



---

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

---

**FERNANDO ARTHUR DA SILVA OLINTO**

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES  
PARA LOCAIS SEM DADOS: ESTUDO DE CASO PARA A BACIA  
DO RIO IBICUÍ – RS**

Porto Alegre

2024

**FERNANDO ARTHUR DA SILVA OLINTO**

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES PARA LOCAIS  
SEM DADOS: ESTUDO DE CASO PARA A BACIA DO RIO IBICUÍ – RS**

Trabalho de conclusão apresentado ao curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan

Porto Alegre

2024

### CIP - Catalogação na Publicação

Olinto, Fernando Arthur da Silva  
COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES  
PARA LOCAIS SEM DADOS: ESTUDO DE CASO PARA A BACIA DO  
RIO IBICUÍ - RS / Fernando Arthur da Silva Olinto. --  
2024.  
99 f.  
Orientador: Fernando Mainardi Fan.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto  
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia  
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. modelagem hidrológica. 2. MGB-IPH. 3.  
regionalização de vazões. 4. bacia do rio Ibicuí. I.  
Fan, Fernando Mainardi, orient. II. Título.

FERNANDO ARTHUR DA SILVA OLINTO

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES PARA LOCAIS SEM  
DADOS: ESTUDO DE CASO PARA A BACIA DO RIO IBICUI – RS

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 15 de fevereiro de 2024 pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....  
Prof. Doutor Fernando Mainardi Fan - Orientador  
Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS

.....  
Mestra Camila Dalla Porta Mattiuzi  
Serviço Geológico do Brasil – GEHTE-PA

.....  
Doutor Mino Viana Sorribas  
Pós-doutorando no Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS

Conceito:.....

Dedico este trabalho a Deus, que me cumulou de bênçãos para que fosse possível dedicar-me a um curso de graduação, a meus pais, que sempre foram meu suporte e sustento terreno, e a todos que estiveram ao meu lado durante os anos dedicados à faculdade.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por haver me conduzido até hoje pelo Caminho da graça, que transforma nossas misérias em méritos que devemos unicamente ao seu Amor misericordioso.

Agradeço aos meus pais, Silvana e Denis, que foram o suporte físico e espiritual nos momentos conturbados e de alegria, por meio da dedicação sem medidas de amor a mim.

Agradeço ao Professor Fernando Mainardi Fan, orientador deste trabalho, que me foi atencioso em todos os momentos, trazendo-me o entendimento da função e a dedicação pela profissão de engenheiro ambiental.

Agradeço a minha namorada Maria Luiza, a quem confio as alegrias e dificuldades cotidianas, partilho a vida e desejo alcançar junto a ela a vida eterna.

Agradeço aos amigos que estiveram ao meu lado, compartilhando as riquezas e dificuldades dos momentos de amadurecimento e transição à vida adulta.

Agradeço as instituições CPRM e UFRGS, em que pude me dedicar e receber conhecimentos e vivências que levarei para a vida profissional e pessoal.

“Eu te louvo, Pai, Senhor do céu e da terra, porque escondeste essas coisas aos sábios e inteligentes, e as revelaste aos pequeninos. Sim, Pai, porque assim foi do teu agrado”

*Lucas 10,21*

## RESUMO

**OLINTO, FAS. Comparação de métodos para estimativa de vazões para locais sem dados: estudo de caso para a bacia do rio Ibicuí – RS. 2024. 99 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.**

Este trabalho busca compreender qual o método mais adequado para a estimativa de vazão em locais sem dados para a bacia do rio Ibicuí, no Rio Grande do Sul, em condições de vazão alta e de vazão baixa. Para isso, optou-se pela análise dos métodos de modelagem hidrológica, através do MGB-IPH, e de regionalização de vazões, por meio do método de vazão específica. A fim de realizar as análises, objetivou-se obter os valores de vazões de referência para vazões altas, vazão com tempo de retorno de 5 anos ( $Q_{TR5}$ ), e para vazões baixas, vazão com 90% de permanência ( $Q_{90\%}$ ). Utilizou-se um método de *split-sample* onde 2/3 das amostras são utilizadas no período de calibração, que contemplou os anos de 2006 a 2020, e 1/3 das amostras destinam-se a validação, utilizado o período de 1991 a 2005. Os resultados apontam que o método de regionalização apresentou melhor desempenho global do que a modelagem hidrológica pelo MGB-IPH, tanto em vazões altas, como em vazões baixas. Contudo, das 4 estações avaliadas, a modelagem hidrológica mostrou-se mais otimizada para uma estação para vazões baixas e em uma estação para vazões altas, demonstrando que os estudos hidrológicos demandam diferentes abordagens para sua compreensão integral.

Palavras-chave: modelagem hidrológica; MGB-IPH; regionalização de vazões; bacia do rio Ibicuí.

## ABSTRACT

This project aims to understand the most suitable method for estimating flow in locations without data for the Ibicuí River basin in Rio Grande do Sul, under both high and low flow conditions. For this purpose, the analysis focused on hydrological modeling methods using MGB-IPH and flow regionalization methods using the specific flow method. To conduct the analyses, the objective was to obtain reference flow values for high flows, represented by the 5-year return period flow ( $Q_{TR5}$ ), and for low flows, represented by the 90% exceedance flow ( $Q_{90\%}$ ). A split-sample method was employed, where  $2/3$  of the samples were used for calibration covering the years 2006 to 2020, and  $1/3$  of the samples were reserved for validation, covering the period from 1991 to 2005. The results indicate that the regionalization method demonstrated better overall performance than hydrological modeling using MGB-IPH, both for high and low flows. However, among the 4 evaluated stations, hydrological modeling proved to be more optimized for one station for low flows and for one station for high flows, demonstrating that hydrological studies require different approaches for comprehensive understanding.

Keywords: hydrological modeling; MGB-IPH; regionalization of flows; Ibicuí river basin.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bacia hidrográfica e seus componentes. ....	20
Figura 2 – Modelo numérico de terreno da bacia do rio Ibicuí. ....	22
Figura 3 – Estação fluviométrica convencional. ....	24
Figura 4 – Curva de permanência histórica para a estação 76750000 – Alegrete. ....	26
Figura 5 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Ibicuí. ....	34
Figura 6 – Mapa de unidades geológicas da bacia do Ibicuí - RS. ....	37
Figura 7 – Mapa de domínios hidrogeológicos dominantes para a bacia do Ibicuí – RS. ....	38
Figura 8 – Mapa de uso e cobertura do solo para a bacia do Ibicuí - RS. ....	39
Figura 9 – Mapa de solos da bacia do Ibicuí - RS. ....	40
Figura 10 – Gráfico e equação de relação área de drenagem – largura. ....	45
Figura 11 - Gráfico e equação de relação área de drenagem – profundidade média. ....	46
Figura 12 – Mapa das estações fluviométricas de calibração e validação. ....	50
Figura 13 – Gráfico de $Q_{90\%}$ obtido na calibração. ....	51
Figura 14 – Gráfico de $Q_{TR5}$ obtido na calibração. ....	52
Figura 15 – Hidrograma de calibração para a estação 76085000. ....	55
Figura 16 – Hidrograma de calibração para a estação 76100000. ....	55
Figura 17 – Hidrograma de calibração para a estação 76251000. ....	56
Figura 18 – Hidrograma de calibração para a estação 76310000. ....	56
Figura 19 – Hidrograma de calibração para a estação 76440000. ....	57
Figura 20 – Hidrograma de calibração para a estação 76500000. ....	57
Figura 21 – Hidrograma de calibração para a estação 76560000. ....	58
Figura 22 – Hidrograma de calibração para a estação 76650000. ....	58
Figura 23 – Hidrograma de calibração para a estação 76800000. ....	59
Figura 24 – Curva de permanência de calibração para a estação 76085000. ....	59
Figura 25 – Curva de permanência de calibração para a estação 76100000. ....	60
Figura 26 – Curva de permanência de calibração para a estação 76251000. ....	60
Figura 27 – Curva de permanência de calibração para a estação 76310000. ....	60
Figura 28 – Curva de permanência de calibração para a estação 76440000. ....	61
Figura 29 – Curva de permanência de calibração para a estação 76500000. ....	61
Figura 30 – Curva de permanência de calibração para a estação 76560000. ....	61
Figura 31 – Curva de permanência de calibração para a estação 76650000. ....	62
Figura 32 – Curva de permanência de calibração para a estação 76800000. ....	62

Figura 33 – Mapa com a classificação de valor de NSE para a calibração, segundo Moriasi et al. (2007). .....	63
Figura 34 – Mapa com a classificação de valor de PBIAS para a calibração, segundo Moriasi et al. (2007). .....	64
Figura 35 – Mapa de identificação da transferência de parâmetros entre sub-bacias. ....	65
Figura 36 – Hidrograma de validação para a estação 76300000.....	66
Figura 37 – Hidrograma de validação para a estação 76460000.....	66
Figura 38 – Hidrograma de validação para a estação 76742000.....	67
Figura 39 – Hidrograma de validação para a estação 76750000.....	67
Figura 40 – Curva de permanência de validação para a estação 76300000.....	68
Figura 41 – Curva de permanência de validação para a estação 76460000.....	68
Figura 42 – Curva de permanência de validação para a estação 76742000.....	69
Figura 43 – Curva de permanência de validação para a estação 76750000.....	69
Figura 44 – Mapa com a classificação de valor de NSE para a validação, segundo Moriasi et al. (2007). .....	70
Figura 45 – Mapa com a classificação de valor de PBIAS para a validação, segundo Moriasi et al. (2007). .....	70
Figura 46 – Gráfico da $Q_{90\%}$ das estações de validação – período de 1991-2005.....	72
Figura 47 – Gráfico da $Q_{TR5}$ das estações de validação – período de 1991-2005.....	73
Figura 48 – Mapa de dominância de método com menor erro observado para vazões baixas. ....	74
Figura 49 – Mapa de dominância de método com menor erro observado para vazões altas. ....	75

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estações fluviométricas utilizadas. ....	46
Quadro 2 – Estações escolhidas para calibração e validação.....	49
Quadro 3 – Valores recomendados para métricas de análise de resultados. ....	62
Quadro 4 – Distribuição da transferência de parâmetros para as sub-bacias sobrepostas. ....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantitativo de área ocupada por classe de uso e cobertura do solo. ....	39
Tabela 2 – Levantamentos de seção transversal selecionados para obtenção dos parâmetros a, b, c, d. ....	45
Tabela 3 – Disponibilidade de dados para o período de calibração e validação. ....	48
Tabela 4 – Dados de $Q_{90\%}$ obtido na calibração. ....	51
Tabela 5 – Dados de $Q_{TR5}$ obtido na calibração. ....	52
Tabela 6 – Valores das funções objetivo encontrados para as bacias de calibração. ....	63
Tabela 7 – Valores das funções objetivo encontrados para as bacias de validação. ....	69
Tabela 8 – Valores de $Q_{90\%}$ obtidas pelo método de modelagem hidrológica. ....	71
Tabela 9 – Valores de $Q_{TR5}$ obtidas pelo método de modelagem hidrológica. ....	71
Tabela 10 – Valores de $Q_{90\%}$ obtidas pelo método de regionalização. ....	71
Tabela 11 – Valores de $Q_{TR5}$ obtidas pelo método de regionalização. ....	72
Tabela 12 – Resultados globais de vazões de referência. ....	73
Tabela 13 – Aproveitamento para a $Q_{90\%}$ . ....	74
Tabela 14 – Aproveitamento para a $Q_{TR5}$ . ....	74

## LISTA DE SIGLAS

ANA: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

APA: Área de Proteção Ambiental

HGE: Grupo de Pesquisa de Hidrologia de Grande Escala

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia

IPH: Instituto de Pesquisas Hidráulicas

MDE: Modelo Digital de Elevação

MDT: Modelo Digital de Terreno

MGB-IPH: Modelo Hidrológico de Grandes Bacias

MNT: Modelo Numérico de Terreno

NSE: Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe

NSElog: Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões

PBIAS: Erro Percentual de Volume

PCH: Pequenas Centrais Hidrelétricas

PNRH: Política Nacional de Recursos Hídricos

RHN: Rede Hidrometeorológica Nacional

SAH: Sistema de Alerta Hidrológico

TR: Tempo de Retorno

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

URH: Unidades de Resposta Hidrológica

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>19</b>
2.1	Objetivo Geral.....	19
2.2	Objetivos Específicos.....	19
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>20</b>
3.1	Bacia Hidrográfica .....	20
3.1.1	Modelo Numéricos de Terreno.....	21
3.1.2	Delimitação de Bacias.....	23
3.2	Dados Hidrológicos.....	24
3.2.1	Curva de Permanência.....	26
3.2.2	Tempo de Retorno .....	27
3.3	Estimativa de vazão para locais sem dados .....	28
3.3.1	Regionalização de Vazões.....	29
3.3.2	Modelagem Hidrológica-Hidrodinâmica.....	30
3.3.2.1	Modelos Concentrados .....	31
3.3.2.2	Modelos Distribuídos e Semi-distribuídos .....	32
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>33</b>
4.1	Caracterização da Área de Estudo.....	33
4.1.1	Características Gerais .....	34
4.1.2	Diagrama Unifilar .....	35
4.1.3	Geologia.....	36
4.1.4	Hidrogeologia.....	37
4.1.5	Uso e Cobertura do Solo .....	38
4.1.6	Pedologia.....	40
4.2	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO PELO MÉTODO SPLIT-SAMPLE .....	41
4.3	APLICAÇÃO DO MGB-IPH .....	41
4.3.1	Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH) .....	42
4.3.2	Arquivos de Entrada.....	43
4.3.2.1	Pré-processamento .....	44
4.3.2.2	Obtenção de Dados de Vazão, Precipitação e Clima.....	46
4.3.2.3	Calibração e Validação.....	48
4.4	Regionalização de vazões.....	50
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>53</b>
5.1	MODELagem hidrológica com o mgb-iph.....	53
5.1.1	Calibração .....	53
5.1.1.1	Hidrogramas.....	54

5.1.1.2	Curvas de permanência .....	59
5.1.1.3	Funções-Objetivo .....	62
5.1.2	Validação.....	64
5.1.2.1	Hidrogramas .....	66
5.1.2.2	Curvas de permanência .....	67
5.1.2.3	Funções-Objetivo .....	69
5.1.3	Vazões de Referência Obtidas.....	70
5.2	REGIONALIZAÇÃO .....	71
5.2.1	Vazões de Referência Obtidas.....	71
5.3	COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS.....	73
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>76</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE I – Disponibilidade de dados das estações fluviométricas da bacia. ....</b>	<b>84</b>
	<b>APÊNDICE II – Parâmetros de solo calibrados.....</b>	<b>87</b>
	<b>ANEXO I – Diagrama unifilar da bacia do rio Ibicuí (KOEFENDER, 2015).....</b>	<b>95</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos são indispensáveis à vida humana, desde os usos mais básicos como a dessedentação até usos de maior complexidade como o aproveitamento elétrico. A sociedade necessita entender a dinâmica de disponibilidade desse recurso, para assim promover seu aproveitamento máximo, dispondo meios para realizar a manutenção dos ecossistemas interdependentes, atender as demandas antrópicas e propiciar a segurança hídrica coletiva.

Essencialmente os aglomerados urbanos se desenvolveram junto a corpos de água, na costa oceânica ou marítima ou junto a rios ou lagos, naturais e artificiais, pois a logística de dependência do homem com a água é facilitada quando a distância entre os dois entes é mínima.

Nas cidades situadas junto a rios, a disponibilidade de água no rio é geralmente utilizada para abastecimento de água para população e indústrias, irrigação de áreas agrícolas, produção de energia através de hidrelétricas, garantir calado para navegação, conservação do ecossistema e diluição de água residuais (TUCCI, 2005).

Para todos esses usos, saber a quantidade de água que se dispõe não se trata de algo acessório, mas sim de algo essencial, o que torna o monitoramento uma ferramenta imprescindível para o planejamento, previsão e gestão das águas.

Presentemente, o monitoramento é feito a partir de estações hidrometeorológicas em pontos de controle selecionados que coletam em frequência definida dados de cota, vazão e precipitação para a localidade, que podem ou não ser julgados como representativos para regiões circunvizinhas, mediante uma regra determinada, uma extrapolação.

Precisa-se de longas séries para se entender satisfatoriamente a dinâmica de um processo hidrológico, o que fomenta a realização do monitoramento contínuo e por um longo íterim de tempo.

Contudo existem inviabilidades técnicas e financeiras para o monitoramento integral dos cursos d'água. Com o propósito de preencher essa lacuna de monitoramento, são utilizados métodos de estimativa de vazão para locais sem dados.

Há variedade de técnicas utilizadas para a obtenção de estimativas, a contar de métodos tradicionais tal como a regionalização de vazões, em que é realizada a transferência de valores de vazões proporcionalmente entre bacias semelhantes; ou então por outras técnicas, como os métodos de modelagem hidrológica. Um exemplo é o Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Localizado na região sul do Brasil, na fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul, o rio Ibicuí e seus afluentes fornecem água a cerca de 570 mil habitantes, em municípios com grandes usos de água para irrigação, dessedentação animal e abastecimento humano.

Considerando as demandas de desenvolvimento econômico, ecossistêmicas e populacionais pela água na bacia hidrográfica do rio Ibicuí e que grande parte dos trechos de rios da bacia não possuem monitoramento, o trabalho irá comparar as técnicas de regionalização e modelagem hidrológica com os valores observados em estações hidrometeorológicas da bacia do rio Ibicuí no estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do presente trabalho é comparar dois métodos de estimativa de vazão em locais sem dados para a bacia do rio Ibicuí (sub-bacia 76), no Rio Grande do Sul, em condições de vazão alta e de vazão baixa.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho podem ser compreendidos como a busca pela resposta às seguintes indagações:

- É justificável empregar modelos hidrológicos de maior demanda computacional para a estimativa de vazões em locais sem dados?
- Como se comparam métodos mais modernos contra métodos tradicionais?
- Os resultados podem ser extrapolados para áreas vizinhas?

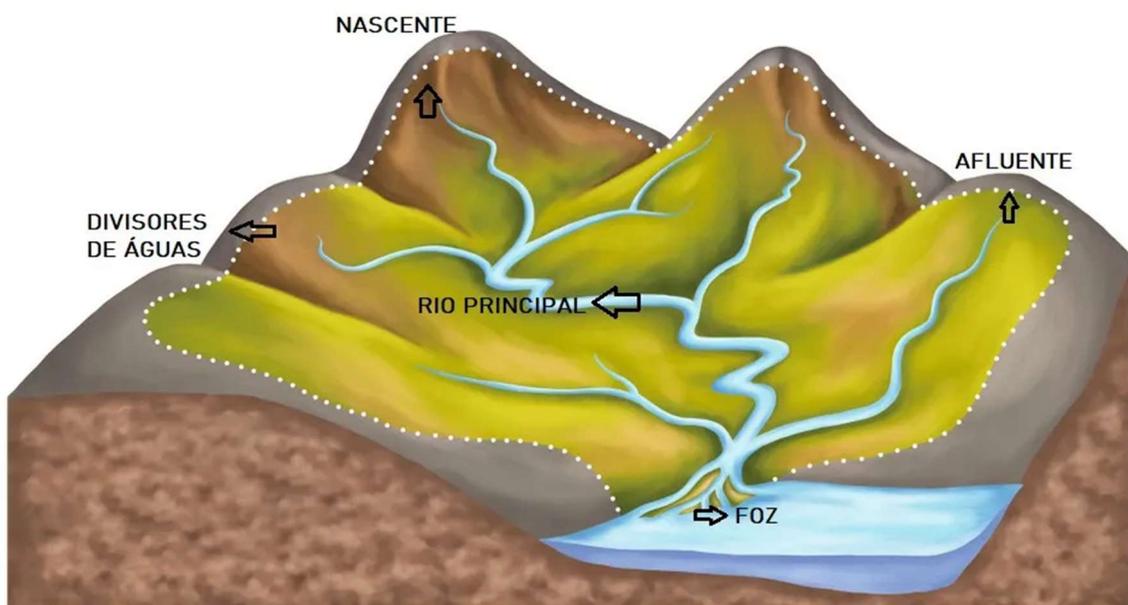
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Aqui é apresentada uma revisão bibliográfica sobre as principais matérias de interesse deste trabalho: bacia hidrográfica, dados hidrológicos e estimativa de vazão para locais sem dados.

#### 3.1 BACIA HIDROGRÁFICA

Todo líquido alocado sobre uma superfície deve naturalmente seguir a direção de maior declividade, o que resulta na acumulação de volumes de água em pontos de menor altitude. O ponto onde essa água converge é chamado de exutório, que delimita uma área de drenagem denominada bacia hidrográfica. Logo, quando se busca estudar o escoamento superficial da água, o escopo de estudo deve ser a bacia hidrográfica.

Figura 1 – Bacia hidrográfica e seus componentes.



Fonte: Mendonça (2024).

Segundo Collischonn & Dornelles (2015), uma bacia hidrográfica é normalmente definida por um curso de água que intitulado exutório e delimitada traçando-se divisores de água que separam a área na qual escoamento superficial tem como destino o exutório da bacia.

Conforme Galvão & Campos (2023), bacias hidrográficas são definidas por divisores localizados em regiões de elevada altitude entre duas áreas de menor altitude.

A delimitação da bacia hidrográfica detém grande importância para fins de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, dado que no Brasil a Lei Federal nº 9433/97 (BRASIL, 1997) estabelece a bacia hidrográfica como unidade territorial para aplicação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (SOBRINHO et al., 2010).

É dentro da unidade da bacia hidrográfica onde ocorrem os processos hidrológicos de precipitação, geração de fluxo superficial, subterrâneo e subsuperficial, também a infiltração, a percolação, a interceptação e a evapotranspiração. Todos esses fenômenos são componentes do balanço hídrico, alguns explicitamente outros implícitos em outros termos da equação (1).

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = P - ET - Q \tag{1}$$

Onde  $\Delta V$  é a variação do volume de água armazenada na bacia ( $m^3$ ),  $\Delta t$  é o intervalo de tempo considerado (s),  $P$  é a precipitação ( $m^3.s^{-1}$ ),  $Q$  é o escoamento ( $m^3.s^{-1}$ ) e  $ET$  é a evapotranspiração ( $m^3.s^{-1}$ ).

### 3.1.1 Modelo Numéricos de Terreno

A fim de se realizar a delimitação da bacia hidrográfica podem ser utilizados métodos de papel ou de forma automática por meio de modelos numéricos de terreno (COLLISCHONN & DORNELLES, 2015)

Um modelo numérico de terreno por essência é um *raster*, ou seja, uma grade de pontos, em que cada célula, denominada *pixel*, possui um valor relacionado, no caso do modelo numérico de terreno cada elemento ou *pixel* tem como atributo o valor de elevação do terreno em relação a um determinado referencial (BURROUGH & MCDONNEL, 1998).

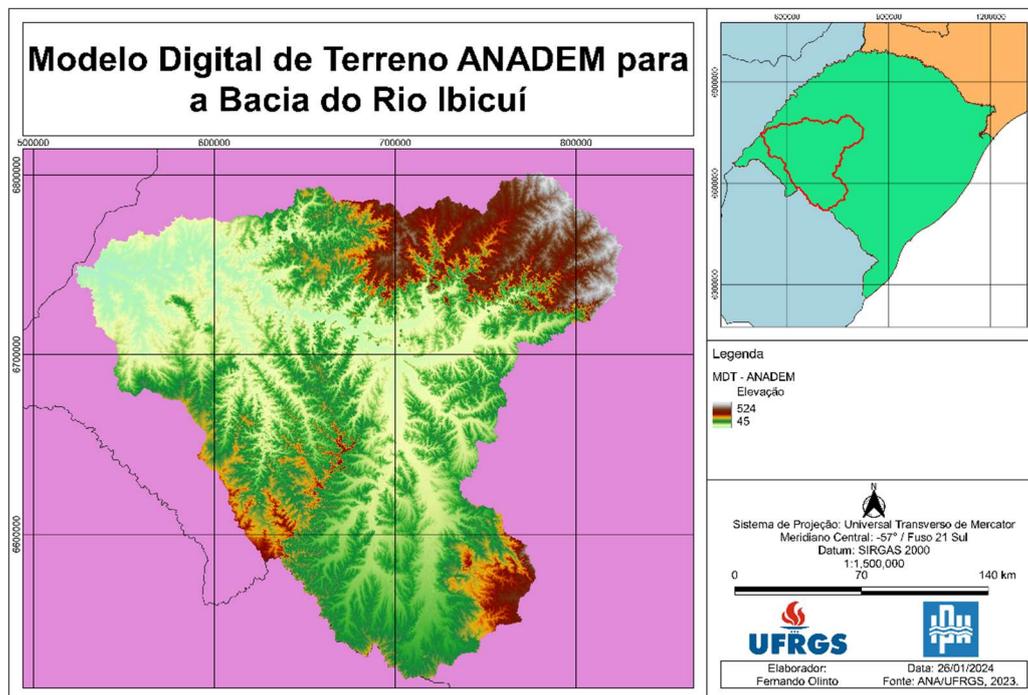
Contudo essa representação não é perfeita, possui erros de aproximação devido à resolução espacial da imagem utilizada, uma vez que as imagens utilizadas provêm de

sensoriamento remoto. A resolução espacial corresponde ao tamanho do elemento em unidades reais do terreno (COLLISCHONN & DORNELLES, 2015).

Quanto maior a resolução da imagem, isto é, menor a largura e o comprimento do *pixel*, a princípio será mais representativa a estimativa da elevação.

Existem, em geral, dois tipos de MNTs: modelos digitais de terreno (MDT) e modelos digitais de elevação (MDE). Os MDEs representam a superfície observada por sensores remotos de satélites, ou seja, geram resultados com influência da altura e densidade do dossel (ANA & UFRGS 2023), consideram obstruções como construções e todas que possam ter derivação significativa da elevação circunvizinha, enquanto os MDTs buscam representar a superfície terrestre real, ajustando os MDEs frente aos obstáculos do terreno, construções, vegetação, entre outros, sendo assim uma estimativa mais apropriada para usos hidrológicos. Na Figura 2 tem-se o MDT utilizando o modelo ANADEM da Bacia do rio Ibicuí.

Figura 2 – Modelo numérico de terreno da bacia do rio Ibicuí.



Os MNTs prestam grande auxílio aos estudos hidrológicos, já que com os MDEs é possível definir os caminhos de fluxo, delimitar as bacias e calcular as áreas de contribuição, utilizando técnicas de geoprocessamento (BERTOLO, 2000; BURROUGH & MCDONNELL, 1998; JENSON & DOMINGUE, 1988).

### 3.1.2 Delimitação de Bacias

A delimitação de bacias é feita através a identificação dos divisores de água superficiais. A área delimitada com base nos divisores de água é considerada a área de drenagem da bacia, a característica mais importante de uma bacia hidrográfica, (COLLISCHONN & DORNELLES, 2015)

A fim de se localizar os divisores de água é necessária uma série de procedimentos que podem ser feitos em papel ou com auxílio de geoprocessamento.

O primeiro passo é a remoção de depressões espúrias do terreno, para que não ocorra armazenamento de água em pontos sem conectividade a elementos com menor elevação.

Considerando um modelo numérico de terreno, após a remoção das depressões espúrias, é feita uma análise da direção de escoamento para cada *pixel* a partir da matriz de elevações. É utilizado um algoritmo conhecido como D8, em que para cada célula do MDE é definida uma entre oito direções de escoamento, suas oito células vizinhas mais próximas (BURROUGH & MCDONNEL, 1998; JENSON & DOMINGUE, 1988).

A etapa seguinte é o cálculo de uma matriz de área de drenagem acumulada. Nesta etapa, é gerado um novo plano de informação matricial em que cada célula tem como atributo o valor correspondente ao somatório das áreas superficiais de todos os pixels cujo escoamento contribui para o pixel em questão (JENSON & DOMINGUE, 1988).

Na próxima etapa da delimitação, a matriz de áreas acumuladas é reclassificada a partir de um limiar de área de drenagem que caracteriza a área de drenagem mínima necessária para iniciar um canal (FAN et al., 2013). Em posse dessa matriz reclassificada em valores binários (0 e 1) é possível obter a rede de drenagem da bacia.

Um método para determinação do limiar de área de drenagem foi proposto por Collischonn & Fan (2012), em que se propõe a enquadrar diversas bacias do Brasil em classes de semelhança baseadas na declividade, tipo de aquífero e a relação Q90/Q50.

### 3.2 DADOS HIDROLÓGICOS

Dados hidrológicos são informações obtidas através do monitoramento de fenômenos relacionados ao ciclo da água.

Convencionalmente são considerados dados hidrológicos observações de cota e vazão fluviométrica, precipitação, seção transversal do rio, taxas de infiltração, evaporação, evapotranspiração e interceptação, concentração de poluentes e sedimentos, entre outras relacionadas.

As observações dos dados são realizadas dentro de uma escala temporal, os intervalos de verificações podem ser feitos de forma acumulada, quando se faz a soma ou a média das medições na escala temporal, ou instantaneamente.

Para realizar o monitoramento e modelagem em corpos d'água, comumente são utilizados dados de cota e de vazão, sendo os primeiros mais facilmente de serem obtidos, pois necessitam de instrumentos menos sofisticados para a medição direta. Os dados de cota podem ser logrados através de linígrafos, sensores automáticos, ou por observações em régua linimétrica, em geral, com 1 a 2 metros de comprimento, feitas de metal e com marcações a cada 2 cm (COLLISCHONN, DORNELLES, 2015), a fim de obter medições em situações de cheia e de estiagem são instaladas diversas régua que se complementam.

Figura 3 – Estação fluviométrica convencional.



Fonte: Chaves, 2013.

Já, os dados de vazão podem ser medidos direta ou indiretamente, no primeiro caso é necessário ir a campo para realizar a medição da vazão. Alguns dos métodos diretos

disponíveis são: medição de área e velocidade, método da diluição e uso de calhas e vertedores. Contudo esses métodos são tarefas demoradas e que, frequentemente, envolvem elevados custos (BRUSA & CLARKE, 1999). A fim de solucionar esse empecilho são utilizados os métodos indiretos de estimativa de vazão, a qual, na maioria das vezes, é representada por uma curva-chave que relaciona a cota com a vazão.

A curva-chave é formulada após sistemáticas medições de nível e vazão em uma determinada seção transversal do curso hídrico, de modo que sejam logradas amostras representativas de grande parte da amplitude de vazões para a seção. A curva chave é uma equação que admite diferentes relações entre a variável cota (x) e vazão (y): exponencial, linear, parabólica ou cúbica. Usualmente, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) utiliza equações da curva chave no formato de potência com diversos tramo.

Normalmente elas apresentam bons resultados para estimar valores entre as cotas máximas e mínimas para a qual foram definidas, todavia é uma aproximação da vazão real e incorpora diferentes fontes de incertezas (VIEIRA et al., 2022). Quando se busca valores acima das cotas máximas e abaixo das mínimas medidas, em que é feita a extrapolação da curva, é frequente o surgimento de erros na estimativa (BRUSA & CLARKE, 1999).

Os dados de precipitação são medidos utilizando instrumentos chamados pluviômetros que são recipientes para coletar água precipitada com algumas dimensões padronizadas. Quando os pluviômetros são adaptados para realizar medições de forma automática, estes equipamentos são denominados pluviômetros automáticos ou pluviógrafos (COLLISCHONN, DORNELLES, 2015).

No Brasil, os dados hidrometeorológicos são registrados em campo por meio de uma rede de equipamentos chamadas de Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) sob coordenação das atividades pela ANA (NECTOUX, 2021)

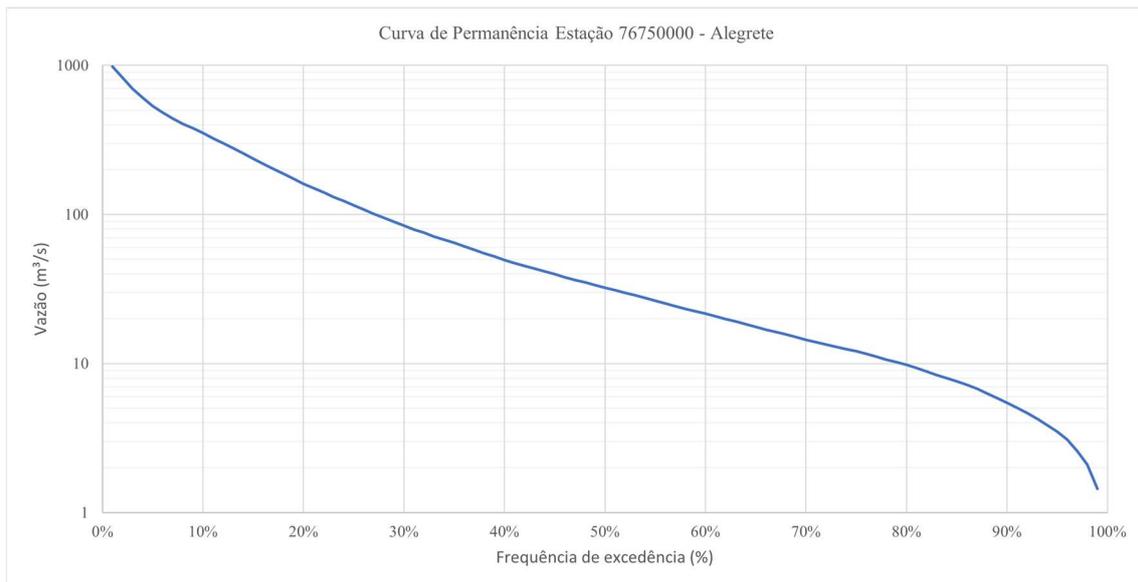
A RHN possui papel de suma importância, pois seus dados são usados nas mais diversas aplicações, sendo informações necessárias para a sociedade e para diversos setores econômicos e também pelos entes governamentais e agentes privados, que planejam e decidem seus investimentos (no curto e longo prazo) com base nessas informações (NECTOUX, 2021).

### 3.2.1 Curva de Permanência

A curva de permanência, também chamada de curva de duração (MENDES, 2007), representa a relação entre vazão e frequência de algum intervalo de tempo para uma determinada bacia hidrográfica. A curva fornece uma estimativa do percentual de tempo em que uma determinada vazão foi igualada ou superada ao longo de um período histórico (KOEENDER, 2015).

A prerrogativa da curva baseia-se na probabilidade de excedência da vazão dentro de um período. Encontra-se a vazão de excedência para cada percentil ao se dispor os dados de vazão diária em ordem decrescente e verificar a porcentagem de dados que são menores do que a vazão escolhida.

Figura 4 – Curva de permanência histórica para a estação 76750000 – Alegrete.



Dentro desse propósito, busca-se encontrar vazões que representem o que seriam vazões altas e vazões baixas. O uso da referência da vazão 90% da curva de permanência é comum para representar vazões baixas e como instrumento de outorga, inclusive para a bacia do rio Santa Maria, tributário do rio Ibicuí, onde foi adotada a vazão de outorga como 90% da  $Q_{90\%}$  (PEREIRA, KAYSER, COLLISCHONN 2013).

Mendes (2007) indica que, devido ao uso de vazões médias diárias para a construção da curva de permanência, há um deplecionamento fluvial das vazões máximas, geralmente para percentis abaixo de 20% (vazão que é igualada ou superada em 20% do tempo), uma vez que as médias diárias tendem a atenuar as máximas diárias.

A vazões de referência são definidas como valores de vazão que permitem resumir uma grande quantidade de dados da série completa de vazões em um determinado local (CRUZ & TUCCI, 2008), sendo uma referência a série estatística da série de dados (COLLISCHONN et al., 2023). Para a definição de uma vazão de referência aceitável deve-se dispor de uma série histórica representativa com a menor ocorrência de falhas possível (MENDES, 2007).

Entre as vazões de referência, desponta o uso da  $Q_{90\%}$ , uma vazão de permanência, que, reflete a vazão que é igualada ou superada 90% do tempo (KOEFEENDER, 2015). É amplamente difundida para a definição de vazão de outorga, como base de vazão de referência a vazões mínimas. Além desses aspectos, segundo Muller (2019), a  $Q_{90\%}$  pode ser considerada uma vazão característica da bacia, outrossim, de acordo com Fan et al. (2013), quando colocada como numerador em uma razão com a  $Q_{50\%}$ , é utilizada para estimativa de vazão de base que passa no exutório da bacia.

### 3.2.2 Tempo de Retorno

Em contraponto às vazões baixas, necessita-se de vazões de referência que representem em uma primeira análise, o comportamento da bacia em condições de cheia. Em concordância ao caso da  $Q_{90\%}$ , que representa as vazões baixas, para vazões altas a referência largamente utilizada são as vazões de tempo de retorno (TR), ou tempo de recorrência, específico.

O TR é uma medida estatística, sendo definido como o tempo médio, em anos, em que a inundação é igualada ou superada, estando relacionada à probabilidade de excedência  $P$ , conforme equação (2) (GERMANO et al., 2022).

$$TR = \frac{1}{P} \tag{2}$$

Onde, TR é o tempo de retorno em anos e  $P$  é a probabilidade que o evento aconteça em anos<sup>-1</sup>.

Para a análise de frequência, normalmente usa-se uma análise empírica de vazões máximas, em que é considerado o valor do maior pico anual ordenados de forma decrescente, atribuindo-se um valor de ordem (m) para cada pico anual, começando em 1 e continuando a contagem com números inteiros até o valor de N, que é o número de amostras da análise. A definição da fórmula a se utilizar para obter o valor da probabilidade deve partir do conhecimento da distribuição de probabilidade dos dados que estão sendo analisados (COLLISCHONN, DORNELLES, 2015). Há grande diversidade de métodos para a obtenção da probabilidade, sendo exemplificado nesse trabalho o método de Gumbel nas equações (3), (4) e (5).

$$X_{TR} = \beta - \alpha * \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{TR} \right) \right] \quad (3)$$

$$\beta = \bar{X} - 0,45 * S_X \quad (4)$$

$$\alpha = -0,7797 * S_X \quad (5)$$

Onde,  $X_{TR}$  é o quantil associado ao tempo de retorno, TR é o tempo de retorno em anos,  $\bar{X}$  é a média dos picos anuais e  $S_X$  é o desvio padrão dos picos anuais.

### 3.3 ESTIMATIVA DE VAZÃO PARA LOCAIS SEM DADOS

Uma boa gestão de recursos hídricos implica o conhecimento técnico quantitativo e qualitativo dos processos hidrológicos e a quantificação desses processos só pode ser alcançada por meio da observação contínua dessas informações. Dado que manter medições em todo os trechos de rios é praticamente impossível (KOEFEENDER, 2015) por questões de recursos ou de quantidade de pessoal, e que séries temporais de vazão medida estão disponíveis apenas em locais em que existem postos de monitoramento fluviométrico (COLLISCHONN et al., 2023), a estimativa da vazão em locais sem dados

é de suma importância para as atividades de gestão e planejamento dos recursos hídricos e de outros setores, como exemplo os setores energético e de quantificação de risco.

### 3.3.1 Regionalização de Vazões

A regionalização consiste na transferência de informações de um local para outro dentro de uma área com comportamento hidrológico semelhante (TUCCI, 2002), método que permite calcular, em sítios que não dispõem de dados, as variáveis fluviométricas de interesse (WOLFF et al., 2014).

Em Collischonn et al. (2023) é descrito que os métodos de regionalização podem ser enquadrados em três tipos: 1) regionalização dos parâmetros da distribuição estatística; 2) regionalização de um evento com um determinado risco e 3) regionalização de uma curva adimensional de probabilidade e seu fator de escala, método *index-flood*.

Entretanto, a regionalização de vazões pelo método tradicional apresenta grandes restrições quando as séries hidrológicas disponíveis em uma bacia hidrográfica podem ser reduzidas (PEREIRA, KAYSER, COLLISCHONN, 2013). Tucci (2002) ressalta que a regionalização de vazões não é um método seguro para a extrapolação hidrológica, por conta da variabilidade de escala dos processos hidrológicos, pois pequenas bacias possuem comportamento hidrológico muito diferente de grandes bacias, em termos de vazões, transporte de sedimentos, tempo de concentração, entre outros. Portanto, a regionalização apresenta dificuldade em ser representativa para uma vasta amplitude de tamanho de bacias.

A regionalização por regressão busca encontrar uma relação estatística entre a vazão e características físicas da bacia, como área de drenagem, declividade, precipitação média, entre outras (COLLISCHONN et al., 2023). A equação encontrada pode ser global, com somente uma única equação com todos os dados conhecidos, ou regional, onde são concebidas equações para sub-regiões com comportamento semelhante.

O método da vazão específica é igual ou melhor do que métodos mais complexos de regressão quando a área de drenagem do local sem dados está entre 0,3 e 1,5 vezes a área de drenagem do local com dados (COLLISCHONN et al., 2023).

A regionalização possui uma fraqueza relacionada a intervenções antrópicas na bacia, uma vez que essas promovem uma dissonância comparadas ao fluxo natural. As intervenções dizem respeito, por exemplo, a barramentos, retiradas d'água, obras hidráulicas, lançamento de efluentes.

Nessa perspectiva, Collischonn et al. (2023) destacam uma questão importante na utilização de dados fluviométricos em estudos de regionalização hidrológica: a interferência de atividades humanas pode distorcer os dados observados, tornando-os inadequados para representar com precisão o regime hidrológico natural da região em estudo, sendo que quase sempre as medições são alteradas por efeitos de retiradas de água para diversos usos a montante dos postos fluviométricos.

Essas interferências humanas podem introduzir viés nos dados coletados nos postos fluviométricos, o que pode afetar a validade dos resultados obtidos em estudos de regionalização. Portanto, é crucial considerar esses fatores ao analisar e interpretar os dados hidrológicos, bem como ao realizar estudos que dependem fortemente desses dados observados.

### 3.3.2 Modelagem Hidrológica-Hidrodinâmica

A modelagem é o processo de simplificação da realidade em um período de tempo e/ou extensão espacial definidos, com o objetivo de promover a compreensão do sistema real. Um tipo comum de modelo utilizado na área de recursos hídricos é o modelo chuva-vazão, que busca representar a transformação da chuva em vazão em uma bacia hidrográfica (COLLISCHONN et al., 2023).

Com o advento da computação em larga escala, foi possível desenvolver a modelagem matemática dos processos naturais, que é baseada na combinação de equações que descrevem diferentes processos físicos (POPESCU, 2014). A modelagem matemática promove o estudo do impacto de alterações no sistema, sem realizar danos ao mesmo, de modo a se obter a melhor solução.

A modelagem matemática no âmbito da hidrologia surgiu no século XIX, a partir do equacionamento de alguns processos hidrológicos (SANTOS, 2018). A modelagem hidrológica é eficaz para a realização de previsões, estudos sobre efeitos de mudanças

climáticas e de uso do solo, análises de disponibilidade de água e apoio à tomada de decisão, entre outras aplicações. (FAN & COLLISCHONN, 2014).

Os modelos hidrológicos são representações matemáticas do comportamento dos sistemas hídricos (FAN & COLLISCHONN, 2014) e procuram representar a parte terrestre do ciclo hidrológico, transformando a precipitação que cai sobre a bacia em vazão para uma determinada seção de trecho hídrico (ALMEIDA & SERRA, 2017).

De acordo com Pereira, Kayser, Collischonn (2013), os principais usos de modelos hidrológicos são: compreensão dos processos hidrológicos, planejamento e dimensionamento de projetos, previsão de vazão, análise dos efeitos de modificações antrópicas e naturais em dada bacia e análise de consistência e extensão de séries hidrológicas em locais com poucos dados.

Um dos resultados possíveis de se obter é a vazão do curso d'água, a qual se pode atribuir a cota e área alagada prevista, a distribuição de velocidades em perfil e seção, entre outros resultados. Os dados simulados por meio dos modelos são produtos que podem subsidiar a tomada de decisão no processo de gestão de recursos hídricos.

A modelagem hidrológica se diferencia conforme o modelo adotado para a simulação, uma dessas divisões é relativa à representação espacial: modelos concentrados e distribuídos ou semi-distribuídos.

### 3.3.2.1 Modelos Concentrados

Os modelos concentrados consideram a bacia hidrográfica como um elemento de características uniformes, onde um conjunto de parâmetros é representativo para toda bacia por meio do valor médio ou mediano. Por regra, os modelos concentrados assumem um número reduzido de elementos conceituais para representar os processos de escoamento e de armazenamento de água na bacia (SANTOS, 2018).

### 3.3.2.2 Modelos Distribuídos e Semi-distribuídos

Os modelos semi-distribuídos ou distribuídos assumem a variabilidade espacial das características das bacias hidrográficas, dos processos hidrológicos, dos dados de entrada e das condições de contorno (LI, WELLER, JORDAN, 2007). Nos modelos distribuídos, a bacia hidrográfica é dividida em uma grade de células, enquanto nos modelos semi-distribuídos, a bacia é dividida em diversas sub-bacias ou unidades de menor dimensão, em que se assume uniformidade espacial das suas características. O grau de pormenor da heterogeneidade espacial considerada no modelo distribuído é tipicamente definido pelo modelador.

## 4 METODOLOGIA

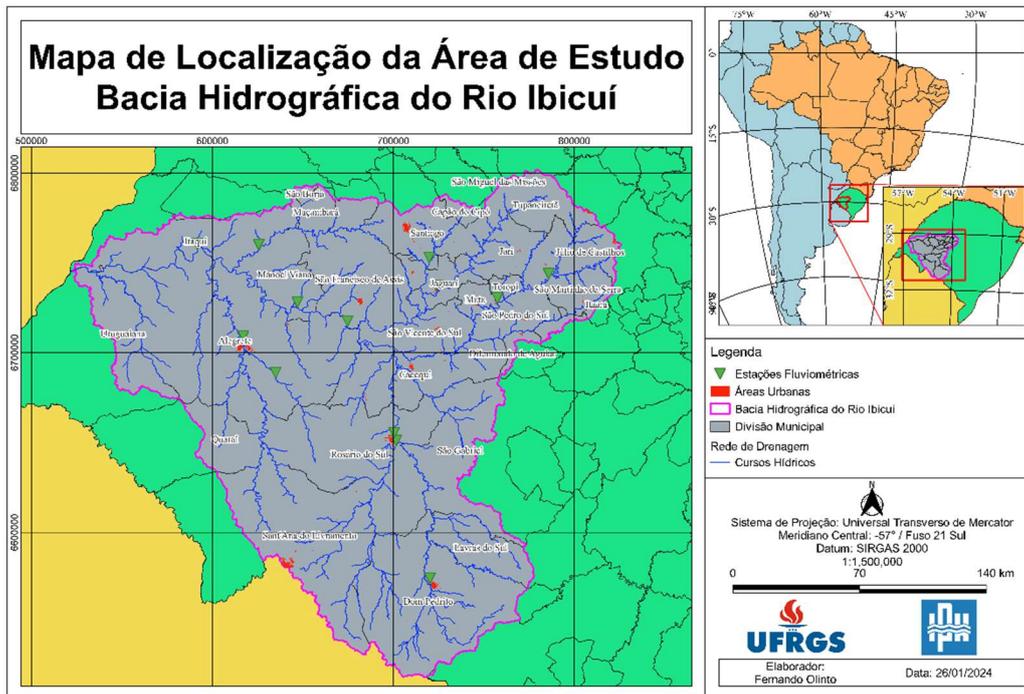
Neste item serão repassadas informações interessantes para a boa compreensão dos assuntos que serão trabalhados, baseada em uma explicação dos procedimentos a serem realizados e da caracterização da área onde os estudos ocorrerão.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo escolhida teve por base o interesse do autor por conta das atividades do estágio curricular, visto que trabalhou diretamente com a bacia do rio Uruguai através do Sistema de Alerta Hidrológico (SAH), sendo a região de estudo a bacia do rio Ibicuí, tributário do rio Uruguai, integrante do SAH, sistema que dispara alertas de inundação e estiagem para diversos municípios brasileiros, com atuação em 17 bacias, o sistema baseia-se na chuva precipitada e prevista e níveis observados, coletados automaticamente e telemetricamente, a fim de calcular o nível previsto para um instante futuro. O SAH possui relevância ao atuar junto às defesas civis municipais e outros órgãos para a atenuação de danos causados por eventos hidrológicos extremos.

O Governo do Estado do Rio Grande do Sul (RS) mediante o Decreto nº 53885/2018 instituiu a subdivisão das Regiões Hidrográficas no estado, de modo que a região analisada contém duas bacias hidrográficas a bacia do Rio Ibicuí (U050) e a bacia do Rio Santa Maria (U070). Contudo as análises realizadas serão feitas unindo as 2 bacias em uma só, visto que possuem um exutório em comum, tratando a união como bacia do rio Ibicuí, que será descrita nos itens a seguir.

Figura 5 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Ibicuí.



#### 4.1.1 Características Gerais

A bacia hidrográfica do Ibicuí, sub-bacia 76, definida conforme o método de Otto Pfafstetter, possui área de 47,162 km<sup>2</sup> e população estimada em 570,234 habitantes (DIPLA/DRHS, 2020), desses, 85,5% é considerada população urbana e 14,5%, rural. A bacia abrange um total de 32 municípios são eles: Alegrete, Barra do Quaraí, Cacequi, Capão do Cipó, Dilermino de Aguiar, Dom Pedrito, Itaara, Itaquí, Jaguari, Jari, Júlio de Castilhos, Lavras do Sul, Maçambará, Manoel Viana, Mata, Nova Esperança do Sul, Quaraí, Quevedos, Rosário do Sul, Santa Maria, Sant'Ana do Livramento, Santiago, São Borja, São Francisco de Assis, São Gabriel, São Martinho da Serra, São Pedro do Sul, São Vicente do Sul, Toropi, Tupanciretã, Unistalda, Uruguaiana.

O rio Ibicuí é formado na confluência do Ibicuí-Mirim com o rio Santa Maria e a desembocadura é no Rio Uruguai. O principal uso da água nesta bacia se destina a irrigação, uso que pode gerar insuficiência hídrica nos meses de verão, devido à irrigação do arroz (PEREIRA, KAYSER, COLLISCHONN, 2013). Juntamente ao Ibicuí, Ibicuí-Mirim e Santa Maria, os principais cursos de água da bacia são considerados os rios: Jaguari, Ibirapuitã, Ibicuí da Armada, Toropi e Itu, todos estes com área de drenagem superior a 2000 km<sup>2</sup>.

Segundo Marcuzzo (2017), a bacia do Ibicuí é a maior sub-bacia do rio Uruguai em área de drenagem no território brasileiro, sendo o seu principal afluente da margem esquerda (PAIVA et al., 2000).

O clima é considerado temperado, o regime térmico da área apresenta temperatura média situada entre 16° e 20°C (ADAM, 2011). De acordo com o MMA (2006) precipitação média anual na bacia é de 1540 mm/ano, valor condizente ao apresentado por Koefender (2015), em que se obteve um valor de média anual de 1629 mm, variando entre 1491 mm na região oeste e 1834 mm na porção leste. A distribuição sazonal das chuvas na região aponta que não há definição de início e fim do ano hidrológico na região, corroborado pelo relatado por Marcuzzo & Pinto (2022).

Em questões hipsométricas, a variação altimétrica na sub-bacia 76 vai de 26m próximo a sua foz no rio Uruguai a 546m em sua porção nordeste na região do município de Tupanciretã/RS (MARCUIZZO & PINTO, 2022).

Em decorrência da baixa declividade na maioria do terreno periodicamente há o alagamento das margens, várzeas e campos de pastagens, que gera escoamentos mais lentos. Em períodos de cheias, o rio se torna navegável em quase toda a sua extensão (MATTIUIZI, 2013).

#### 4.1.2 Diagrama Unifilar

Pretendendo entender satisfatoriamente o comportamento, condições da bacia e presença de barramentos na bacia, buscou-se um diagrama unifilar, que representa todas as estações fluviométricas, pluviométricas e pluviográficas, bem como as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), em fase de operação e de estudo. O diagrama foi construído por Koefender (2015), apresentado no Anexo I.

Com o diagrama garantiu-se que até o ano de 2015 havia somente uma PCH em operação na bacia (PCH Furnas do Segredo). A PCH Furnas do Segredo encontra-se em operação desde 16/09/2005, instalada próxima a cabeceira do rio Jaguari, na porção sudeste da bacia, com área de drenagem de 1870 km<sup>2</sup> é considerada uma usina de pequeno porte que funciona a fio d'água, sem capacidade de controle de cheias. Por conta desse barramento,

os dados de vazão observada da estação 76431000 pode possuir certo grau de incoerência com a vazão natural esperada.

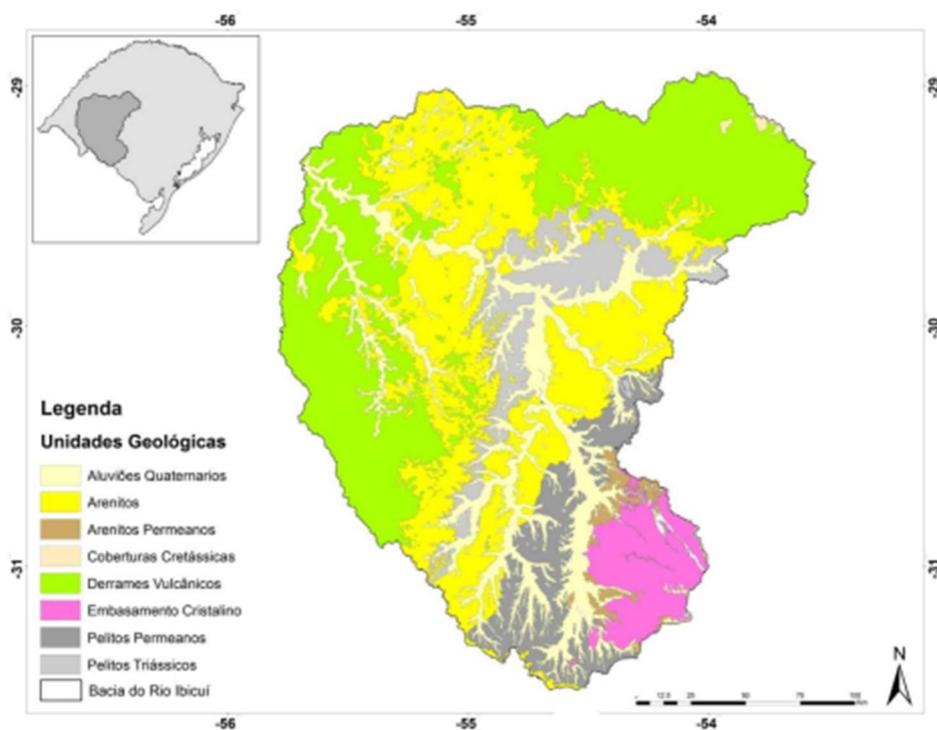
Ademais, verificou-se que havia outras 15 PCH em estudo ou outorga para implantação, as quais foram averiguadas para o período após a construção do diagrama unifilar via observação de imagens de satélite e concluiu-se que não estavam operando pelo menos até o final de 2020.

### 4.1.3 Geologia

A geologia da bacia hidrográfica do rio Ibicuí apresenta 8 unidades geológicas distintas que serão brevemente percorridas nesse item e geoespacializadas na Figura 6.

Distribuídos em quase toda bacia, em principal nas porções oeste, central e norte, destacam-se os Derrames Vulcânicos, de litologia de basaltos, riódacitos e andesitos, bem como, os Arenitos e Arenitos Permeanos. Ao longo de drenagens distribuem-se Depósitos Aluvionares Quaternários, com litologia de rochas sedimentares. A sudeste, na região dos municípios de Dom Pedrito e Lavras do Sul, a litologia é caracterizada pelo Embasamento Cristalino, que compreende rochas pré-cambrianas ígneas e metamórficas. A unidade Coberturas Cretácicas, representam pequenos afloramentos discordantes sobre Derrames Vulcânicos e sem continuidade física, rochas sedimentares de arenitos e conglomerados. Os Pelitos Permeanos ocupam área a sudeste da bacia, representada por arenitos (MATTIUIZI, 2013), e os Pelitos Triássicos localizam-se na porção central e oriental da bacia, constituída por arenitos, siltitos e conglomerados (NANNI, 2008).

Figura 6 – Mapa de unidades geológicas da bacia do Ibicuí - RS.

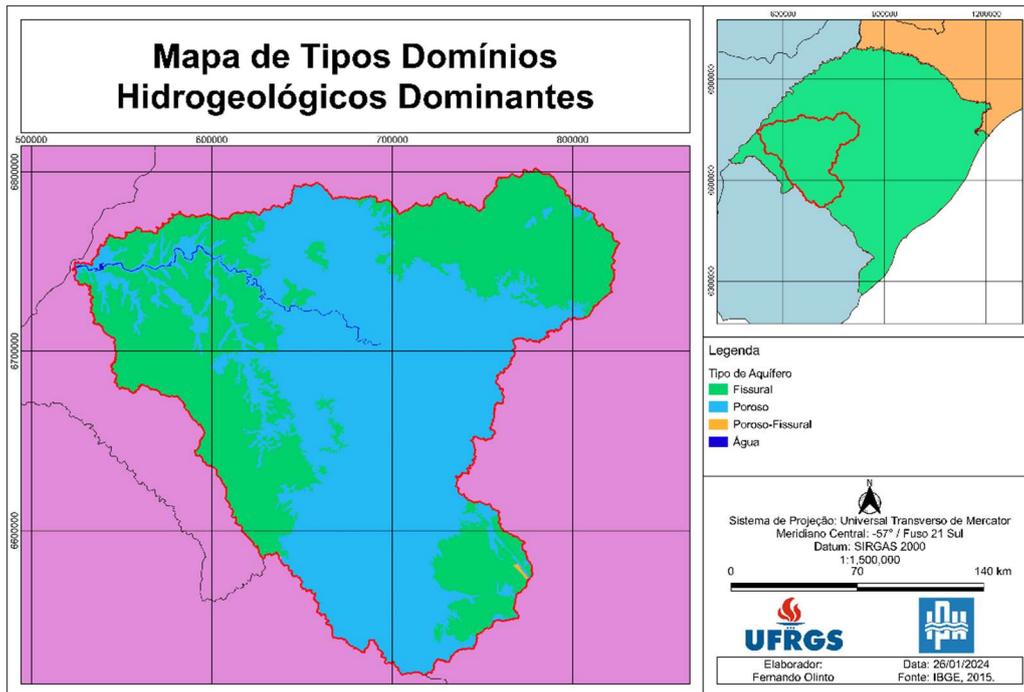


Fonte: Mattiuzi. 2013.

#### 4.1.4 Hidrogeologia

Para fins do estudo, foi elaborado um mapa com a classificação de porosidade dos aquíferos da bacia, conforme IBGE (2015), concluindo-se que a bacia possui a maior parte de seu território abrangido por aquíferos porosos, todavia nas porções oeste, nordeste e sudeste há prevalência de aquíferos fissurais. Junto às drenagens ocorrem somente aquíferos porosos.

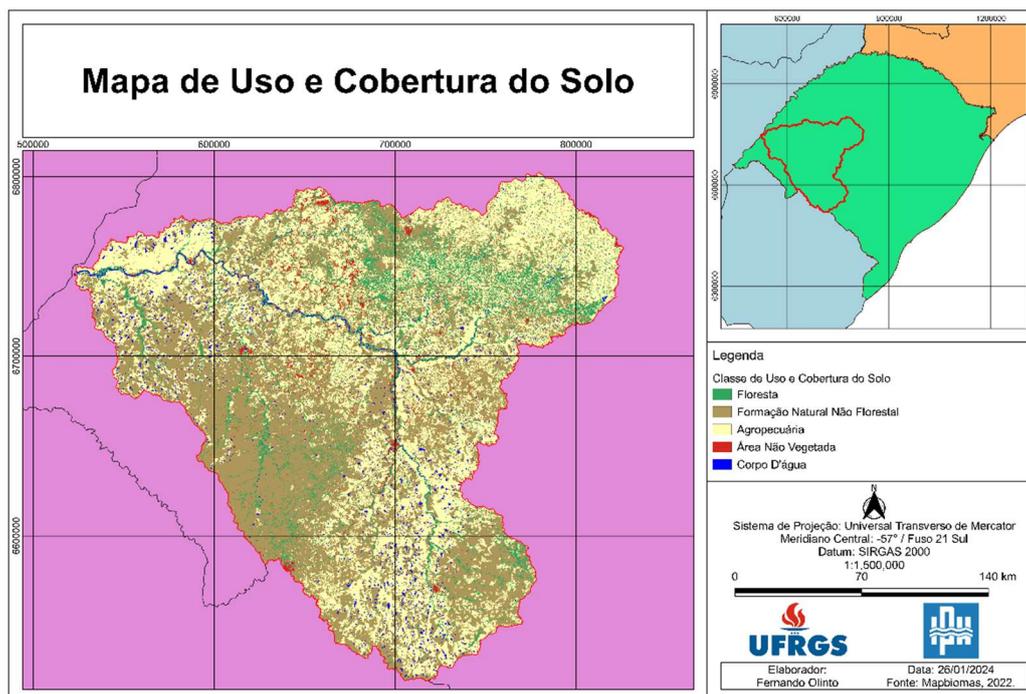
Figura 7 – Mapa de domínios hidrogeológicos dominantes para a bacia do Ibicuí – RS.



#### 4.1.5 Uso e Cobertura do Solo

O uso e cobertura do solo foi caracterizado a partir do Projeto *Mapbiomas* Brasil, portal colaborativo formado por ONGs, universidades e *startups*, que realiza análise da cobertura do terreno nacional, enquadrando os usos em classes pré-definidas, que são otimizadas continuamente por meio de refinamento do algoritmo de análise das imagens de satélite. O enquadramento é realizado considerando as diferentes características dos biomas brasileiros, utilizando de ferramentas do software *Google Earth Engine*. Abaixo, na Figura 8, encontra-se um mapa produzido com base no enquadramento de nível 1.

Figura 8 – Mapa de uso e cobertura do solo para a bacia do Ibicuí - RS.



Com base no mapa, foi extraída a área ocupada por cada classe de uso, dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Quantitativo de área ocupada por classe de uso e cobertura do solo.

Classe de Uso e Cobertura	Área (km <sup>2</sup> )
Floresta	4020
Formação natural não florestal	22367
Agropecuária	19288
Área não vegetada	603
Corpo D'água	908

Ao observar-se o mapa e o quantitativo de área ocupada, é possível verificar a proeminência das classes de uso Formação Natural não Florestal e Agropecuária, classes que demonstram que o principal uso do solo da bacia é a agricultura e pecuária, uma vez que é de difícil diferenciação áreas de campo natural do bioma Pampas e áreas utilizadas para a pecuária. As classes de agropecuária e formação natural não florestal situam-se espalhados por todo o território. Há poucas áreas observadas para a classe de floresta, que localizam-se majoritariamente na região do rio Ibirapuitã, devido à Área de Proteção Ambiental (APA) do Ibirapuitã, no norte-nordeste da bacia e nas margens dos rios. A classe área não vegetada basicamente é observada nos aglomerados urbanos. Destaca-se a grande quantidade de corpos d'água observados na cabeceira sudeste e em proximidades do exutório, região oeste da bacia, esses corpos d'água não possuem conectividade direta com os rios principais, o que evidenciam a sua classificação como açudes, denominação

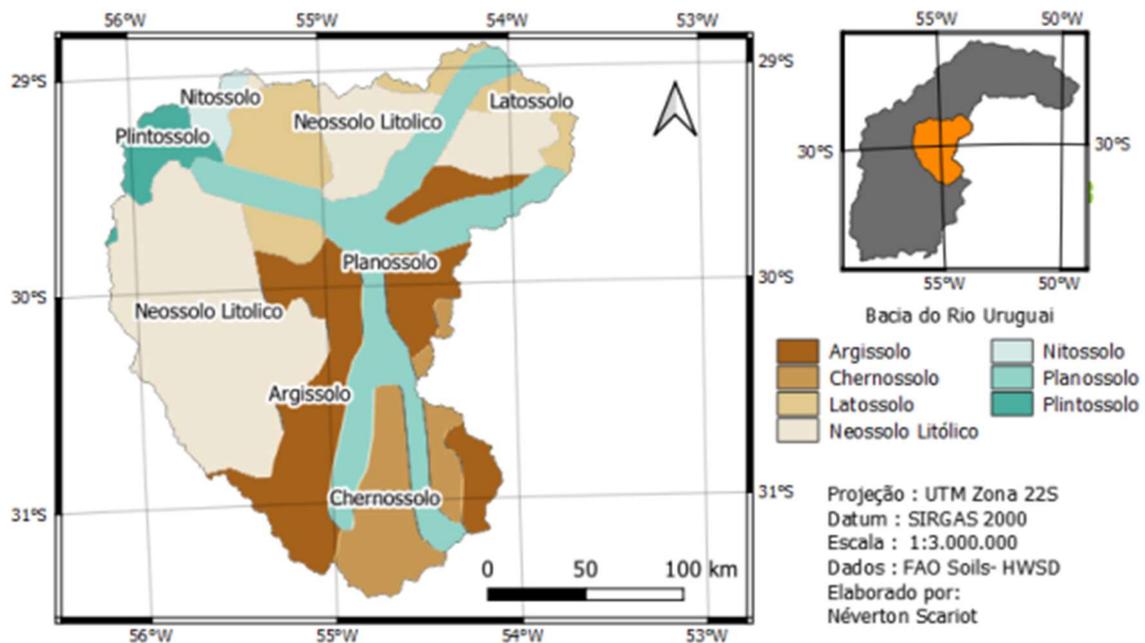
local para pequenos reservatórios que garantem o suprimento de água para irrigação (COLLISCHONN et al. 2011).

#### 4.1.6 Pedologia

Quanto aos tipos de solos a região da bacia do Rio Ibicuí apresenta uma grande variabilidade de solos. Classificados em: Alissolo, Argissolo, Afloramento Rochoso, Chernossolo, Gleissolo, Litossolo, Luvisolo, Neossolo, Nitossolo, Planossolo e Vertissolo (EMATER/RS-Ascar, 2008).

De acordo com Fauconnier (2017), o tipo de solo mais encontrado na bacia são os Neossolos, localizados na parte norte e oeste, os Argissolos se concentram na parte centro-leste, enquanto nos fundos aluviais encontram-se os Planossolos, os Latossolos, Nitossolos e Plintossolos ocupam principalmente o noroeste da bacia os Chernossolos ocupam predominantemente a sub-bacia do rio Santa Maria e os demais solos ocupam pouquíssimos espaços.

Figura 9 – Mapa de solos da bacia do Ibicuí - RS.



Fonte: Scariot, 2023.

## 4.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO PELO MÉTODO SPLIT-SAMPLE

A calibração consiste no ajuste de parâmetros do modelo ao longo de um período de treinamento, de forma manual ou automática, já a validação é a capacidade do modelo representar um processo subjacente (ARSENAULT, BRISSETTE, AND MARTEL, 2018). Para a calibração utilizam-se métricas de eficiência para entender estatisticamente se o modelo confere com a realidade e se o teste de calibração demonstrou um melhor ou pior desempenho.

Habitualmente a calibração e validação de modelos hidrológicos ocorre pela divisão de duas amostras do mesmo ponto de controle em tempos diferentes, uma para calibração e outra para validação, esse método denomina-se *split-sample*.

Nesse estudo busca-se obter respostas se um modelo de maior custo computacional, MGB-IPH, tem resultados superiores a um modelo mais simples, regionalização por equação de regressão por área de drenagem, para estimativa de vazões para locais sem dados. Para o teste dessa hipótese, realizou-se a calibração e validação pelo método *split-sample* na questão temporal, porém para realizar a verificação para os locais sem dados, excluiu-se da calibração 1/3 das estações consideradas com dados e após utilizou-se somente esse 1/3 na validação. A regra foi válida para os 2 modelos, utilizando dados de 2/3 das estações para a calibração em um período mais recente e 1/3 para um período anterior. Os princípios utilizados para a seleção dos conjuntos de estações estão no item 4.3.2.3 .

## 4.3 APLICAÇÃO DO MGB-IPH

A modelagem hidrológica da bacia do Ibicuí foi feita utilizando o modelo semi-distribuído MGB-IPH. O modelo e a sua aplicação serão descritos a seguir nos próximos itens.

### 4.3.1 Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH)

O MGB-IPH é um modelo hidrológico distribuído de grande escala, descrito em Collischonn (2001) e Collischonn et al. (2007), baseado em equações físicas e conceituais para representar o ciclo hidrológico terrestre (PAIVA, COLLISCHONN, TUCCI, 2011). Com passo de tempo diário, representa via equações conceituais os módulos de balanço de água no solo, balanço de radiação na superfície, escoamento na minibacia, além de equacionamento físico para o módulo de escoamento na rede de drenagem.

O MGB-IPH está disponível como um *plugin* do software QGIS, algo que torna o uso do modelo mais acolhedor ao usuário, já que instrui mais satisfatoriamente o uso da interface e ilustra de imediato os procedimentos realizados. Um *plugin* pode ser definido como uma funcionalidade pré-programada que é utilizada para adicionar funções, ou ferramentas, ao programa no qual ele é instalado (FAN & COLLISCHONN, 2014).

A distribuição espacial do modelo baseia-se em minibacias, áreas de contribuição imediata de trecho de rio, que são determinadas por um limiar mínimo de comprimento de trecho de drenagem. No pré-processamento dos arquivos de entrada para o modelo é feita a aquisição de parâmetros geométricos e de relação das minibacias.

Nas minibacias há uma subdivisão para Unidades de Resposta Hidrológica (URH) que são áreas com comportamento hidrológico semelhante (PAIVA, COLLISCHONN, TUCCI, 2011), que permitem a representação da heterogeneidade das condições da bacia, contudo mantendo certo grau de simplificação do modelo.

Uma URH é definida por uma combinação específica de características de uso do solo e pedologia. Uma classificação de URH com resolução de 450 m para toda a América do Sul foi desenvolvida por Fan et al. (2015), sendo a escolhida para a parametrização da aplicação do modelo no Ibicuí.

As URH possuem valores específicos dos parâmetros: altura média da vegetação (“z”), índice de área foliar (“IAF”), albedo (“ $\alpha$ ”), resistência superficial (“ $r_s$ ”), capacidade de armazenamento de água no solo (“ $W_m$ ”), condutividade hidráulica do solo saturado (“ $K_{int}$ ”), taxa máxima de percolação do solo para o reservatório subterrâneo (“ $K_{bas}$ ”), taxa máxima de percolação do solo (“CAP”), índice de porosidade do solo (“XL”), limite de armazenamento no solo para haver escoamento subsuperficial (“ $W_c$ ”), parâmetro de grau

de heterogeneidade da capacidade de armazenamento de água no solo (“b”), termos de correção de tempo de escoamento superficial (“CS”), subsuperficial (“CI”) e subterrâneo (“CB”) e parâmetro associado à condição inicial do modelo (“Q<sub>b</sub>”).

Dentro de uma minibacia é feito o cálculo de balanço hídrico e de energia por URH, independentemente da sua localização na minibacia, pois leva-se em consideração somente a área total ocupada pela URH na minibacia. Os resultados das URH são somados ponderadamente pela área ocupada, soma que é atribuída como o resultado da minibacia, sendo que os cálculos são realizados para cada módulo do modelo.

Os resultados dos módulos das minibacias são propagados ao longo da rede de drenagem. O MGB-IPH dispõe de dois modelos para o módulo de escoamento na rede de drenagem: modelo hidrodinâmico–inercial e modelo Muskingum-Cunge. Para a aplicação no Ibicuí o modelo escolhido foi o hidrodinâmico-inercial.

As principais equações que regem o modelo hidrodinâmico-inercial são as equações de Saint-Venant, adaptadas para uso no MGB-IPH, conforme descrito em Fan, Pontes e Paiva (2014). Para a evaporação e evapotranspiração, usa-se a equação de Penman-Monteith.

Além da discretização em minibacias, o modelo propõe uma outra divisão, porém que não é utilizada diretamente nos cálculos do modelo, que é a divisão da bacia em sub-bacias. Sub-bacias são definidas com base na presença e localização de postos fluviométricos, uma vez que os dados das estações são utilizados para visualização e comparação de resultados, bem como, cálculo de métricas de eficiência das simulações. Outrossim, as sub-bacias servem de agrupamento de minibacias para a calibração dos parâmetros, isto é, todas as minibacias presentes na sub-bacia relacionada possuem mesmo valores de parâmetros calibráveis para as URH.

#### 4.3.2 Arquivos de Entrada

O MGB-IPH necessita dos seguintes arquivos de entrada para realizar suas operações: dados geométricos das minibacias, descrição das URH, dados de precipitação diária interpolados, dados de vazão diária observados, normais climatológicas, parâmetros de vegetação, parâmetros de solo calibráveis e relação cota-área inundada.

#### 4.3.2.1 Pré-processamento

O pré-processamento do MGB foi feito pelo *plugin* IPH *HydroTools*. Por meio dele, a partir de um MNT, é possível delimitar bacias, adquirir trechos de drenagem e obter alguns arquivos de entrada do MGB-IPH: *mini.gtp* (dados geométricos), *cota\_area.flp* (relação cota-área) e *hand\_flood.asc*, este último não será utilizado para a simulação. Para obter esses arquivos, deve-se alimentar o IPH *HydroTools* com os arquivos de: MNT, direções de fluxo, minibacias delimitadas, rede de drenagem segmentada, URH e sub-bacias delimitadas; além de valores de variáveis do canal: mínima e máxima declividade, coeficiente de rugosidade de Manning e valores dos parâmetros das relações geomorfológicas.

O MNT utilizado foi o ANADEM (ANA, UFRGS, 2023), MDT desenvolvido pelo HGE/IPH/UFRGS. O exutório da bacia foi definido pela confluência do rio Ibicuí com o rio Uruguai, já, os exutórios das sub-bacias foram definidos pela obtenção de dados de vazão de 17 estações da bacia do Ibicuí, apresentados no Quadro 1.

Para aplicação do modelo, foi escolhida a segmentação em minibacias por um limiar de segmento de trecho de rio ( $\Delta x$ ), pois esse método fornece distâncias de fluxo iguais e melhora o controle do passo de tempo e do tempo de execução do modelo (FAN et al., 2021). O limiar aplicado foi o de 30 km, que demonstra reduzir significativamente o tempo de processamento sem haver perda substancial de qualidade nos parâmetros de desempenho (MULLER, 2019) e sem causar muitas oscilações numéricas (FAN et al., 2021).

Os valores de declividade máxima e mínima do canal foram mantidos os padrões do *plugin*.

O coeficiente de rugosidade de Manning adotado teve por base os testes realizados ao longo das subsequentes calibrações. Inicialmente, foram testados valores encontrados na literatura anteriormente utilizados para a bacia do Ibicuí (COLLISCHONN & DORNELLES, 2015; ALVES, 2018; GERMANO et al., 2022), contudo verificou-se ganhos consideráveis nas métricas de desempenho ao reduzir o valor para  $n=0,030$ , sendo este o escolhido para a aplicação.

Os parâmetros geomorfológicos do canal (a, b, c, d) foram determinados a partir da coleta de dados de levantamento de seção transversal nas 17 estações da bacia com dados disponíveis no portal *Hidroweb*. Foi selecionado um levantamento de cada estação, o qual possuía similaridade de vazão observada com a  $Q_{90\%}$  calculada, contudo, para a obtenção dos parâmetros utilizou-se somente as 9 estações de calibração. A partir desses dados, buscou-se plotar pontos de área de drenagem ( $Ad$ ) - largura do canal ( $W$ ) e de área de drenagem ( $Ad$ ) - profundidade média ( $D$ ), desse modo, obtendo-se uma equação da forma exponencial ( $W=a*Ad^b$ ;  $D=c*Ad^d$ ) e os valores dos parâmetros. Abaixo, na Tabela 2 e na Figura 10 são apresentados os levantamentos selecionados e os parâmetros obtidos.

Tabela 2 – Levantamentos de seção transversal selecionados para obtenção dos parâmetros a, b, c, d.

Código da Estação	$Q_{90\%}$ (m <sup>3</sup> /s)	Data	N	Q (m <sup>3</sup> /s)	Ad (km <sup>2</sup> )	W (m)	D (m)
76085000	3.0	13/04/2012	96	2.46	1538	37	0.42
76100000	3.4	31/03/2023	361	3.814	2794	44.77	1.19
76251000	0.8	26/03/2012	37	1.41	2111	30.5	0.99
76310000	14.1	28/08/2010	220	51.7	12083	136	1.47
76440000	4.2	25/01/2011	455	2.81	2324	35.5	0.47
76500000	55.1	09/10/2013	212	104.51	27812	152.78	3.45
76560000	65.2	07/02/2020	269	65.733	29354	147.59	2.86
76650000	20.57	18/07/2012	238	19.926	2564	52.79	1.14
76800000	120.2	21/02/2011	188	126	42563	270	3.46

Figura 10 – Gráfico e equação de relação área de drenagem – largura.

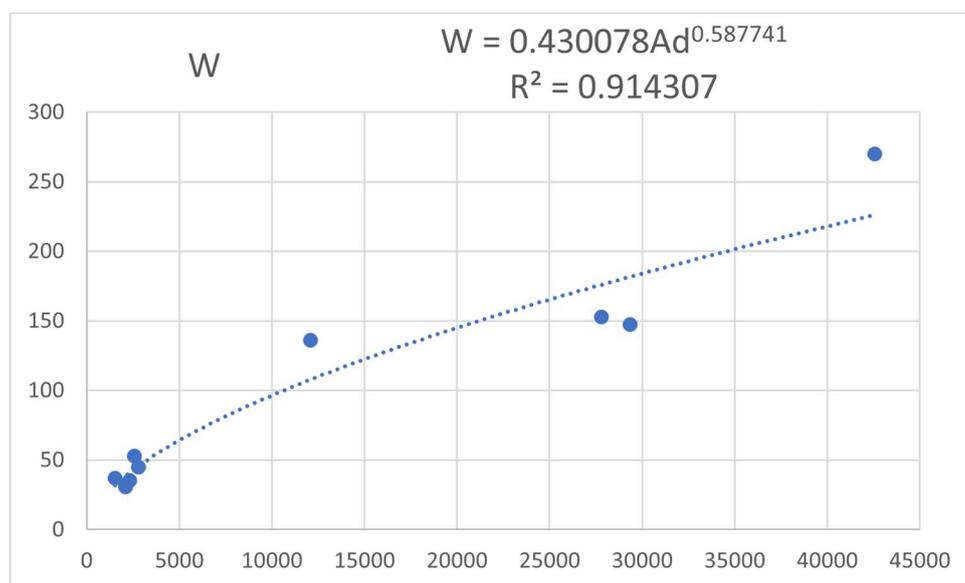
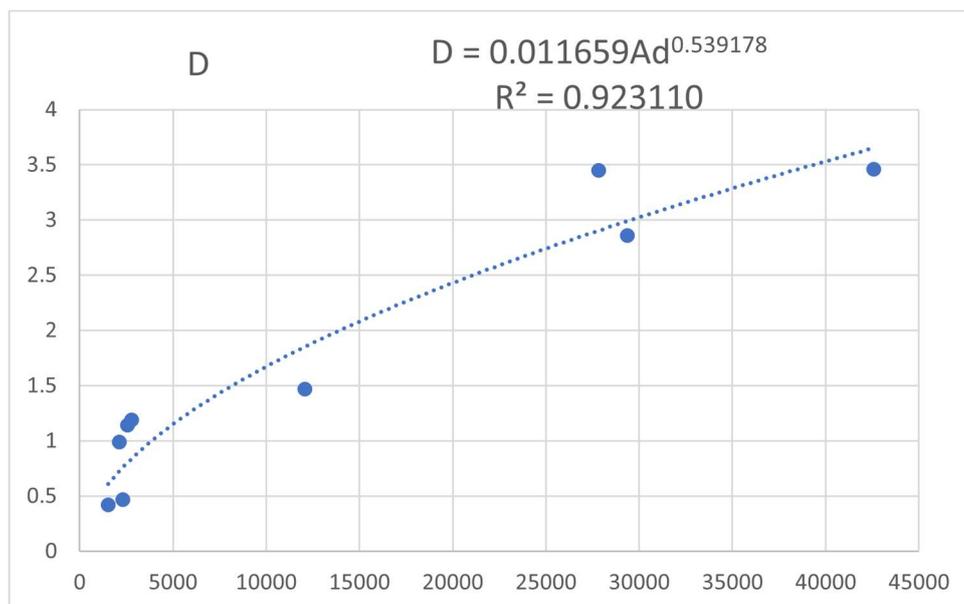


Figura 11 - Gráfico e equação de relação área de drenagem – profundidade média.



Em posse dos arquivos de entrada e parâmetros para o pré-processamento no IPH *HydroTools*, foi feito o procedimento e obtidos os arquivos de geometria e relação cota-área das minibacias.

#### 4.3.2.2 Obtenção de Dados de Vazão, Precipitação e Clima

Além destas informações espaciais, para a aplicação do MGB-IPH, dados de clima, chuva e vazão devem ser obtidos, processados e então utilizados como entrada no modelo (FAN & COLLISCHONN, 2014). O MGB-IPH trabalha com o passo de tempo diário e seu *plugin* para o QGIS possui ferramentas de obtenção desses dados.

Os dados diários de vazão e precipitação foram logrados através da ferramenta ANA *data acquisition* do *plugin* do MGB no QGIS. Esses dados são retirados da base de dados da ANA do seu portal *Hidroweb*. Foram selecionadas séries no período de 1991 a 2020 das estações apresentadas no Quadro 1 para estações fluviométricas.

Quadro 1 – Estações fluviométricas utilizadas.

Estação	Nome	Ád (km <sup>2</sup> )	Curso Hídrico	Latitude	Longitude
76085000	CACHOEIRA 5 VEADOS	1540	Rio Toropi	-29.4289	-54.0542
76100000	VILA CLARA	2790	Rio Toropi	-29.5561	-54.3422
76251000	DOM PEDRITO	462	Rio Santa Maria	-30.9703	-54.6933
76300000	PONTE IBICUI DA ARMADA	6010	Rio Ibicuí Da Armada	-30.2808	-54.9031
76310000	ROSARIO DO SUL	12100	Rio Santa Maria	-30.2428	-54.9169

Estação	Nome	Ád (km²)	Curso Hídrico	Latitude	Longitude
76370000	AZEVEDO SODRE	1220	Rio Cacequi	-30.1056	-54.6375
76395000	PASSAGEM BR-287	473	Rio Ibicuí-Mirim	-29.665	-54.1067
76431000	PCH FURNAS DO SEGREDO	1830	Rio Jaguari	-29.3803	-54.5103
76440000	JAGUARI	2320	Rio Jaguari	-29.4989	-54.6892
76460000	ERNESTO ALVES	926	Rio Jaguarizinho	-29.3625	-54.7353
76500000	JACAQUA	27800	Rio Ibicuí	-29.6869	-55.1961
76560000	MANOEL VIANA	29400	Rio Ibicuí	-29.5958	-55.4814
76650000	PASSO DA CACHOEIRA	2560	Rio Itu	-29.3086	-55.7069
76700000	PASSO DOS BRITOS	3200	Rio Ibirapuitã	-29.9731	-55.7478
76742000	PASSO DO OSORIO	1160	Arroio Cavera	-29.9511	-55.6003
76750000	ALEGRETE	5868	Rio Ibirapuitã	-29.7683	-55.7875
76800000	PASSO MARIANO PINTO	42500	Rio Ibicuí	-29.3092	-56.0553

Quanto às estações pluviométricas, buscou-se alcançar o maior número de estações, a fim de que se obtivessem valores espacialmente melhor representados. Foram utilizadas as estações: 2854013, 2855005, 2855006, 2856007, 2953005, 2953011, 2953013, 2953017, 2953018, 2953021, 2953023, 2953027, 2953028, 2953029, 2953030, 2953033, 2953034, 2953035, 2953038, 2953043, 2953045, 2954001, 2954002, 2954004, 2954005, 2954006, 2954007, 2954009, 2954010, 2954011, 2954013, 2954014, 2954015, 2954016, 2954019, 2954020, 2954024, 2954025, 2954026, 2954027, 2954028, 2954029, 2954030, 2954031, 2954032, 2954033, 2954034, 2954035, 2954036, 2955001, 2955002, 2955003, 2955004, 2955005, 2955006, 2955007, 2955008, 2955009, 2955011, 2955012, 2955013, 2955014, 2955015, 2955016, 2955017, 2956001, 2956002, 2956003, 2956004, 2956005, 2956006, 2956007, 2956008, 2956009, 2956010, 3053004, 3053007, 3053008, 3053009, 3053016, 3053017, 3053019, 3053023, 3053024, 3054001, 3054002, 3054003, 3054004, 3054005, 3054006, 3054007, 3054008, 3054009, 3054010, 3054011, 3054012, 3054013, 3054014, 3054015, 3054016, 3054017, 3054018, 3054019, 3054020, 3054021, 3054022, 3055001, 3055002, 3055003, 3055004, 3055005, 3055006, 3055007, 3055008, 3055009, 3055011, 3055012, 3056001, 3056002, 3056003, 3056005, 3056006, 3056007, 3056008, 3056009, 3056010, 3153003, 3153012, 3154001, 3154003, 3154004, 3154005, 3154008, 3155001, 3154005, 3154008 e 3155001.

Já, para a extração de dados de normais climatológicas, foi utilizada a ferramenta “*Climate variables using INMET climatology database (Brazil)*” do plugin do MGB no QGIS. A extração foi feita para estações presentes no interior da bacia do rio Ibicuí, dessa

maneira, foram consideradas as estações: 83953 – Santana do Livramento e 83931 – Alegrete.

#### 4.3.2.3 Calibração e Validação

Com base na premissa do estudo, de realizar a seleção de estações diferentes para calibração (2/3 do total) e validação (1/3 do total), foram obtidas as séries de vazões diárias para as estações da bacia do Ibicuí junto ao portal *Hidroweb* da ANA. Ao todo, encontraram-se 17 estações com dados e realizou-se o *download* da série temporal disponível completa, a fim de se verificar o melhor período e estações para serem feitos os procedimentos de calibração e validação.

No Apêndice I, há uma tabela com a quantidade de dias com disponibilidade de dados das 17 estações para cada ano no período máximo de dados disponíveis. Na segunda linhas está o número anos com disponibilidade de dados acima de 300 dias, valor que foi considerado aceitável para que se obtenha resultados de vazão máxima representativos.

Para definir os períodos de calibração e validação, buscou-se dois períodos de 15 anos subsequentes, sendo o mais recente utilizado para a calibração e o outro, para a validação. Desse modo, foi definido que os anos de 2006 a 2020 seriam utilizados para a calibração e de 1991 a 2005, para a validação, não foram utilizados períodos mais recentes, mesmo havendo disponibilidade, em função do início da operação de diversas PCHs. Após isso, procurou-se estações que possuam disponibilidade de dados de vazão nesses períodos, chegando à Tabela 3. Foi observado ao selecionar os dados a consistência desses números, realizando uma pré-consistência a partir da verificação de anomalias nos hidrogramas.

Tabela 3 – Disponibilidade de dados para o período de calibração e validação

<b>Estação</b>	<b>Disponibilidade total (anos)</b>	<b>Disponibilidade 2006-2020</b>	<b>Disponibilidade 1991-2005</b>
76085000	45	15	15
76100000	80	15	15
76251000	20	14	5
76300000	55	15	15
76310000	55	15	15
76370000	11	10	1
76395000	12	8	4
76431000	3	3	0
76440000	80	15	15

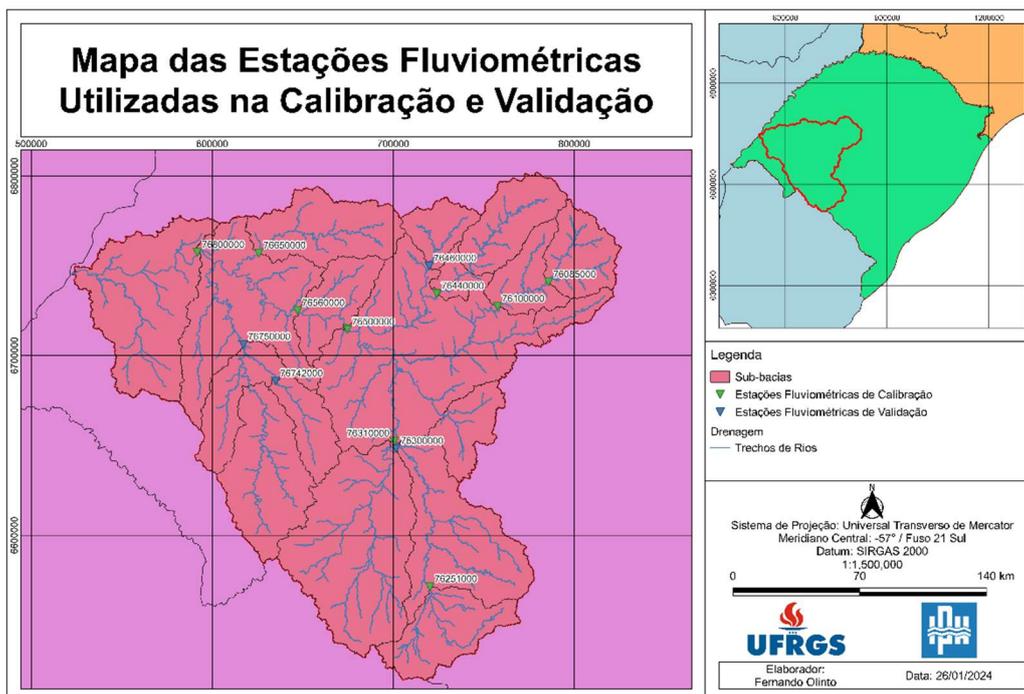
<b>Estação</b>	<b>Disponibilidade total (anos)</b>	<b>Disponibilidade 2006-2020</b>	<b>Disponibilidade 1991-2005</b>
76460000	63	15	15
76500000	59	15	15
76560000	55	15	15
76650000	72	15	15
76700000	13	0	3
76742000	45	14	15
76750000	82	15	15
76800000	59	15	15

Com base na Tabela 3, constata-se que as estações 76370000, 76395000, 76431000 e 76700000 não são passíveis de serem utilizadas em nenhum período, pois não possuem disponibilidade de dados adequada, e que a estação 76251000 não é passível de uso para o período de validação, de 1991 a 2005. Seguindo o critério estabelecido de que 2/3 das estações seriam utilizadas para a calibração e 1/3 para a validação, como também a disponibilidade de dados observada e uma amplitude de área de drenagem das bacias, as estações foram subdivididas conforme o Quadro 2 e podem ser visualizadas espacialmente na Figura 12.

Quadro 2 – Estações escolhidas para calibração e validação.

<b>Calibração</b>		<b>Validação</b>	
<b>Estação</b>	<b>Ad (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Estação</b>	<b>Ad (km<sup>2</sup>)</b>
76085000	1538	76300000	5997
76100000	2794	76460000	928
76251000	2111	76742000	1166
76310000	12083	76750000	5952
76440000	2324		
76500000	27812		
76560000	29354		
76650000	2564		
76800000	42563		

Figura 12 – Mapa das estações fluviométricas de calibração e validação.



#### 4.4 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

Como o objetivo do estudo é comparar um método complexo, a modelagem hidrológica, com um simples, a regionalização, foi escolhido o método de regionalização considerado o mais simples: método da vazão específica. Neste método considera-se que a vazão é diretamente proporcional à área de drenagem da bacia, sendo esta a única variável explicativa. Para o método da vazão específica, utiliza-se a equação (6).

$$Q_u = Q_g \frac{Ad_u}{Ad_g} \quad (6)$$

Onde  $Q_u$  é a vazão no local sem dados em  $m^3/s$ ,  $Q_g$  é a vazão no local com dados em  $m^3/s$ ,  $Ad_u$  é a área de drenagem do local sem dados em  $km^2$  e  $Ad_g$  é a área de drenagem do local com dados em  $km^2$ .

O método de regionalização de vazões necessita atribuir um valor de referência, portanto buscou-se a representatividade de vazões altas e vazões baixas a partir de vazões de referência:

- para as vazões baixas foi fixado o valor da  $Q_{90\%}$ , que é a vazão igualada ou superada em 90% do tempo;
- para vazões altas utilizou-se o valor da vazão com TR de 5 anos, que foi denominada de  $Q_{TR5}$ .

O cálculo da  $Q_{90\%}$  foi feito de maneira simples, ao colher todos os dados de vazão diária disponíveis para o período de interesse e aplicar a função percentil no *Excel*. Já, para a  $Q_{TR5}$  foi feita a análise estatística de probabilidade pelo método de Gumbel, descrita no item 3.2.2 .

Para as duas estimativas, foram obtidas curvas que relacionassem linearmente a vazão com a área de drenagem, a partir dos dados das estações de calibração selecionadas e no intervalo de calibração de 2006 a 2020.

Figura 13 – Gráfico de  $Q_{90\%}$  obtido na calibração.

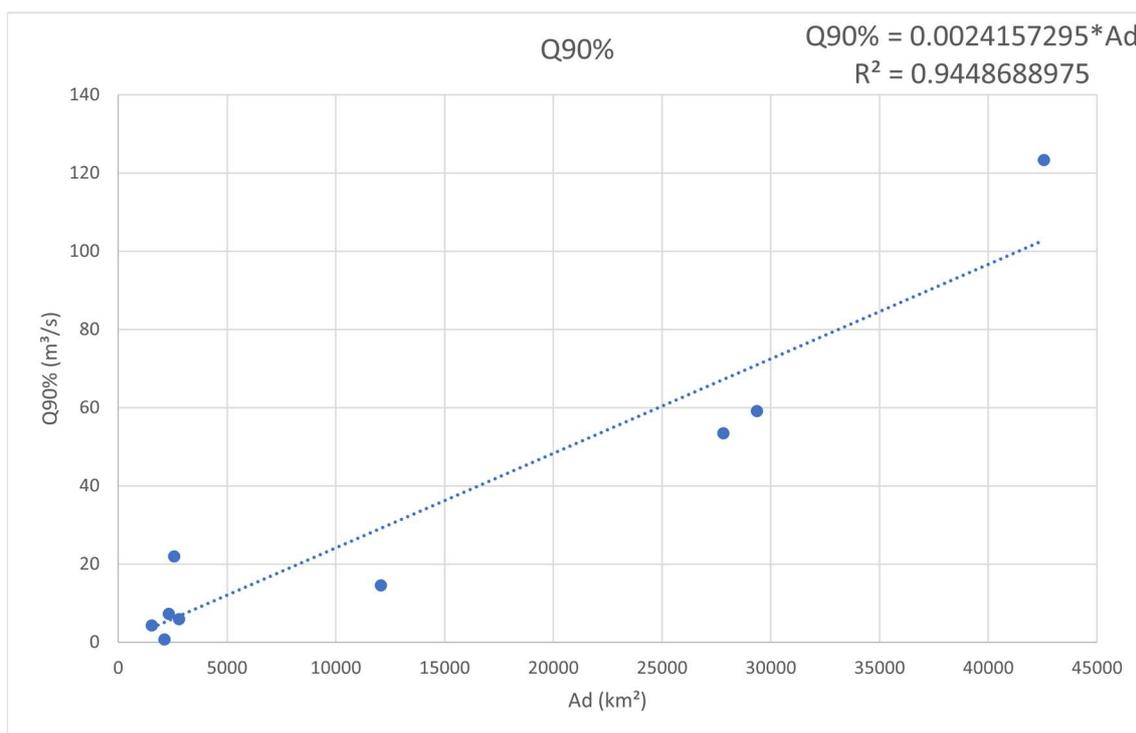


Tabela 4 – Dados de  $Q_{90\%}$  obtido na calibração.

Estação	Q <sub>90%</sub>	Ad (km <sup>2</sup> )
76085000	4.3	1538
76100000	5.9	2794
76251000	0.7	2111
76310000	14.6	12083
76440000	7.3	2324
76500000	53.4	27812

<b>Estação</b>	<b>Q<sub>90%</sub></b>	<b>Ad (km<sup>2</sup>)</b>
76560000	59.1	29354
76650000	21.9	2564
76800000	123.3	42563

Figura 14 – Gráfico de Q<sub>TR5</sub> obtido na calibração.

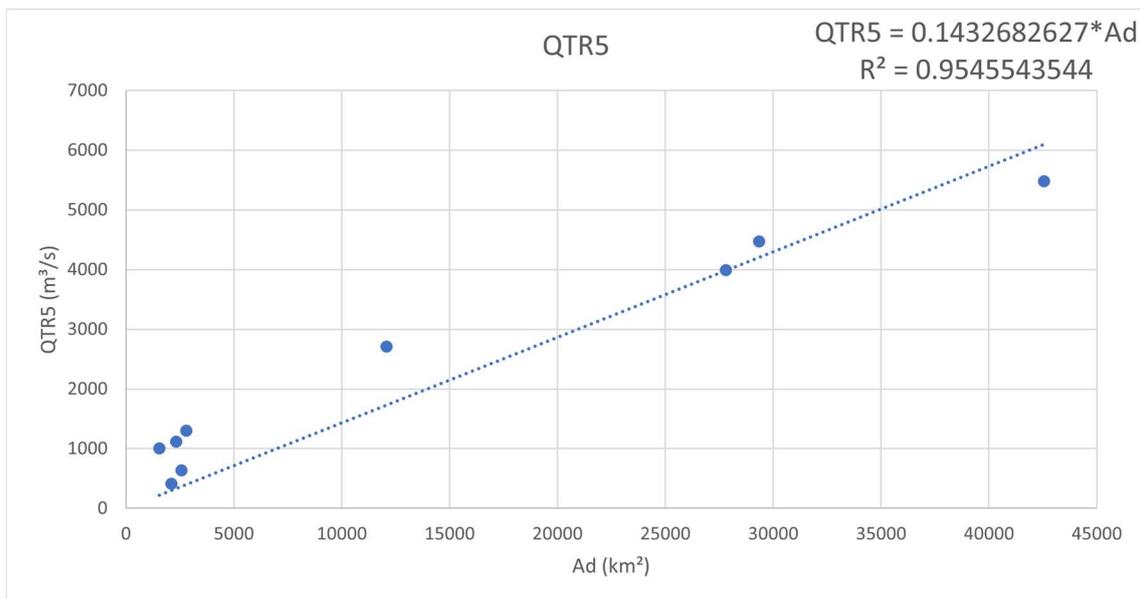


Tabela 5 – Dados de Q<sub>TR5</sub> obtido na calibração.

<b>Estação</b>	<b>Q<sub>TR5</sub></b>	<b>Ad (km<sup>2</sup>)</b>
76085000	1007.5	1538
76100000	1299.3	2794
76251000	412.6	2111
76310000	2712.3	12083
76440000	1116.5	2324
76500000	3987.9	27812
76560000	4470.4	29354
76650000	634.9	2564
76800000	5482.7	42563

## 5 RESULTADOS

Neste item são elucidados os resultados provenientes das aplicações dos dados hidrometeorológicos selecionados aos modelos de estimativa de vazão para locais sem dados: modelagem hidrológica pelo MGB-IPH e regionalização por vazão específica, além de uma posterior comparação entre os resultados obtidos em cada um dos modelos com os dados observados das estações utilizadas para validação.

### 5.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O MGB-IPH

Inicialmente foi feita a calibração dos parâmetros calibráveis do modelo via calibração automática e manual para as 9 estações selecionadas, compreendidas no Quadro 2, no período de 2006 a 2020. Posteriormente, com o modelo calibrado foi realizada a validação para as 4 estações, também inclusas no Quadro 2, no período de 1991 a 2005. Os resultados obtidos são representados em forma de hidrogramas, curva de permanência, mapas e tabelas para a compreensão integral do constatado.

#### 5.1.1 Calibração

O modelo foi calibrado através de sucessivos procedimentos de calibração automática e manual. O módulo de calibração automática do MGB-IPH é uma calibração multiobjetivo regido por um algoritmo genético que tendo como base uma população inicial, busca encontrar uma geração com valores superiores a geração anterior. A cada geração, são concebidos novos indivíduos partindo dos indivíduos da geração atual que, dentro de certo grau de aleatoriedade, empenham-se para encontrar valores mais adequados para as funções objetivo.

Função objetivo é uma equação matemática a ser minimizada para garantir a máxima similaridade entre os resultados do modelo e as observações (ARSENAULT, BRISSETTE, AND MARTEL, 2018).

As funções objetivo escolhidas para a calibração automática foram: a métrica de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), a métrica de eficiência de Nash-Sutcliffe do

logaritmo das vazões (NSElog) e o erro percentual de volume (PBIAS), todas com peso de igual valor. As equações das métricas de desempenho encontram-se abaixo.

$$NSE = 1 - \frac{\sum(M_i - O_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

$$NSElog = 1 - \frac{\sum(\ln(M_i) - \ln(O_i))^2}{\sum(\ln(O_i) - \ln(\bar{O}))^2} \quad (8)$$

$$PBIAS = \frac{Média(M_i - O_i)}{\bar{O}} \quad (9)$$

Onde,  $M_i$  é a vazão obtida com o modelo para um momento “i”,  $O_i$  é a vazão observada para um momento “i” e  $\bar{O}$  é a média das vazões observadas.

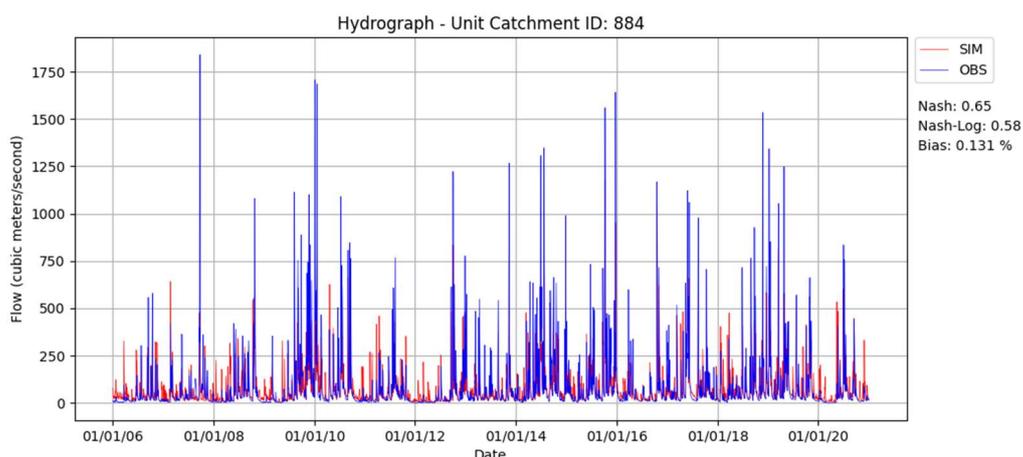
A calibração foi realizada de montante para jusante, uma bacia por vez, após procedeu-se a calibração por encadeamento dos pontos de controle.

Os resultados dos parâmetros calibrados podem ser observados no Apêndice II.

#### 5.1.1.1 Hidrogramas

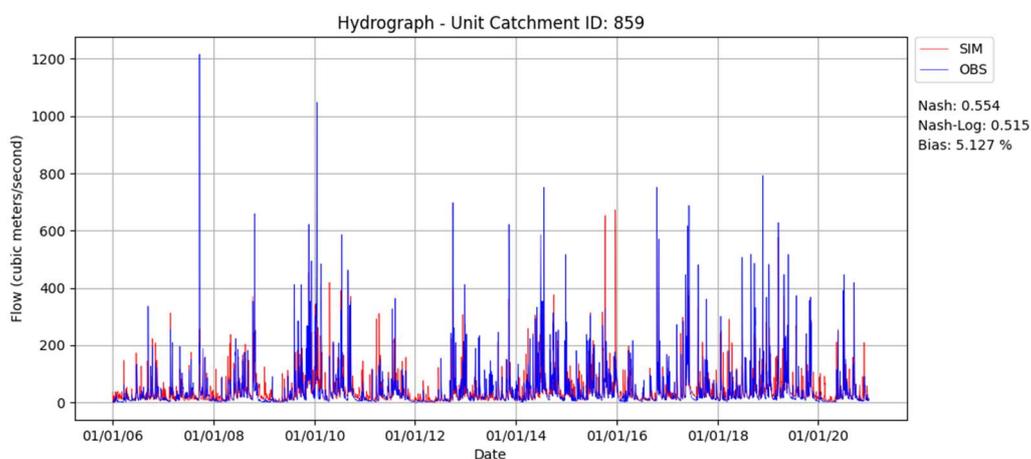
Abaixo, da Figura 15 à Figura 23, são apresentados os hidrogramas e os coeficientes de NSE, NSElog e PBIAS obtidos após a calibração dos parâmetros. Todas as estações alcançaram valores de PBIAS considerados muito bons, de acordo com Moriasi et al. (2007), como consta no Quadro 3.

Figura 15 – Hidrograma de calibração para a estação 76085000.



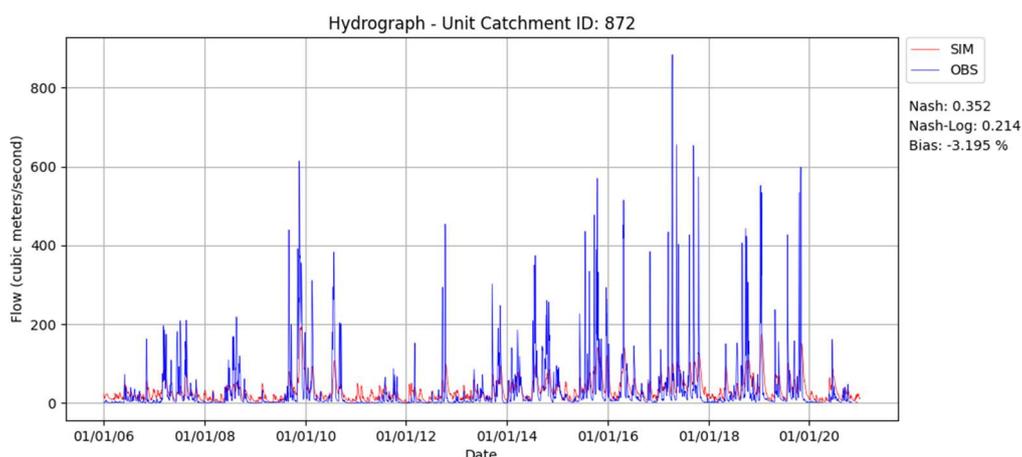
O hidrograma da estação 76085000 indica que foram obtidas métricas de desempenho boa e muito boa, NSE e PBIAS, respectivamente, porém, em uma análise visual no hidrograma identifica-se que os picos aparentam possuir um limiar, onde praticamente qualquer pico alcança, todavia, por existir esse limite, o hidrograma não alcança valores de pico realmente muito altos.

Figura 16 – Hidrograma de calibração para a estação 76100000.



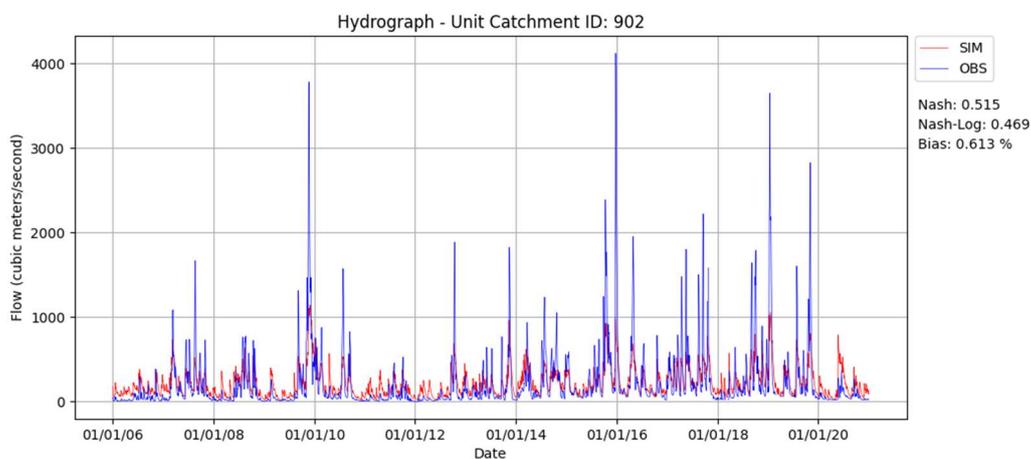
A estação 76100000 atingiu um valor satisfatório de NSE. Por ser uma estação encadeada a jusante da estação 76085000, os resultados podem apresentar enviesamento, na vazão recebida das bacias a montante, prejudicando seu desempenho, pelo menos em termos de métricas. Visualmente é possível perceber que os picos se tornam de escala mais próxima aos picos observados, contudo a vazão de base parece estar acima da observada e o hidrograma, mais sensível.

Figura 17 – Hidrograma de calibração para a estação 76251000.



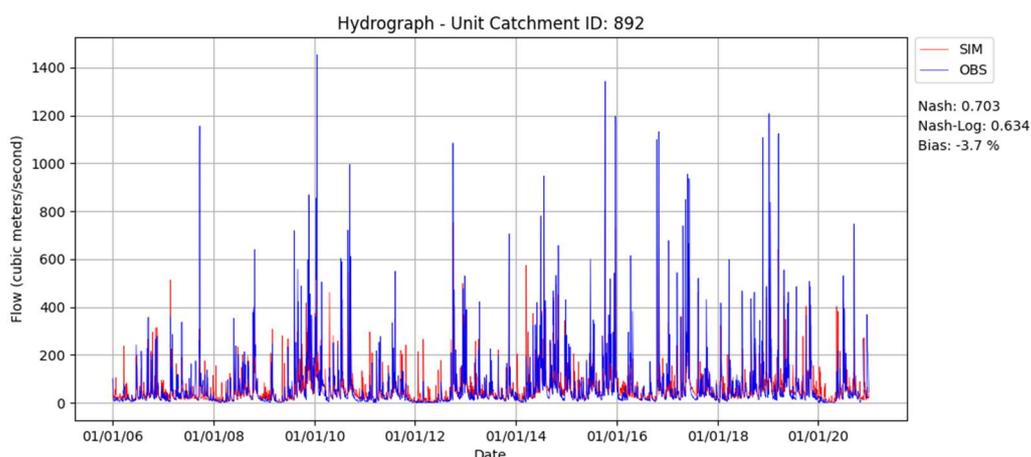
A estação 76251000 encontra-se em uma cabeceira da bacia e obteve a pior métrica dentre todas as estações, a única considerada insatisfatória. Observa-se que a vazão de base simulada está sempre acima da observada e que os picos sempre são subestimados, apesar disso, a simulação logrou um hidrograma consideravelmente mais sensível a precipitações de intensidade baixa, que nos dados observados não provocam elevações de vazão significativas.

Figura 18 – Hidrograma de calibração para a estação 76310000.



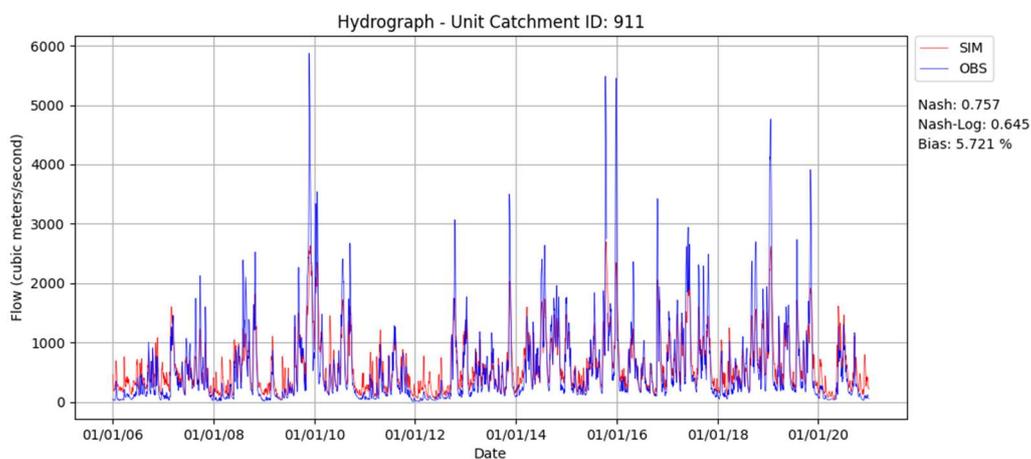
A estação 76310000 encontra-se encadeada a jusante da estação 76251000, porém, diferentemente da sua contribuinte, atingiu um valor de NSE satisfatório. O hidrograma aparenta ser condizente com as vazões observadas, em magnitude de picos e sensibilidade, em contrapartida, a simulação não foi capaz de representar com precisão os grandes picos e as recessões do hidrograma.

Figura 19 – Hidrograma de calibração para a estação 76440000.



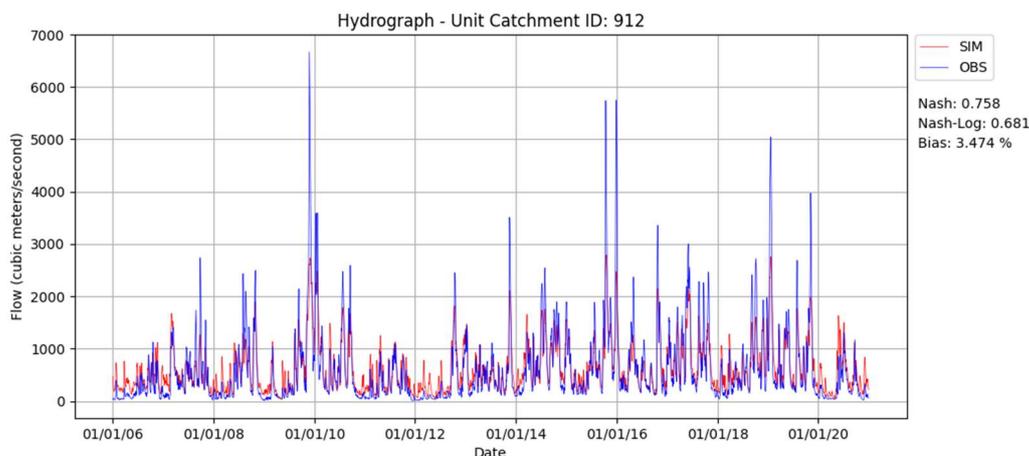
A estação 76440000 recebeu um valor de NSE considerado bom, em sua bacia de drenagem há o reservatório da PCH Furnas do Segredo, que entrou em operação em 2006, mas que funciona a fio d'água, de modo que não determinou impactos significativos nas vazões simuladas. A simulação conseguiu alcançar valores próximos aos observados para os picos e vazões de base, entretanto, mostrou-se bem mais sensível a pequenas precipitações.

Figura 20 – Hidrograma de calibração para a estação 76500000.



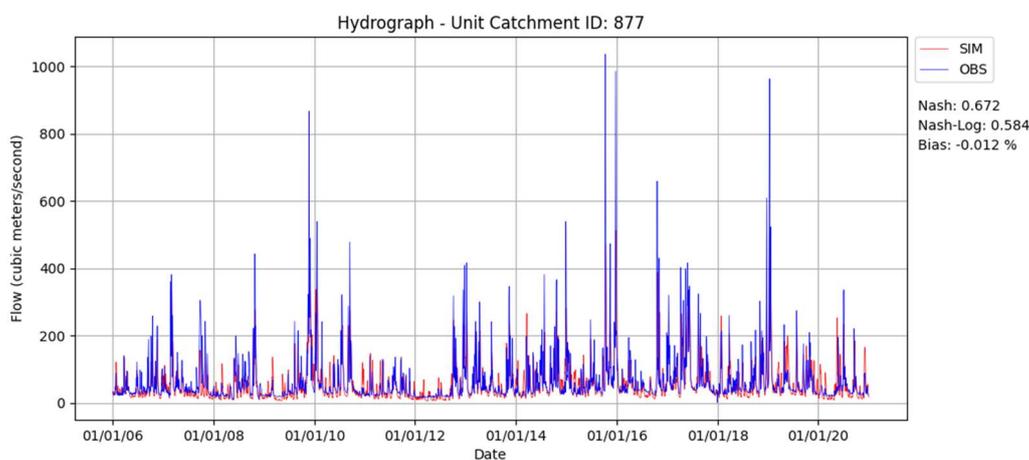
A estação 76500000 possui uma área de drenagem bastante extensa, recebendo vazão de todas as 5 estações analisadas anteriormente neste item. O valor de NSE foi considerado muito bom e o hidrograma em uma abordagem inicial evidencia vazões de picos baixos superestimadas, mas não muito distantes dos valores observados, já, para os picos médios e altos, as vazões aparentam ser subestimadas, mas também não variando muito dos picos observados.

Figura 21 – Hidrograma de calibração para a estação 76560000.



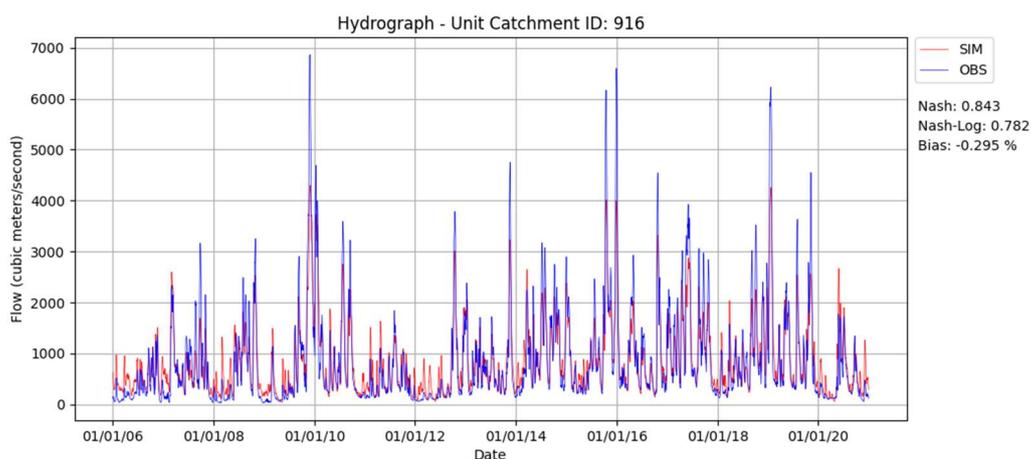
Estação 76560000 situa-se a jusante da 76500000, sendo que, dentre as estações utilizadas no estudo, somente vazão desta última contribui para a 76560000, que recebeu valor de NSE muito bom. O comportamento do hidrograma é muito semelhante ao observado para a estação 76500000, podendo-se chegar as mesmas conclusões a partir da análise visual do hidrograma, fato que evidencia a proximidade das duas estações.

Figura 22 – Hidrograma de calibração para a estação 76650000.



A estação 76560000 tem sua área de drenagem em uma cabeceira da bacia do Ibicuí e obteve um NSE bom. Apresenta a mesma limitação da estação 76085000: picos aparentam possuir um limiar, onde praticamente qualquer pico alcança, todavia, por existir esse limite, o hidrograma não alcança valores de pico realmente muito altos, ou seja, subestima os maiores picos e superestima os picos menores.

Figura 23 – Hidrograma de calibração para a estação 76800000.



Estação 76800000, a mais a jusante da bacia, atingiu o maior valor de NSE, considerado muito bom. Observa-se que é a bacia que melhor representou os picos do hidrograma, em especial os maiores, além de apresentar boa semelhança às recessões.

### 5.1.1.2 Curvas de permanência

Abaixo, da Figura 24 à Figura 32, são apresentadas as curvas de permanência das bacias obtidas após a calibração dos parâmetros.

Em geral, as curvas demonstraram boa representatividade para vazões altas, com leves subestimações, e superestimação para as maiores permanências, com exceção da 76650000 que apresentou uma curva simulada normalmente próxima à observada, mas que em altas permanências subestimou as vazões.

Figura 24 – Curva de permanência de calibração para a estação 76085000.

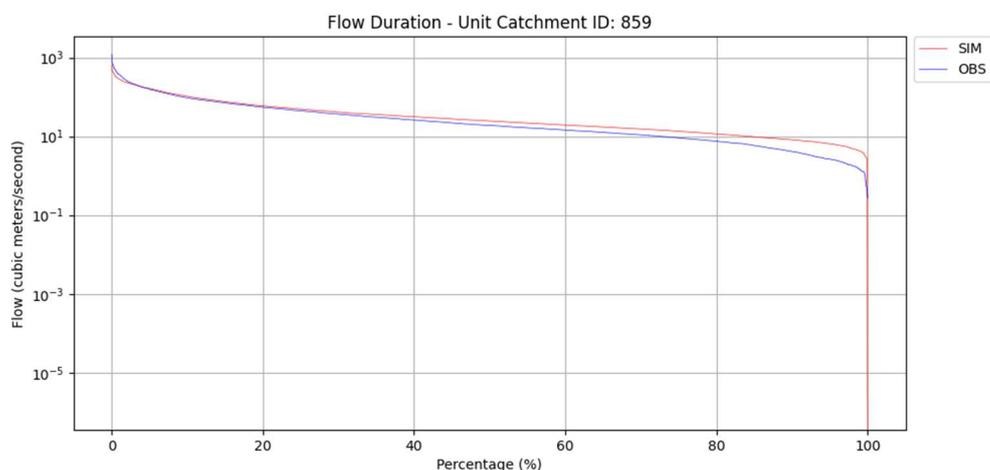


Figura 25 – Curva de permanência de calibração para a estação 7610000.

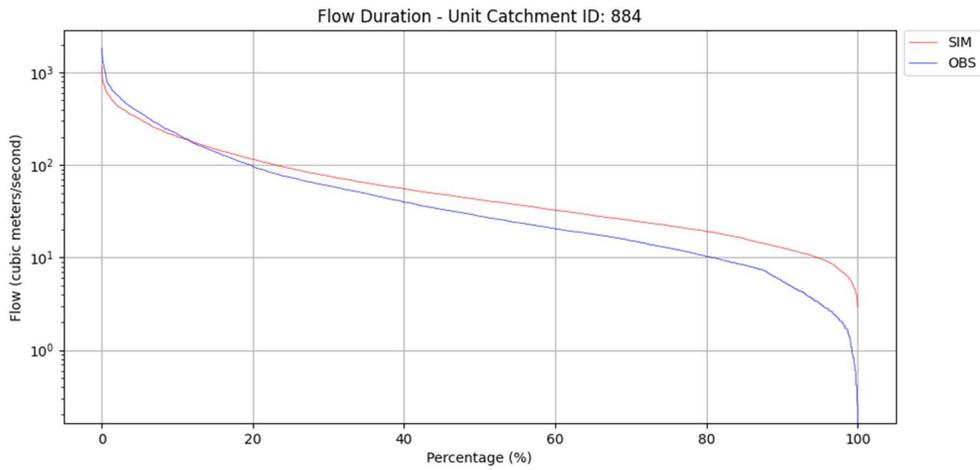


Figura 26 – Curva de permanência de calibração para a estação 76251000.

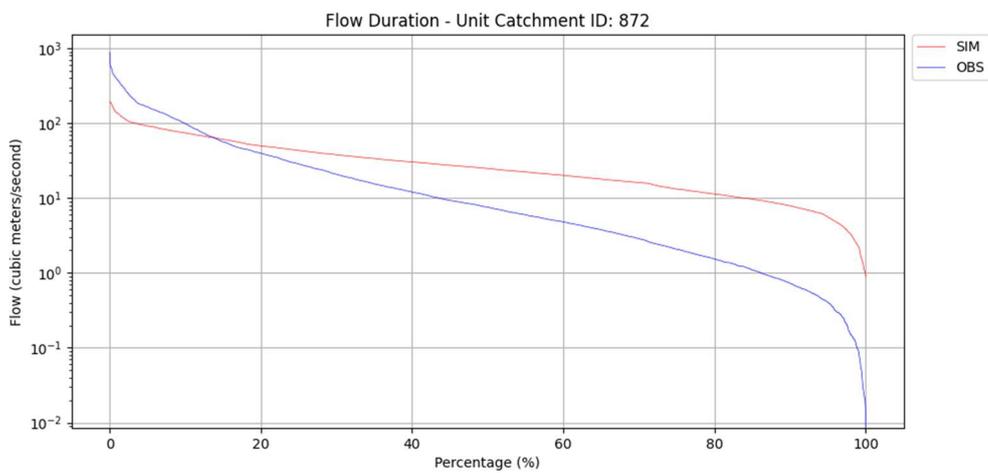


Figura 27 – Curva de permanência de calibração para a estação 76310000.

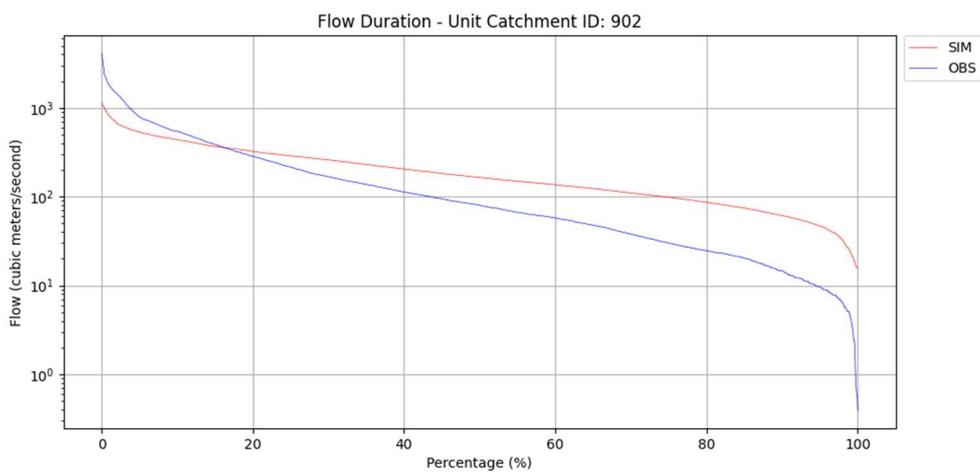


Figura 28 – Curva de permanência de calibração para a estação 76440000.

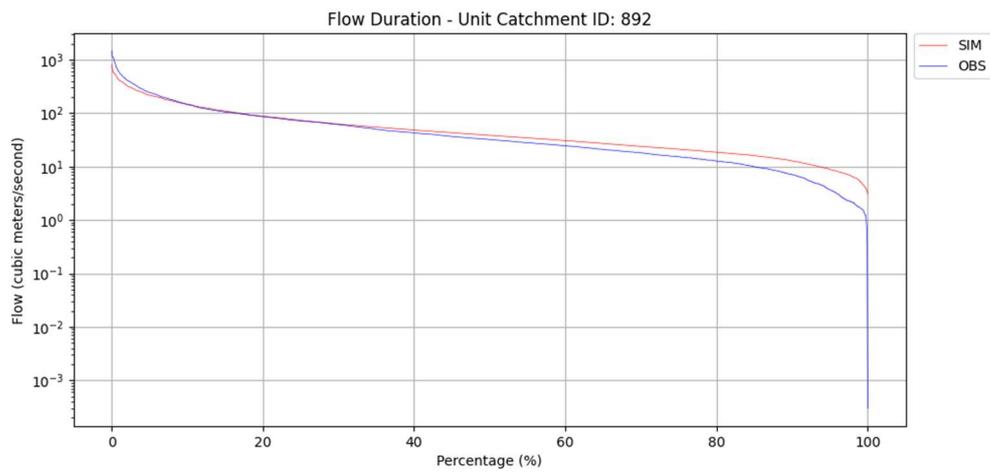


Figura 29 – Curva de permanência de calibração para a estação 76500000.

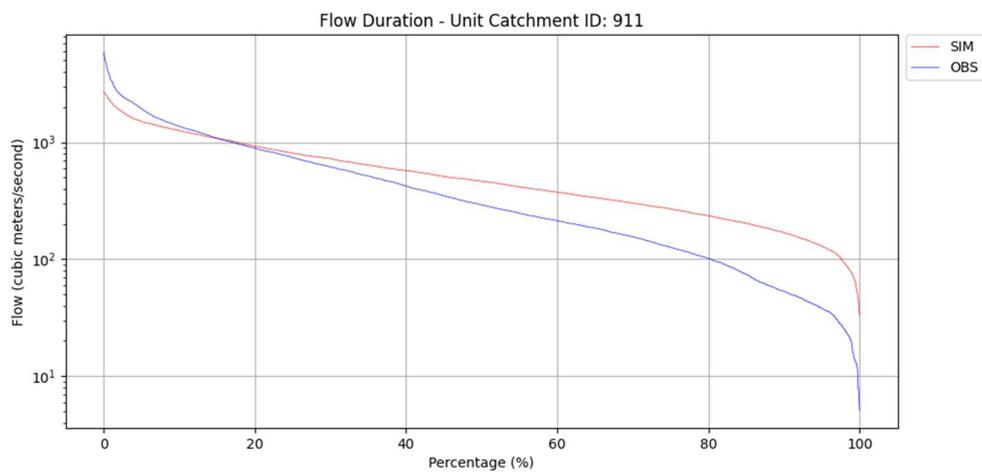


Figura 30 – Curva de permanência de calibração para a estação 76560000.

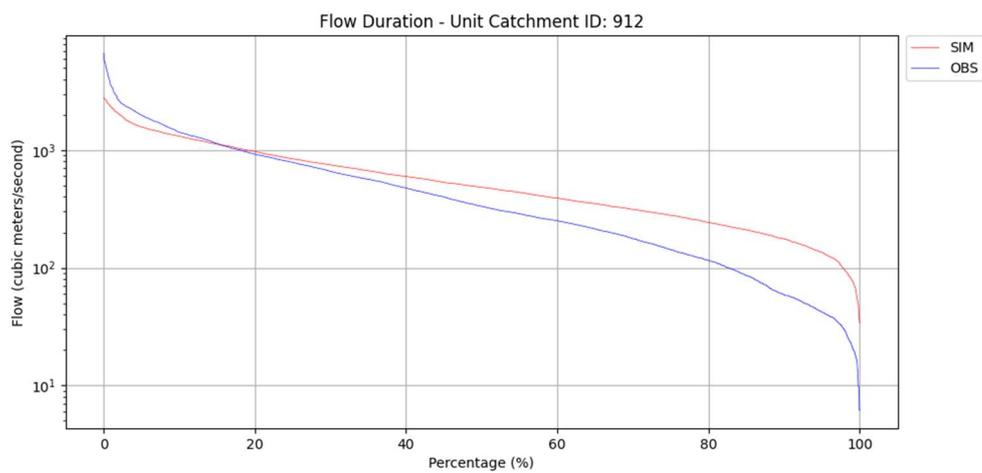


Figura 31 – Curva de permanência de calibração para a estação 76650000.

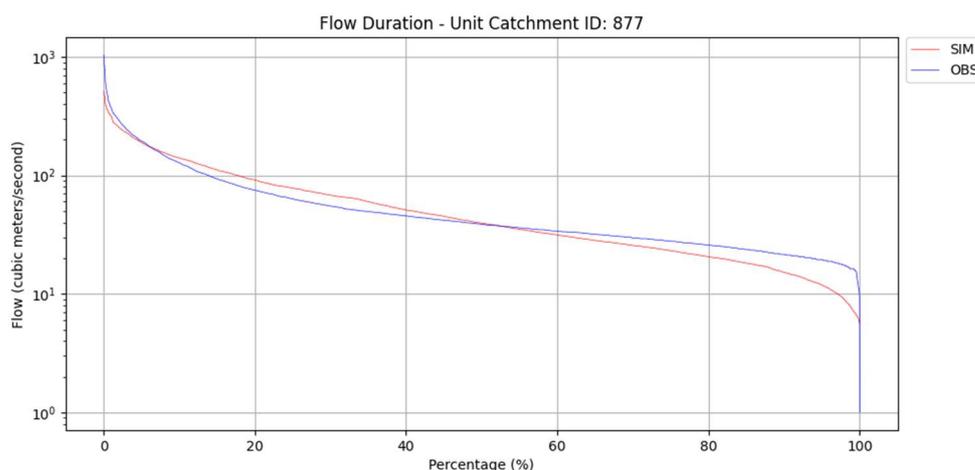
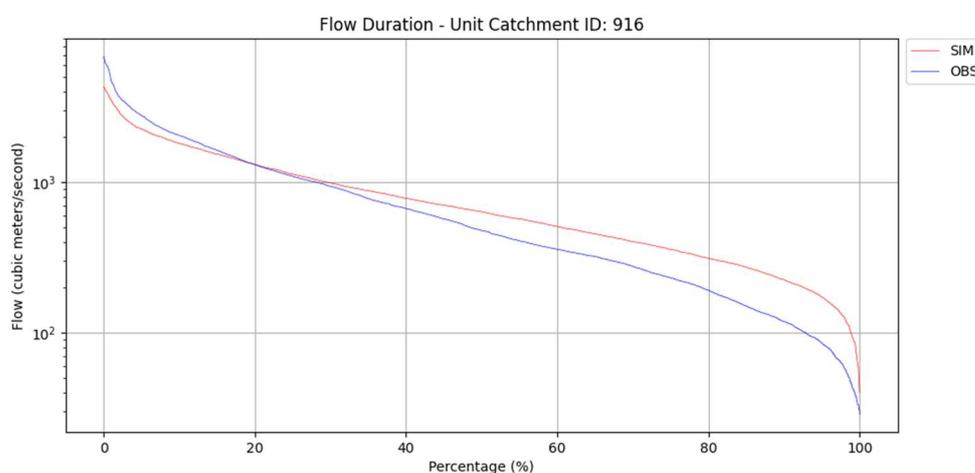


Figura 32 – Curva de permanência de calibração para a estação 76800000.



Em geral, a calibração do MGB teve melhor ajuste para vazões altas, e menor aderência em vazões mínimas.

### 5.1.1.3 Funções-Objetivo

Para a avaliação das funções objetivo, foi tomado por base a classificação proposta por Moriasi et al. (2007), descrita no Quadro 3.

Quadro 3 – Valores recomendados para métricas de análise de resultados.

Performance	NSE	PBIAS (%)
Muito bom	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$
Bom	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfatório	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 20$
Insatisfatório	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 20$

Fonte: adaptado de Moriasi et al. (2007).

Na Tabela 6 foram compilados os valores das funções objetivo de calibração. Nota-se que somente a estação 76251000 apresentou valor de NSE insatisfatório, ainda assim, seu valor de PBIAS foi considerado bom. As Figura 33 e Figura 34 ilustram a disposição espacial dos NSE e PBIAS, respectivamente.

Tabela 6 – Valores das funções objetivo encontrados para as bacias de calibração.

Estação	Ád (km <sup>2</sup> )	Curso Hídrico	NSE	NSElog	PBIAS
76085000	1538	Rio Toropi	0.554	0.515	5.127
76100000	2794	Rio Toropi	0.650	0.580	0.131
76251000	2111	Rio Santa Maria	0.372	0.146	12.081
76310000	12083	Rio Santa Maria	0.520	0.456	3.035
76440000	2324	Rio Jaguari	0.703	0.634	-3.700
76500000	27812	Rio Ibicuí	0.758	0.640	6.611
76560000	29354	Rio Ibicuí	0.759	0.677	4.311
76650000	2564	Rio Itu	0.672	0.584	-0.012
76800000	42563	Rio Ibicuí	0.844	0.779	0.285

Figura 33 – Mapa com a classificação de valor de NSE para a calibração, segundo Moriasi et al. (2007).

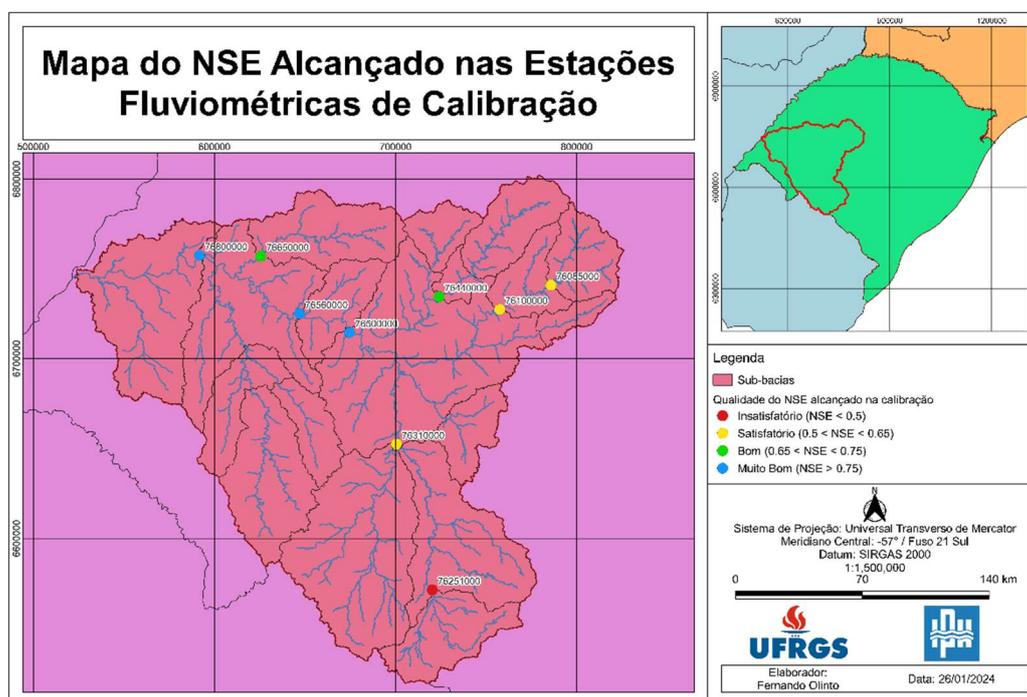
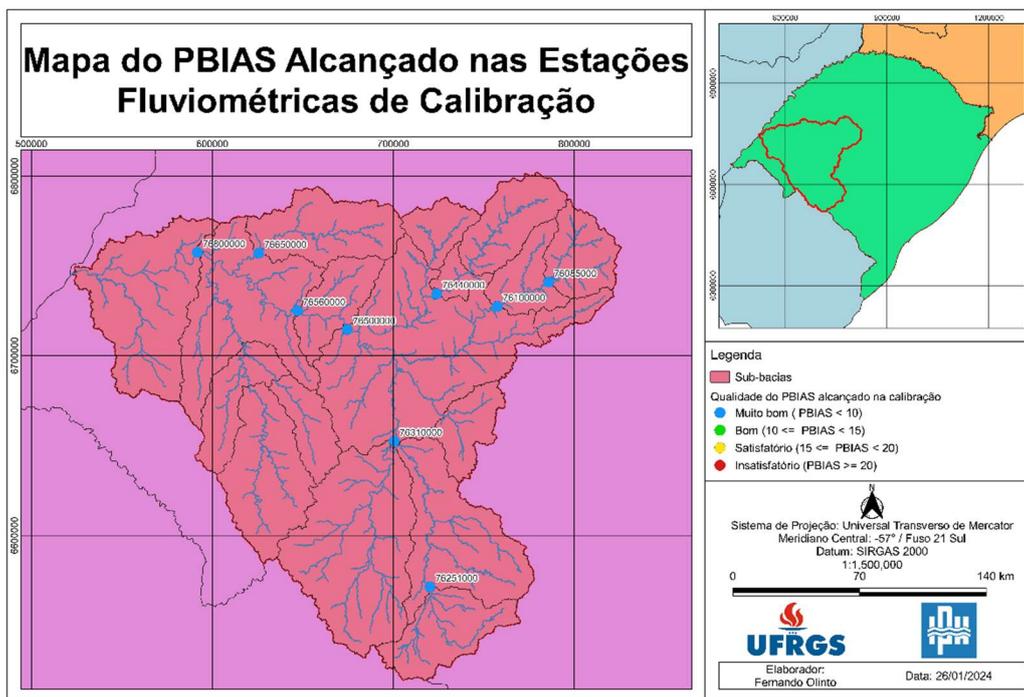


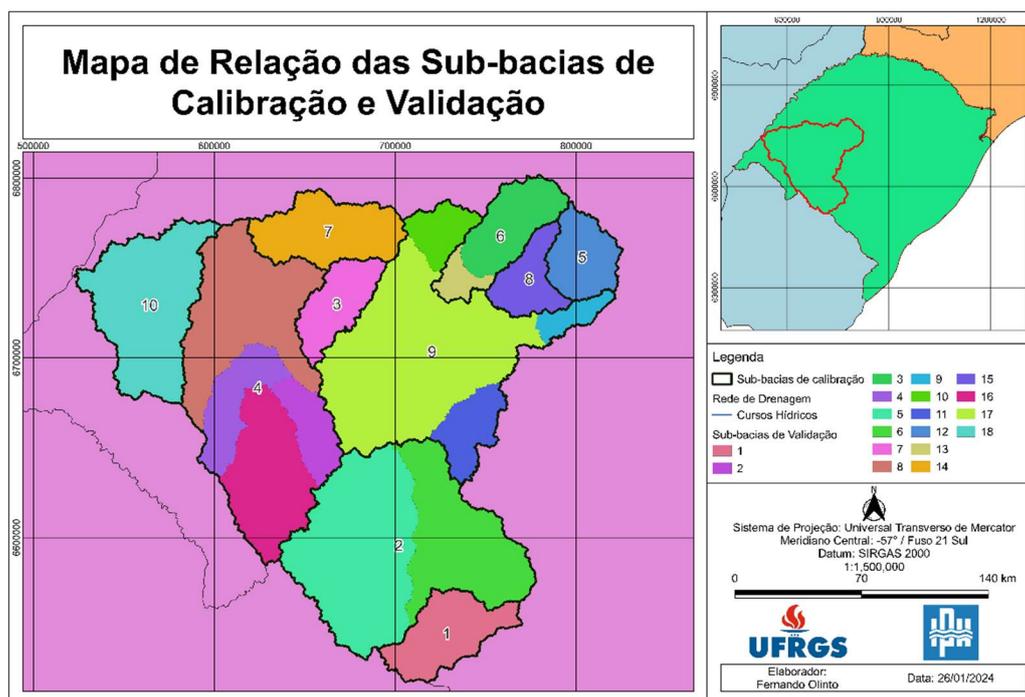
Figura 34 – Mapa com a classificação de valor de PBIAS para a calibração, segundo Moriasi et al. (2007).



### 5.1.2 Validação

No procedimento da validação no MGB-IPH, os parâmetros calibrados para as sub-bacias de calibração foram transferidos para as sub-bacias de validação sobrepostas, como exemplificado na Figura 35.

Figura 35 – Mapa de identificação da transferência de parâmetros entre sub-bacias.



Conforme a Figura 35, por exemplo, os parâmetros obtidos para a sub-bacia 4 da calibração foram utilizados nas sub-bacias 2, 4, 8 e 16. A distribuição da transferência dos parâmetros consta, abaixo, no Quadro 4.

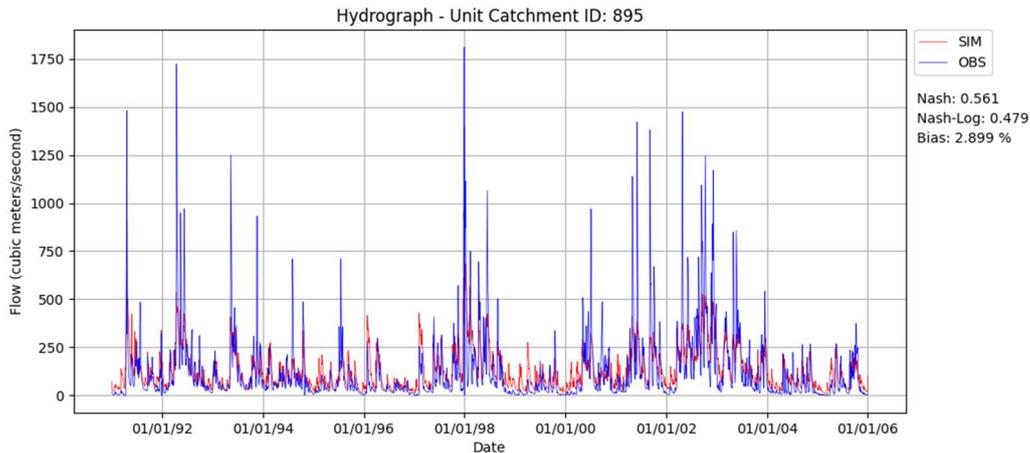
Quadro 4 – Distribuição da transferência de parâmetros para as sub-bacias sobrepostas.

Sub-bacias de Validação	Sub-bacias de Calibração	Código da Estação	Nome da Estação
1	1	76251000	DOM PEDRITO
5	2	76300000	PONTE IBICUI DA ARMADA
6	2	76310000	ROSARIO DO SUL
7	3	76560000	MANOEL VIANA
2	4	76742000	PASSO DO OSORIO
4	4	76750000	ALEGRETE
8	4	76800000	PASSO MARIANO PINTO
16	4	76700000	PASSO DOS BRITOS
12	5	76085000	CACHOEIRA 5 VEADOS
3	6	76431000	PCH FURNAS DO SEGREDO JUSANTE
13	6	76440000	JAGUARI
14	7	76650000	PASSO DA CACHOEIRA
15	8	76100000	VILA CLARA
9	9	76395000	PASSAGEM BR-287
10	9	76460000	ERNESTO ALVES
11	9	76370000	AZEVEDO SODRE
17	9	76500000	JACAQUA
18	10	-	-

### 5.1.2.1 Hidrogramas

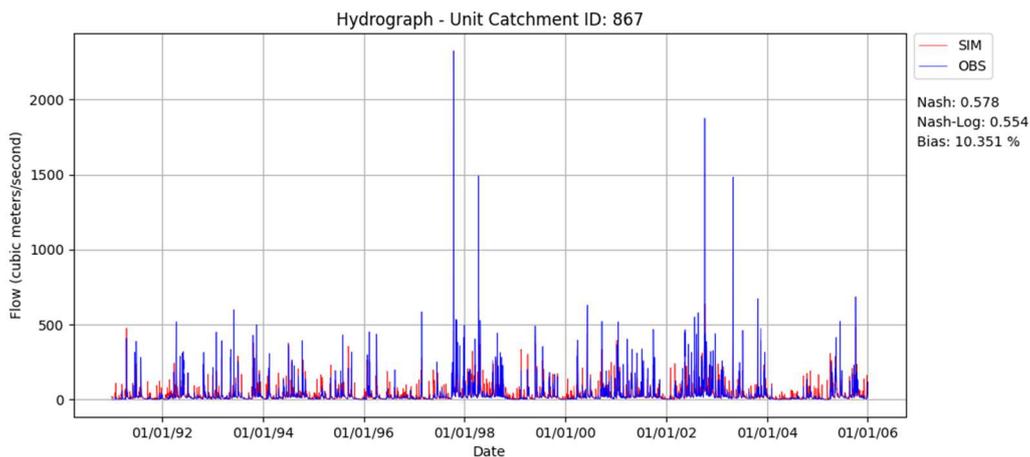
Abaixo, da Figura 36 à Figura 39, são apresentados os hidrogramas e os coeficientes de NSE, NSElog e PBIAS obtidos após a calibração dos parâmetros.

Figura 36 – Hidrograma de validação para a estação 76300000.



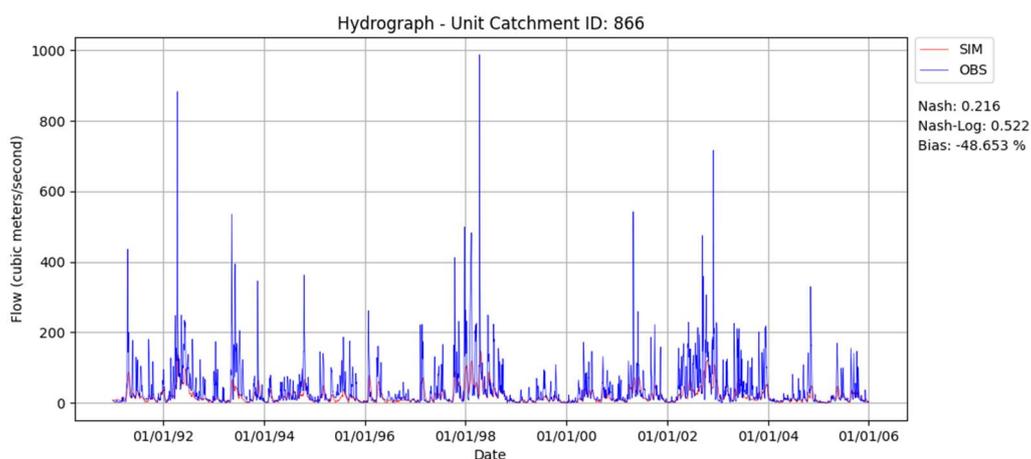
Na validação para a estação 76300000 foi atingido um valor de NSE considerado satisfatório e PBIAS, muito bom. Observa-se que os maiores picos observados não são muito bem representados, porém a simulação se aproxima para os picos médios e apresenta boa representatividade para os picos menores.

Figura 37 – Hidrograma de validação para a estação 76460000.



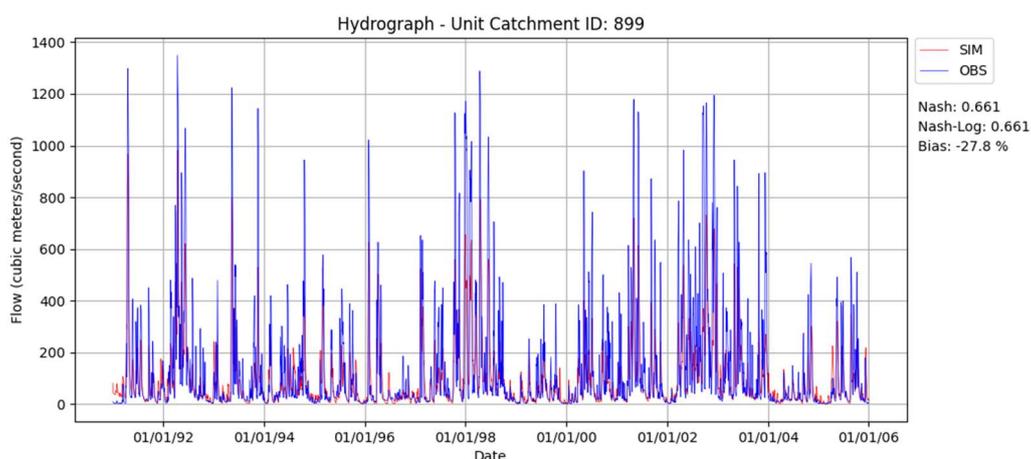
A estação 76460000 conseguiu valores de NSE satisfatório e de PBIAS bom. É possível notar que o hidrograma tem dificuldade de representar picos altos, mas para picos intermediários comporta-se bem, outrossim, o hidrograma aparenta estar com grande sensibilidade a eventos de precipitação de pequena magnitude.

Figura 38 – Hidrograma de validação para a estação 76742000.



Estação 76742000 obteve valores insatisfatórios para NSE e PBIAS. O hidrograma demonstra que a simulação logrou uma boa estimativa da vazão de base, todavia o comportamento para picos, de qualquer magnitude, foi péssimo, o que justifica os valores insatisfatórios das funções objetivo.

Figura 39 – Hidrograma de validação para a estação 76750000.



A estação 76750000 teve valor de NSE considerado bom e PBIAS, insatisfatório, no entanto, visualmente, o hidrograma aparenta representar bem a bacia, com boa semelhança para os maiores picos e para a vazão de base.

### 5.1.2.2 Curvas de permanência

Abaixo, da Figura 40 à Figura 43, são apresentadas as curvas de permanência para as bacias de validação.

As curvas de permanências podem ser enquadradas em duas descrições:

- 76300000 e 76460000 – superestimação da vazão de todas as permanências, com ressalva aos valores de permanência baixa, vazões altas, onde 76300000 subestimou as vazões e o 76460000 representou bem;
- 76742000 e 76750000 – ótima aproximação para as vazões baixas, altos valores de permanência e boa semelhança para o restante da curva, exceto nas permanências reduzidas, em que houve subestimação.

Figura 40 – Curva de permanência de validação para a estação 76300000.

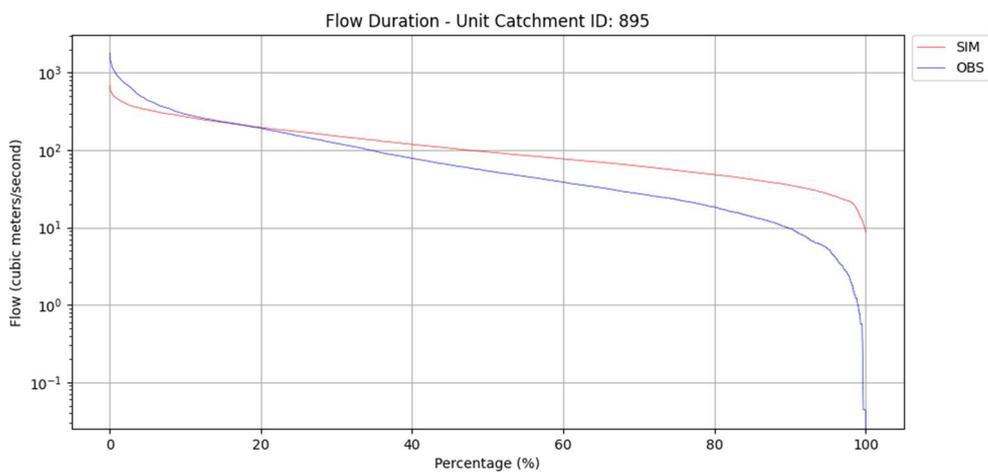


Figura 41 – Curva de permanência de validação para a estação 76460000.

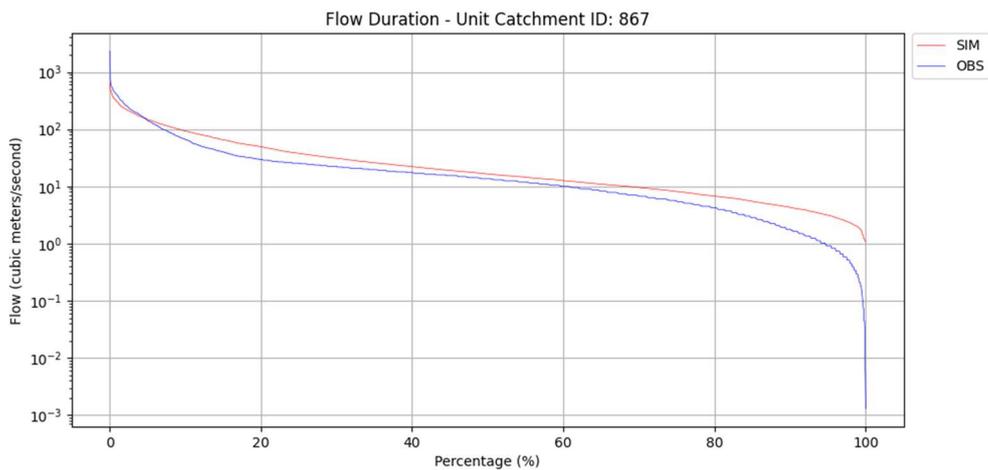


Figura 42 – Curva de permanência de validação para a estação 76742000.

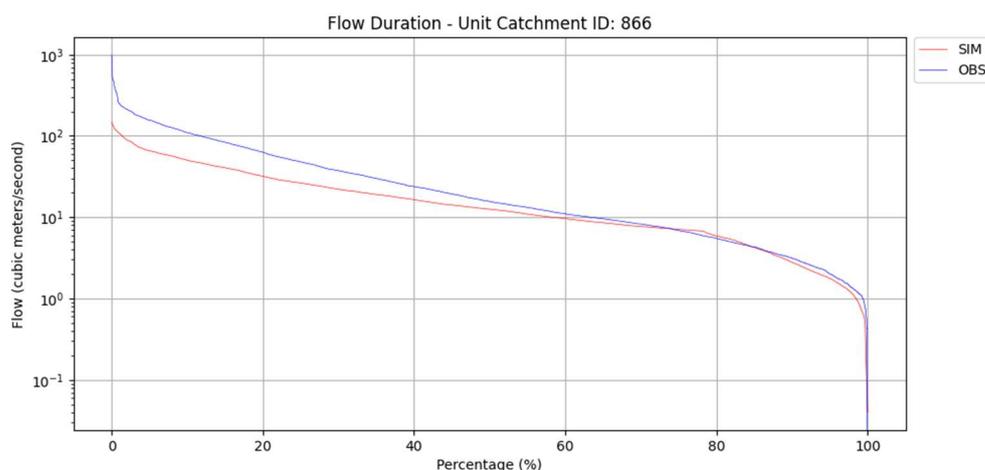
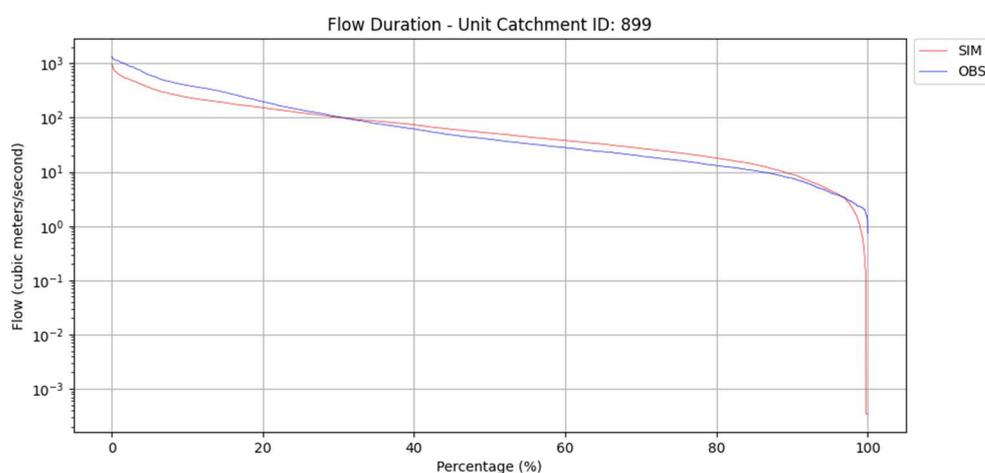


Figura 43 – Curva de permanência de validação para a estação 76750000.



### 5.1.2.3 Funções-Objetivo

Na Tabela 7 foram compilados os valores das funções objetivo de validação. Nota-se que somente a estação 76742000 apresentou valor de NSE insatisfatório, enquanto o PBIAS foi considerado insatisfatório para as estações 76742000 e 76750000. As Figura 44 e Figura 45 ilustram a disposição espacial dos NSE e PBIAS, respectivamente.

Tabela 7 – Valores das funções objetivo encontrados para as bacias de validação.

Estação	Ad (km <sup>2</sup> )	Curso Hídrico	NSE	NSElog	PBIAS
76300000	5997	Rio Ibicuí da Armada	0.561	0.479	2.899
76460000	928	Rio Jaguarzinho	0.578	0.554	10.351
76742000	1166	Arroio Cavera	0.216	0.522	-48.653
76750000	5952	Rio Ibirapuitã	0.661	0.661	-27.800

Figura 44 – Mapa com a classificação de valor de NSE para a validação, segundo Moriasi et al. (2007).

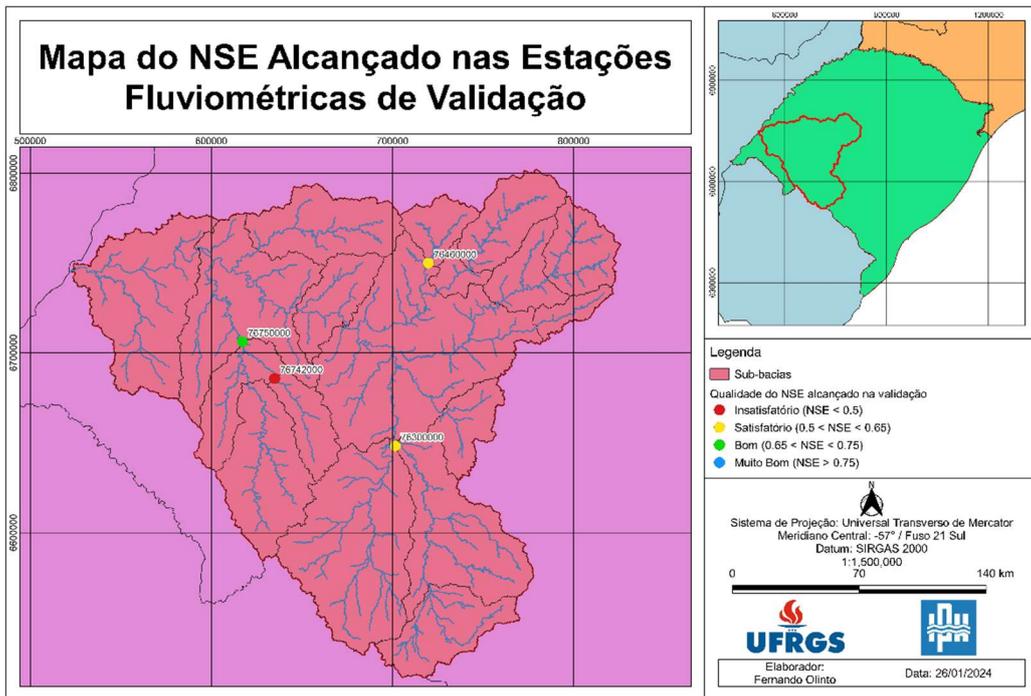
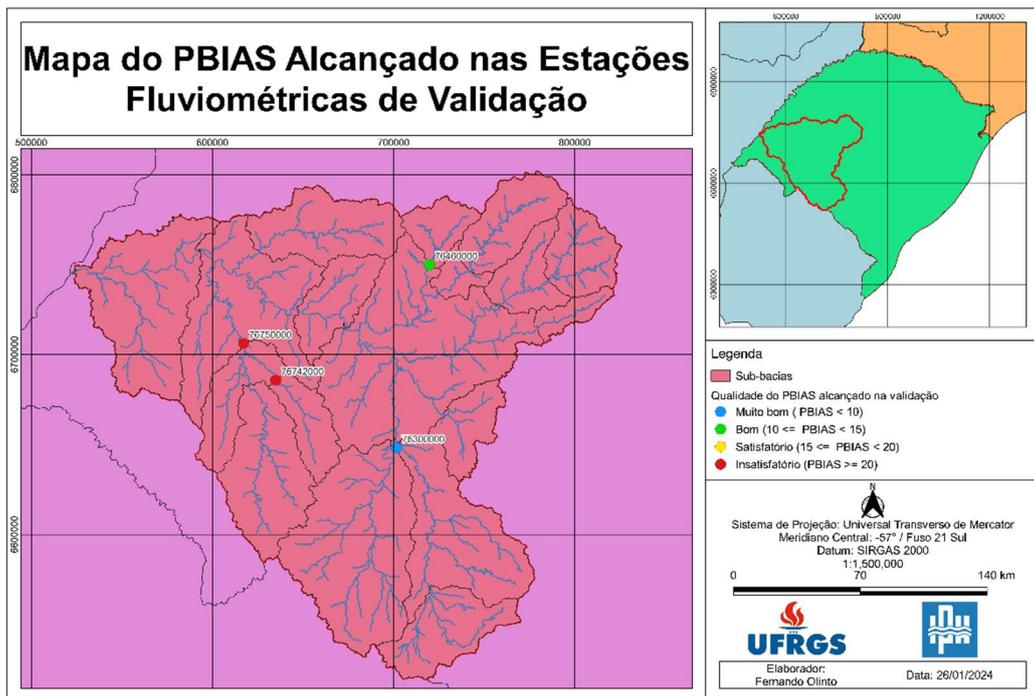


Figura 45 – Mapa com a classificação de valor de PBIAS para a validação, segundo Moriasi et al. (2007).



### 5.1.3 Vazões de Referência Obtidas

Para que seja possível a comparação com o método de regionalização, os resultados necessários são as vazões de referência. As vazões de referência utilizadas nesse trabalho,

$Q_{90\%}$  e  $Q_{TR5}$ , foram calculadas como o decorrido nos itens 4.4 e 3.2.2 , respectivamente. Nas Tabela 8 e Tabela 9 tem-se os valores encontrados para as estações e período de validação.

Tabela 8 – Valores de  $Q_{90\%}$  obtidas pelo método de modelagem hidrológica.

$Q_{90\%}$	<b>76300000</b>	<b>76460000</b>	<b>76742000</b>	<b>76750000</b>
Observada	9.2	1.9	3.2	7.7
Modelagem (MGB-IPH)	35.1	4.3	2.8	9.0
Erro Absoluto (m <sup>3</sup> /s)	25.9	2.4	-0.4	1.3
Erro Percentual (%)	280.4%	125.3%	13.5%	17.1%

Tabela 9 – Valores de  $Q_{TR5}$  obtidas pelo método de modelagem hidrológica.

$Q_{TR5}$	<b>76300000</b>	<b>76460000</b>	<b>76742000</b>	<b>76750000</b>
Observada	1393.8	1291.5	620.7	1196.1
Modelagem (MGB-IPH)	518.5	509.1	101.8	770.6
Erro Absoluto (m <sup>3</sup> /s)	-875.3	-782.5	-518.9	-425.5
Erro Percentual (%)	62.8%	60.6%	83.6%	35.6%

## 5.2 REGIONALIZAÇÃO

O equacionamento das curvas de regionalização por vazão específica foi apresentado no item 4.4 , tendo como base os dados de 9 estações selecionadas, compreendidas no Quadro 2, no período de 2006 a 2020. Posteriormente, aplicou-se as equações concebidas para as 4 estações da validação, obtendo as vazões de referência,  $Q_{90\%}$  e  $Q_{TR5}$ , para o período de 1991 a 2005 e comparou-se com os valores observados no mesmo período.

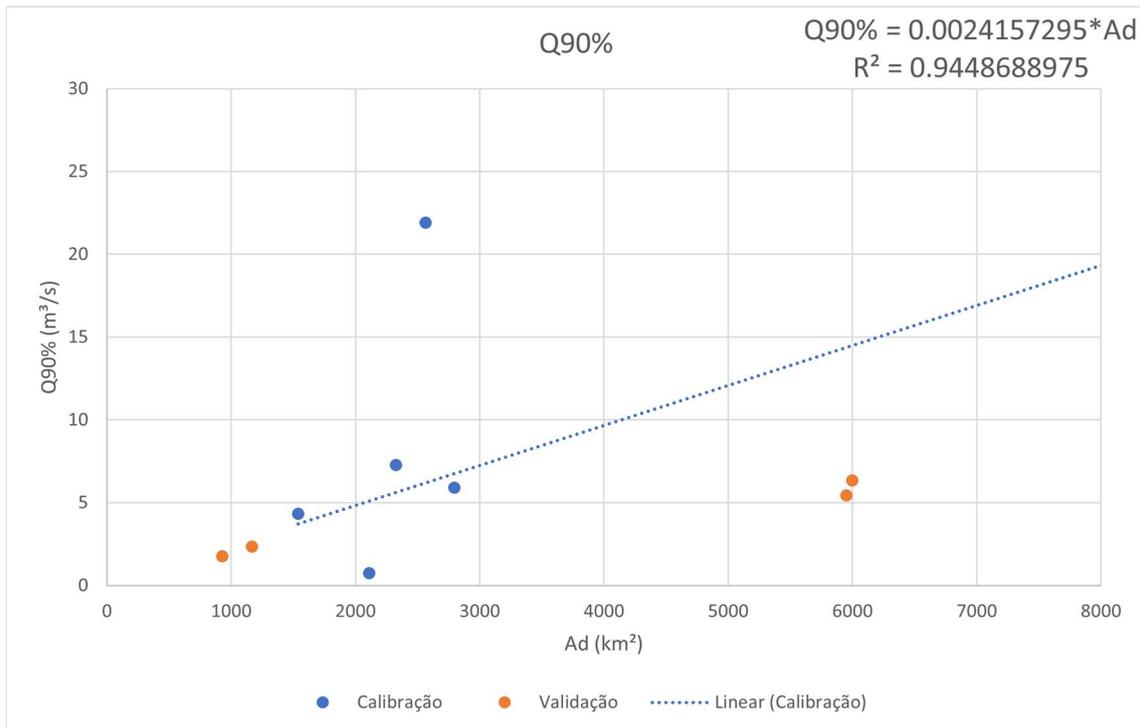
### 5.2.1 Vazões de Referência Obtidas

Com base nas equações de vazão específica com variável explicativa sendo a área de drenagem, foram calculados os valores de vazão de referência para as bacias e período de validação, como apresentado nas Tabela 10 e Tabela 11.

Tabela 10 – Valores de  $Q_{90\%}$  obtidas pelo método de regionalização.

$Q_{90\%}$	<b>76300000</b>	<b>76460000</b>	<b>76742000</b>	<b>76750000</b>
Observada	9.2	1.9	3.2	7.7
Regionalização	14.5	2.2	2.8	14.4
Erro Absoluto (m <sup>3</sup> /s)	5.3	0.3	-0.4	6.7
Erro Percentual (%)	56.9%	17.7%	12.5%	86.7%

Figura 46 – Gráfico da Q<sub>90%</sub> das estações de validação – período de 1991-2005.

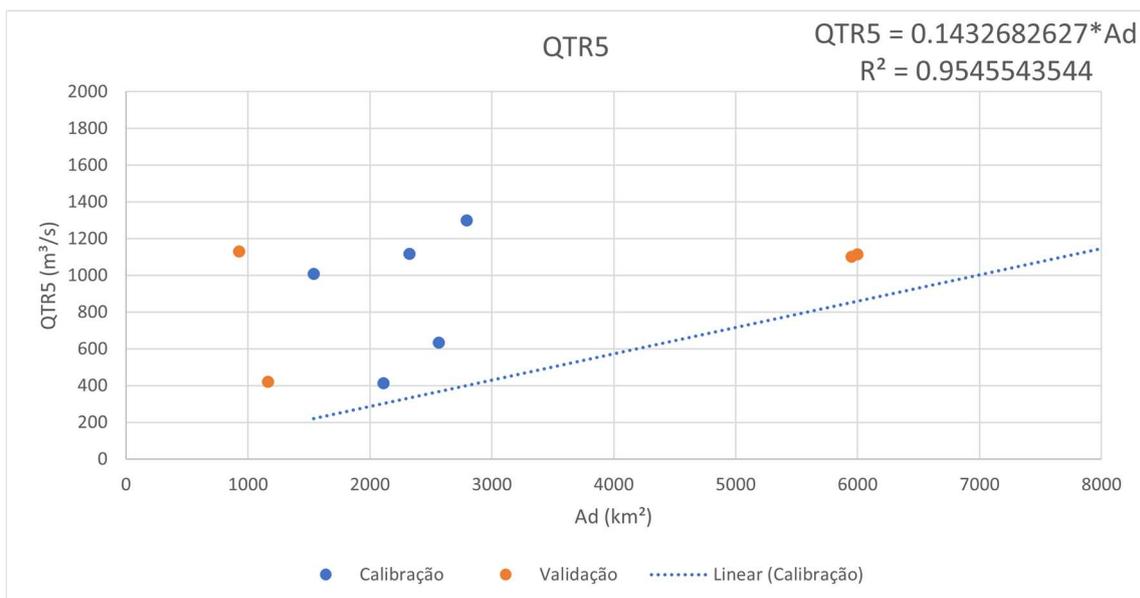


Os pontos do gráfico da Figura 46 em laranja referem-se aos valores de vazão observada das estações de validação no período de 1991 a 2005. É possível notar que o segmento da curva de calibração, equação da vazão específica para a Q<sub>90%</sub>, tende a praticamente interceptar os valores da validação que correspondem às estações 76460000 e 76742000, as duas estações da validação com menor área de drenagem. Enquanto, para as estações 76300000 e 76750000, a curva de calibração superestima as vazões observadas.

Tabela 11 – Valores de Q<sub>TR5</sub> obtidas pelo método de regionalização.

Q <sub>TR5</sub>	76300000	76460000	76742000	76750000
Observada	1393.8	1291.5	620.7	1196.1
Regionalização	859.2	133.0	167.1	852.7
Erro Absoluto (m³/s)	-534.6	-1158.6	-453.6	-343.4
Erro Percentual (%)	38%	90%	73%	29%

Figura 47 – Gráfico da  $Q_{TR5}$  das estações de validação – período de 1991-2005.



Do mesmo modo, na Figura 47, os pontos do gráfico em laranja referem-se aos valores de vazão observada das estações de validação no período de 1991 a 2005. Neste caso, todas as vazões aparentam estar deslocadas da curva de regionalização, de forma que as vazões para todas as estações demonstram estar subestimadas.

### 5.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

Como o objetivo principal do estudo é comparar dois métodos de estimativa de vazão em locais sem dados, em condições de vazão alta e de vazão baixa, para a bacia do rio Ibicuí – RS, é preciso ter métricas de erro aos valores observados passível de comparação. Assim, foram escolhidas as métricas quantitativa de erro absoluto e erro percentual.

A Tabela 12 apresenta todos os resultados obtidos para as bacias de calibração. Nas Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14 o termo “REG” está se referindo à regionalização e o termo “MGB” diz respeito à modelagem hidrológica com o uso do MGB-IPH.

Tabela 12 – Resultados globais de vazões de referência.

Estação	76300000		76460000		76742000		76750000									
	Q90%	QTR5	Q90%	QTR5	Q90%	QTR5	Q90%	QTR5								
Observado	9.2	1393.8	1.9	1291.5	3.2	620.7	7.7	1196.1								
	MGB	REG	MGB	REG	MGB	REG	MGB	REG								
Vazão	35.1	14.5	518.5	859.2	4.3	2.2	509.1	133.0	2.8	2.8	101.8	167.1	9.0	14.4	770.6	852.7
Erro Absoluto	25.9	5.3	-875	-534	2.4	0.3	-782	-1159	-0.4	-0.4	-519	-454	1.3	6.7	-425	-343

Estação	76300000		76460000		76742000		76750000									
	Q90%	QTR5	Q90%	QTR5	Q90%	QTR5	Q90%	QTR5								
Erro																
Percentual	280%	57%	63%	38%	125%	18%	61%	90%	13%	12%	84%	73%	17%	87%	36%	29%

Nas Tabela 13 e Tabela 14 são citados os métodos que obtiveram o menor valor de erro percentual para cada vazão de referência e a diferença do erro percentual para o outro método.

Tabela 13 – Aproveitamento para a Q<sub>90%</sub>.

Estação	76300000	76460000	76742000	76750000
Melhor Estimativa Q <sub>90%</sub>	REG	REG	REG	MGB
Diferença Erro Percentual	223%	108%	1%	70%

Figura 48 – Mapa de dominância de método com menor erro observado para vazões baixas.

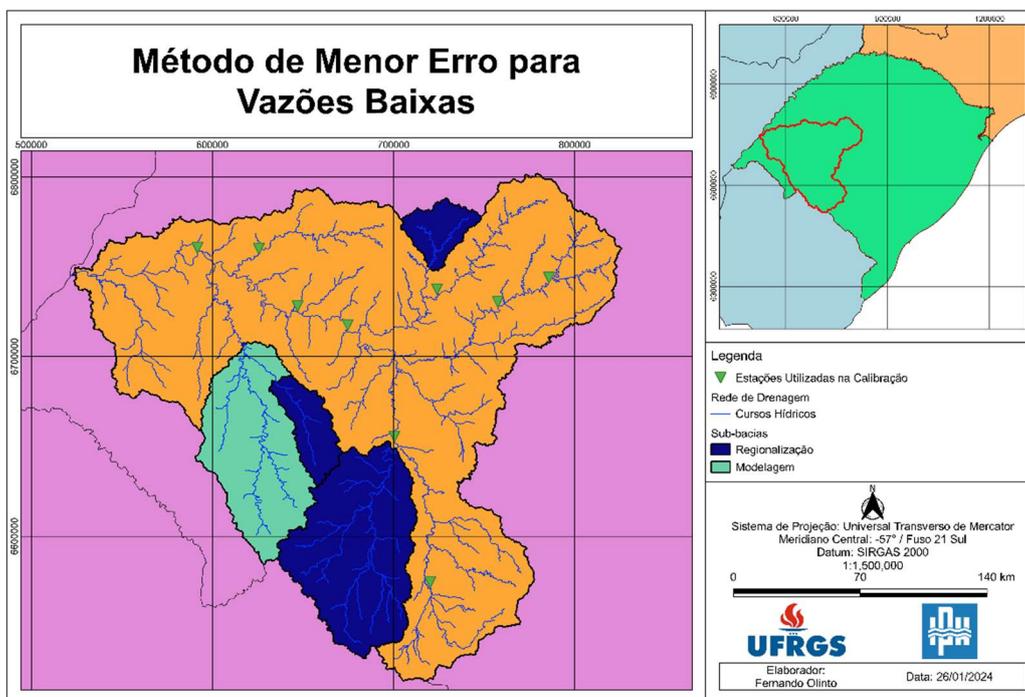
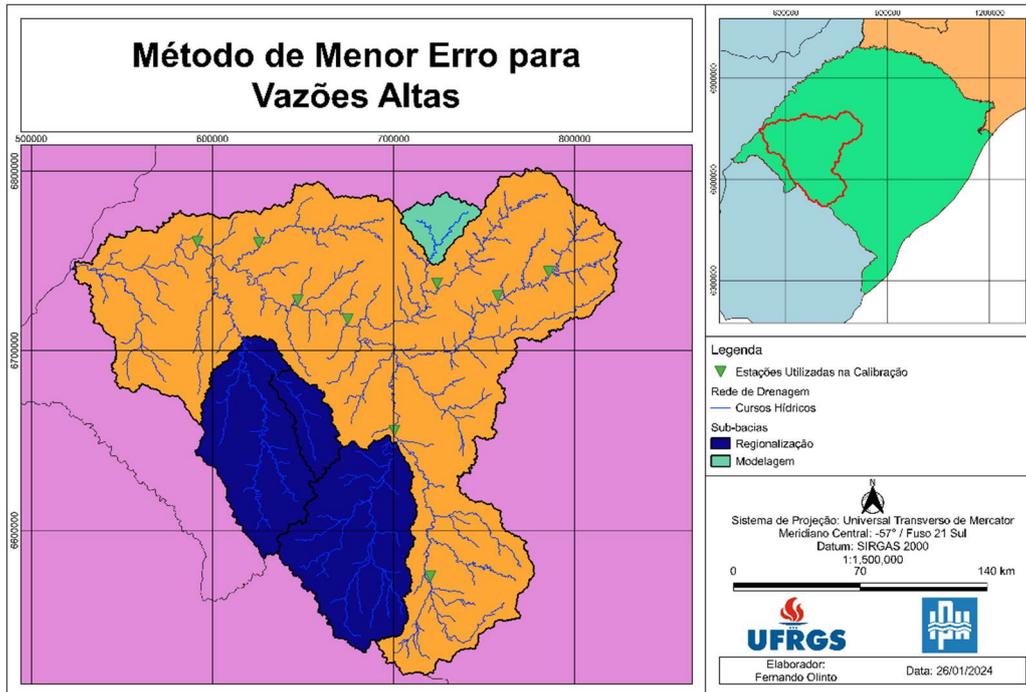


Tabela 14 – Aproveitamento para a Q<sub>TR5</sub>.

Estação	76300000	76460000	76742000	76750000
Melhor Estimativa Q <sub>TR5</sub>	REG	MGB	REG	REG
Diferença Erro Percentual	24%	29%	11%	7%

Figura 49 – Mapa de dominância de método com menor erro observado para vazões altas.



Em geral, o método que obteve menores índices de erro foi a regionalização, sendo superior a modelagem nas estações 76300000 e 76742000 para casos de vazões altas e baixas, na estação 76460000 para vazões baixas e 76750000 para vazões altas.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com suporte nos resultados obtidos, foi possível concluir com o estudo que o método de regionalização por vazão específica apresentou melhor desempenho global do que a modelagem hidrológica pelo MGB-IPH, tanto para vazões altas, usando como referência a  $Q_{TR5}$ , como também para vazões baixas, como referência a  $Q_{90\%}$ . Contudo, das 4 estações avaliadas, a modelagem hidrológica mostrou-se mais otimizada para uma estação (76750000) para vazões baixas e em uma estação para vazões altas (76460000), demonstrando que os estudos hidrológicos demandam diferentes abordagens para sua compreensão integral.

Em termos de erro percentual para vazões altas, os dois métodos se mostraram próximos, com pouca diferença entre os métodos nesta métrica. Enquanto, para as vazões baixas, a diferença entre os erros percentuais da  $Q_{90\%}$  foram superiores a 70%, com exceção da bacia da estação 76742000, que foram obtidos valores praticamente idênticos.

A partir das análises feitas, também foi possível responder questões complementares do estudo. Elucidou-se que é justificável empregar modelos hidrológicos de maior demanda computacional para a estimativa de vazões em locais sem dados em bacias muito heterogêneas e de grandes diferenças de área de drenagem por comprimento de rio. Foi concluído que métodos tradicionais e modernos são equivalentes e complementares, porém, para métodos de modelagem, há um custo significativamente maior em termos de esforço computacional e de preparo do modelador que devem ser levados em consideração em projetos de pequena escala, abordagens iniciais e estudo de bacias de pequeno porte. Ao se avaliar se os resultados podem ser extrapolados para áreas vizinhas, considerando como regiões vizinhas: bacia do rio Uruguai, bacia do rio Quaraí e bacia do rio Vacacaí, concluiu-se que os resultados devem ser melhor analisados, pois extrapolar resultados para regiões não encadeadas mostra-se algo limitado, o que seria os casos das bacias do rio Quaraí e Vacacaí, porém também para o rio Uruguai, que é encadeado ao rio Ibicuí, deve-se ser realizada uma análise em separado, uma vez que trata-se de uma bacia de magnitude excessivamente maior, com comportamento distinto e intervenções antrópicas mais variadas, como barramentos consecutivos a montante.

Cita-se que mesmo que os resultados obtidos tenham sido satisfatórios, houve, durante o procedimento algumas fontes de incertezas que podem ter influenciado os resultados. As

análises foram realizadas a partir de dados de vazão não obtidos diretamente, pois são oriundos das curvas-chave das estações, o que pode incluir erros de curvas desatualizadas ou mal dimensionadas. Principalmente na porção sudeste e oeste da bacia há muitos açudes que principalmente na estação do verão reservam água para a rizicultura, sendo essa mais uma fonte de incerteza para os modelos, especialmente para a modelagem hidrológica que tenta assimilar a vazão natural das bacias. Por não se haver encontrado na literatura métodos de escolha dos parâmetros das equações de relações geomorfológicas do canal para o MGB-IPH, optou-se por considerar a calha para vazões baixas, da  $Q_{90\%}$ , no entanto isso pode diminuir as vazões totais, já que o volume que excede a calha no MGB-IPH é destinado ao armazenamento. Outra possível fonte de incerteza é a escolha das estações que seriam utilizadas para calibração e validação, pois não foram selecionadas com base no encadeamento de pontos de controle.

Além disso, foi constatado que o MGB-IPH, na fase de calibração, obteve melhores resultados de funções objetivo para o caso das grandes bacias, diminuindo sua performance à medida que a área das bacias reduz.

Por fim, recomenda-se para trabalhos futuros:

- fazer sucessivas regionalizações por vazão específica para bacias encadeadas e ir comparando o comportamento à medida que a magnitude das áreas de drenagem vai se distanciando, observar critério de Collischonn et al. (2023) de que a razão entre as áreas de drenagem deve ser de 0,3 a 1,5;
- estudos para a extrapolação dos resultados em bacias vizinhas, encadeadas ou desconexas;
- verificar a influência da rizicultura, sugere-se novos estudos que considerem as diversidades de usos da água e do solo

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, K. N. **Análise dos impactos de mudanças climáticas nos regimes de precipitação e vazão na bacia do rio Ibicuí.** 147 p. Dissertação (mestrado) - UFRGS/IPH. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil); UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Nota técnica: ANADEM – Modelo digital do terreno para a América do Sul.** Brasília: Porto Alegre, 2023.

ALMEIDA, L., SERRA, J. C. V. **Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas.** Revista da FAE, v. 20, n. 1, Curitiba, p 129-137, 2017.

ALVES, M. E. P. **Simulação de rompimento de barragens em cascata com o modelo MGB.** 128 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, UFRGS/IPH, Porto Alegre, 2018.

ARSENAULT, R., BRISSETTE, F., AND MARTEL, J.L. **The hazards of split-sample validation in hydrological model calibration.** Journal of Hydrology., 566, p 346–362, 2018.

BERTOLO, F. **Catchment delineation and characterization: a review.** Ispra (VA), Space Applications Institute, Joint Research Centre, 2000.

BRASIL. **Lei nº 9.433/1997.** Instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 09 jan. 1997.

BRUSA, L. C.; CLARKE, R. T. **Erros envolvidos na estimativa da vazão máxima utilizando curva-chave. Caso de estudo: Bacia do Rio Ibicuí, RS.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, pp 91-95, v. 4, n. 3, Porto Alegre, 1999.

BURROUGH P. A.; MCDONNELL R. A. **Principles of Geographical Information Systems.** Oxford University Press, Spatial Information Systems, 1998.

CHAVES, H. A. T. **Projeto de uma estação fluviométrica automática.** 82 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, UNIVATES, Lajeado, 2013.

COLLISCHONN, B.; PAIVA, R. C. D. D.; COLLISCHONN, W.; MEIRELLES, F. S. C.; SCHETTINI, E. B. C.; FAN, F. M. **Modelagem hidrológica de uma bacia com uso intensivo de água: Caso do Rio Quaraí-RS.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, s.l, v. 16, n. 4, p. 119-134, 2011.

COLLISCHONN, W. 2001. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias.** Tese de doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 182p.

COLLISCHONN, W., ALLASIA, D. G., SILVA, B. C., TUCCI, C. E. M. **The MGB-IPH Model for Large-Scale Rainfall-Runoff Modelling.** Hydrological Sciences Journal, 52, 878-895 pp, 2007.

COLLISCHONN, W., DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais.** Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 336 p. Porto Alegre, 2015.

COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. **Defining parameters for Eckhardt's digital baseflow filter.** Hydrological Processes, v. 27, n. 18, p. 2614-2622, 2012.

COLLISCHONN, W., SORRIBAS, M. V., PAIVA, R. C. D., ARAUJO, A. A. de, SOUZA, S. A., CARVALHO, T. L. L. de. **Métodos simples para estimar vazões de referência e sua incerteza.** Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 110 p. Porto Alegre, 2023.

CRUZ, J. C., TUCCI, C. E. M. **Estimativa da disponibilidade hídrica através da curva de permanência.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 13, n. 1, p 111-124 Porto Alegre, 2008.

DRHS. **Nota Técnica n. 003/2020/DIPLA/DRHS.** DRHS/SEMA, 21p, Porto Alegre, 2020.

EMATER/RS-ASCAR. **Solos do Rio Grande do Sul.** 222 p. UFRGS. Porto Alegre. 2008.

FAN, F., BUARQUE, D.C., PONTES, P.R.M., COLLISCHONN, W. **Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul.** Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, Brasília, p. PAP019919. 2015.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. **Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, n. 1, p. 243-254, 2014.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W., SORRIBAS, M. V., PONTES, P. R. M. **Sobre o início da rede de drenagem definida a partir dos modelos digitais de elevação.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v 18, n. 3, p 241-257, 2013.

FAN, F.M.; PONTES, P.R.M., PAIVA, R.C.D. **Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v 19, p 137- 147. 2014

FAN, F. M.; SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A. S.; BRÊDA, J. P. F.; PAIVA, R. C. D.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. **On the discretization of river networks for large scale hydrologic-hydrodynamic models.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v 26, e 5, pp. 1-19, 2021.

FAUCONNIER, Y. **Evaluation de La Ressource Dans Le Bassin Versant de Libicuí Grâce à La Modélisation Hydrologique: Application de Loutil SWAT.** Tese (Doutorado) — University of Le Mans Le Mans, France, 2017.

GALVÃO, M. F.; CAMPOS, J. G. E. **Bacias hidrogeológicas: conceitos e implicações.** XXII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2023.

GERMANO, A.O.; MATTIUZI, C.D.P.; DUARTE, E.S.; BINOTTO, R.B.; MENDONÇA, R. **Mapeamento de manchas de inundação: Alegrete, RS.** Porto Alegre: CPRM, 2022.

IBGE - Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa hidrogeológico da região Sul.** Rio de Janeiro: 2015. (escala 1:700.000).

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. **Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis.** Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.

KOEFENDER, A.; MARCUZZO, F. F. N. **Modelo e conceituação de diagrama unifilar de bacia hidrográfica: o caso da sub-bacia 76.** Revista de Geografia, Recife, v. 33, n. 3, p. 201-229, 2016.

KOEFENDER, A. **Regionalização das vazões Q95%, Q50% e Q7,10 da bacia hidrográfica do Rio Ibicuí. 2015.** 120 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, UFRGS/IPH, Porto Alegre, 2015.

LI, X., WELLER, D. E., JORDAN, T. E. **Watershed model calibration using multi-objective optimization and multi-site averaging.** Journal of Hydrology, v.380, n. 3, p. 277-288, 2010.

MAPBIOMAS. **Coleção 8.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil.** Acessado em: 25/01/2024 através do link: <<https://brasil.mapbiomas.org/downloads/>>

MARCUZZO, F. F. N. **Bacia hidrográfica do rio Uruguai: altimetria e áreas.** Anais XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, p 1-8, Florianópolis, 2017.

MARCUZZO, F. F. N.; PINTO, E. J. de A. **Análise de frequência de cotas dos Sistemas de Alerta: Sistema de Alerta Bacia do Rio Uruguai; rio Ibicuí, estação fluviométrica Manoel Viana, código 76560000, município atendido Manoel Viana, RS.** Porto Alegre: CPRM, 2022. Programa Gestão de Risco e Resposta a Desastres. Ação Levantamentos, Estudos, Previsão e Alerta de Eventos Hidrológicos. Estudos de Regionalização nas Bacias Hidrográficas Brasileiras.

MATTIUZI, C. D. P. **Estimativa de recarga a partir da separação de escoamento de base na bacia hidrográfica do rio Ibicuí/RS.** 72p. UFRGS/IPH, Porto Alegre, 2013.

MENDES, L. A. **Análise dos critérios de outorga de direito de usos consuntivos dos recursos hídricos baseados em vazões mínimas e em vazões de permanência.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

MENDONÇA, G. H. **Bacia hidrográfica**. Mundo Educação, 2024. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/bacia-hidrografica.htm>>. Acesso em: 06/02/2024.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. 2006. **Caderno da Região Hidrográfica do Rio Uruguai**. Brasília/DF, 132 p.

MORIASI, D.N., ARNOLD, J.G., VAN LIEW, M.W., BINGNER, R.L., HARMEL, R.D., VEITH, T.L. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations**. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 50, 885. 2007.

MULLER, Y. T. **Efeito da discretização na calibração do modelo MGB-IPH para a bacia do rio Uruguai**. 105 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, UFRGS/IPH, Porto Alegre, 2019.

NANNI, A. S. **O Flúor em águas do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul: Origem e Condicionamento Geológico**. 127 p. Tese (Doutorado) – UFRGS. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, 2008.

NASH, J.E., SUTCLIFFE, J.V. **River flow forecasting through conceptual models part I—a discussion of principles**. Journal of Hydrology. 10, p 282–290, 1970.

NECTOUX, M.P. **Análise custo benefício das informações provenientes da rede hidrometeorológica nacional – aplicação na cadeia causal da garantia física de PCHS**. 154 p. Dissertação (mestrado) - UFRGS/IPH. Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (Prof<sup>Á</sup>gua), Porto Alegre, 2021.

PAIVA, R. C. D., COLLISCHONN, W., TUCCI, C. E. M. **Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach**. Journal of Hydrology. v. 406. p 170-181. 2011.

PAIVA, J. B. D; PAIVA, E. M. C. D; GASTALDINI, M. C. C; IRION, C. A. O; DIAS, J. R; COSTA, L. C. M. **Quantificação da demanda de água na bacia do rio Ibicuí – RS**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 5, p. 93-111, 2000.

PEREIRA, M., KAYSER, R., COLLISCHONN, W. **Regionalização de vazões assistida por modelagem hidrológica para análises de disponibilidade de água, estudo de caso: bacia do rio Ibicuí – RS.** XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves. 2013.

POPESCU, I. **Computational Hydraulics: Numerical Methods and Modelling.** 160p. IWA Publishing, Londres, 2014.

RIO GRANDE DO SUL. **Decreto nº 53.885, de 16 de janeiro de 2018.** Institui subdivisão das Regiões Hidrográficas do Estado do Rio Grande do Sul em Bacias Hidrográficas.

SANTOS, F. M. **Modelagem concentrada e semi-distribuída para simulação de vazão, produção de sedimentos e de contaminantes em bacias hidrográficas do interior de São Paulo.** 191p. USP/PPG-SEA, São Carlos. 2018.

SCARIOT, N. **Avaliação da aplicabilidade do modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Ibicuí.** 50 p. UFSM, Santa Maria, 2023.

SOBRINHO, A. T.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; AYRES, F. M. **Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM.** Engenharia Agrícola, v. 30, 2010.

TUCCI, C.E.M. **Regionalização de vazões.** 256 p. Ed. ABRH/ UFRGS Porto Alegre, 2002.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas.** Brasília: Ministério das Cidades, Global Water Partnership, Wolrd Bank, Unesco, 2005.

VIEIRA, L. M. D. S., SAMPAIO, J. C. L., COSTA, V. A. F., ELEUTÉRIO, J. C. **Assessing the effects of rating curve uncertainty in flood frequency analysis.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 27, p 1-14, 2022.

WOLFF, W., DUARTE, S. N., MINGOTI, R. **Nova metodologia de regionalização de vazões, estudo de caso para o Estado de São Paulo.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v 19, p 21-33, 2014.

## APÊNDICE I – Disponibilidade de dados das estações fluviométricas da bacia.

Estações	76085000	76100000	76251000	76300000	76310000	76370000	76395000	76431000	76440000	76460000	76500000	76560000	76650000	76700000	76742000	76750000	76800000
<b>Disponibilidade</b>	45	80	20	55	55	11	12	3	80	63	59	55	72	13	45	82	59
1940	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	71	0
1941	0	52	0	0	0	0	0	0	61	0	0	0	0	0	0	365	0
1942	0	365	0	0	0	0	0	0	365	0	0	0	244	0	0	365	0
1943	0	365	0	0	0	0	0	0	338	0	0	0	189	0	0	365	0
1944	0	366	0	0	0	0	0	0	366	0	0	0	217	0	0	366	0
1945	0	287	0	0	0	0	0	0	365	0	0	0	238	0	0	365	0
1946	0	365	0	0	0	0	0	0	365	0	0	0	0	0	0	365	0
1947	0	365	0	0	0	0	0	0	365	0	0	0	21	0	0	365	0
1948	0	366	0	0	0	0	0	0	366	0	0	0	366	0	0	366	0
1949	0	363	0	0	0	0	0	0	365	0	0	0	328	0	0	365	0
1950	0	365	0	0	0	0	0	0	365	0	0	0	365	0	0	365	0
1951	0	365	0	0	0	0	0	0	365	0	0	0	338	0	0	365	0
1952	0	366	0	0	0	0	0	0	366	0	0	0	224	0	0	366	0
1953	0	365	0	0	0	0	0	0	365	0	0	0	277	0	0	365	0
1954	0	365	0	0	0	0	0	0	365	0	0	0	365	0	0	365	0
1955	0	365	0	0	0	0	0	0	365	0	0	0	365	0	0	365	0
1956	0	366	0	0	0	0	0	0	366	0	0	0	366	0	0	366	0
1957	0	365	0	0	0	0	0	0	365	0	0	0	279	0	0	365	0
1958	0	365	0	0	0	0	0	0	365	96	0	0	365	0	0	365	0
1959	0	365	0	0	0	0	0	0	365	365	0	0	365	0	0	365	0
1960	0	366	0	0	0	0	0	0	366	366	0	0	366	0	0	366	0
1961	0	365	0	0	0	0	0	0	365	365	0	0	365	0	0	365	0
1962	0	365	0	0	0	0	0	0	365	365	0	0	365	0	0	365	0
1963	0	365	0	0	0	0	0	0	365	365	0	0	332	0	0	365	0
1964	0	366	0	0	0	0	0	0	366	366	306	0	366	0	0	366	306
1965	0	365	0	0	0	0	0	0	365	365	365	0	365	0	0	365	365
1966	0	365	0	0	0	0	0	0	365	365	365	0	365	0	0	365	365
1967	0	365	0	224	213	0	0	0	365	365	365	213	365	0	0	365	365
1968	0	366	0	366	366	0	0	0	366	366	366	366	366	0	0	366	366
1969	0	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	0	0	365	365
1970	0	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	0	0	365	365
1971	0	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	0	0	365	365
1972	0	366	0	366	366	0	0	0	366	366	366	366	366	0	0	366	366
1973	0	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	0	0	365	365
1974	0	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	0	0	365	365

Estações	76085000	76100000	76251000	76300000	76310000	76370000	76395000	76431000	76440000	76460000	76500000	76560000	76650000	76700000	76742000	76750000	76800000
1975	0	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	0	0	365	365
1976	37	366	0	366	366	0	0	0	366	366	366	366	366	0	0	366	366
1977	365	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	25	308	365	365
1978	365	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	319	365	351	365
1979	365	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	285	365	365	365
1980	366	366	0	366	366	0	0	0	366	366	366	366	366	327	366	366	366
1981	365	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	365	365	365	365
1982	365	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	365	365	365	365
1983	365	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	354	365	341	365
1984	366	366	0	366	366	0	0	0	366	366	366	366	366	366	366	366	366
1985	365	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	365	365	365	365
1986	365	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	301	365	365	365
1987	365	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	192	365	365	365
1988	366	366	0	366	366	0	0	0	366	366	366	366	366	336	366	366	366
1989	365	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	365	354	365	365
1990	365	365	0	365	362	0	0	0	365	365	365	365	365	103	365	365	365
1991	365	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	19	365	365	365
1992	366	366	0	366	366	0	0	0	340	366	366	366	366	213	366	366	366
1993	365	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	178	358	365	365
1994	365	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	293	365	365	365
1995	365	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	278	365	365	365
1996	366	366	0	366	366	0	0	0	366	366	366	366	366	366	366	366	366
1997	306	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	324	365	365	365
1998	365	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	284	365	365	365
1999	365	365	0	365	365	0	0	0	365	365	365	365	365	351	365	365	365
2000	366	366	250	366	366	0	199	0	366	366	366	366	366	172	366	366	366
2001	365	365	365	365	365	0	365	0	365	365	365	365	365	0	365	365	365
2002	365	365	365	365	365	0	334	0	365	365	365	365	365	0	365	365	365
2003	365	365	365	365	365	0	365	0	365	365	365	365	365	0	365	365	365
2004	366	366	366	366	366	164	366	0	366	366	366	366	366	0	366	366	366
2005	353	365	365	365	365	365	285	0	365	365	365	365	365	0	365	365	365
2006	365	365	365	365	365	365	365	0	365	365	365	365	365	0	365	355	365
2007	365	365	365	365	365	365	364	0	365	365	365	365	365	0	365	365	365
2008	366	366	366	366	366	366	351	0	366	366	366	366	366	0	366	366	366
2009	365	365	365	365	365	364	363	0	365	365	365	365	365	0	365	365	365
2010	365	365	365	365	365	365	294	0	365	365	365	365	365	0	365	365	365
2011	365	365	365	365	365	365	328	0	365	365	365	365	365	0	365	365	365
2012	337	366	366	366	366	366	341	0	366	366	366	366	366	0	366	366	366
2013	365	365	365	365	365	365	359	0	365	365	365	365	365	0	365	365	365
2014	365	365	365	365	365	365	349	0	365	365	365	365	365	0	355	365	365
2015	361	365	365	363	365	365	27	93	365	365	360	365	365	0	365	352	365
2016	366	366	366	337	366	91	0	366	365	366	366	366	366	0	310	363	366

<b>Estações</b>	<b>76085000</b>	<b>76100000</b>	<b>76251000</b>	<b>76300000</b>	<b>76310000</b>	<b>76370000</b>	<b>76395000</b>	<b>76431000</b>	<b>76440000</b>	<b>76460000</b>	<b>76500000</b>	<b>76560000</b>	<b>76650000</b>	<b>76700000</b>	<b>76742000</b>	<b>76750000</b>	<b>76800000</b>
2017	365	365	365	354	359	0	0	365	364	365	365	354	364	0	365	361	365
2018	365	365	365	365	332	0	0	365	365	365	365	365	365	0	365	365	365
2019	365	365	365	358	362	0	0	0	365	365	365	365	365	0	277	362	365
2020	366	366	258	323	366	0	0	0	339	318	366	366	366	0	348	366	366
2021	334	365	292	356	364	0	0	0	328	342	365	365	365	0	360	365	365
2022	31	365	329	315	312	0	0	0	252	294	356	347	334	0	365	365	365
2023	0	153	153	157	93	0	0	0	96	118	96	153	77	0	181	90	151

## APÊNDICE II – Parâmetros de solo calibrados

### Watershed 1

use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	156.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
FlorProf	929.5	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
AgriRas	14.5	1.29	1.40	34.88	0.60	0.00	0.10
AgriProf	821.3	1.48	1.88	39.78	0.60	0.00	0.10
CampRas	120.0	1.34	0.39	32.24	0.60	0.00	0.10
CampProf	955.7	1.06	0.05	22.20	0.60	0.00	0.10
Varzea	574.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
ASI	1008.0	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
Agua	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS	3.81						
CI	90.53						
CB	1925.16						
QB_M3/SKM2	0.0100						

### Watershed 2

use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	156.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
FlorProf	929.5	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10

AgriRas	52.0	1.56	0.34	17.11	0.60	0.00	0.10
AgriProf	918.0	1.16	1.32	31.10	0.60	0.00	0.10
CampRas	10.4	0.59	0.77	39.92	0.60	0.00	0.10
CampProf	1311.7	1.06	1.74	21.64	0.60	0.00	0.10
Varzea	574.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
ASI	1008.0	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
Agua	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS	1.54						
CI	151.91						
CB	5174.58						
QB_M3/SKM2	0.0100						

Watershed 3

use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	156.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
FlorProf	929.5	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
AgriRas	31.8	1.56	2.14	40.34	0.60	0.00	0.10
AgriProf	452.2	1.50	0.52	28.31	0.60	0.00	0.10
CampRas	18.5	1.04	0.02	30.52	0.60	0.00	0.10
CampProf	656.9	1.39	1.05	24.32	0.60	0.00	0.10
Varzea	574.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
ASI	1008.0	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10

Agua 0.0 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00

CS 2.79

CI 48.05

CB 4375.48

QB\_M3/SKM2 0.0100

#### Watershed 4

use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	156.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
FlorProf	929.5	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
AgriRas	99.9	1.02	0.72	36.35	0.60	0.00	0.10
AgriProf	625.2	1.32	0.54	23.68	0.60	0.00	0.10
CampRas	74.0	0.58	0.24	30.96	0.60	0.00	0.10
CampProf	1038.4	1.01	0.45	14.80	0.60	0.00	0.10
Varzea	574.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
ASI	1008.0	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
Agua	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

CS 4.04

CI 20.49

CB 1862.04

QB\_M3/SKM2 0.0100

#### Watershed 5

use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	156.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
FlorProf	929.5	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
AgriRas	30.0	1.24	1.31	19.48	0.60	0.00	0.10
AgriProf	595.2	1.30	1.17	33.09	0.60	0.00	0.10
CampRas	27.6	1.09	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
CampProf	481.4	1.45	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
Varzea	574.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
ASI	1008.0	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
Agua	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS	4.02						
CI	88.39						
CB	2884.58						
QB_M3/SKM2	0.0100						

#### Watershed 6

use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	156.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
FlorProf	929.5	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
AgriRas	35.3	0.82	2.30	37.07	0.60	0.00	0.10
AgriProf	572.0	0.65	0.28	24.30	0.60	0.00	0.10
CampRas	48.3	1.01	1.78	37.56	0.60	0.00	0.10

CampProf	776.2	1.43	2.86	8.48	0.60	0.00	0.10
Varzea	574.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
ASI	1008.0	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
Agua	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS	1.23						
CI	118.43						
CB	1806.49						
QB_M3/SKM2	0.0100						

Watershed 7

use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	156.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
FlorProf	929.5	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
AgriRas	20.2	0.56	0.86	37.66	0.60	0.00	0.10
AgriProf	1287.1	1.24	0.55	31.89	0.60	0.00	0.10
CampRas	52.6	1.44	1.69	27.20	0.60	0.00	0.10
CampProf	581.4	1.50	2.74	34.08	0.60	0.00	0.10
Varzea	574.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
ASI	1008.0	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
Agua	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS	0.97						
CI	125.69						

CB 3888.19

QB\_M3/SKM2 0.0100

Watershed 8

use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	156.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
FlorProf	929.5	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
AgriRas	25.2	0.54	0.36	34.53	0.60	0.00	0.10
AgriProf	469.9	1.58	0.53	24.88	0.60	0.00	0.10
CampRas	12.4	0.65	1.48	18.00	0.60	0.00	0.10
CampProf	984.3	0.75	1.43	31.68	0.60	0.00	0.10
Varzea	574.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
ASI	1008.0	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
Agua	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

CS 5.89

CI 97.04

CB 2495.76

QB\_M3/SKM2 0.0100

Watershed 9

use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	156.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
FlorProf	929.5	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10

AgriRas	20.5	1.54	0.35	21.68	0.60	0.00	0.10
AgriProf	569.3	1.48	0.82	31.93	0.60	0.00	0.10
CampRas	21.6	0.89	1.09	32.24	0.60	0.00	0.10
CampProf	895.6	1.14	0.88	26.16	0.60	0.00	0.10
Varzea	574.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
ASI	1008.0	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
Agua	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS	2.16						
CI	67.80						
CB	1826.69						
QB_M3/SKM2	0.0100						

Watershed 10

use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	156.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
FlorProf	929.5	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
AgriRas	99.9	1.02	0.72	36.35	0.60	0.00	0.10
AgriProf	625.2	1.32	0.54	23.68	0.60	0.00	0.10
CampRas	74.0	0.58	0.24	30.96	0.60	0.00	0.10
CampProf	1038.4	1.01	0.45	14.80	0.60	0.00	0.10
Varzea	574.9	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10
ASI	1008.0	1.60	0.01	40.00	0.60	0.00	0.10

Agua 0.0 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00

CS 4.04

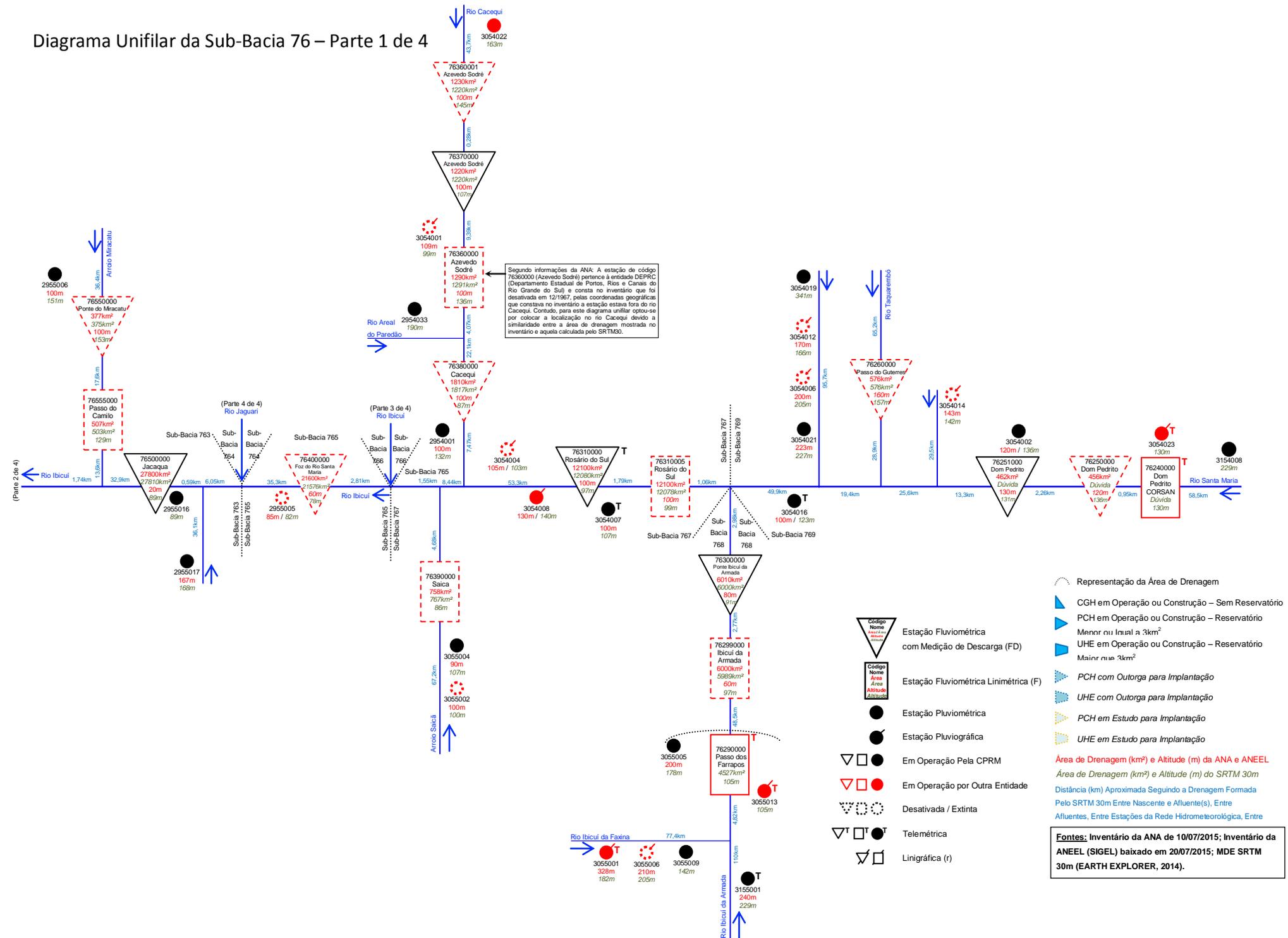
CI 20.49

CB 1862.04

QB\_M3/SKM2 0.0100

**ANEXO I – Diagrama unifilar da bacia do rio Ibicuí  
(KOEENDER, 2015)**

# Diagrama Unifilar da Sub-Bacia 76 – Parte 1 de 4



**Representação da Área de Drenagem**

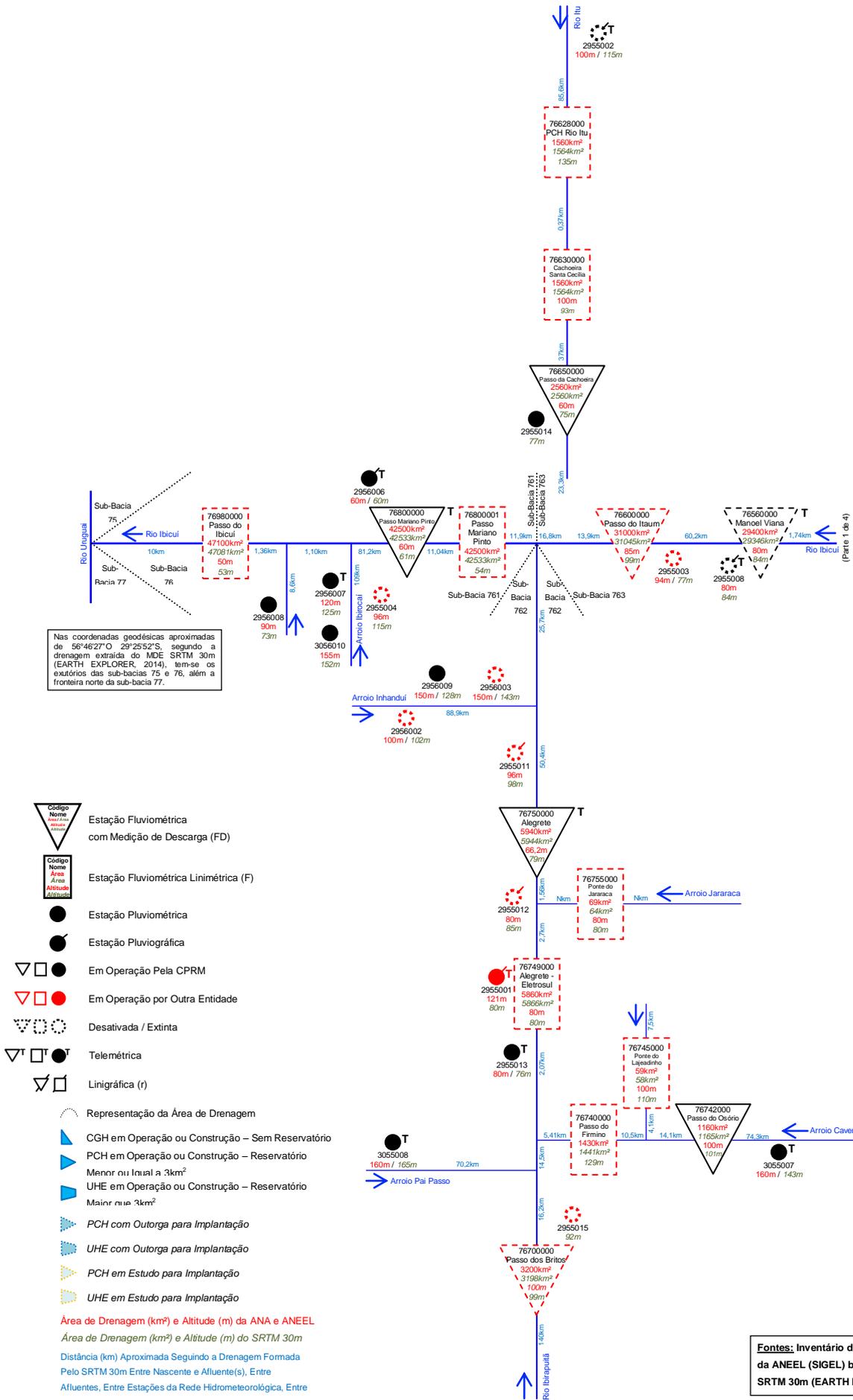
- CGH em Operação ou Construção – Sem Reservatório
- PCH em Operação ou Construção – Reservatório
- Menor ou Igual a 3km<sup>2</sup>
- UHE em Operação ou Construção – Reservatório
- Menor ou Igual a 3km<sup>2</sup>
- PCH com Outorga para Implantação
- UHE com Outorga para Implantação
- PCH em Estudo para Implantação
- UHE em Estudo para Implantação

Área de Drenagem (km<sup>2</sup>) e Altitude (m) da ANA e ANEEL  
 Área de Drenagem (km<sup>2</sup>) e Altitude (m) do SRTM 30m  
 Distância (km) Aproximada Segundo a Drenagem Formada Pelo SRTM 30m Entre Nascente e Afluente(s), Entre Afluentes, Entre Estações da Rede Hidrometeorológica, Entre

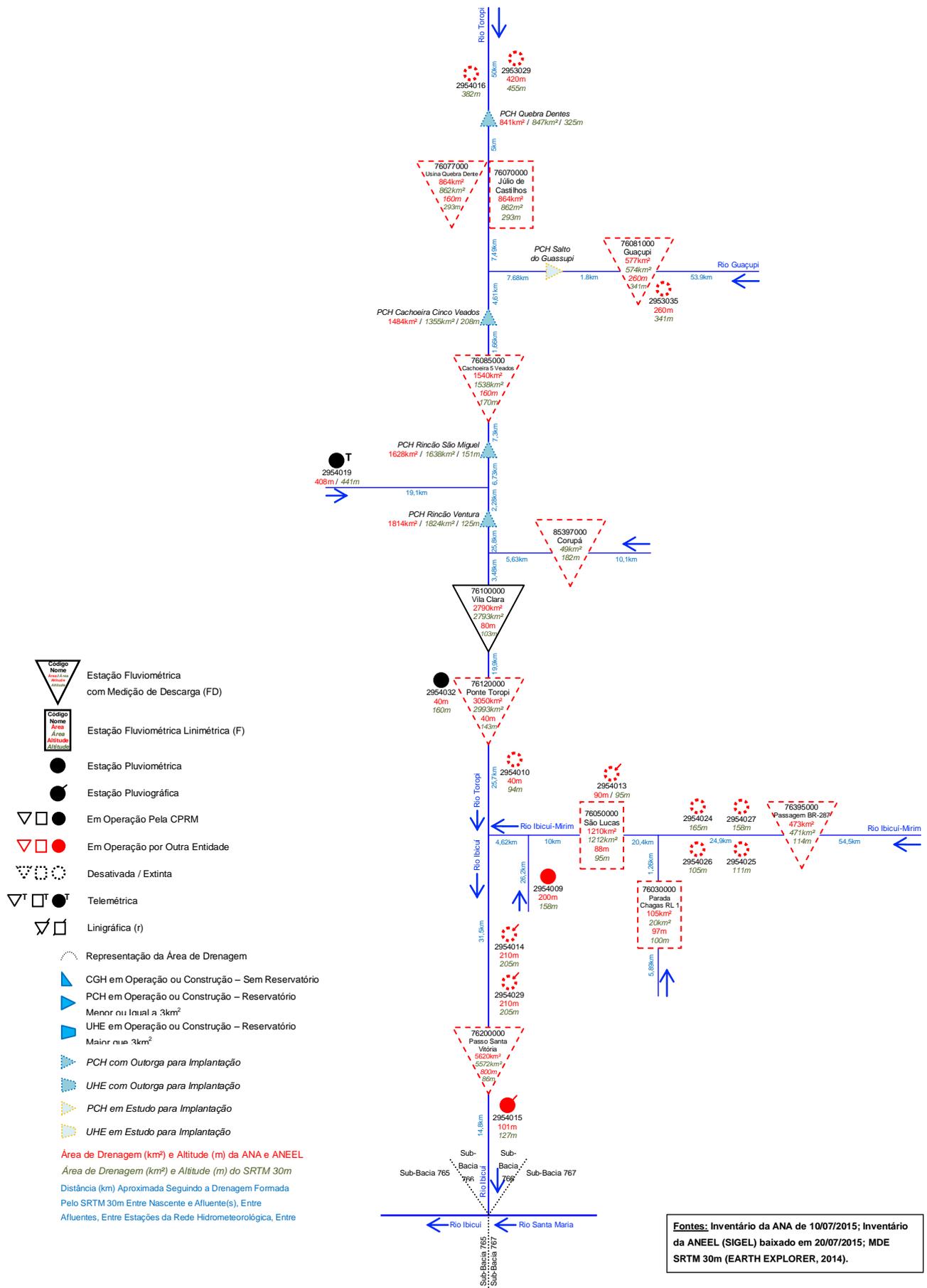
**Fontes:** Inventário da ANA de 10/07/2015; Inventário da ANEEL (SIGEL) baixado em 20/07/2015; MDE SRTM 30m (EARTH EXPLORER, 2014).

- Estação Fluviométrica com Medição de Descarga (FD)
- Estação Fluviométrica Linimétrica (F)
- Estação Pluviométrica
- Estação Pluviográfica
- Em Operação Pela CPRM
- Em Operação por Outra Entidade
- Desativada / Extinta
- Telemétrica
- Linigráfica (r)

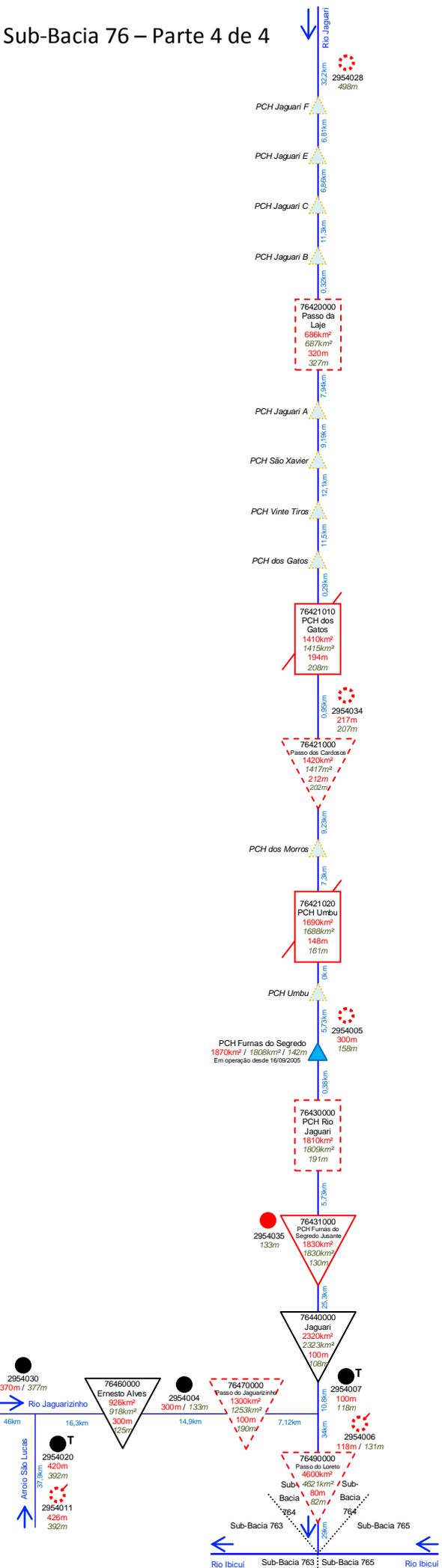
# Diagrama Unifilar da Sub-Bacia 76 – Parte 2 de 4



# Diagrama Unifilar da Sub-Bacia 76 – Parte 3 de 4



# Diagrama Unifilar da Sub-Bacia 76 – Parte 4 de 4



	Estação Fluviométrica com Medição de Descarga (FD)
	Estação Fluviométrica Linimétrica (F)
	Estação Pluviométrica
	Estação Pluviográfica
	Em Operação Pela CPRM
	Em Operação por Outra Entidade
	Desativada / Extinta
	Telemétrica
	Linigráfica (r)
	Representação da Área de Drenagem
	CGH em Operação ou Construção – Sem Reservatório
	PCH em Operação ou Construção – Reservatório Menor ou Igual a 3km <sup>2</sup>
	UHE em Operação ou Construção – Reservatório Maior que 3km <sup>2</sup>
	PCH com Outorga para Implantação
	UHE com Outorga para Implantação
	PCH em Estudo para Implantação
	UHE em Estudo para Implantação

**Área de Drenagem (km<sup>2</sup>) e Altitude (m) da ANA e ANEEL**  
 Área de Drenagem (km<sup>2</sup>) e Altitude (m) do SRTM 30m  
 Distância (km) Aproximada Seguindo a Drenagem Formada Pelo SRTM 30m Entre Nascente e Afluentes(s), Entre Afluentes, Entre Estações da Rede Hidrometeorológica, Entre

**Fontes:** Inventário da ANA de 10/07/2015; Inventário da ANEEL (SIGEL) baixado em 20/07/2015; MDE SRTM 30m (EARTH EXPLORER, 2014).