo utilizou os dados de chuva observada e prevista, sendo que os dados observados de chuva foram considerados até o dia anterior ao início da previsão, a partir do primeiro dia da previsão o modelo utiliza os dados da previsão de chuva até o quinto dia de previsão.

Para a estação de Itajubá, como pode ser visto na Figura 5.10, foi escolhido o período de 25/12/1999 até 10/01/2000, no qual ocorreu uma das piores inundações na cidade, e este intervalo é referente ao caso 2 (Tabela 4.5). A análise foi feita através da comparação entre as previsões de cada membro e a média desses membros com os dados de vazão observada.

Com a Figura 5.10, percebe-se que para antecedência de 5, 4 e 3 dias o modelo não conseguiu prever o momento da subida do nível e o resultado não foi considerado satisfatório para nenhum dos membros. Mas para dois dias de antecedência, o modelo conseguiu prever que haveria uma subida de nível, porém com atraso de dois dias, ou seja, o nível subiu no dia 31/12/1999 e o modelo previu a subida no dia 02/01/2000. O melhor resultado foi para a previsão com um dia de antecedência, na qual foi possível observar menor diferença entre os membros e o modelo também conseguiu prever a subida do nível, mas com um dia de atraso, prevendo que o nível subiria no dia 01/01/2000. Na mesma figura, nota-se ainda que há um período sem dados observados, que é justamente o período em que a cidade ficou inundada e as estações ficaram cobertas pela água, por isso não foi possível obter os dados.

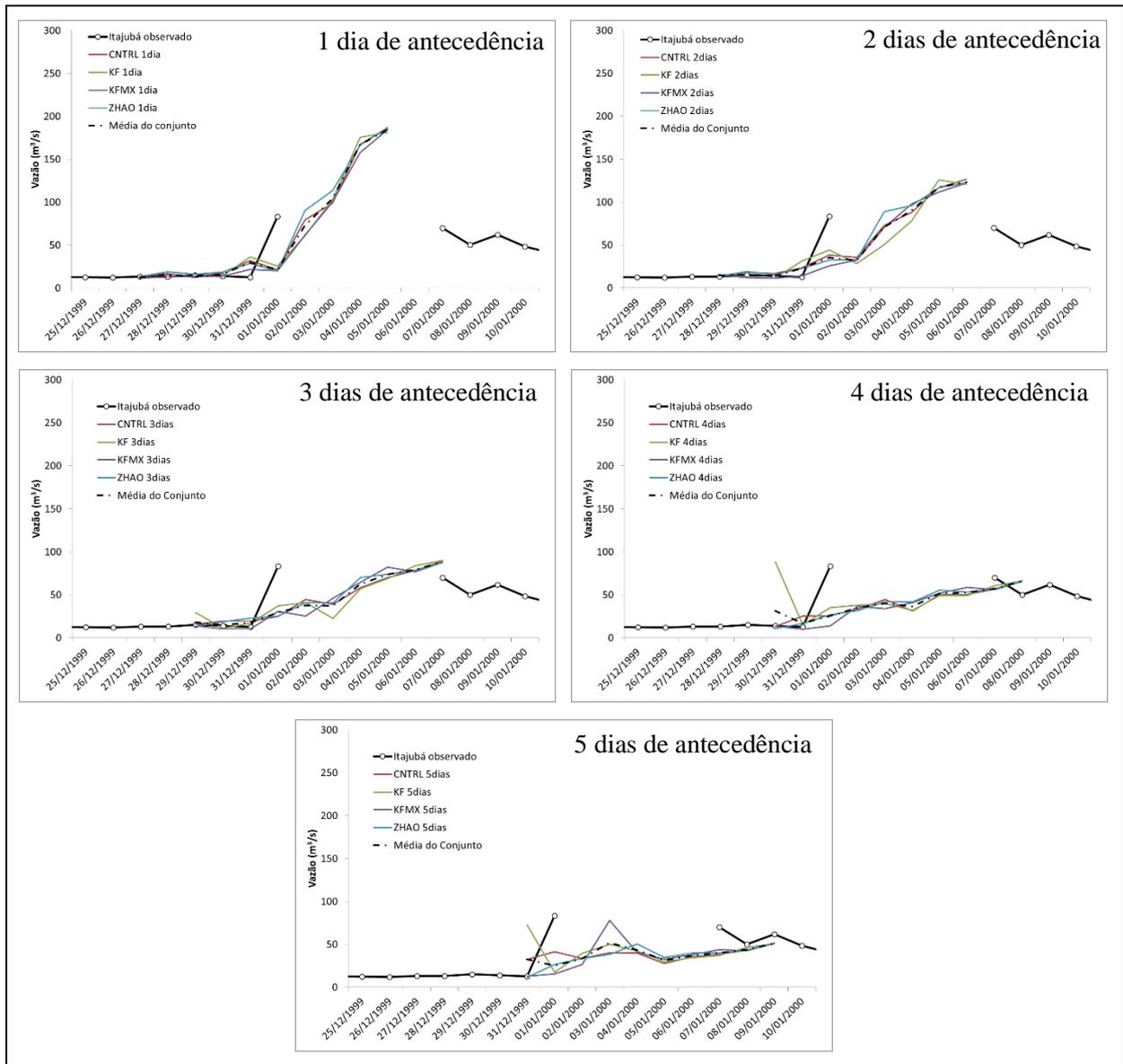


Figura 5.10: Previsão para o posto de Itajubá com até 5 dias de antecedência

Ainda para a mesma estação, foram observados alguns falsos picos do membro KF (Kain-Fritsch) para outros períodos verificados aleatoriamente (Figura 5.11), porém em alguns casos ele também conseguiu identificar alguns picos existentes com melhor precisão, como pode ser visto na Figura 5.12. Neste caso o membro KF acertou o tempo do pico, mas não a magnitude. Com isso, é possível perceber que este membro é mais sensível aos picos de vazão do que os outros membros.

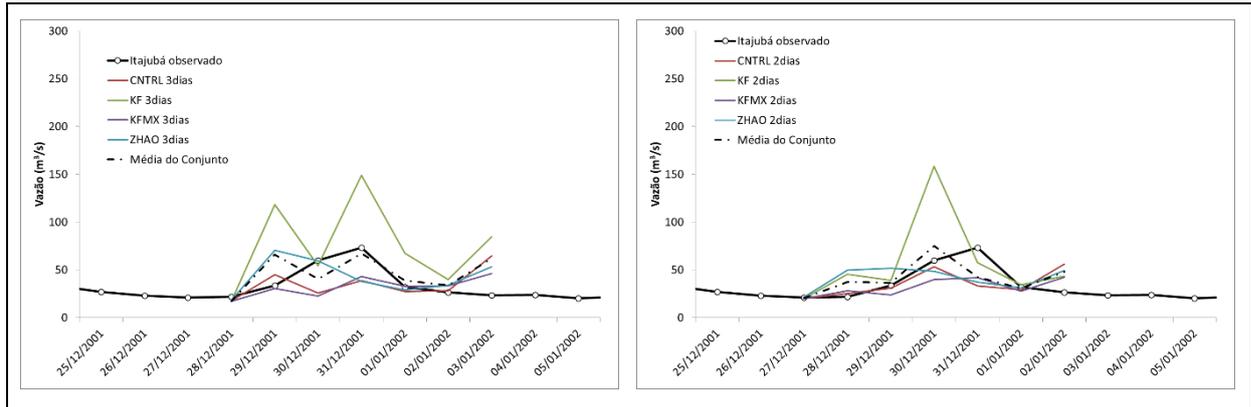


Figura 5.11: Falsos picos do membro Kain-Fritsch

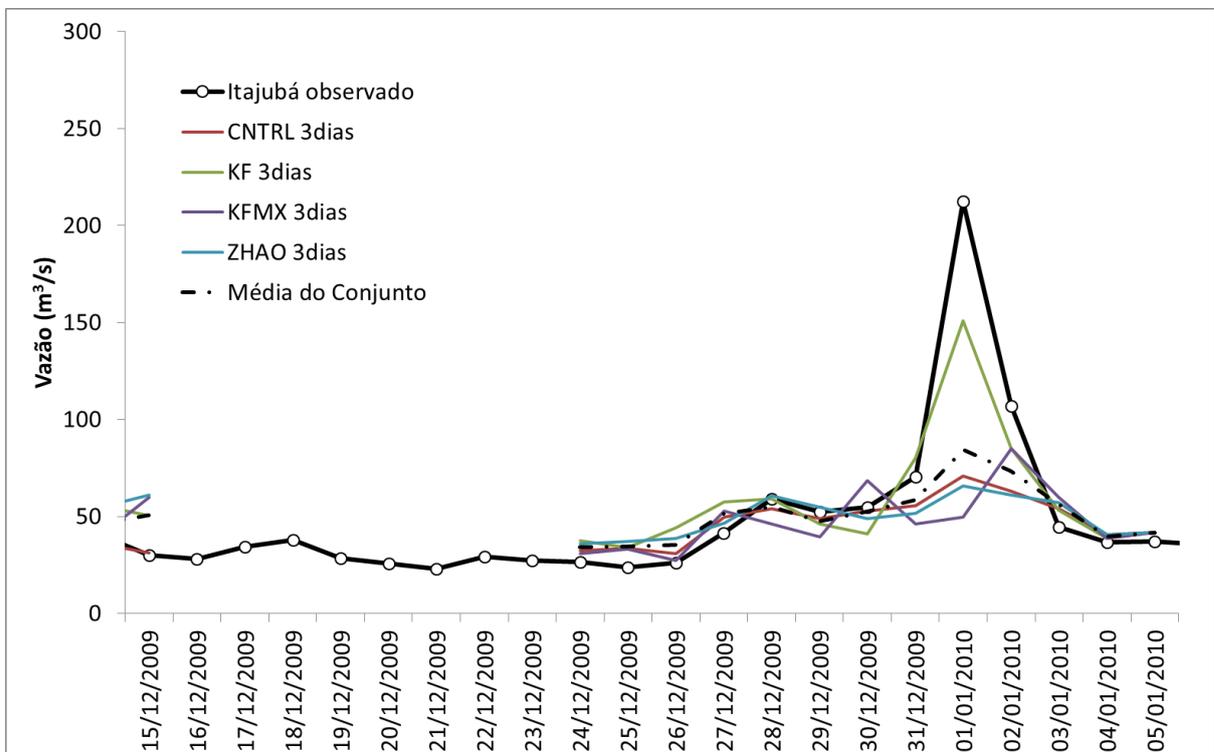


Figura 5.12: Identificação do pico pelo membro Kain-Fritsch

O comportamento encontrado para o posto de Itajubá, foi o mesmo para as outras estações, ou seja, as previsões com 5, 4 e 3 dias de antecedência não geraram bons resultados para a previsão de vazão.

Para a estação de Santa Rita do Sapucaí, um fato que chamou a atenção foi a antecipação dos picos das cheias (Figura 5.13). Este problema pode estar relacionado a existência de planície de inundação entre os municípios de Itajubá e Santa Rita do Sapucaí, que são áreas facilmente inundáveis. Essas áreas, quando inundam, diminuem a velocidade de escoamento, com isso a água que escoava de Itajubá demora mais para chegar em Santa Rita do Sapucaí e, como o modelo considera apenas a calha do rio, ele não consegue representar a

influência das planícies inundáveis sobre o escoamento da água, gerando assim, a antecipação dos picos de cheia. O período entre 25/12/1999 até 10/01/2000 é importante de ser analisado devido a ocorrência de uma das piores inundações na região, porém, para o município de Santa Rita do Sapucaí não foi possível fazer análise desse período, assim como foi feita para Itajubá, porque a falta de dados observados impossibilitou a verificação do momento em que o nível da água subiu, e também não tinha como fazer as comparações entre vazão prevista e observada.

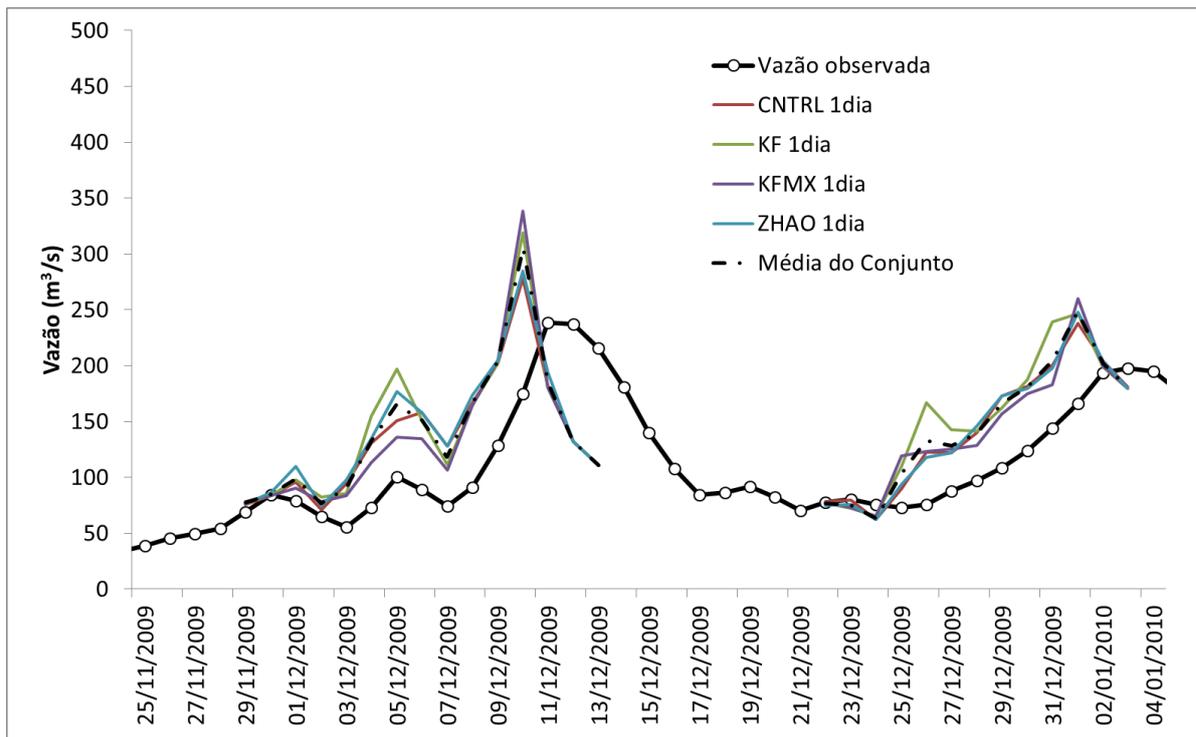


Figura 5.13: Antecipação dos picos de cheia do posto de Santa Rita do Sapucaí

Agora, analisando o período entre 25/12/1999 até 10/01/2000 da sub-bacia de Paraguaçu, que é sub-bacia mais a jusante, observa-se que os resultados foram melhores para 1 e 2 dias de antecedência (Figuras 5.14 e 5.15). O modelo conseguiu captar o momento da subida de nível (01/01/2000) com antecedência de até dois dias, porém ele superestimou o pico, não conseguindo, então, representar a magnitude do pico de maneira adequada. Esse erro pode estar associado a existência de planícies de inundação na região, que foi o mesmo problema detectado na análise da sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí. Nota-se, também, que com até 3 dias de antecedência (Figura 5.14, 5.15 e 5.16) houve pouca diferença entre os membros (Controle, KF, KFMX e ZHAO). Nas Figuras 5.17 e 5.18, para as previsões com 4 e 5 dias de antecedência, respectivamente, nota-se que as previsões não foram satisfatórias, pois há um maior distanciamento dos dados observados. Mas, comparando a previsão para esta sub-bacia com as duas anteriores, é possível perceber que os resultados foram melhores,

conseguindo boas previsões para até dois de antecedência. Isso pode estar relacionado ao fato desta sub-bacia ter maior área de drenagem, sendo melhor representada pelo modelo hidrológico.

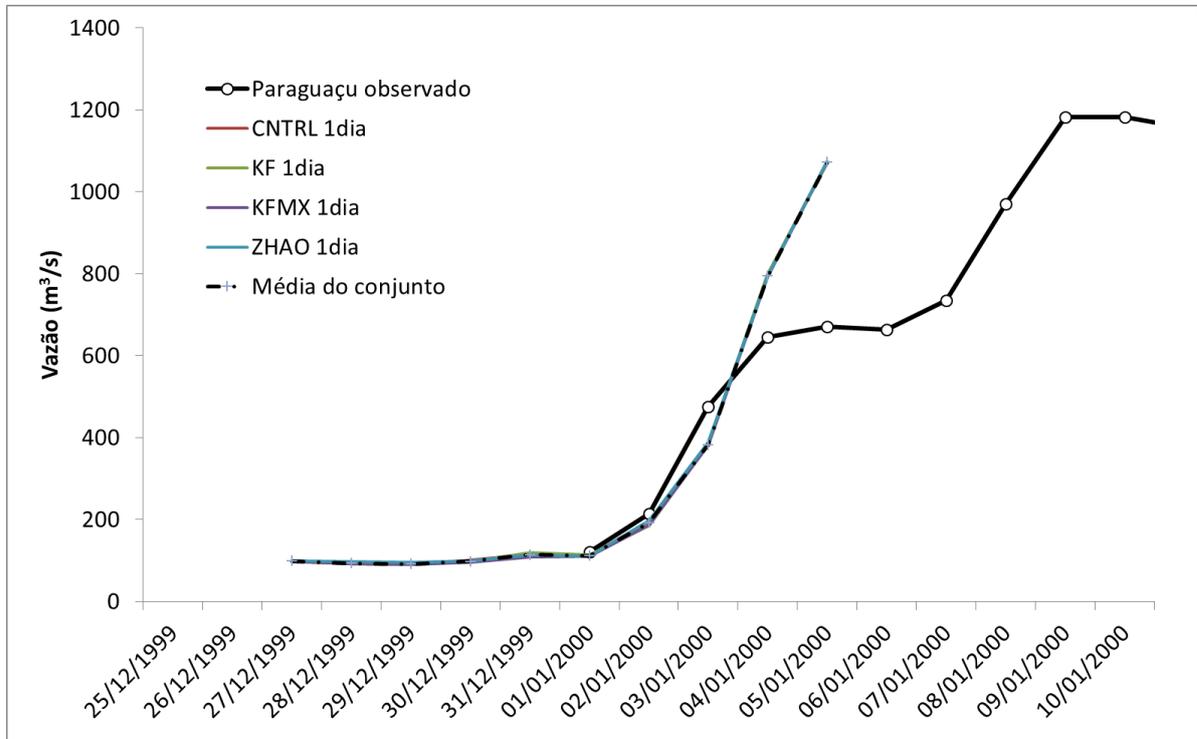


Figura 5.14: Previsão para o posto de Paraguaçu com 1 dia de antecedência

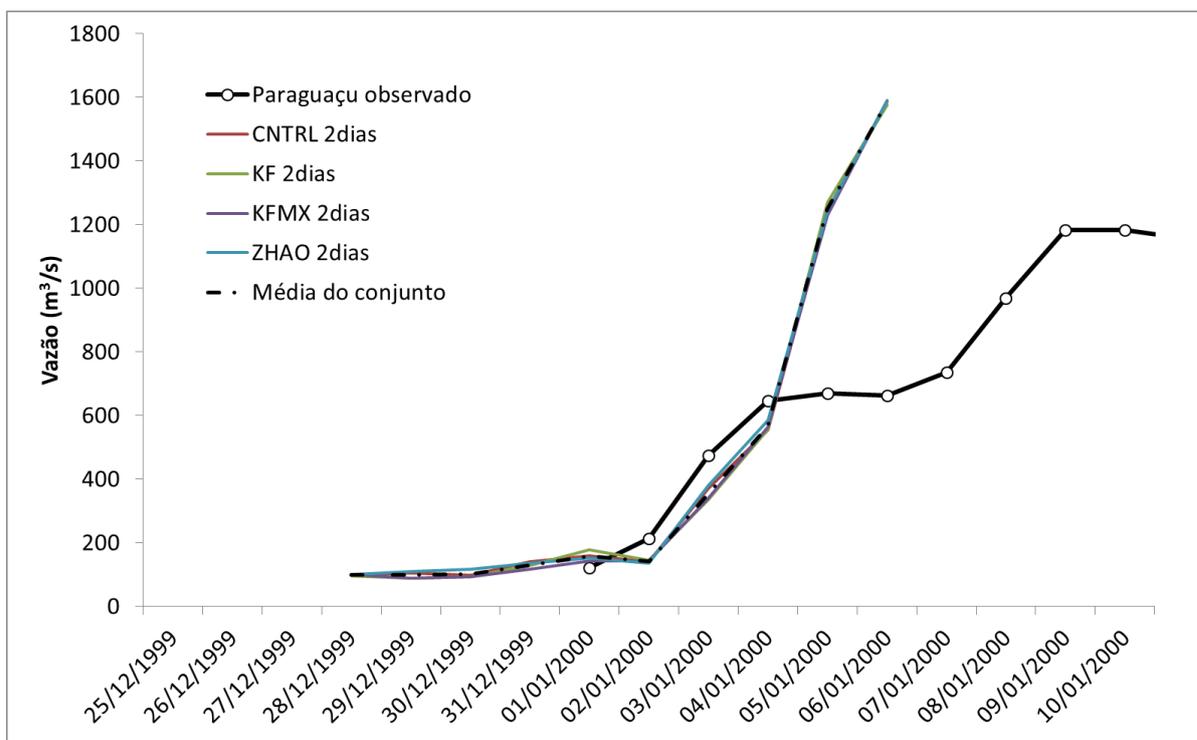


Figura 5.15: Previsão para o posto de Paraguaçu com 2 dias de antecedência

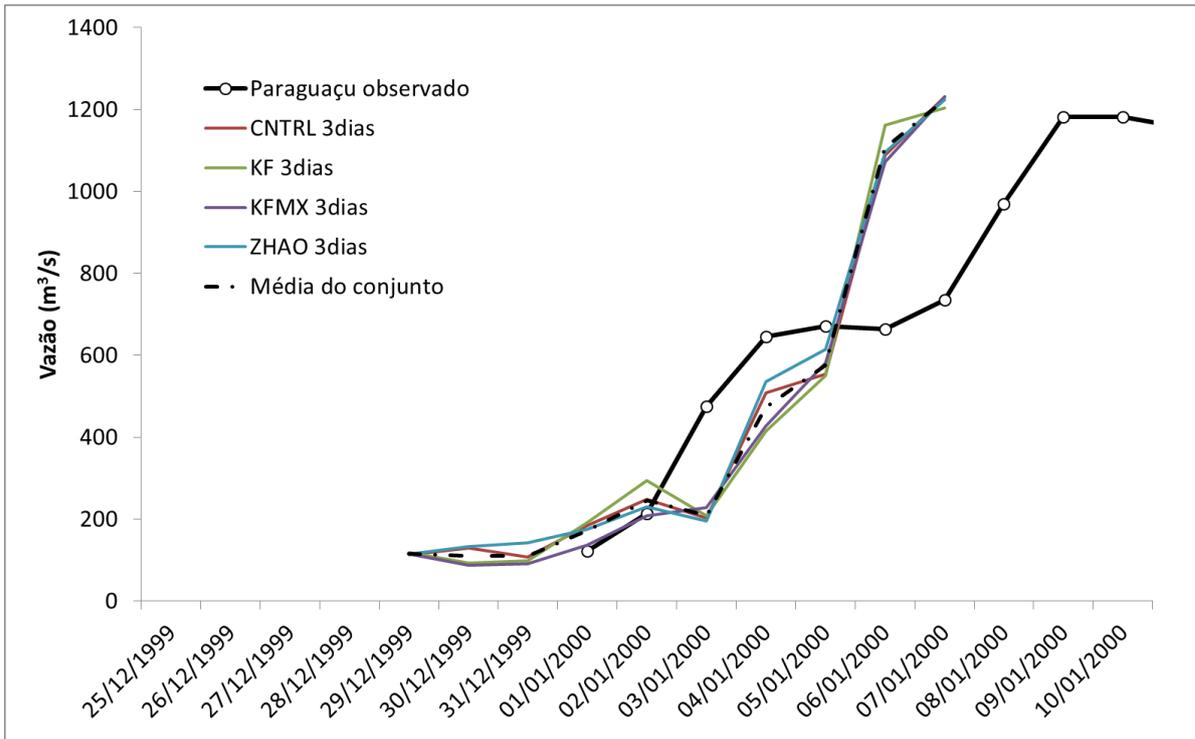


Figura 5.16: Previsão para o posto de Paraguaçu com 3 dias de antecedência

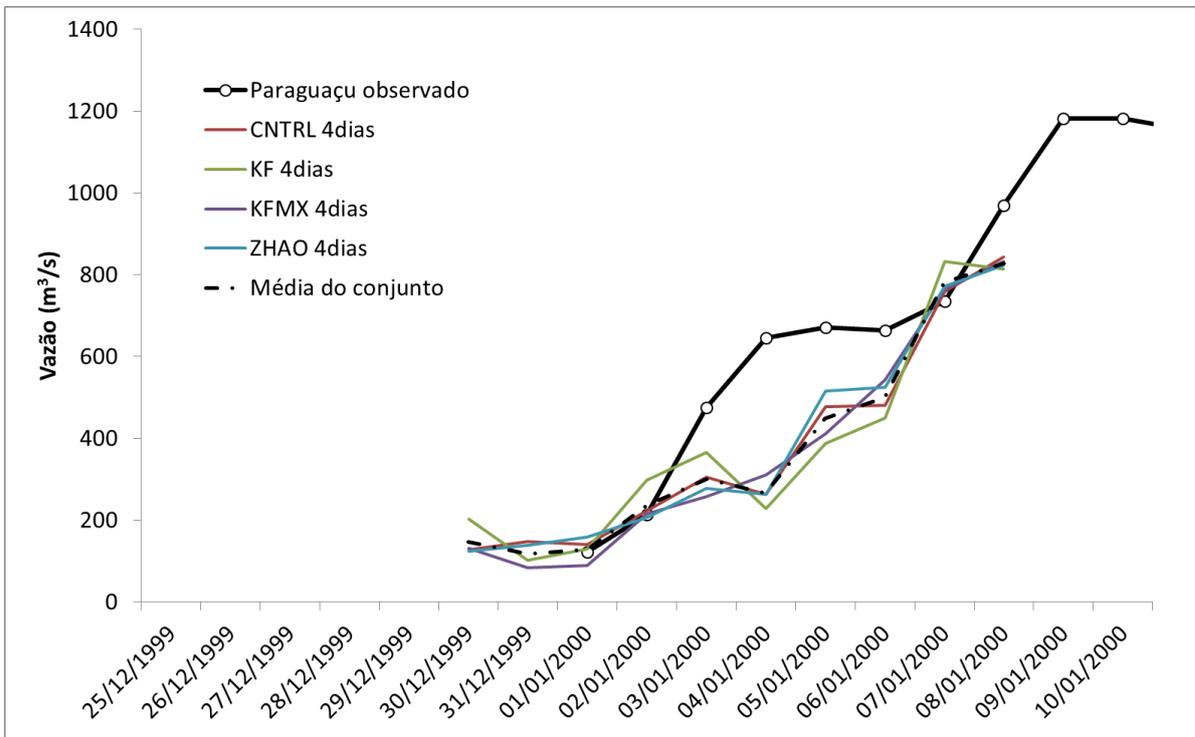


Figura 5.17: Previsão para o posto de Paraguaçu com 4 dias de antecedência

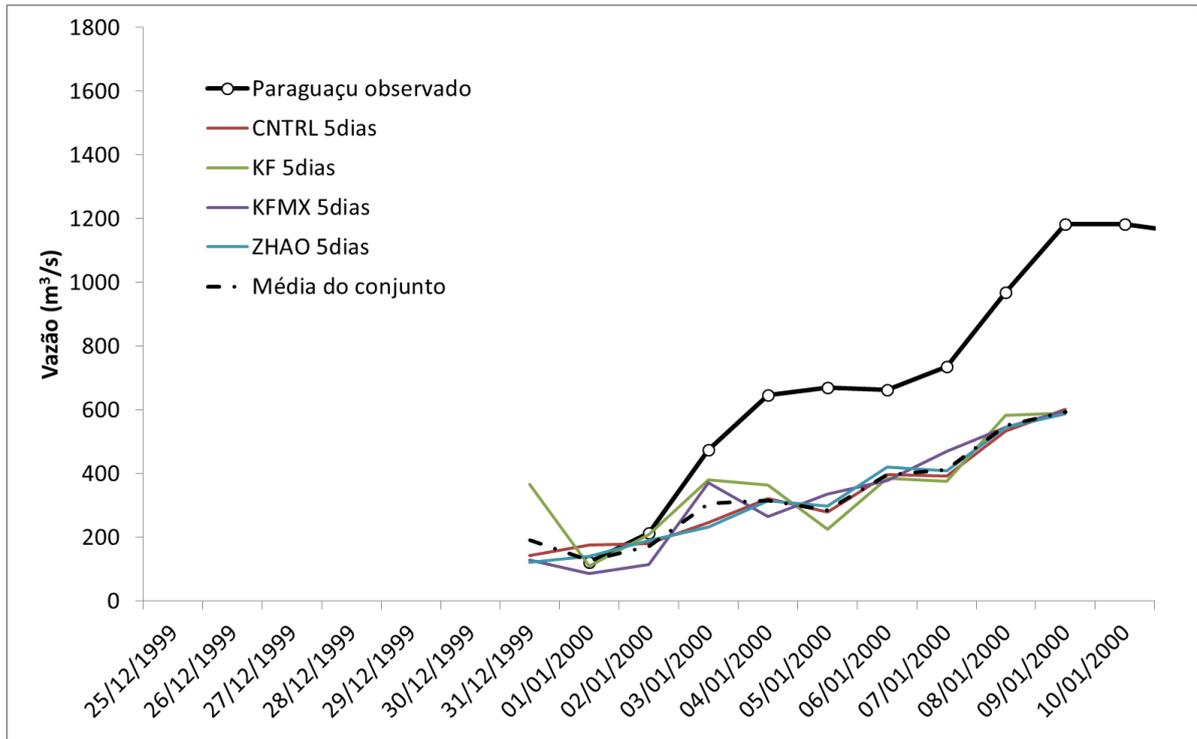


Figura 5.18: Previsão para o posto de Paraguaçu com 5 dias de antecedência

5.7. Análise Estatística da Previsão de Vazão por Conjunto

5.7.1. Avaliação do erro ou precisão

Os erros quantitativos das previsões de vazão foram avaliados através do EMA e EMR. Como já foi dito anteriormente, com o EMA foi possível verificar a diferença absoluta entre a vazão prevista e observada e como EMR avaliar o viés geral das previsões. Para ambos métodos, o ideal é o resultado mais próximo de zero. Os resultados obtidos para o EMA e EMR foram apresentados nas Figuras 5.19 e 5.20, respectivamente.

Considerando o EMA, na Figura 5.19 percebe-se que ele cresce com o aumento do horizonte da previsão, apresentando melhores resultados para antecedências menores, o que já era esperado de uma previsão. Agora, comparando o resultado entre as sub-bacias nota-se que o erro médio absoluto para a sub-bacia de Paraguaçu foi maior do que para as outras duas, o que pode estar ligado ao fato desta sub-bacia ter vazões maiores, visto que ela possui a maior área de drenagem.

Analisando o EMR, nota-se na Figura 5.20 que, assim como o EMA, cresce com o aumento da antecedência da previsão. Para Itajubá, observa-se que o erro varia entre 0,49 e 0,61, apresentando uma tendência a manter o mesmo patamar de erro a partir do terceiro dia de antecedência, que pode ser devido ao efeito da assimilação de dados deixar de influenciar no resultado. A sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí apresentou EMR entre 0,37 e 0,64, com

comportamento parecido com a de Itajubá, porém com um erro um pouco menor para o primeiro dia de antecedência. Para a sub-bacia de Paraguaçu o EMR variou entre 0,12 e 0,57, apresentando o mesmo comportamento também, ou seja, o erro cresce com o aumento do horizonte da previsão, porém, apresenta erros menores do que das sub-bacias anteriores, o que já era esperado por esta sub-bacia ter maior a maior área de drenagem. Então, com este método foi possível perceber que o erro médio apresentou valores menores apenas para um dia de antecedência, e com valores menores apenas para sub-bacias, porém com valores satisfatórios apenas para sub-bacias maiores.

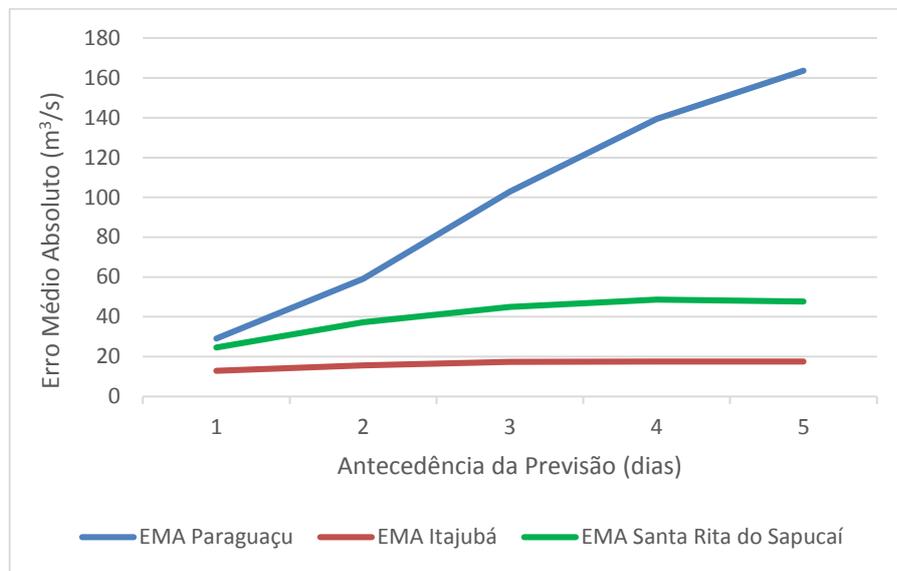


Figura 5.19: Erro médio absoluto para cada antecedência de previsão

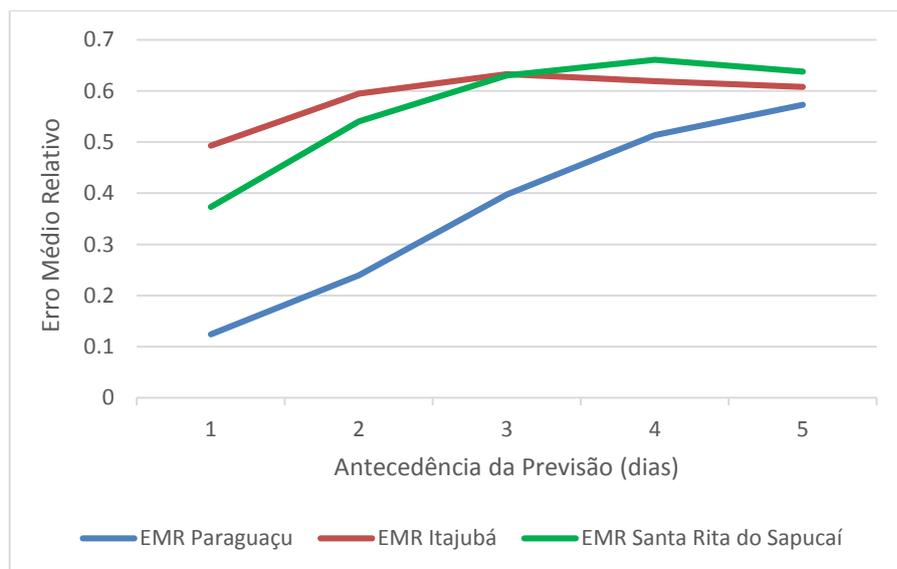


Figura 5.20: Erro médio relativo para cada antecedência de previsão

Com os diagramas de dispersão, mostrados na Figura 5.21, 5.22 para a sub-bacia de Itajubá e Santa Rita do Sapucaí, respectivamente, podem-se observar para ambas as sub-

bacias, que nesses diagramas há maior concentração dos pares observação/previsão acima da linha de 45°, indicando a superestimação da vazão. Para a sub-bacia de Paraguaçu (Figura 5.23), o resultado foi melhor para até dois de antecedência, pois os pares observação/previsão estão bem próximas a linha de 45°, porém, com o aumento do horizonte da previsão, percebe-se que os pares ficam mais dispersos e acima da linha de 45°, indicando a superestimativa da previsão.

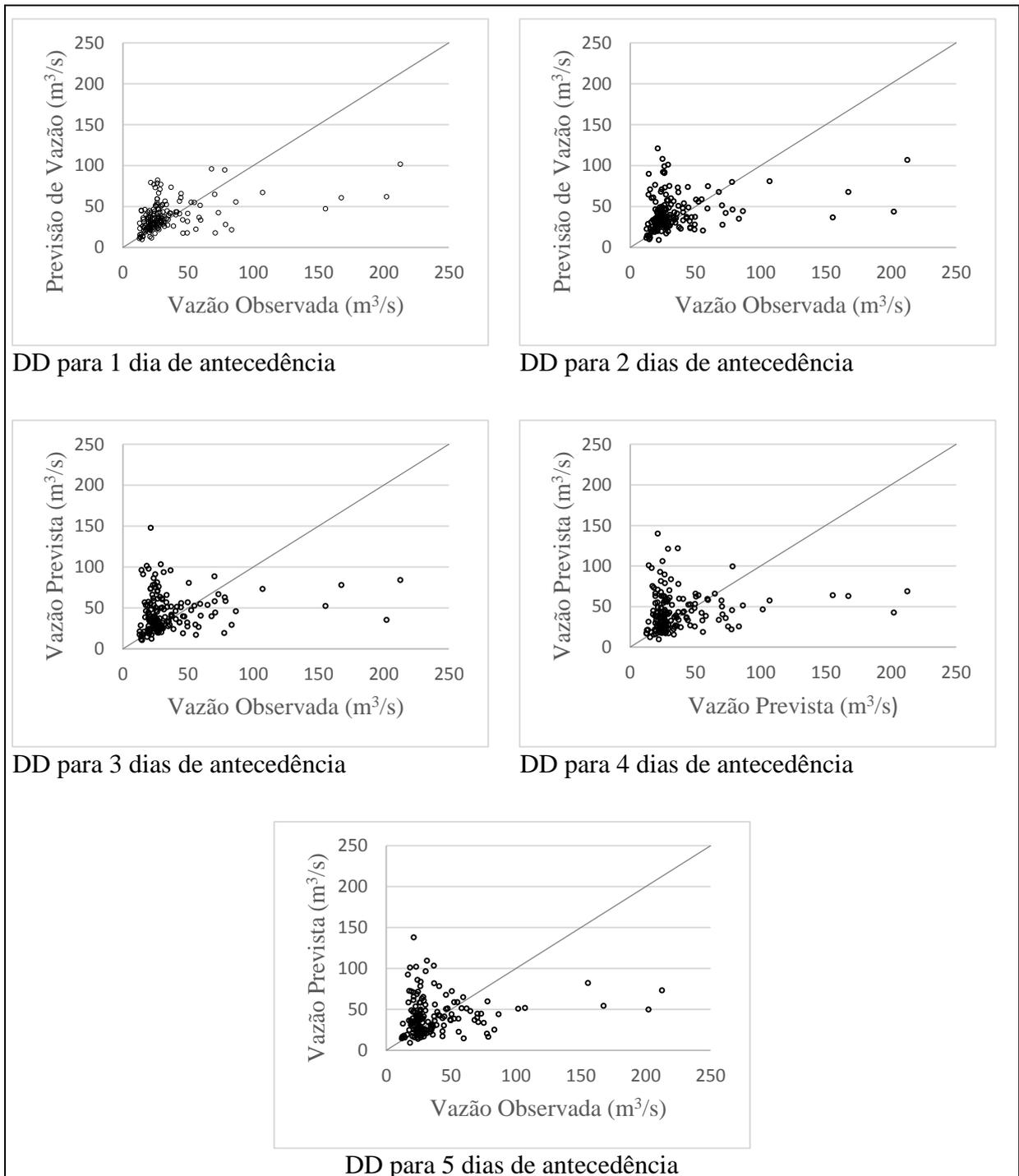


Figura 5.21: Diagrama de Dispersão vazão observada x vazão prevista para sub-bacia de Itajubá

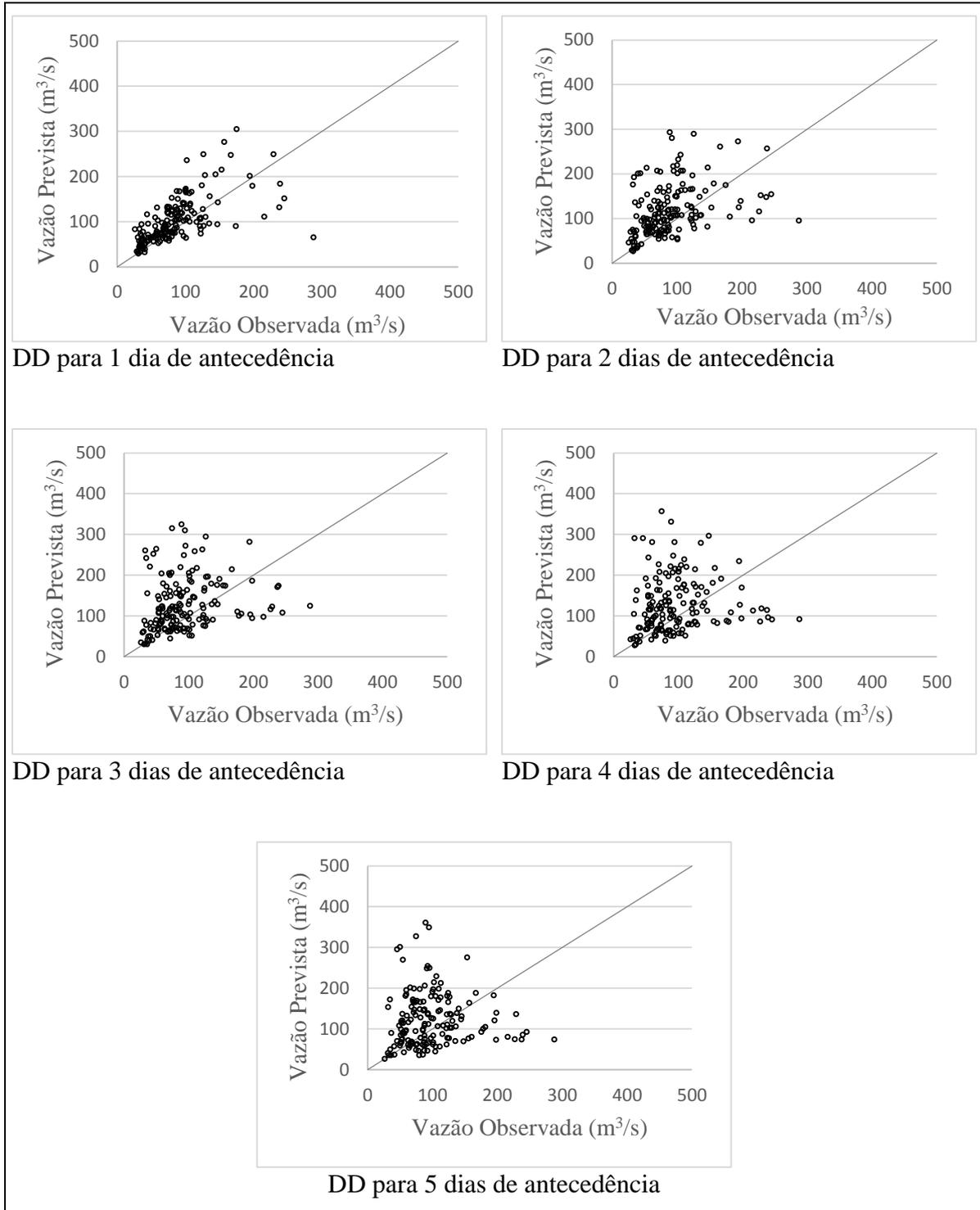


Figura 5.22: Diagrama de Dispersão vazão observada x vazão prevista para sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí

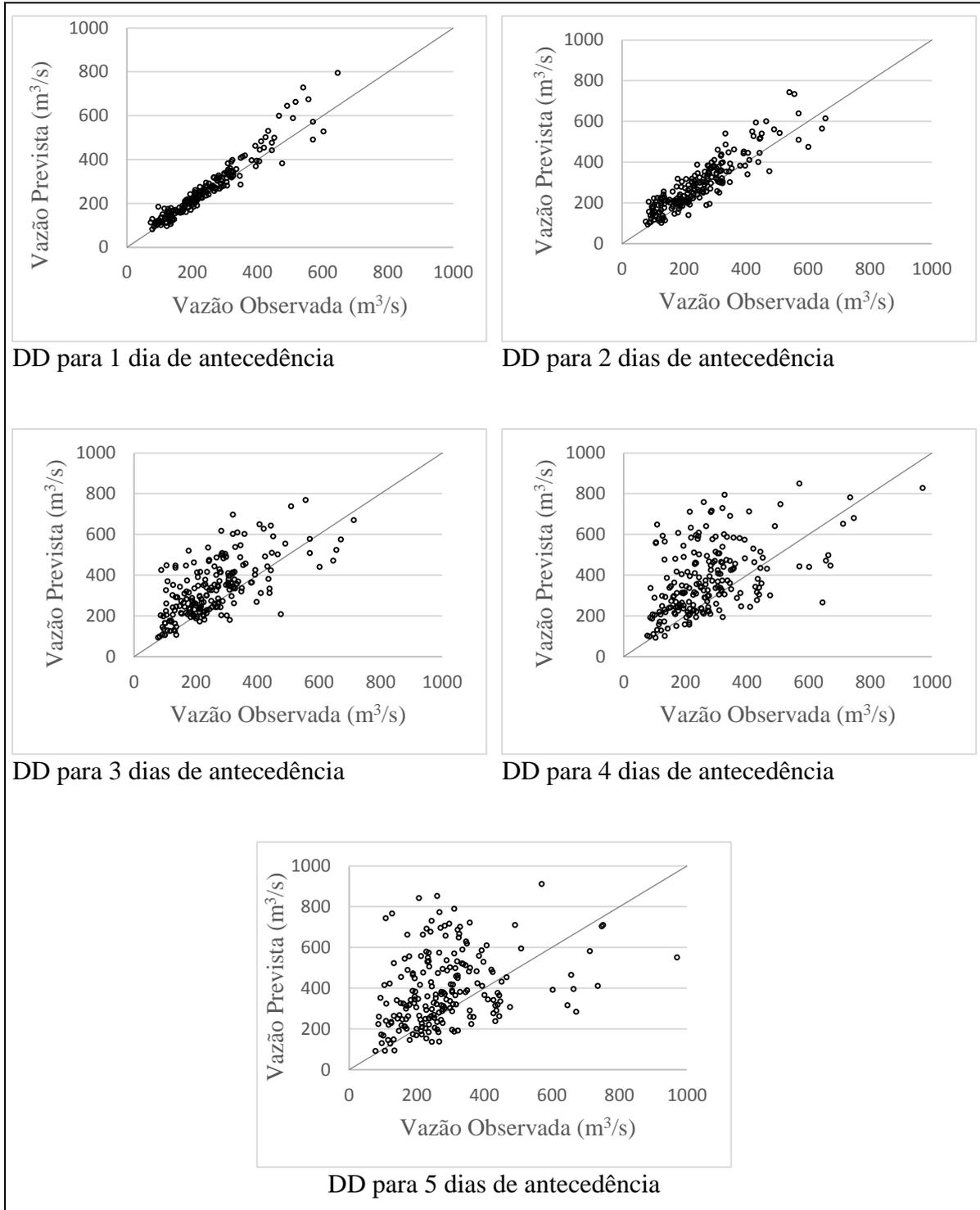


Figura 5.23: Diagrama de Dispersão vazão observada x vazão prevista para sub-bacia de Paraguaçu

Também foi comparado o desempenho de cada membro (Controle, KF, KFMX e ZHAO) com a média do conjunto através do coeficiente CM, definido anteriormente pela Equação 4.7. Valores positivos de CM indicam que o resultado obtido com o membro é melhor do que o resultado obtido com a média do conjunto. Em contrapartida, os resultados

negativos indicam que o resultado com utilizando a média do conjunto é melhor do que com membro avaliado.

Os resultados do cálculo do CM encontram-se na Tabela 5.2, na qual é possível observar que a grande maioria dos resultados foram valores negativos, com exceção do membro controle para ambas sub-bacias, e o membro ZHAO apenas para Santa Rita do Sapucaí e Paraguaçu. Para facilitar a comparação foram elaborados gráficos com esses resultados.

Tabela 5.2: Resultado do coeficiente de eficiência de cada membro comparado a média do conjunto de previsões

Membros	Antecedência da Previsão				
	1 dia	2 dias	3 dias	4 dias	5 dias
<i>CM – Itajubá</i>					
Controle	0.00021	-0.0447	0.07213	0.11119	0.10965
KF	-0.194	-0.3497	-0.3876	-0.4607	-0.4708
KFMX	-0.0701	-0.0209	-0.3529	-0.3583	-0.4672
ZHAO	-0.0516	-0.1901	-0.1527	-0.0166	-0.0069
<i>CM - Santa Rita do Sapucaí</i>					
Controle	0.06504	0.11086	0.19818	0.26985	0.28122
KF	-0.2295	-0.6439	-0.9171	-0.9171	-0.8064
KFMX	-0.0411	-0.1497	-0.4288	-0.669	-0.7704
ZHAO	0.01091	-0.0102	0.0207	0.02943	0.10251
<i>CM - Paraguaçu</i>					
Controle	0.01543	0.05067	0.18525	0.25552	0.29845
KF	-0.0177	-0.1495	-0.6273	-1.0109	-1.2257
KFMX	-0.0068	-0.0213	-0.1263	-0.2651	-0.4252
ZHAO	-0.0259	-0.0245	-0.0097	0.05914	0.14326

As Figuras 5.24, 5.25 e 5.26 mostram o desempenho de cada membro, comparado ao desempenho do conjunto dos membros das sub-bacias de Itajubá, Santa Rita do Sapucaí e Paraguaçu, respectivamente. Valores positivos indicam melhor desempenho do membro separadamente e valores negativos indicam melhor desempenho do conjunto de membros. Então, é possível observar que para as três sub-bacias o conjunto obteve melhor desempenho quando comparado a maioria dos membros, exceto o membro controle, que apresentou valores de CM positivo para ambas as sub-bacias, o que indica que o desempenho dele individualmente é superior ao da média dos membros. Com o membro ZHAO, verificou-se que, na maioria dos resultados para Santa Rita do Sapucaí e Paraguaçu, o CM ficou próximo

de zero, indicando que o desempenho entre a média e o membro ZHAO é praticamente o mesmo. Já os membros KF e KFMX, em todos os casos, resultaram em CM negativo, indicando melhor desempenho da média dos membros, ou seja, a média dos membros está mais próxima dos dados observados do que os membros KF e KFMX. É importante ressaltar que o CM não compara o desempenho dos membros entre si, ou seja, com este resultado não é possível afirmar que um membro tem desempenho melhor que outro, e sim, apenas uma comparação de cada membro com a média do conjunto.

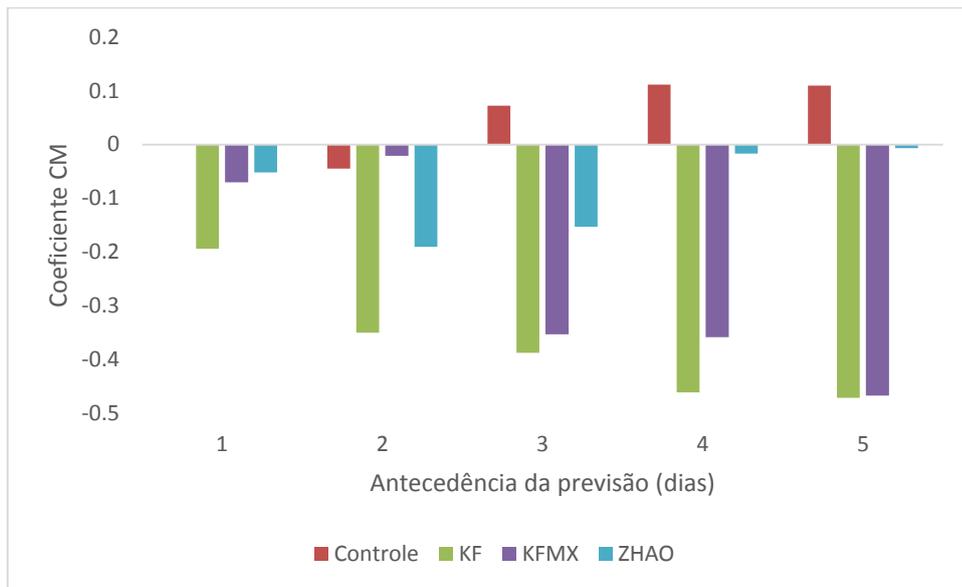


Figura 5.24: Resultado do CM para sub-bacia de Itajubá

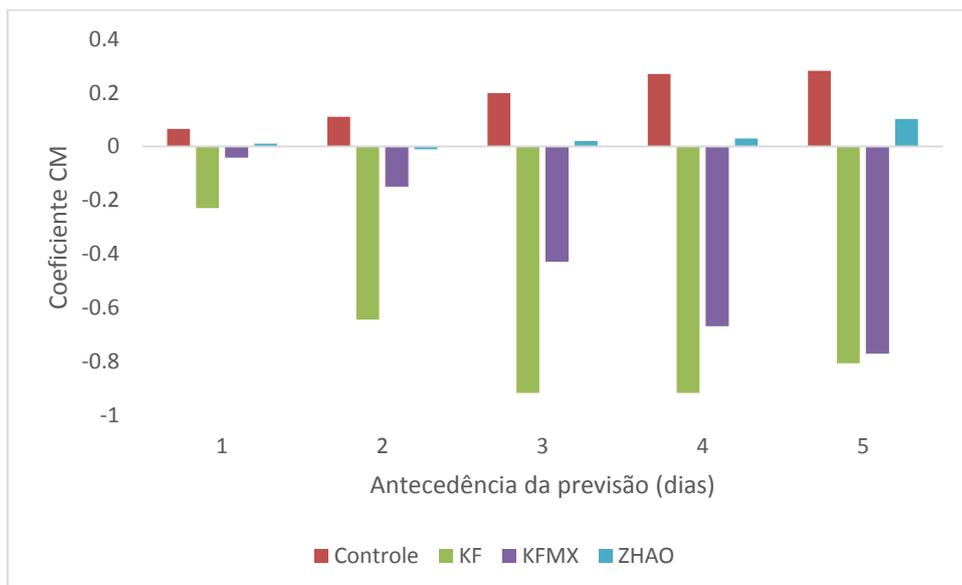


Figura 5.25: Resultado do CM para sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí

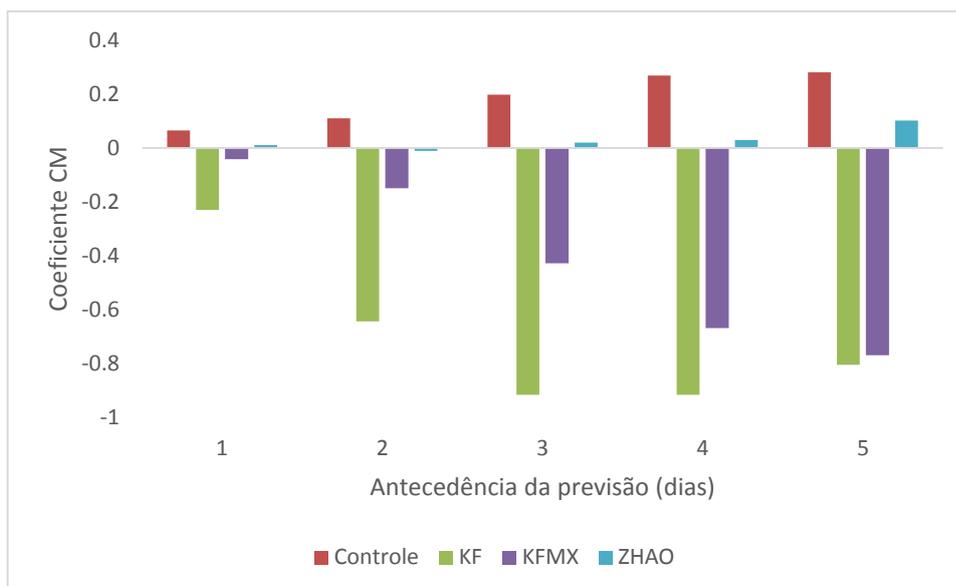


Figura 5.26: Resultado do CM para sub-bacia de Paraguaçu

5.7.2. Brier Score e Brier Skill Score

Para o cálculo do BS é necessário um limiar de vazão, então, foi adotada a mesma metodologia de Meller (2012), que utilizou como base para os cálculos quatro limites de vazões, de terminados através de análise da série de dados observados de cada estação fluviométrica de 1980 a 2013. A Tabela 5.3 contém a forma como foi definido os limites e as respectivas condições hidrológicas hipotéticas.

Tabela 5.3: Vazões limites adotadas para a análise do Brier Score

Vazão Limite	Quantil	Condições hidrológicas hipotéticas	Vazão (m ³ /s)		
			Itajubá	Santa Rita do Sapucaí	Paraguaçu
Q20%	80%	Vazões típicas durante períodos de cheias	27,95	82,10	252,10
Q5%	95%	Vazões acima do normal, mas não são esperadas inundações	46,50	138,00	424,40
Q2%	98%	Possibilidade de vazões próximas ao limite da calha menor	66,25	177,00	515,80
Q1%	99%	Extravasamento da calha menor, com grande possibilidade de inundação	83,53	200,30	583,40

Para facilitar a visualização destes limites, as Figuras 5.27, 5.28 e 5.29 apresentam as vazões observadas das estações de Itajubá, Santa Rita do Sapucaí e Paraguaçu, respectivamente e os quatro limiares de vazão adotados para o cálculo do BS. Com isso, é possível observar que a Q20% representa um situação típica de cheia e tem valores próximos

a vazão média durante o período chuvoso. Em contrapartida, a vazão Q1% representa uma situação hipotética de extravasamento da calha do rio, são os valores mais altos de vazão, comparado aos outros limites.

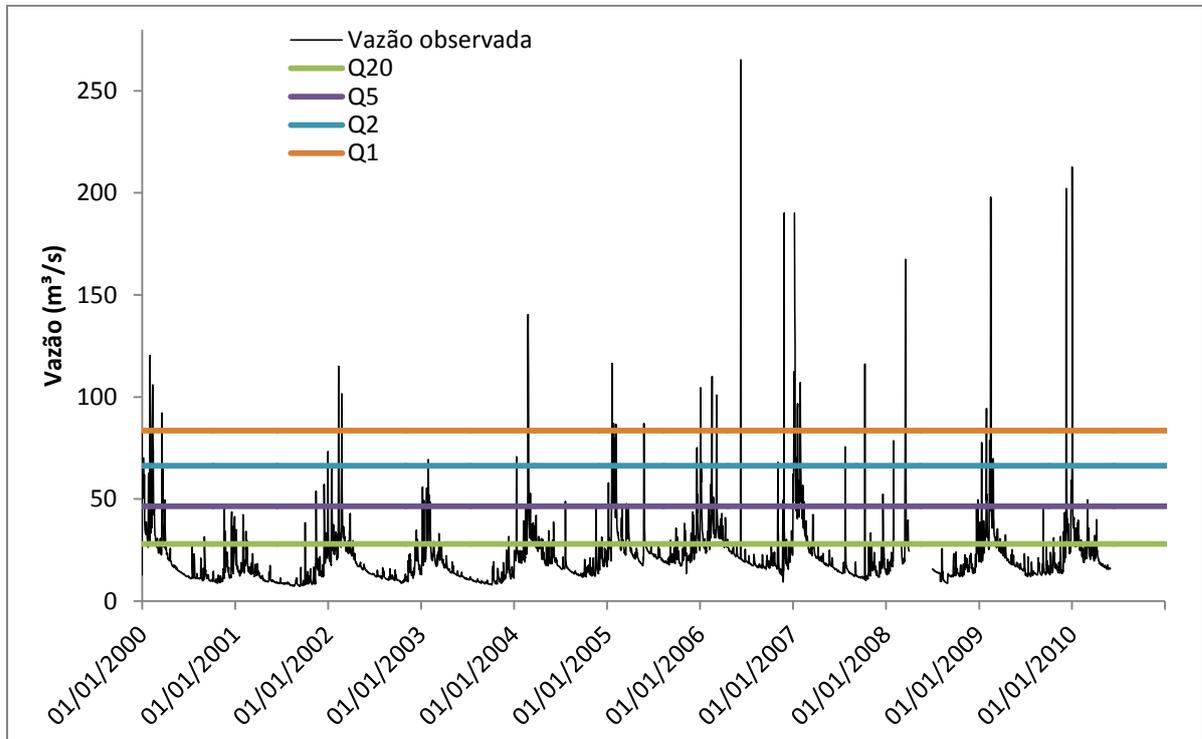


Figura 5.27: Representação das vazões limite para a sub-bacia de Itajubá

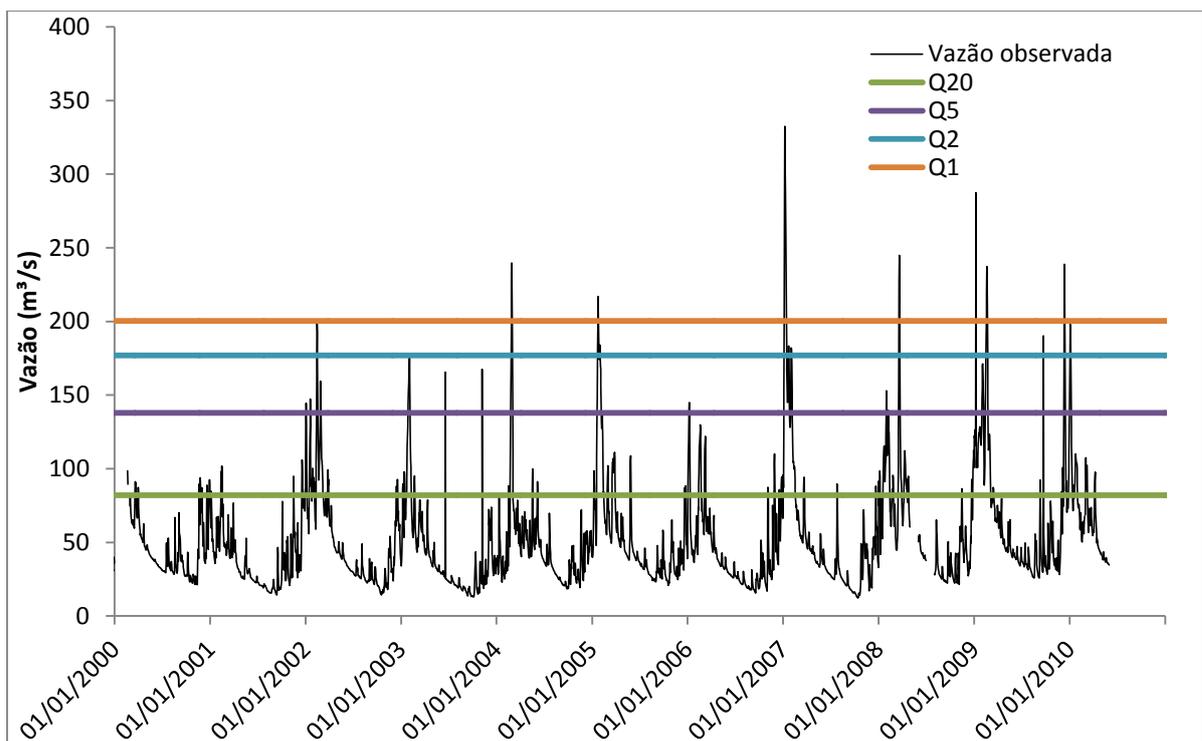


Figura 5.28: Representação das vazões limite para a sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí

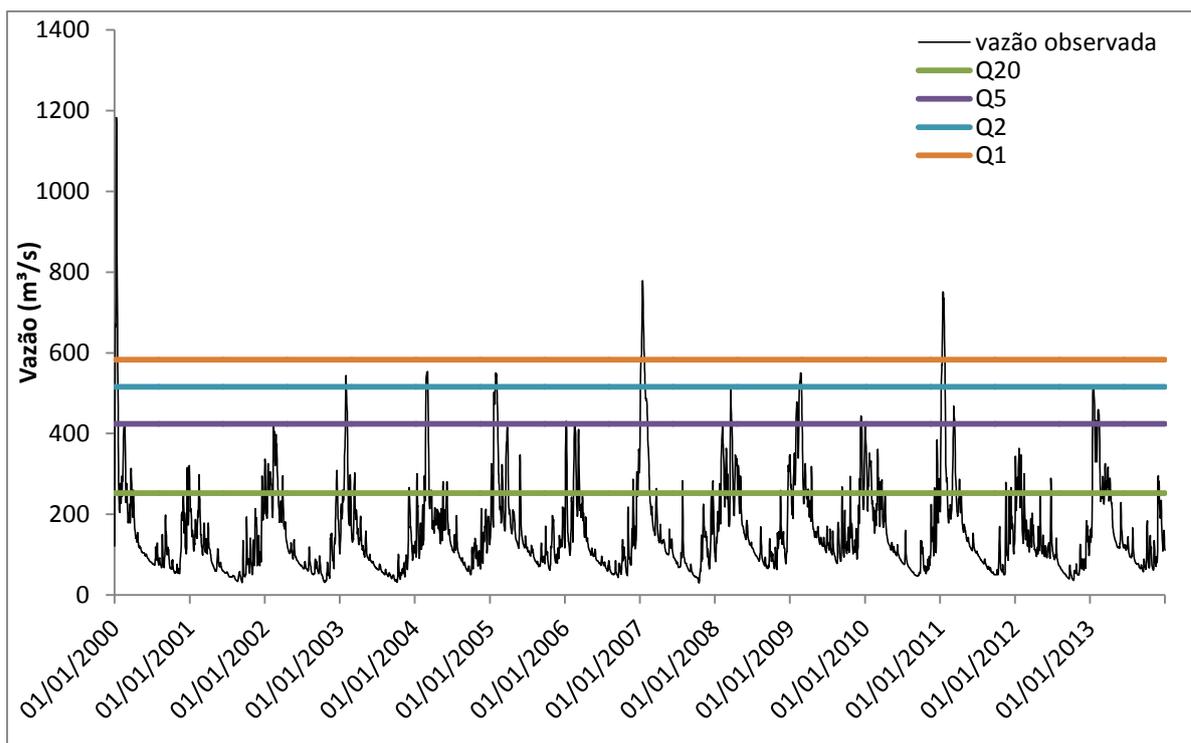


Figura 5.29: Representação das vazões limite para a sub-bacia de Paraguaçu

Os resultados obtidos para o Brier Score (BS) para cada limiar de vazão são apresentados nas Figuras 5.30, 5.31 e 5.32, para as sub-bacias de Itajubá, Santa Rita do Sapucaí e Paraguaçu, respectivamente. É importante ressaltar que este cálculo foi feito utilizando todos os membros do conjunto.

Na Figura 5.30, na qual é possível observar os resultados de BS para sub-bacia de Itajubá, verificou-se que os resultados foram melhores para as vazões maiores, pois os valores de BS estão mais próximos de zero. Porém, observou-se, também, um comportamento atípico, pois não houve um aumento significativo do BS com o aumento do horizonte da previsão, o que era esperado, visto que as incertezas crescem com o aumento da antecedência da previsão.

Considerando o limiar de $27,95 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q20%), o BS variou entre 0,41 para antecedência de 1 dia e 0,44 para 5 dias de antecedência, porém chegou a atingir 0,48 para 2 e 3 dias de antecedência. Para o limiar de $46,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q5%), o BS apresentou o mesmo comportamento, variando entre 0,23 para 1 dia de antecedência e 0,28 para horizonte de 5 dias de previsão, apresentando o maior BS para 3 dias de antecedência. Os melhores resultados obtidos de BS foram para os maiores limiares, Q2% e Q1%, apresentando o valor de BS crescente de acordo com o aumento da antecedência da previsão.

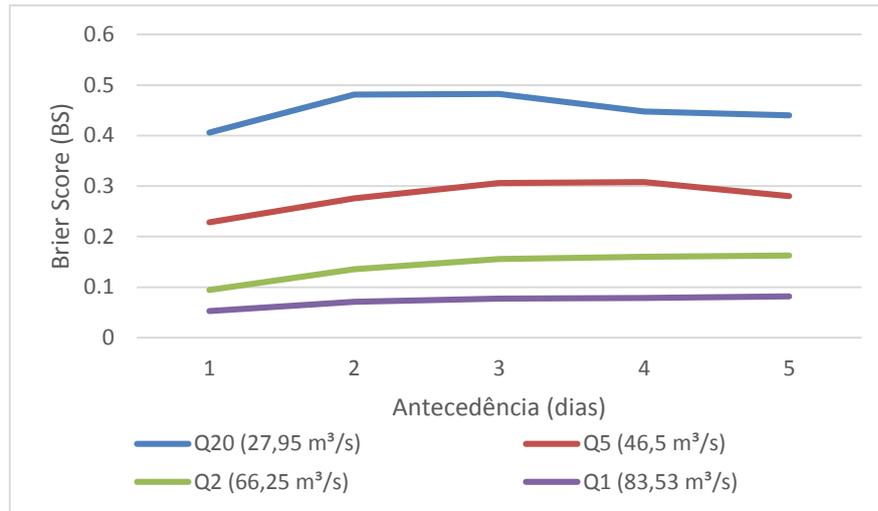


Figura 5.30: Resultado do Brier Score para sub-bacia de Itajubá

Para sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí é possível observar, na Figura 5.31, que o BS aumenta de acordo com o aumento do horizonte da previsão, sendo que os menores valores são para a antecedência de um dia. Os resultados de BS foram maiores para o limiar de 82,1 m³/s, chegando a atingir o valor de 0,44 para 5 dias de antecedência. Mas de maneira geral, considera-se que os resultados foram satisfatórios para a previsão com 1 dia de antecedência, pois os valores de BS estão mais próximos de zero. Neste caso também verificou-se que os resultados foram melhores para vazões maiores (Q1% e Q2%), o que está relacionado aos maiores níveis de vazão e ao alto risco de inundação.

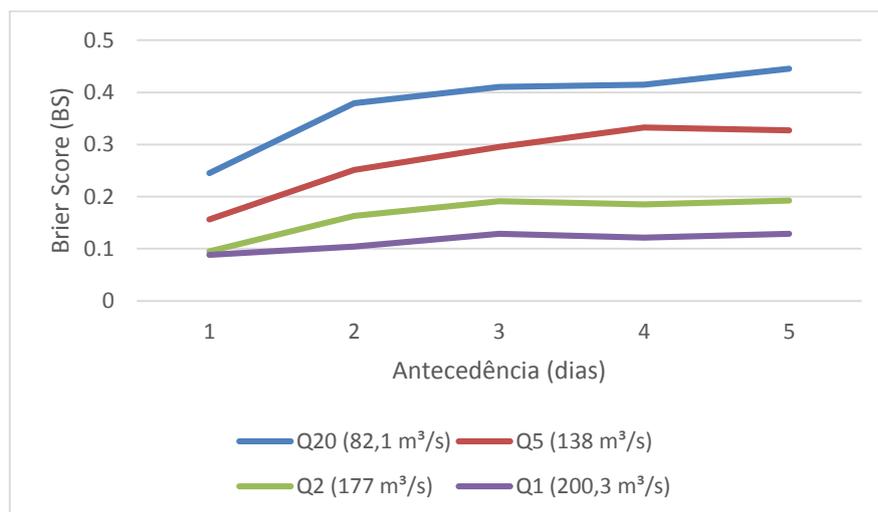


Figura 5.31: Resultado do Brier Score para sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí

Por fim, na análise de BS da sub-bacia de Paraguaçu (Figura 5.32), os erros aumentam com o aumento da antecedência da previsão. Nos primeiros intervalos de tempo (1 e 2 dias de antecedência) os valores de BS para os limites Q5%, Q2% e Q1% estão muito próximos, assumindo valores entre 0,02 a 0,05. Neste caso, verificou-se também que os resultados foram melhores para os limites de vazões maiores, o que pode ser explicado pelo fato do BS estar relacionado com probabilidade de excedência de um determinado limiar, e essa probabilidade é maior quanto menor for o limiar (MENDES, 2017). Então, de modo geral, o resultado pode-se considerar satisfatório, pois os valores estão próximos a zero, principalmente para as menores antecedências.

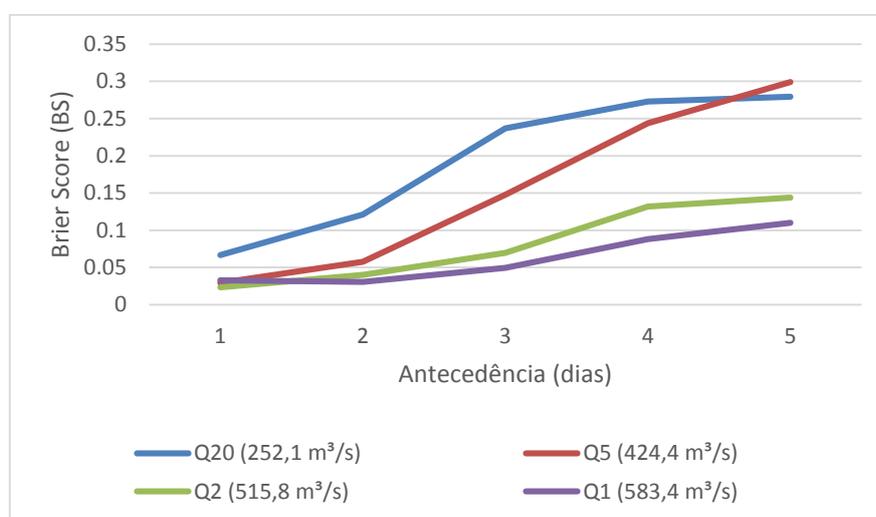


Figura 5.32: Resultado do Brier Score para sub-bacia de Paraguaçu

No intuito de comparar o desempenho da previsão utilizando todos os membros do conjunto e a previsão utilizando a média dos membros, foi calculado o Brier Skill Score (BSS), no qual foi utilizada como referência a previsão com a média dos membros, e para previsão principal foi utilizada a previsão considerando todos os membros, que é o cálculo do BS citado anteriormente. Para este método foram utilizados os mesmos limites de vazão supracitados.

O BSS varia entre o intervalo de $(-\infty, 1]$, quando o resultado é positivo significa que a previsão principal tem melhor desempenho na detecção dos limiares de vazão do que a previsão de referência, de maneira oposta, quando o resultado é negativo indica que o desempenho da previsão de referência é superior ao da previsão principal. Os resultados obtidos para o BSS para cada limiar de vazão são apresentados nas Figuras 5.33, 5.34 e 5.35, para as sub-bacias de Itajubá, Santa Rita do Sapucaí e Paraguaçu, respectivamente.

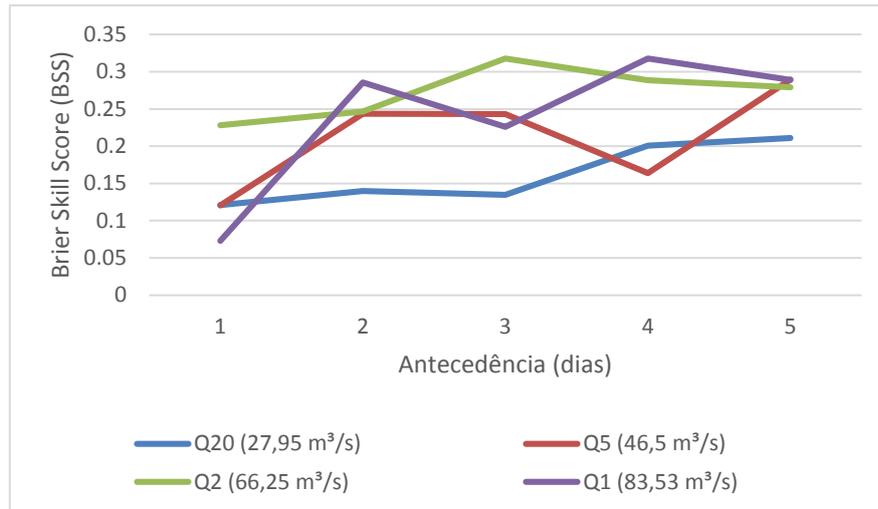


Figura 5.33: Resultado do Brier Skill Score para sub-bacia de Itajubá

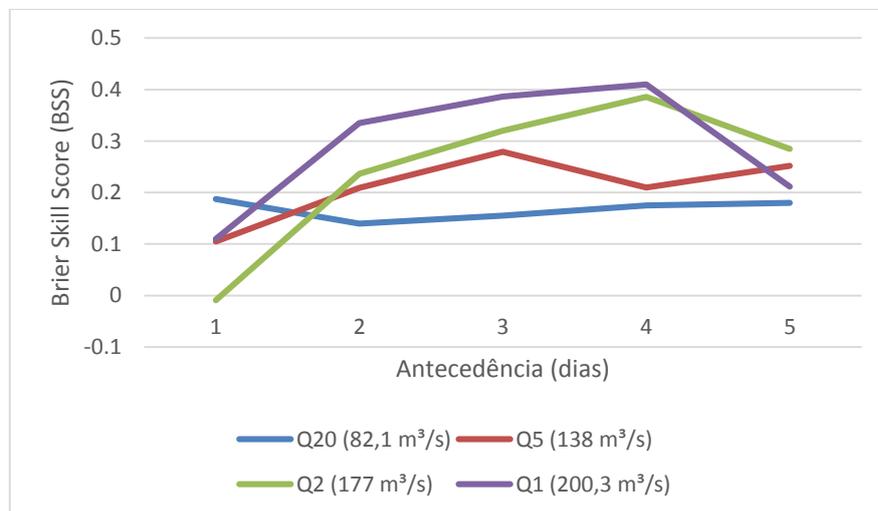


Figura 5.34: Resultado do Brier Skill Score para sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí

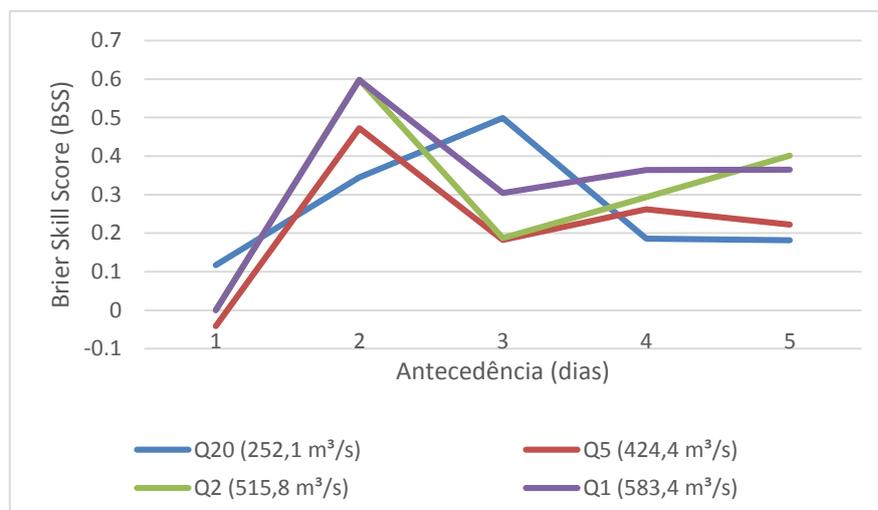


Figura 5.35: Resultado do Brier Skill Score para sub-bacia de Paraguaçu

Na Figura 5.33, é possível perceber que todos os resultados são positivos, o que indica melhor destreza da previsão principal em relação a previsão de referência. Para a previsão com antecedência de 1 dia, o BSS ficou acima de 0,22 para o limite de Q2%, para os limites de Q5% e Q20% o BSS foi de aproximadamente 0,12 e o seu menor valor foi para a vazão de Q1%, atingindo um valor de 0,07. Na mesma figura, para 5 dias de antecedência observa-se que os valores de BSS são muito próximos para os limites de vazão Q1%, Q2% e Q5%, chegando a valores próximos de 0,28.

Para Santa Rita do Sapucaí (Figura 5.34), foi detectado para o horizonte de 1 dia de antecedência que a previsão de referência obteve melhor desempenho para detectar o limiar de Q2% do que a previsão principal, pois o BSS resultou em valor negativo. Exceto este caso, os demais limiares apresentaram desempenho superior com a previsão principal, visto que os valores de BSS foram positivos para todas as antecedências.

Por fim, para a sub-bacia de Paraguaçu (Figura 5.35), assim como para Santa Rita do Sapucaí, apenas um BSS resultou em valor negativo, sendo de -0,04 para o limiar de Q5%, considerando o horizonte de 1 dia de antecedência. Isso mostra melhor destreza da previsão de referência para detectar o limiar de Q5% do que a previsão principal. Para esta sub-bacia também foi observado para 1 dia de antecedência valores de BSS nulos para a detecção dos limiares de Q2% e Q1%, o que mostra que os resultados são iguais com ambos os tipos de previsão. Porém no restante dos casos, os resultados foram positivos, confirmando o melhor desempenho da previsão principal em relação a previsão de referência.

De acordo com os resultados de BSS, pode-se considerar, de modo geral, que a previsão principal, ou seja, a previsão utilizando todos os membros, tem melhor desempenho para detectar os limites de vazão estipulados do que a previsão de referência. Com isso, pode-se concluir que, neste caso, é melhor utilizar todos os membros do conjunto do que a média destes membros.

6. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo principal a avaliação da aplicabilidade do modelo MGB-IPH à bacia do rio Sapucaí para a previsão de vazão de curto prazo, com o foco no auxílio ao alerta de inundações nos municípios de Itajubá e Santa Rita do Sapucaí, que são cidades que frequentemente sofrem com estes eventos.

O MGB-IPH, que é um modelo hidrológico conceitual e distribuído, necessita de vários dados de entrada, os quais influenciam no resultado do ajuste e previsão, então, a qualidade e quantidade destes dados são fundamentais para obtenção de um bom resultado. A bacia de estudo está localizada em uma região muito montanhosa, o que dificulta principalmente a previsão atmosférica e, conseqüentemente, a previsão de vazão. Outro problema encontrado foi a carência de dados climatológicos, sendo necessária a utilização dos dados das normais climatológicas para suprir a necessidade do modelo de dados como: temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar ou insolação. Para completar, foram utilizadas os dados de precipitação disponíveis em estações do INMET.

Os dados físicos utilizados foram considerados satisfatórios, porque possibilitaram gerar os mapas de pedologia e uso e ocupação do solo de maneira adequada às necessidades do modelo MGB-IPH. Porém, é importante ressaltar que o detalhamento do mapa de solos pode contribuir para melhorar os resultados do ajuste do modelo.

Na aplicação do modelo hidrológico, a bacia do rio Sapucaí foi discretizada em 229 minibacias. Como os dados disponíveis estavam em intervalos diários, todo o procedimento foi feito considerando esse intervalo de tempo. A calibração do modelo foi feita nas sub-bacias, as quais foram definidas utilizando os postos fluviométricos como exutório. De modo geral, foram obtidos valores significativos na etapa de modelagem e calibração, com Coeficientes de Eficiência de *Nash-Sutcliffe* maior do que 0,70 para a maioria das sub-bacias, sendo que para a sub-bacia de Itajubá o Coeficiente foi de aproximadamente 0,77 e para Santa Rita do Sapucaí 0,67, que são valores considerados satisfatórios para modelagem hidrológica. Porém, o modelo teve dificuldade de ajustar as bacias com menor área de drenagem, além de não conseguir representar adequadamente os picos de vazão, que é de grande importância em um estudo sobre inundação

Para gerar as previsões de vazão, a variável precipitação foi alimentada pela conjunto de previsões meteorológicas, obtidas com o modelo ETA, operado pelo CPTEC/INPE. A princípio, com a análise visual dos hidrogramas, foi observado que o modelo conseguiu

representar melhor com apenas um dia de antecedência e, os resultados foram piorando com o aumento da antecedência da previsão. Com as análises estatísticas, essa análise visual foi confirmada, pois os tanto o EMA quanto o EMR aumentaram com aumento do horizonte da previsão. O EMR apresentou valores relativamente altos, sendo de aproximadamente 49% para um dia de antecedência para a sub-bacia de Itajubá e de 37% para Santa Rita do Sapucaí, considerando a mesma antecedência. A partir de dois dias de antecedência o EMR foi aumentando e chegou a mais de 60% para as duas sub-bacias citadas anteriormente. Apesar do EMR ser alto para essas duas sub-bacias, considera-se que o resultado foi aceitável por se tratar da previsão de uma região de difícil modelagem. Porém, para a sub-bacia de Paraguaçu, os resultados foram melhores, obtendo resultados satisfatórios com até dois dias de antecedência, visto que o EMR foi de 12% para o primeiro dia de antecedência e de 24% para o segundo dia. Mas, acredita-se que os resultados para esta sub-bacia foi melhor porque ela é a sub-bacia com a maior área de drenagem.

Com a análise do BS verificou-se a tendência de melhores resultados para limites maiores de vazão e o aumento deste índice com o aumento da antecedência da previsão, o que já era esperado, devido ao aumento das incertezas. Além disso, foi possível observar, que os resultados foram melhores para a sub-bacia de Paraguaçu, o que pode estar relacionado com o fato dela ter a maior área de drenagem. De modo geral, o resultado foi considerado satisfatório para região de estudo, pois os valores estavam próximos a zero.

Além do BS, também foi utilizado o BSS, para realizar a comparação entre o desempenho da previsão utilizando todos os membros e a previsão utilizando a média do conjunto de membros. Como a grande maioria dos resultados foram acima de zero, pode-se afirmar que, neste caso, a previsão utilizando todos os membros tem desempenho superior quando comparada a previsão utilizando a média dos membros.

A previsão de vazão é um processo complexo e que depende de diversos fatores, que influenciam no resultado final. A qualidade dos dados disponíveis é fundamental para obter bons resultados. Então, alguns fatores que podem ter afetado o resultado da previsão são: as falhas na série de vazão observados, principalmente nos períodos de inundação, no qual os postos fluviométricos ficaram submersos e, com isso, sem medição; a localização da bacia do Sapucaí, que está em uma região de topografia acentuada, o que dificulta a previsão atmosférica, podendo afetar diretamente o resultado da previsão de precipitação, conseqüentemente a previsão de vazão e, por fim, o tempo de concentração menor do que um dia da bacia em estudo. Como os dados disponíveis estavam em intervalos diários, todo o processo foi feito usando este intervalo, mas, devido o tempo de concentração da bacia do rio

Sapucaí ser menor do que um dia, o ideal seria que as previsões fossem feitas em intervalos menores do que um dia. É importante ressaltar ainda, que para a sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí foi verificado a antecipação das cheias, o que pode ter sido causado devido as planícies de inundação desconsideradas pelo modelo, com isso o modelo previu que a água chegou mais cedo do que realmente aconteceu, pois a planície de inundação diminui a velocidade da água, o que não foi captado pelo modelo. Com todas as análises estatísticas realizadas, foi verificado que para Paraguaçu os resultados foram satisfatórios para até dois dias de antecedência, o que pode contribuir muito para o alerta de cheia da região. Para Itajubá e Santa Rita do Sapucaí, os resultados foram considerados aceitáveis para apenas um dia de antecedência e, apesar de terem erros mais elevados, o resultado foi considerado aceitável por ser uma região de difícil modelagem.

Por fim, conclui-se que a aplicação do modelo MGB-IPH à bacia em estudo é possível, e este tipo de previsão, utilizando a previsão por conjunto é um método promissor, mas ainda necessita de melhorias, devido aos vários fatores, citados anteriormente, que interferiram no resultado. É importante a continuação deste estudo, pois a aplicação deste método proporciona uma antecedência maior da previsão, contribuindo para a emissão do alerta de cheia com antecedência e, com isso, diminuir o impacto das inundações sobre a população. Então, a sugestão para pesquisas posteriores é o refinamento do ajuste do modelo à bacia, pois ele interfere muito no resultado final; a utilização de dados de entrada em intervalos sub-diários, já que o tempo de concentração da bacia é menor do que um dia; melhorar a representação das planícies de inundação no modelo hidrológico e, por último, analisar estatisticamente as previsões de precipitação, para poder verificar se é a previsão de precipitação que está influenciando no resultado do modelo hidrológico ou se os erros encontrados foram provenientes do próprio modelo hidrológico.

REFERÊNCIAS

ALFIERI, L.; PAPPENBERGER, F.; WETTERHALL, F.; HAIDEN, T.; RICHARDSON, D.; SALAMON, P. Evaluation of ensemble streamflow predictions in Europe, **Journal of Hydrology**, v. 517, p. 913-922, ISSN 0022-1694, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.035>.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R. de.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 1, p. 69-76, 2013. Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br/revista/v17n01/v17n01a10.pdf>>. Acesso em: 23 maio 2016.

ANDREOLLI, I. **Previsão de vazão em tempo real no rio Uruguai com base na previsão meteorológica**. 2003. 182 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2003.

BAO, H.-J.; ZHAO, L.-N., HE, Y.; LI, Z.-J.; WETTERHALL, F.; CLOKE, H. L.; PAPPENBERGER, F.; MANFUL, D. Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinjiang model for flood forecast. **Advances in Geosciences**, v. 29, p. 61–67, 2011.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria Geral. **Projeto RADAMBRASIL: Levantamento de Recursos Naturais: Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação e Uso Potencial da Terra**. Folha SF. 23/24, v. 32. Rio de Janeiro/Vitória, 1983. 779p.

BUSTAMANTE, J. F. **Estudo da previsibilidade de eventos severos sobre o sudeste da América do Sul com ênfase na região da Serra do Mar usando previsão de curto prazo por ensemble**. 2009. 218 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2009.

CALVETTI, L. **Previsão hidrometeorológica probabilística na bacia do alto Iguaçu – PR com os modelos WRF e TopModel**. 2011. 141 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. 2001. 194 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Previsão sazonal de vazão na bacia do rio Uruguai 1: ajuste e verificação do modelo hidrológico distribuído. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vol. 10, n. 4, p. 43-59, 2005. Doi:10.21168/rbrh.v10n4.p43-59

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C. da.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall - runoff modeling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1623/hysj.52.5.878#aHR0cDovL3d3dy50YW5kZm9ubGluZS5jb20vZG9pL3BkZi8xMC4xNjZlZL2h5c2ouNTIuNS44NzhAQEAw>>. Acesso em: 20 maio 2016.

COLLISCHONN, W.; MELLER, A.; FAN, F.; MOREIRA, D. S.; DIAS, P. L. S.; BUARQUE, D.; BRAVO, J. M. Short-term Ensemble Flood Forecasting Experiments in Brazil. **Geophysical Research Abstracts**, v. 15, p. 119-132, 2013.

COUTINHO, M. M. **Previsão por conjuntos utilizando perturbações baseadas em componentes principais**. 1999. 136 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 1999.

CUNHA, L. K. da. **Sistemas avançados de previsão hidrológica e operação hidráulica em tempo real**. 2004. 259 p. Dissertação (Mestrado Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2004.

EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DO ESTADO DE MINAS GERAIS (EMATER). **Fundamentos de Solo**. Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <<http://www.emater.mg.gov.br/doc/intranet/upload/livrariavirtual/cartilhafundamentossolos.pdf>>. Acesso em 10 ago. 2016.

FAN, F. M. **Previsão por conjunto de vazões afluentes a reservatórios em grandes bacias hidrográficas brasileiras**. 2015. 424 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2015.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 243 – 254, 2014. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/170c7ff9bc41f7f845e3bd393b13e7a9_f87a7958332fa277d40514f40c46809a.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2016.

FERRIER, B. S.; LIN, Y.; BLACK, T.; ROGERS, E.; DIMEGO, G. Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta Model. In: CONFERENCE ON NUMERICAL WEATHER PREDICTION, 15, 2002, San Antonio, Texas. **Proceedings...** Massachusetts: American Meteorological Society, 2002. p. 280-283.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2015. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=313240>>. Acesso em 04 de nov. 2015.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Sapucaí**. Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <http://igam.mg.gov.br/images/stories/planos_diretores_BH/sapucaí.pdf>. Acesso em 03 nov. 2015.

JANJIC, Z. I. The step-mountain Eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 5, p. 927-945, 1994. DOI: [dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2). Acesso em 02 abr. 2017.

KAIN, J. S. The Kain-Fritsch convective parametrization: an update. **Journal of Applied Meteorology**, v. 43, n. 1, p. 165-170, 2004. DOI: [dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2). Acesso em 02 abr. 2017.

MARINHO FILHO, G. M.; ANDRADE, R. S.; ZUKOWSKI JUNIOR, J. C. MAGALHÃES FILHO, L. N. L. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012. Disponível em: <http://www.revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Rbca/article/view/268/761>>. Acesso em 25 set. 2016.

MELLER, A. **Previsão de cheias por conjunto em curto prazo**. 2012. 224 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2012.

MENDES, J. M. M. **Previsão de alerta de cheias em bacias regularizadas: Aplicação ao caso de uma bacia portuguesa**. 2017. 291 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto. 2017.

OLIVEIRA, V. G. de.; LIMA, C. H. R. Previsões multiescala de vazões para o sistema hidrelétrico brasileiro utilizando ponderação bayesiana de modelos (BMA). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 618 – 635, 2016. DOI: [dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011616032](https://doi.org/10.1590/2318-0331.011616032). Acesso em 02 jun. 2017.

PAIVA, R. C. D. de.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M. P.; FRAPPART, F.; CALMANT, S.; MENDES, C. A. B. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling 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/epdf>>. Acesso em: 23 maio 2016.

PAPPENBERGER, F.; BARTHOLMES, J.; THIELEN, J.; CLOKE, H. L.; BUIZZA, R.; DE ROO, A. New dimensions in early flood warning across the globe using grand-ensemble weather predictions, **Geophysical Research Letters**, v. 35, 2008, doi:10.1029/2008GL033837.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; ALLASIA, D. Data assimilation in a large-scale distributed hydrological model for medium-range flow forecasts. Quantification and Reduction of Predictive Uncertainty for Sustainable Water Resources Management. In: **Proceedings of Symposium HS2004 at IUGG2007**, Perugia, 2007. p. 471-478.

PINHEIRO, M.V. **Avaliação técnica e histórica das enchentes em Itajubá – MG**. 2005. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2005.

PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 888 – 904, 2015. Disponível em: https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/d1794a9de01a2cda0ade3e472de558fb_544aa821f14776ee2092f3dd967d8aeb.pdf>. Acesso em: 20 maio 2015.

RENNER, M.; WERNER, M.; RADEMACHER, S.; SPROKKEREEF, E. Verification of ensemble flow forecasts for the River Rhine. **Journal of Hydrology**, v. 376, p. 463–475, 2009. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.07.059.

ROULIN, E.; VANNITSEN, S. Skill of medium-range hydrological ensemble predictions. **Journal of Hydrometeorology**, v. 6, p. 729-744, 2005.

SANTOS, L. L. dos. Modelos hidráulicos-hidrológicos: conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 2, n. 3, p. 01-19, 2009. Disponível em: <<http://www.revista.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/view/50/58>>. Acesso em: 20 maio 2016.

SARLAS, T. L. B. Elaboração de manchas de inundação para o município de Santa Rita do Sapucaí/MG, utilizando SIG. 2010. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2010.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 05 – 18, 2005. DOI: 10.21168/rbrh.v10n4.p5-18. Acesso em: 20 maio 2015.

SHELLEKENS, J.; WEERTS, A.H.; MOORE, R.J.; PIERCE, C.E.; HILDON, S. The use of MOGREPS ensemble rainfall forecasts in operational flood forecasting systems across England and wales. **Advances in Geosciences**, v. 29, p. 77–84, 2011.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (SEMAD). **Atlas de vulnerabilidade a inundações**. Belo Horizonte, 2013. p. 34.

SILVA, B. C. da.; **Previsão hidroclimática de vazão para a bacia do rio São Francisco**. 2005. 280 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2005.

SILVA, B. C. da.; TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W. Previsão de Vazão com Modelos Hidroclimáticos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 11, n. 3, p. 15 – 29, 2006. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/9d3b9b8ee947ff677415600945b8c442_9ee64c442591d533308a187c5ad43826.pdf>. Acesso em: 20 maio 2016.

SILVEIRA, C. S.; ARAUJO, A.; COUTINHO, M. M.; SOUZA FILHO, F. A.; VASCONCELOS JUNIOR, F. C.; NORONHA, A. W. Verificação das previsões de tempo para precipitação usando ensemble regional para o estado do Ceará em 2009. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v.26, n. 4, p. 609-618, 2011. DOI: dx.doi.org/10.1590/S0102-7786201100040001. Acesso em 19 de março de 2017.

SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; CHOU, S. C. Ensemble flood forecasting based on operational forecasts of the regional Eta EPS in the Taquari-Antas basin.

Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 21, p. 587-602, 2016. DOI: [dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011616004](https://doi.org/10.1590/2318-0331.011616004). Acesso em: 18 abril 2017.

SIQUEIRA, V. A. **Previsão de cheias por conjunto em curto a médio prazo: bacia do Taquari-Antas/RS**. 2015. 168 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2015.

TUCCI, C.E.M.; COLLISCHONN, W. Previsão de Vazão. In: TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. (Orgs.) **Clima e Recursos Hídricos no Brasil**. Porto Alegre: ABRH, p.281-348, nov. 2003.

VELÁZQUEZ, J. A.; ANCTIL, F.; PERRIN, C. Performance and reliability of multimodel hydrological ensemble simulations based on seventeen lumped models and a thousand catchments. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 14, p. 2303-2317, 2010. doi:10.5194/hess-14-2303-2010.

VIEIRA JUNIOR, P. A.; NETO DOURADO, D.; CHOU, S. C.; MARTIN, T. N. Previsões meteorológicas do Modelo Eta para subsidiar o uso de modelos de previsão agrícola no Centro-Sul do Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 2, p. 412-420, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v39n2/a76cr134.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

YE, J.; SHAO, Y.; LI, Z. Flood forecasting based on TIGGE precipitation ensemble forecast. **Advances in Meteorology**, v. 2016, p. 1-9, 2016. Doi: 10.1155/2016/9129734.

ZHAO, T.; D. YANG; X. CAI; J. ZHAO; H. Wang. Identifying effective forecast horizon for real-time reservoir operation under a limited inflow forecast, **Water Resources Research.**, v. 48, W01540, 2012. doi:10.1029/2011WR010623.

ZHAO, Q.; CARR, F. H. A prognostic cloud scheme for operational NWP models. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 8, p. 193-195, 1997. DOI: [dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<1931:APCSFO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<1931:APCSFO>2.0.CO;2). Acesso em: 02 maio 2017.

Apêndice A: Parâmetros Calibráveis da Bacia do Rio Sapucaí

✓ Sub-bacia 1

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Pastagem A	3493.5	0.38	0.7	17	0.5	0	0.1
Mata A	4658	0.08	0.94	21	0.5	0	0.1
Pastagem B	2096.1	0.95	0.47	12	0.5	0	0.1
Mata B	3493.5	0.38	0.7	14	0.5	0	0.1
Pastagem C	232.9	1.9	0.23	8	0.5	0	0.1
Mata C	465.8	1.14	0.52	10	0.5	0	0.1
Urbano	232.9	3.81	0.23	8	0.5	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0.1
CS	29.3						
CI	152.6						
CB	3958.6						
QB_M3/SKM2	0.03						

✓ Sub-bacia 2

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Pastagem A	2249.8	0.14	0.2	3.6	0.5	0	0.1
Mata A	2999.8	0.03	0.27	4.49	0.5	0	0.1
Pastagem B	1349.9	0.35	0.13	2.7	0.5	0	0.1
Mata B	2249.8	0.14	0.2	3.15	0.5	0	0.1
Pastagem C	150	0.7	0.07	1.8	0.5	0	0.1
Mata C	300	0.42	0.15	2.25	0.5	0	0.1
Urbano	150	1.41	0.07	1.8	0.5	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0.1
CS	54.79						
CI	116.28						
CB	2360						
QB_M3/SKM2	0.03						

✓ Sub-bacia 3

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Pastagem A	643.4	0.48	0.99	17	0.5	0	0.1
Mata A	857.9	0.1	1.34	22	0.5	0	0.1
Pastagem B	386.1	1.21	0.64	13	0.5	0	0.1
Mata B	643.4	0.48	0.99	15	0.5	0	0.1
Pastagem C	42.9	2.42	0.35	8	0.5	0	0.1
Mata C	85.8	1.45	0.74	11	0.5	0	0.1
Urbano	42.9	4.48	0.35	8	0.5	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0.1
CS	32.05						
CI	213.72						
CB	2731						
QB_M3/SKM2	0.03						

✓ Sub-bacia 4

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Pastagem A	707.08	0.52	6.6	79.98	0.5	0	0.1
Mata A	943.8	0.11	8.92	103.5	0.5	0	0.1
Pastagem B	424.8	1.32	4.27	61.16	0.5	0	0.1
Mata B	707.8	0.52	6.6	70.57	0.5	0	0.1
Pastagem C	47.1	2.64	2.33	37.63	0.5	0	0.1
Mata C	94.4	1.58	4.92	51.75	0.5	0	0.1
Urbano	47.1	4.88	2.33	37.63	0.5	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0.1
CS	28.88						
CI	518.45						
CB	5439						
QB_M3/SKM2	0.01						

✓ Sub-bacia 5

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Pastagem A	637.1	1.56	13.2	105.97	0.5	0	0.1
Mata A	850.4	0.33	17.84	137.14	0.5	0	0.1
Pastagem B	382.7	3.96	8.54	81.04	0.5	0	0.1
Mata B	637.7	1.56	13.2	93.51	0.5	0	0.1
Pastagem C	42.4	7.92	4.66	49.86	0.5	0	0.1
Mata C	85.1	4.74	9.84	68.57	0.5	0	0.1
Urbano	42.4 1	4.64	4.66	49.86	0.5	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0.1
CS	53.95						
CI	311.07						
CB	4061						
QB_M3/SKM2	0.01						

✓ Sub-bacia 6

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Pastagem A	707.08	0.52	6.6	79.98	0.5	0	0.1
Mata A	943.8	0.11	8.92	103.5	0.5	0	0.1
Pastagem B	424.8	1.32	4.27	61.16	0.5	0	0.1
Mata B	707.8	0.52	6.6	70.57	0.5	0	0.1
Pastagem C	47.1	2.64	2.33	37.63	0.5	0	0.1
Mata C	94.4	1.58	4.92	51.75	0.5	0	0.1
Urbano	47.1	4.88	2.33	37.63	0.5	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0.1
CS	28.88						
CI	518.45						
CB	4054						
QB_M3/SKM2	0.01						

✓ Sub-bacia 7

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Pastagem A	1301.9	0.35	3.54	133.24	0.5	0	0.1
Mata A	1735.9	0.07	4.77	166.19	0.5	0	0.1
Pastagem B	781.1	0.85	2.3	99.96	0.5	0	0.1
Mata B	1301.9	0.35	3.54	116.6	0.5	0	0.1
Pastagem C	86.8	1.71	1.24	66.62	0.5	0	0.1
Mata C	173.6	1.03	2.65	83.26	0.5	0	0.1
Urbano	86.8	3.44	1.24	66.62	0.5	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0.1
CS	73.14						
CI	255.58						
CB	858						
QB_M3/SKM2	0.01						

✓ Sub-bacia 8

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Pastagem A	570.6	1.03	7.91	117.81	0.5	0	0.1
Mata A	761.6	0.22	10.7	152.46	0.5	0	0.1
Pastagem B	342.8	2.61	5.12	90.09	0.5	0	0.1
Mata B	571.2	1.03	7.91	103.95	0.5	0	0.1
Pastagem C	38	5.23	2.79	55.43	0.5	0	0.1
Mata C	76.2	3.13	5.9	76.23	0.5	0	0.1
Urbano	38	9.67	2.79	55.43	0.5	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0.1
CS	30.87						
CI	158.65						
CB	4706						
QB_M3/SKM2	0.01						

✓ Sub-bacia 9

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Pastagem A	2249.8	0.14	0.2	3.6	0.5	0	0.1
Mata A	2999.8	0.03	0.27	4.49	0.5	0	0.1
Pastagem B	1349.9	0.35	0.13	2.7	0.5	0	0.1
Mata B	2249.8	0.14	0.2	3.15	0.5	0	0.1
Pastagem C	150	0.7	0.07	1.8	0.5	0	0.1
Mata C	300	0.42	0.15	2.25	0.5	0	0.1
Urbano	150	1.41	0.07	1.8	0.5	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0.1
CS	54.79						
CI	116.28						
CB	1872						
QB_M3/SKM2	0.03						

✓ Sub-bacia 10

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Pastagem A	911.2	0.65	0.98	13.56	0.5	0	0.1
Mata A	1214.9	0.14	1.32	16.91	0.5	0	0.1
Pastagem B	546.7	1.62	0.64	10.17	0.5	0	0.1
Mata B	911.2	0.65	0.98	11.87	0.5	0	0.1
Pastagem C	60.8	3.23	0.34	6.78	0.5	0	0.1
Mata C	121.5	1.94	0.73	8.48	0.5	0	0.1
Urbano	60.8	6.51	0.34	6.78	0.5	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0.1
CS	101.96						
CI	221.4						
CB	3401						
QB_M3/SKM2	0.03						

✓ Sub-bacia 11

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Pastagem A	707.08	0.52	6.6	79.98	0.5	0	0.1
Mata A	943.8	0.11	8.92	103.5	0.5	0	0.1
Pastagem B	424.8	1.32	4.27	61.16	0.5	0	0.1
Mata B	707.8	0.52	6.6	70.57	0.5	0	0.1
Pastagem C	47.1	2.64	2.33	37.63	0.5	0	0.1
Mata C	94.4	1.58	4.92	51.75	0.5	0	0.1
Urbano	47.1	4.88	2.33	37.63	0.5	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0.1
CS	28.88						
CI	518.45						
CB	2844						
QB_M3/SKM2	0.01						

✓ Sub-bacia 12

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Pastagem A	871.1	0.64	4.69	69.58	0.5	0	0.1
Mata A	1162.8	0.14	6.34	90.05	0.5	0	0.1
Pastagem B	523.4	1.63	3.04	53.21	0.5	0	0.1
Mata B	872	0.64	4.69	61.4	0.5	0	0.1
Pastagem C	58	3.25	1.66	32.74	0.5	0	0.1
Mata C	116.3	1.95	3.5	45.02	0.5	0	0.1
Urbano	58	6.01	1.66	32.74	0.5	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0.1
CS	45.75						
CI	469.72						
CB	2739						
QB_M3/SKM2	0.01						

✓ Sub-bacia 13

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Pastagem A	567.1	1.02	13.16	116.21	0.5	0	0.1
Mata A	756.9	0.22	17.79	150.39	0.5	0	0.1
Pastagem B	340.7	2.59	8.51	88.87	0.5	0	0.1
Mata B	567.7	1.02	13.16	102.54	0.5	0	0.1
Pastagem C	37.8	5.18	4.65	54.68	0.5	0	0.1
Mata C	75.7	3.1	9.81	75.19	0.5	0	0.1
Urbano	37.8	9.57	4.65	54.68	0.5	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0.1
CS	57.38						
CI	200.12						
CB	4386						
QB_M3/SKM2	0.01						

✓ Sub-bacia 14

uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Pastagem A	707.08	0.52	6.6	79.98	0.5	0	0.1
Mata A	943.8	0.11	8.92	103.5	0.5	0	0.1
Pastagem B	424.8	1.32	4.27	61.16	0.5	0	0.1
Mata B	707.8	0.52	6.6	70.57	0.5	0	0.1
Pastagem C	47.1	2.64	2.33	37.63	0.5	0	0.1
Mata C	94.4	1.58	4.92	51.75	0.5	0	0.1
Urbano	47.1	4.88	2.33	37.63	0.5	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0.1
CS	28.88						
CI	518.45						
CB	1288						
QB_M3/SKM2	0.01						

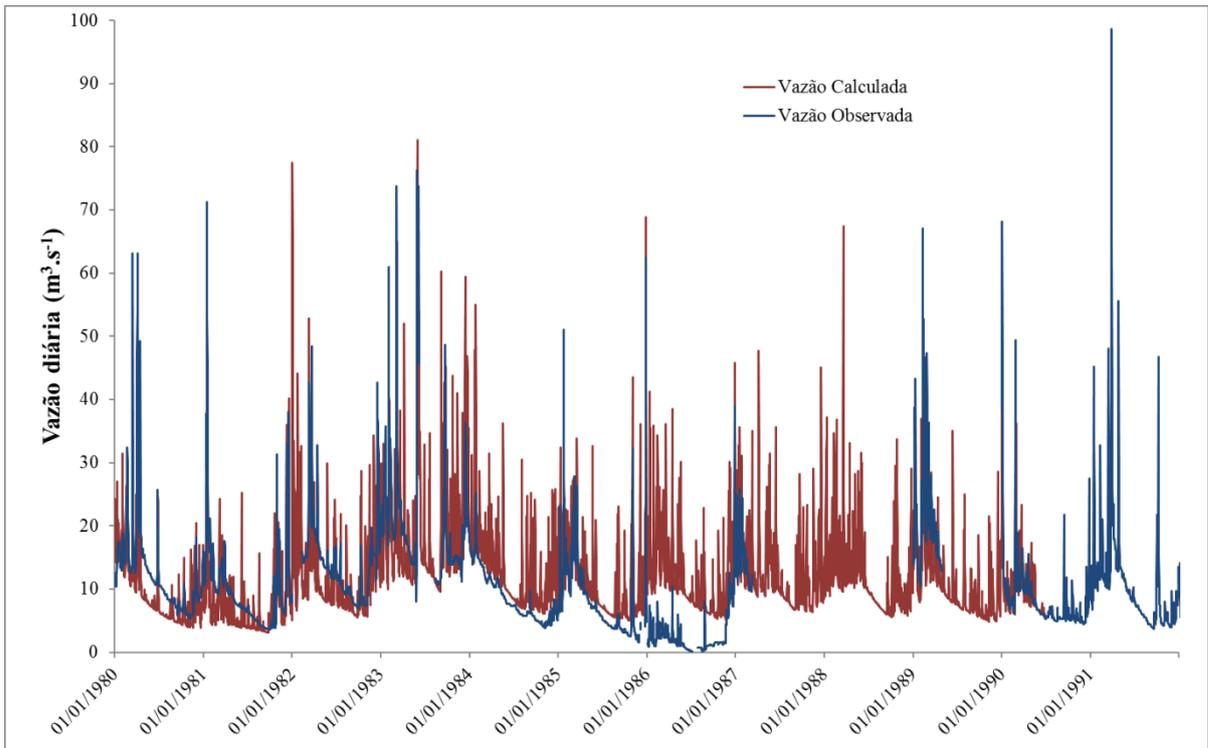
Apêndice B: Hidrogramas de Vazão Calculada x Vazão Observada

Figura B.1: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de São Bento do Sapucaí

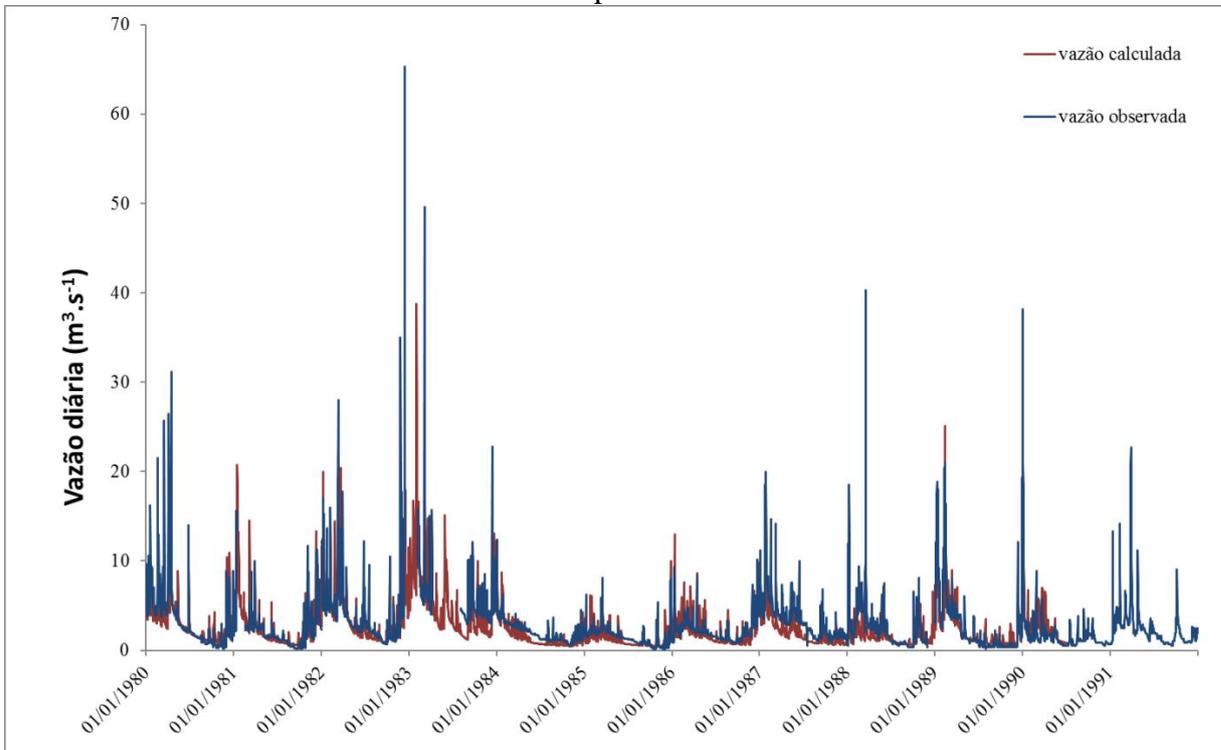


Figura B.2: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Cambuí

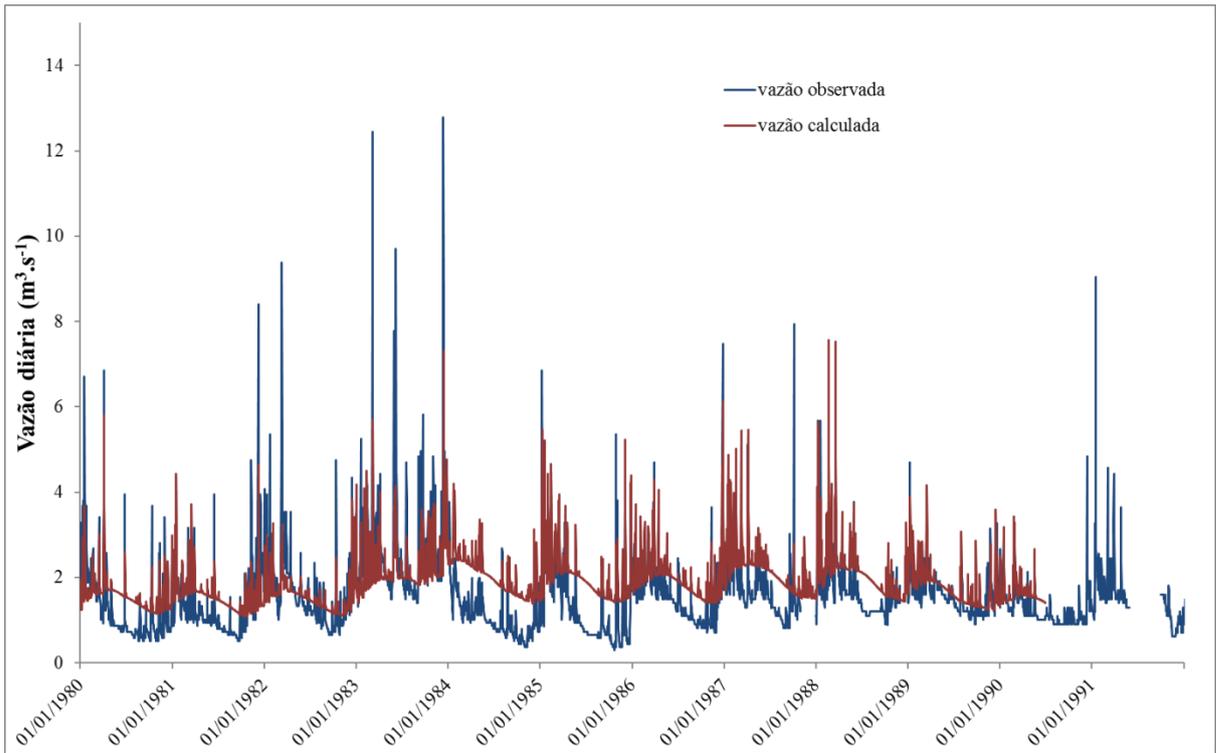


Figura B.3: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Delfim Moreira

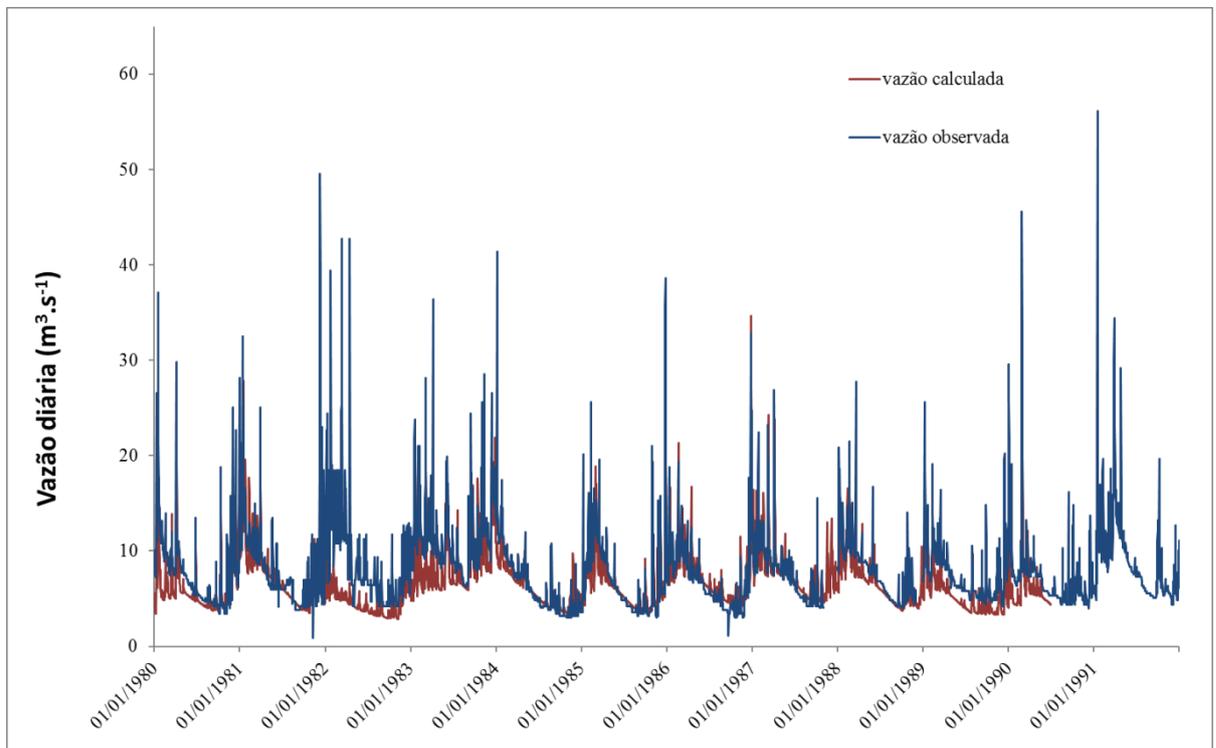


Figura B.4: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Bairro de Santa Cruz

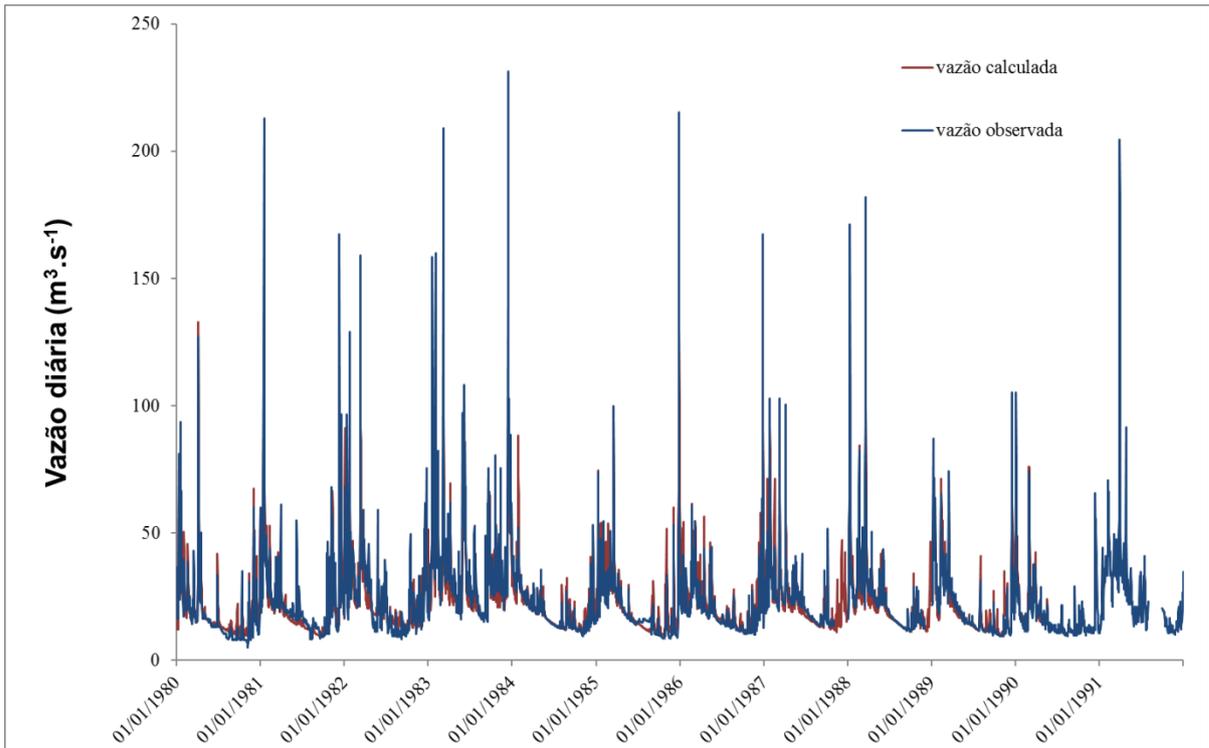


Figura B.5: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Itajubá

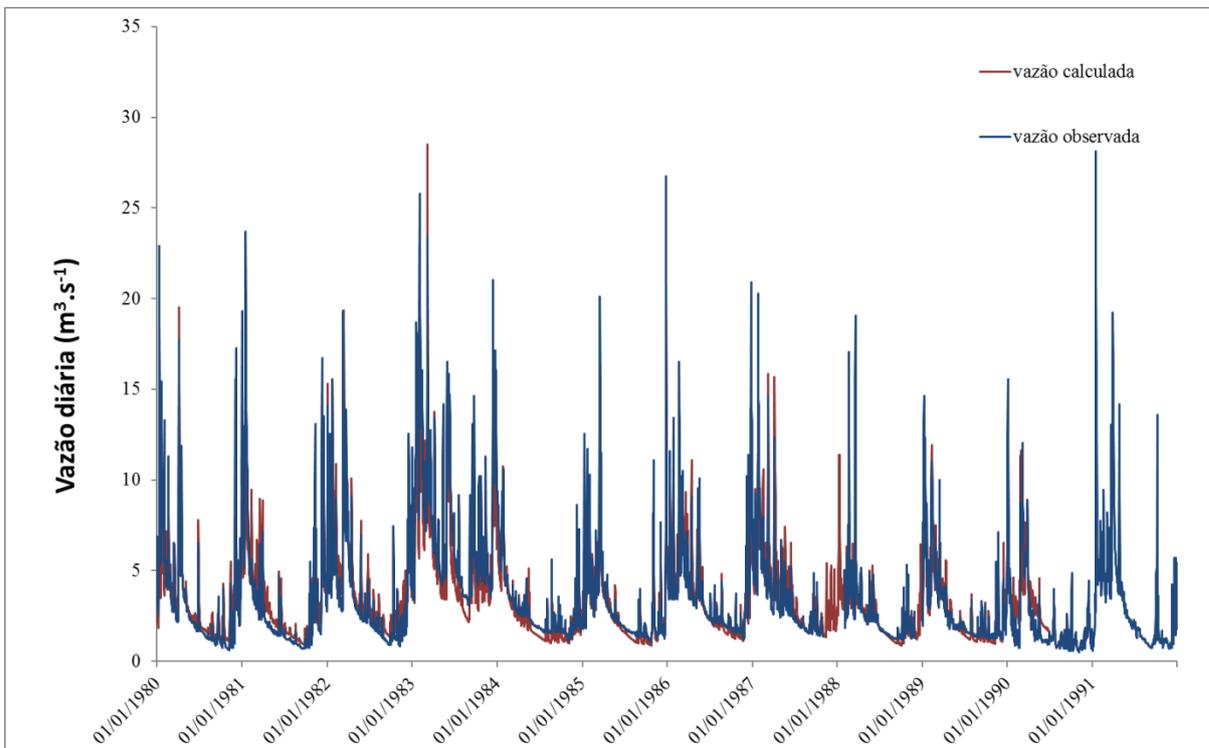


Figura B.6: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Brazópolis

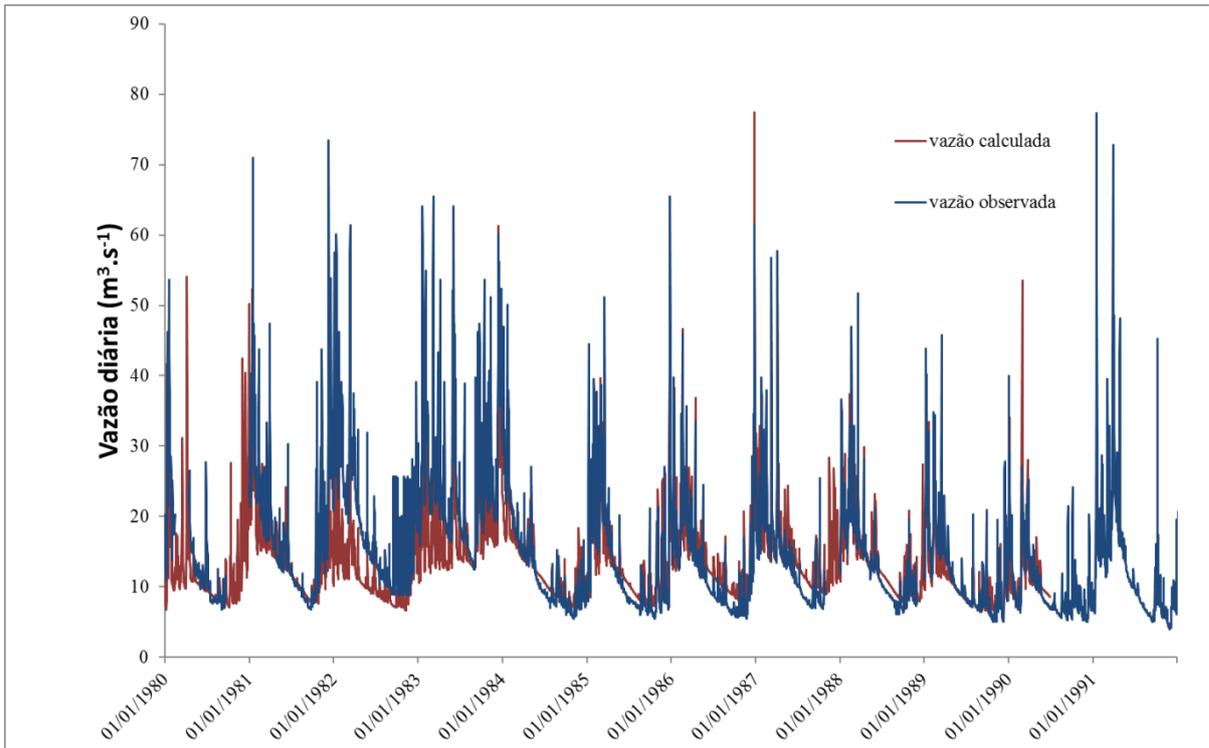


Figura B.7: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de São João de Itajubá

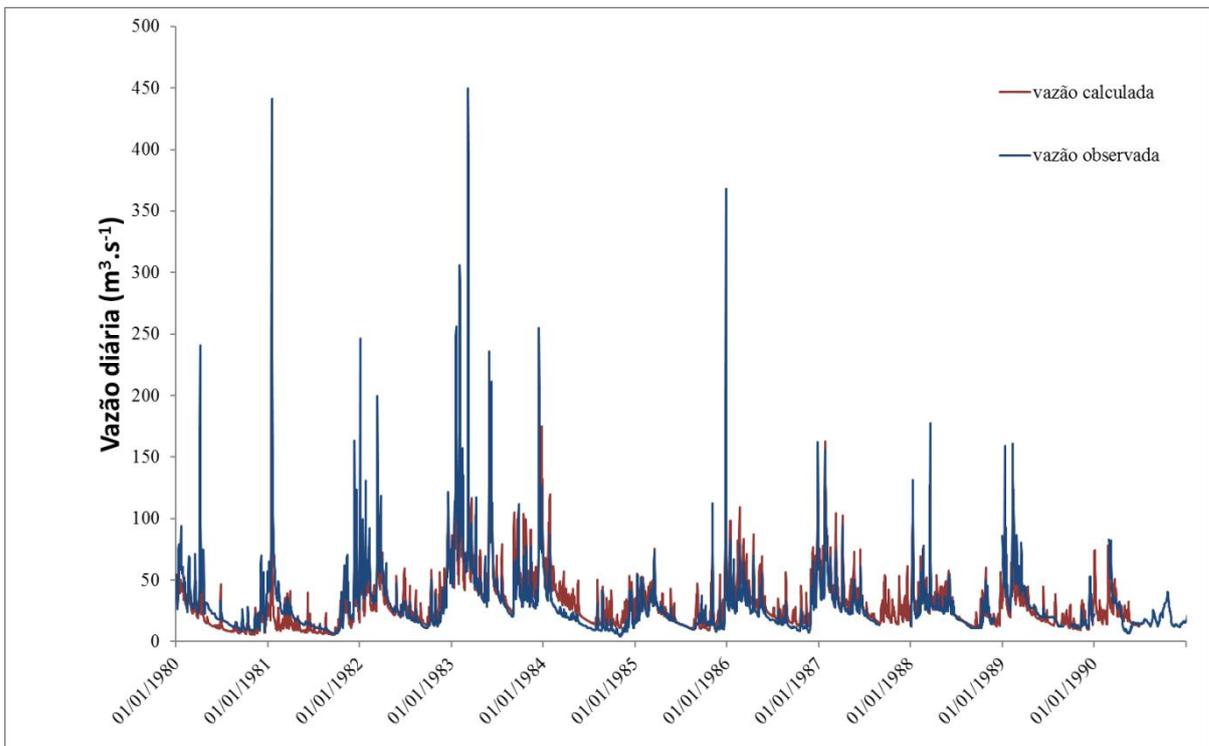


Figura B.8: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Conceição dos Ouros

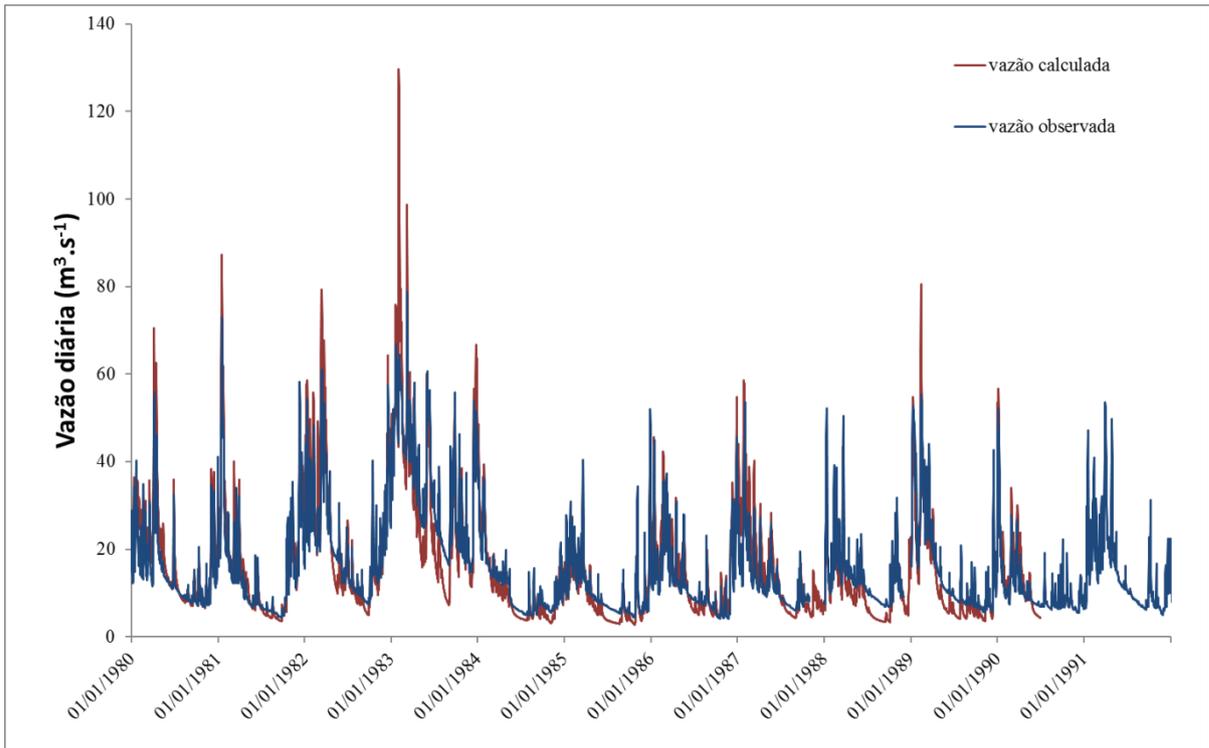


Figura B.9: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Ponte do Rodrigues

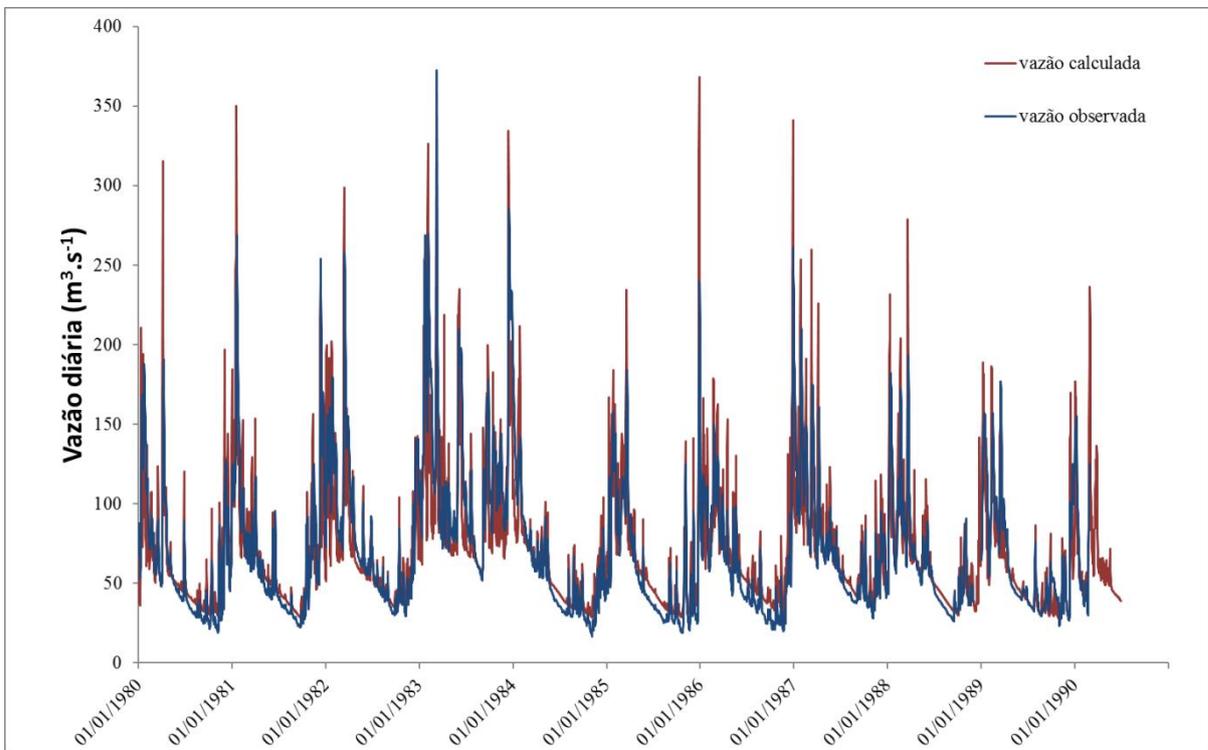


Figura B.10: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Santa Rita do Sapucaí

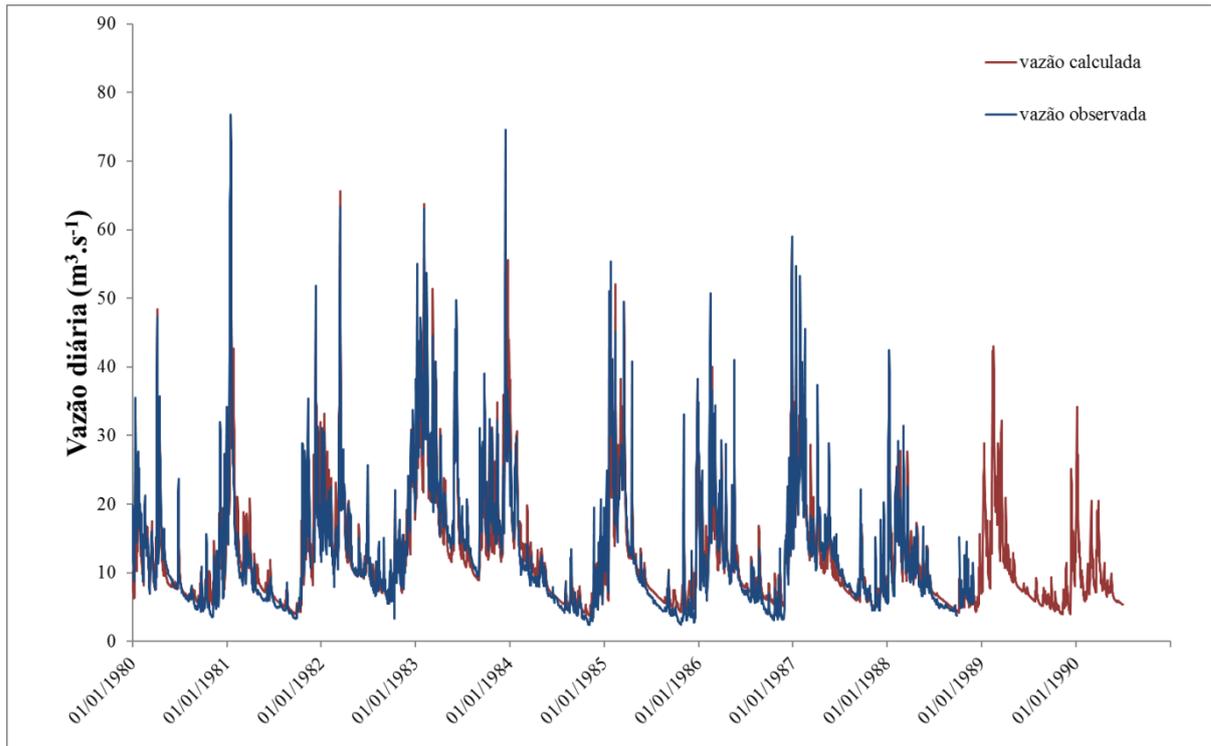


Figura B.11: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Vargem do Cervo

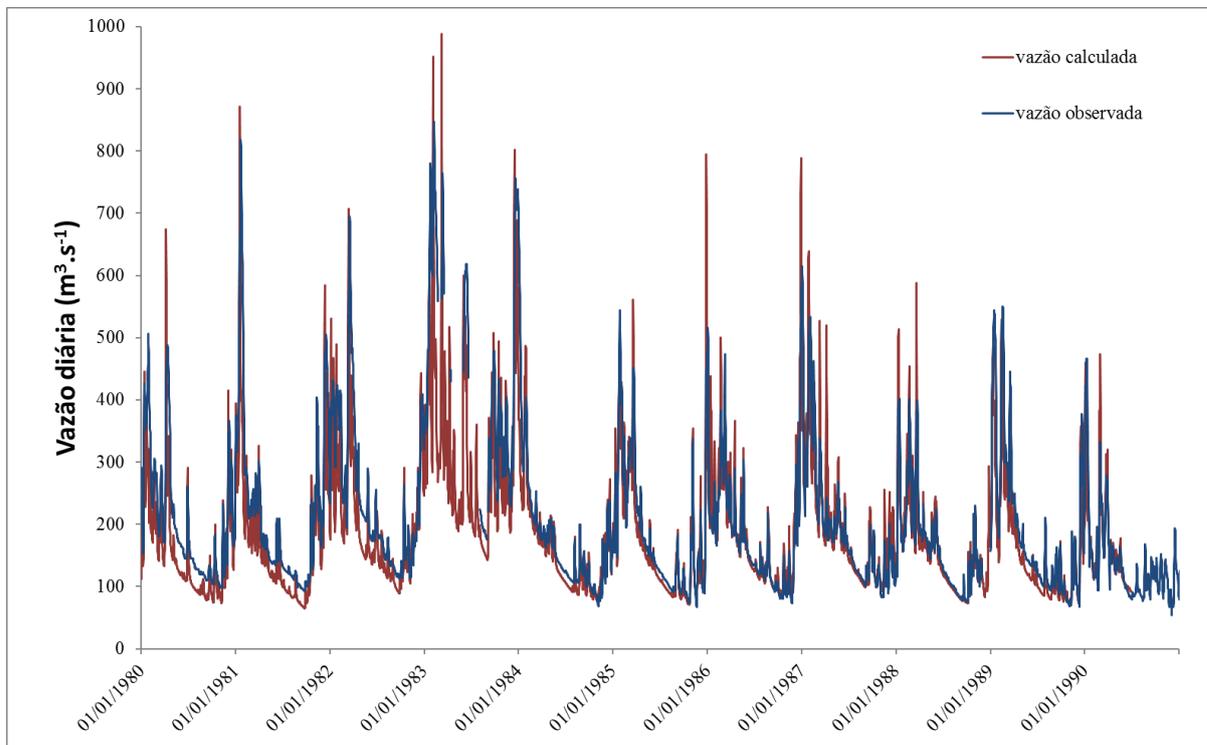


Figura B.12: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Careaçú

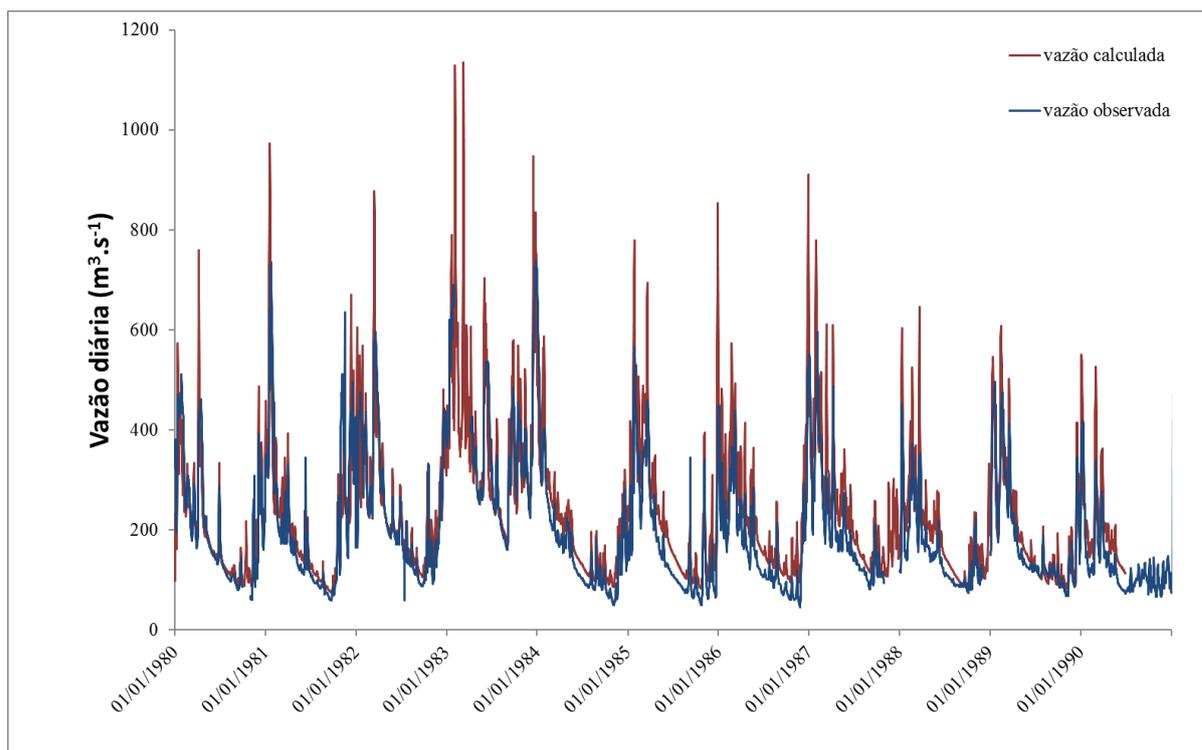


Figura B.13: Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de UHE Furnas Rio Sapucaí