

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Vitoria Ellen da Silva Oliveira

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE REGIONALIZAÇÃO PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES
NA BACIA DO RIO DAS VELHAS**

Belo Horizonte
2023

Vitoria Ellen da Silva Oliveira

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE REGIONALIZAÇÃO PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES
NA BACIA DO RIO DAS VELHAS**

Dissertação/tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Hidráulica e Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem de Processos Hidrológicos

Orientador: Prof. Dr. Éber José Andrade Pinto

Belo Horizonte
2023

O48a	Oliveira, Vitoria Ellen da Silva. Avaliação de métodos de regionalização para estimativa de vazões na Bacia do Rio das Velhas [recurso eletrônico] / Vitoria Ellen da Silva Oliveira. – 2023. 1 recurso online (163 f. : il., color.) : pdf. Orientador: Éber José Andrade Pinto. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Inclui bibliografia. 1. Engenharia sanitária – Teses. 2. Recursos hídricos – Teses. 3. Regionalização – Teses. 4. Vazão, Medidores de – Modelos matemáticos – Teses. 5. Velhas, Rio das, Bacia (MG) – Teses. I. Pinto, Éber José Andrade. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título. CDU: 628(043)
------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

FOLHA DE APROVAÇÃO

“Avaliação de Métodos de Regionalização Para Estimativa de Vazões Na Bacia do Rio das Velhas”

VITORIA ELLEN DA SILVA OLIVEIRA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. Éber José Andrade Pinto

Prof. Francisco Eustáquio Oliveira e Silva

Francisco Fernando Noronha Marcuzzo

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por:

Profa. Priscilla Macedo Moura

Prof. Eber José de Andrade Pinto

Coordenadora

Orientador

Belo Horizonte, 29 de setembro de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Eber Jose de Andrade Pinto, Professor do Magistério Superior**, em 06/10/2023, às 16:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Fernando Noronha Marcuzzo, Usuário Externo**, em 06/10/2023, às 17:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Eustaquio Oliveira e Silva, Professor do Magistério Superior**, em 06/10/2023, às 17:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2691820** e o código CRC **8C66D095**.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SMARH – UFMG) pelo amparo concedido para o desenvolvimento da pesquisa. Sou muito grata por ter tido a oportunidade de aprender e fazer parte de um programa de pós-graduação de tamanha envergadura e qualidade.

Ser orientada pelo Prof. Dr. Éber José Andrade Pinto foi um privilégio que tive na dissertação de mestrado. Apresento aqui todos os mais sinceros agradecimentos por todos os conhecimentos transmitidos.

Agradeço imensamente ao doutorando, mestre e colega de pesquisa Fábio Silva, que me apoiou e colaborou para o desenvolvimento de parte da minha pesquisa. Ainda, agradeço aos colegas do programa de mestrado e de toda a trajetória acadêmica desenvolvida até aqui, em especial nas pessoas de Luiza e Juliana. Obrigada por todos os debates, indicações bibliográficas e pela harmoniosa convivência no desenvolvimento desta pesquisa.

Como não poderia deixar de ser, reconheço a importância e a participação de cada um dos meus amigos da vida, que mesmo não estando juntos no dia a dia da pós-graduação tiveram papel fundamental para que eu pudesse levar este trabalho até o fim. Durante esses dois anos, o apoio e a presença de vocês foram fundamentais.

Agradeço também ao colega de trabalho Rubens Gomes Dias, bem como ao time da Crono Engenharia, especialmente aos sócios Ciomara Rabelo, Ulisses Saffar e Jorge Saffar, por todas as contribuições ao longo da minha formação profissional e pessoal.

Aos meus irmãos, Doutor Marcos Paulo da Silva Oliveira e Victor Hugo de Oliveira, agradeço por terem me ensinado tanto e por termos partilhado tanto. Em especial, para o Doutor Marcos, com todos os destaques possíveis (como gostamos de dizer), obrigada por ser o meu melhor amigo e inspiração, sou grata por todo o apoio durante a minha formação. Aos meus pais, Marcos José de Oliveira e Neusa da Silva Oliveira, meu sentimento de eterno amor e gratidão por todos os sacrifícios em prol da minha

educação e formação, não só profissional, mas também política e pessoal. É por vocês que tento ser melhor a cada dia.

Para todos vocês, meus mais sinceros sentimentos de amor, gratidão e reconhecimento.

RESUMO

A disponibilidade de dados de vazões em uma bacia hidrográfica é fundamental para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. Todavia, a densidade de estações fluviométricas (FLU) é limitada, tornando necessária a aplicação de diferentes metodologias que permitam a transferência de informações de um local com dados observados a outro sem medições de vazões. Um exemplo prático desse problema é o cálculo de cargas em estações de qualidade da água (QA) não coincidentes com as estações FLU. Metodologicamente, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a aderência de quatro métodos de transferência de vazões diárias na bacia do Rio das Velhas. O primeiro método aplicado foi a razão entre as áreas de drenagem de locais com e sem dados de vazões e os outros três são métodos de regionalização das curvas de permanência (CP) de vazões diárias. O segundo é o método de regionalização das CPs consiste em definir regiões homogêneas (RH) a partir das CPs adimensionalizadas pelas médias das vazões diárias do período utilizado para avaliação, out/1994 a set/2014. Cada RH terá uma CP adimensional. Em seguida é efetuada a regressão das médias das vazões diárias com as características da bacia. No terceiro método as mesmas etapas são aplicadas em cada ano hidrológico do período de dados. O quarto método consiste no ajuste de uma distribuição de probabilidades às CPs e, em seguida, os parâmetros das distribuições ajustadas às CPs são regionalizados por meio de uma regressão com as características da bacia. As variáveis explicativas associadas as características geomorfológicas e climáticas das bacias que foram testadas nas regressões foram a área de drenagem, evapotranspiração, precipitação média anual, declividade e a precipitação efetiva ($P - ET$). A avaliação dos métodos de transferência de vazões foi realizada por meio da aplicação das seguintes métricas: R^2 , RMSE, EPMA e KGE. Dos métodos testados observou-se que o método de regionalização das Curvas de Permanência de Longo Termo se mostrou mais aderente, com melhoria em todas as métricas de desempenho utilizadas. Após a seleção do método mais adequado para obtenção de vazões, foram geradas as séries de vazões diárias no período de 2012 a 2020 nas estações de QA da rede do IGAM, onde a maioria dos locais não são coincidentes com as estações fluviométricas, culminando na conclusão do presente estudo.

Palavras-Chave: regionalização; curvas de permanência; vazões diárias; rio das Velhas.

ABSTRACT

The availability of flow data in a hydrographic basin is fundamental for the planning and management of water resources. However, the density of fluviometric stations (FLU) is limited, making it necessary to apply different methodologies that allow the transfer of information from one location with observed data to another without flow measurements. A practical example of this problem is the calculation of loads of pollutants in water quality stations that do not coincide with the fluviometric stations. Methodologically, this study aimed to evaluate four flow transfer methods in the Rio das Velhas basin. The first method applied was the ratio between the drainage areas of sites with and without flow data and the other three are methods of regionalization of the flow-duration curves (FDC). The first method of regionalization of the FDC consists of defining homogeneous regions from the permanence curves dimensionless by the average daily flows of the period used for evaluation, Oct/1994 to Sep/2014. Each homogeneous regions will have a dimensionless FDC. Then, the regression of the averages of the daily flows with the characteristics of the basin is carried out. In the second method the same steps will be applied in each hydrological year of the data period. The third method consists of fitting a probability distribution to the permanence curves and, then, the parameters of the distributions adjusted to the permanence curves are regionalized through a regression with the characteristics of the basin. The explanatory variables associated with the geomorphological and climatic characteristics of the basins that will be tested in the regressions will be the drainage area, evapotranspiration, average annual precipitation, slope and effective precipitation. The evaluation of flow transfer methods was carried out through the application of the following metrics: " R^2 , RMSE, EPMA and KGE". Of the tested methods, it was observed that the method of regionalization of the FDC proved to be more adherent, with significant improvement in all performance metrics used. After selecting the most appropriate method for obtaining flows, daily flow series were generated from 2012 to 2020 at the water quality stations of the IGAM network, where most locations do not coincide with the fluviometric stations, culminating in the conclusion of the present study.

Keywords: regionalization; flow duration curves; daily flows; rio das Velhas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da Bacia do Rio das Velhas no Estado de Minas Gerais	20
Figura 3 – Localização Hidrográfica da Bacia do Rio das Velhas	22
Figura 4 – Municípios – Bacia do Rio das Velhas	24
Figura 2 – Método de interpolação espacial.....	50
Figura 5 – Principais Cursos d'água – Bacia do Rio das Velhas.....	55
Figura 6 – Altimetria – Bacia do Rio das Velhas	57
Figura 7 – Declividade – Bacia do Rio das Velhas.....	58
Figura 8 – Unidades Hidrogeológicas – Bacia do Rio das Velhas.....	61
Figura 9 – Evolução do Uso e Ocupação do Solo – Bacia do Rio das Velhas	64
Figura 10 – Classificação Climática de Koppen – Bacia do Rio das Velhas	65
Figura 11 – Pluviometria Média Ponderada 1994-2014 – Bacia do Rio das Velhas ..	68
Figura 12 – Evapotranspiração Real – Bacia do Rio das Velhas	69
Figura 13 – Localização – Estações de Monitoramento de Vazão – Bacia do Rio das Velhas	72
Figura 14 – Dendrograma – RHH.....	77
Figura 15 – Estações por RHH.....	80
Figura 16 – Curvas de Permanência RHH01: 41150000; 41180000; 41199998; 41260000; 41380000; 41250000; 41340000.....	81
Figura 17 – Curvas de Permanência RHH02:41410000; 41600000; 41650002	81
Figura 18 – Curvas de Permanência RHH03:41685000 e 41780002	81
Figura 19 – Curvas de Permanência RHH04: 41890000 e 41940000	82
Figura 20 – Curvas de Permanência RHH05:41818000 e 41990000	82
Figura 21 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão média de longo termo	84
Figura 22 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41151000 – RHH01	87
Figura 23 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41151000 – RHH01	94
Figura 24 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41151000 (RHH01) – 1997	96
Figura 25 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41151000 (RHH01) – 2003	96

Figura 26 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41151000 (RHH01) – 2007	96
Figura 27 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41151000 (RHH01) – 2010	97
Figura 28 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41151000 (RHH01) – 2014	97
Figura 29 – Diagrama de quocientes de momentos-L.....	99
Figura 30 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41151000	102
Figura 31 – Box-plot – R^2	103
Figura 32 – Box-plot – MAPE.....	103
Figura 33 – Box-plot – RMSE.....	104
Figura 34 – Box-plot – KGE.....	104
Figura 35 – Disponibilidade de Dados Fluviométricos – Período de 2012- 2020	109
Figura 36 – Simplificação da metodologia de preenchimento de falhas.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Municípios da Bacia do Rio das Velhas	23
Tabela 2 – Classes de declividade por tipo de relevo	58
Tabela 3 – Descrição das classes de uso e ocupação do solo	62
Tabela 4 – Estações Pluviométricas – Bacia do Rio das Velhas.....	67
Tabela 5 – Dados das Estações de Monitoramento de Vazão.....	70
Tabela 6 – Variáveis Físicas e Climáticas – Estações Fluviométricas.	74
Tabela 7 – Métricas de desempenho de regionalização utilizando o Cenário 01.....	75
Tabela 8 – Métricas de desempenho de regionalização utilizando o Cenário 02.....	75
Tabela 9 – Correlação – Variáveis Físicas e Climáticas e Vazão média de Longo Termo.....	84
Tabela 10 – Métricas de Desempenho de Regionalização CPLT	85
Tabela 12 – Métricas de Desempenho de Regionalização CPA.....	92
Tabela 13 – Momentos Amostrais – Séries de Dados 1994 a 2014.....	98
Tabela 15 – Correlação – Variáveis Físicas e Climáticas e Parâmetros GNO	100
Tabela 16 – Métricas de desempenho de regionalização GNO	101
Tabela 17 – RHH e Estações Fluviométricas de Referência.....	111
Tabela 18 – Vazões Médias.....	132
Tabela 11 – Correlações – Variáveis Físicas e Climáticas e Vazões Médias Anuais	133
Tabela 18 – Métricas de desempenho por ano – RHH1.	137
Tabela 19 – Métricas de desempenho por ano – RHH2.	137
Tabela 20 – Métricas de desempenho por ano – RHH3.	138
Tabela 21 – Métricas de desempenho por ano – RHH4.	138
Tabela 22 – Métricas de desempenho por ano – RHH5.	138
Tabela 14 – Métricas – Ajuste das Distribuições às Séries de Dados.....	152

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAS – Amostra Aleatória Simples

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

BDiA – Banco de Dados de Informações Ambientais

BH – Bacia Hidrográfica

CE – Coeficientes de exportação

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

CIR – Carga Instantânea Relativa

CP – Curva de Permanência

CPA – Curva de Permanência Anual

CPLT – Curva de Permanência de Longo Termo

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil

Di – Permanência da Curva de Permanência

E – Evaporação

Ei – Evapotranspiração potencial

EPMA – Média do Erro Percentual Absoluto

ETR – Evapotranspiração

FAP – Função Acumulada de Probabilidade

FDP – Função Densidade de Probabilidade

FLU – Estações Fluviométricas

GEV – Distribuição Generalizada de Valores Extremos

GLO – Distribuição Logística Generalizada

GNO – Distribuição Normal Generalizada

HidroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas

i – Indexador das vazões ordenadas, sendo o menor valor de i atribuído à maior vazão observada, e, o maior valor, à menor vazão

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDW – Inverso da potência das distâncias

IDW – Ponderação de Distância Inversa

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

KGE – Coeficiente de Kling Gupta

MDE – Modelo Digital de Elevação

n – número de observações disponíveis

P – Precipitação

PDRH – Plano Diretor de Recursos Hídricos

PDRH Velhas – Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas

Q – Vazão, em (m^3/s)

QA – Qualidade da Água

Qobs, i – Vazão observada correspondente à permanência i;

Qsim, i – Vazão simulada correspondente à permanência i;

R² – Coeficiente de determinação

RHH – Região Hidrologicamente Homogênea

RHN – Rede Hidrometeorológica Nacional

RMSE – Raiz do Erro Quadrático Médio

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SGB-CPRM – Serviço Geológico do Brasil

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	21
2.1	Objetivo Geral	21
2.2	Objetivos Específicos	21
3	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	22
4	REVISÃO DE LITERATURA	27
4.1	Métodos de Regionalização das Curvas de Permanência	27
4.1.1	Identificação e Delimitação de Regiões Hidrologicamente Homogêneas	29
4.1.2	Métodos <i>Index-Flood</i> e <i>Index-Flow</i>	32
4.1.3	Métodos que Regionalizam os Parâmetros da Distribuição de Probabilidades.....	33
4.2	Estimativa das séries temporais de vazões diárias em bacias não monitoradas	39
5	METODOLOGIA / MATERIAL E MÉTODOS	43
5.1	Obtenção e Análise de Consistência de Dados	43
5.1.1	Aquisição de Dados e Caracterização da Área de Estudo	43
5.1.2	Estações Fluviométricas	43
5.2	Regionalização de vazões	45
5.2.1	Identificação e Delimitação de Regiões Homogêneas	45
5.2.2	Regionalização pela Razão entre as áreas de drenagem	46
5.2.3	Regionalização das Curvas de Permanência	47
5.2.3.1	Regionalização das Curvas de Permanência de Longo Termo	49
5.2.3.2	Regionalização das Curvas de Permanência Anuais	51
5.2.3.3	Regionalização das Curvas de Permanência – Ajuste Modelo de Distribuição	51
5.2.4	Avaliação de Desempenho	53
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
6.1	Caracterização Física da bacia do Rio das Velhas	54
6.1.1	Hidrografia	54
6.1.2	Altimetria e Declividade.....	56
6.1.3	Hidrogeologia.....	59
6.1.4	Uso e Ocupação do Solo e Coberturas Vegetais.....	61
6.1.5	Clima e Tempo.....	64
6.2	Aquisição e Análise de Consistência de dados Fluviométricos	70
6.3	Regionalização de vazões	75

6.3.1	Regionalização de Vazões Diárias pela Razão entre as áreas de drenagem	75
6.3.2	Determinação de Regiões Hidrologicamente Homogêneas.....	77
6.3.3	Regionalização das Curvas de Permanência de Longo Termo	82
6.3.4	Regionalização das Curvas de Permanência Anuais	87
6.3.5	Regionalização das Curvas de Permanência – Ajuste de um Modelo de Distribuição	97
6.3.6	Discussão dos Resultados.....	102
6.4	Regionalização das Vazões Diárias nas Estações de Qualidade das Águas	106
7	CONCLUSÕES	112
	REFERÊNCIAS.....	113
	APÊNDICE A – Diagrama Unifilar das Estações da Bacia do Rio das Velhas.....	122
	APÊNDICE B – Curvas de Permanência de Longo Termo (CPLT).....	123
	APÊNDICE C – Curvas de Permanência Anuais (CPA)	132
	APÊNDICE D – Modelo de Distribuição	152
	APÊNDICE E – Resultados de Preenchimento de Falhas	167

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de dados de vazão em bacias hidrográficas é fundamental para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos e a estimativa de cargas de séries históricas de parâmetros de qualidade da água. Segundo Von Sperling (2014a), o conhecimento do comportamento dos cursos hídricos é de suma importância, tendo em vista os possíveis impactos relacionados às intervenções antrópicas, como pelo lançamento de esgotos, brutos ou tratados. Ainda, segundo o mesmo autor, em estudos de empreendimentos, tais como hidrelétricas, é usual a necessidade de estudos de qualidade das águas, sejam em trechos a jusante ou em trechos desviados pela implantação da estrutura, os quais poderão veicular uma vazão reduzida.

Von Sperling (2014a), indica ainda, a importância do conhecimento das vazões em um curso d'água, uma vez que tais dados são imprescindíveis para o conhecimento da capacidade de diluição de despejos e da capacidade de assimilação de poluentes, além de imprescindíveis para realização de modelagens matemáticas. Entretanto, a densidade de estações fluviométricas (FLU) é limitada. Neste sentido, entendem-se os estudos de regionalização como uma série de procedimentos utilizados a fim de estimar determinado dado hidrológico em locais não monitorados, a partir da transferência de informações de um local para outro dentro de uma mesma região com comportamento hidrológico semelhante (Naghetini e Pinto, 2007; Tucci, 2002).

Os métodos de regionalização de curvas de permanência e de razão entre as áreas de drenagem são muito empregados na estimativa de vazões diárias em locais não monitorados para cálculo das cargas de poluentes de um curso d'água. As curvas de permanência de longo termo (CPLT) expressam a porcentagem de tempo em que um quantil de vazão é igualado ou excedido ao longo de um determinado período de registro. De acordo com Westerberg e McMillan (2015) as curvas de permanência relacionam a frequência e a magnitude das vazões observadas e são uma assinatura do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica. As curvas de permanência de longo termo representam uma síntese gráfica simples da variabilidade das vazões em uma seção transversal de um curso d'água e representam os resultados da ação das características de uma bacia (área de drenagem, forma, declividade, climatologia, hidrogeologia e tipologia do solo) na geração dos escoamentos superficiais e de base (Costa e Fernandes, 2021).

Além das estimativas de vazões diárias em locais sem monitoramento (Archfield *et al.* 2013; Zhang *et al.* 2015; Requena *et al.* 2018), as curvas de permanência podem ser empregadas em estudos de vazões ecológicas (Pumo *et al.* 2013), projetos de usinas (Lazzaro *et al.* 2013; Liucci *et al.* 2014), na calibração de modelos de chuva-vazão (Pinheiro e Naghettini 2010, 2013; Vrugt e Sadegh 2013; Costa *et al.* 2014; Beck *et al.* 2016), entre outras aplicações.

O conhecimento da variabilidade interanual das vazões é importante para a caracterização do regime hidrológico de uma bacia hidrográfica. Contudo, as curvas de permanência de longo termo (CPLT) não possibilitam a visualização desta variabilidade, pois, são construídas considerando todos os dados históricos da bacia, não representando dos extremos que podem ocorrer entre os anos hidrológicos, e sim o comportamento médio da bacia.

Vogel e Fennessy (1994a) apontam que a variabilidade interanual das vazões pode ser descrita pelas curvas de permanência anuais (CPA). Estas curvas representariam a variabilidade esperada das vazões nos períodos chuvosos e secos dos anos. Segundo Castellarin *et al.* (2013) as CPAs são empregadas na engenharia de recursos hídricos, principalmente para projetos. Contudo, o uso conjunto das CPLT e CPA podem auxiliar o planejamento e gestão de recursos hídricos, pois, como afirmam Castellarin *et al.* (2004b), mencionados por Costa e Fernandes (2021), “CPLTs e CPAs são conceitos complementares ao invés de competitivos”.

O princípio dos métodos de regionalização se baseia na similaridade entre as variáveis, parâmetros e funções hidrológicas na região de estudo (Tucci, 2002). As variáveis são entendidas como uma expressão do comportamento hidrológico ou de um processo, como as vazões instantâneas ou os valores de precipitação diários. Um parâmetro, por sua vez, é entendido como uma característica do sistema, como área de drenagem, enquanto a função hidrológica condiz a uma relação entre uma variável hidrológica e uma ou mais variáveis explicativas ou estatísticas, como a curva de permanência (Tucci, 2002). Tucci (2009) divide os métodos de regionalização em três diferentes grupos: os que regionalizam as variáveis da distribuição de probabilidades, regionalizações de eventos associados a um determinado risco e métodos que

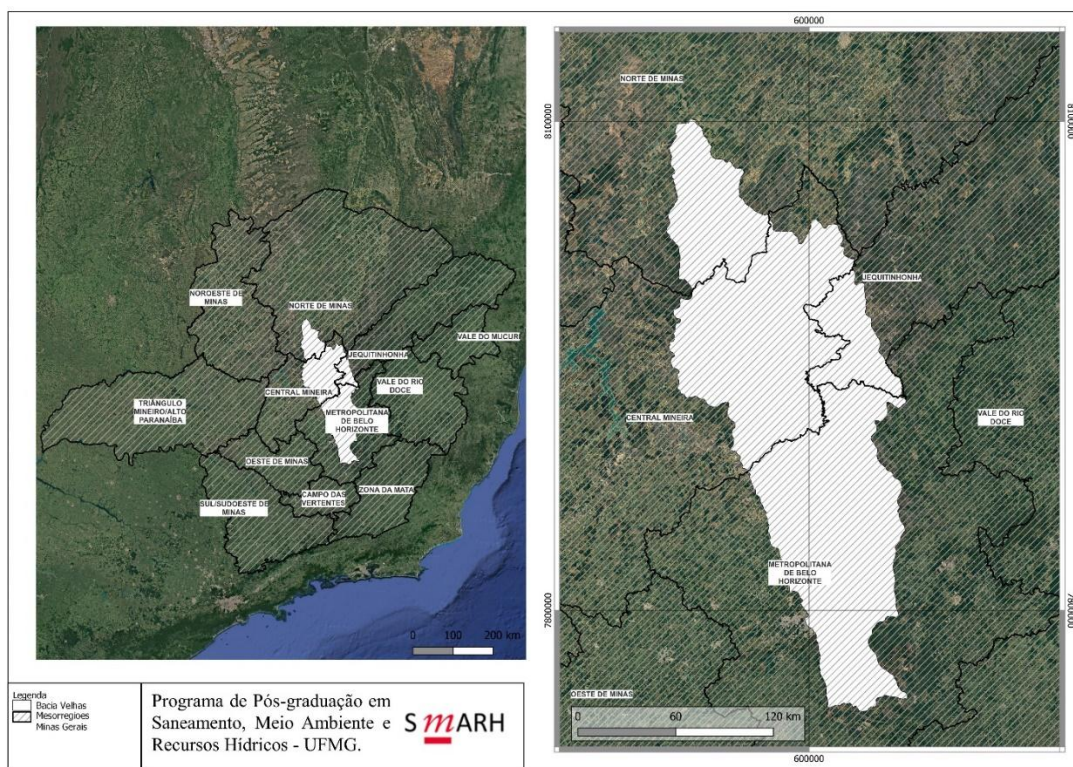
regionalizam uma curva adimensional de probabilidades, usualmente denominado de *index-flood*.

Nas últimas décadas foram desenvolvidas diferentes abordagens para estimar as curvas de permanência em bacias não monitoradas (Blöschl *et al.*, 2013; Booker e Snelder, 2012; Costa e Fernandes, 2021; Ganora *et al.*, 2009; Hope e Bart, 2012; Li *et al.*, 2010; Mohamoud , 2008; Shu e Ouarda, 2012). Segundo Zhang *et al* (2015) essas abordagens podem ser agrupadas em métodos de interpolação espacial (Castiglioni *et al.*, 2009; Chokmani e Ouarda, 2004; Shu e Ouarda, 2012) e métodos *index-flood* (Castellarin *et al.*, 2004, 2007, 2013; Li *et al.*, 2010; Rianna *et al.*, 2011; Shao *et al.*, 2009). Já Castellarin *et al.* (2013), organizam os métodos para estimar curvas de permanência em bacias não monitoradas em quatro grandes categorias, a saber, métodos de regressão, método *index-flow*, geoestatísticos e métodos que usam registros curtos de vazões.

A bacia do Rio das Velhas, localizada na região central do estado de Minas Gerais, como apresentada na Figura 1, engloba parcial ou integralmente 51 municípios, com porções significativas dos municípios da Região Metropolitana de Belo Horizonte (Ecoplan, 2015). Ecoplan (2015) argumenta no Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas (PDRH Velhas) que parte expressiva dos municípios nela situados demandam de uma boa gestão das águas da bacia para suprir as demandas inerentes aos diferentes usos consuntivos da água, visto que cerca de 74 % da vazão consumida em Belo Horizonte, Raposos, Nova Lima, Sabará e Santa Luzia é captada na bacia. Com isso, evidencia-se a necessidade de estudo da disponibilidade hídrica na bacia do rio das Velhas.

Vale ressaltar a lacuna de estudos que avaliem de maneira conjunta os indicadores de qualidade das águas e as vazões de trânsito, variáveis que em conjunto podem indicar os impactos antrópicos sobre os recursos hídricos. Segundo Piazzzi *et al.* (2018), os problemas relacionados à escassez dos recursos hídricos, por vezes abordado apenas em relação ao aspecto quantitativo, deve igualmente abranger em seu processo de gerenciamento, a qualidade das águas, tendo em vista a necessidade de atendimento das demandas econômicas produtivas com as ecossistêmicas.

Figura 1 – Localização da Bacia do Rio das Velhas no Estado de Minas Gerais



Sendo assim, tendo em vista a essencialidade das águas da BH do Rio das Velhas, principalmente na ótica das condições necessárias às atividades de contato primário e de consumo, esse trabalho tem como objetivo principal a avaliação dos métodos de proporção de áreas de drenagem e de regionalização das curvas de permanência e a seleção do mais adequado para aplicação na BH do Rio das Velhas. Os métodos selecionados para estudo foram a proporção entre as áreas de drenagem, os métodos de regionalização das curvas de permanência (CP) anuais e de longo termo, através da técnica *index flow* e o ajuste de modelos de funções densidade de probabilidade.

Este estudo está organizado em seis capítulos, sendo o primeiro a introdução do trabalho, no segundo são apresentados os objetivos, geral e específicos, do presente estudo. No terceiro capítulo são apresentadas breves revisões de literatura acerca dos temas centrais envolvidos neste trabalho. No quarto capítulo são apresentadas as metodologias utilizadas para obtenção dos resultados apresentados no capítulo cinco. No sexto capítulo são apresentadas as conclusões obtidas no estudo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar os métodos de proporção de áreas de drenagem e de regionalização de curvas de permanência para estimativa de vazões diárias e selecionar o mais adequado para aplicação na bacia do Rio das Velhas.

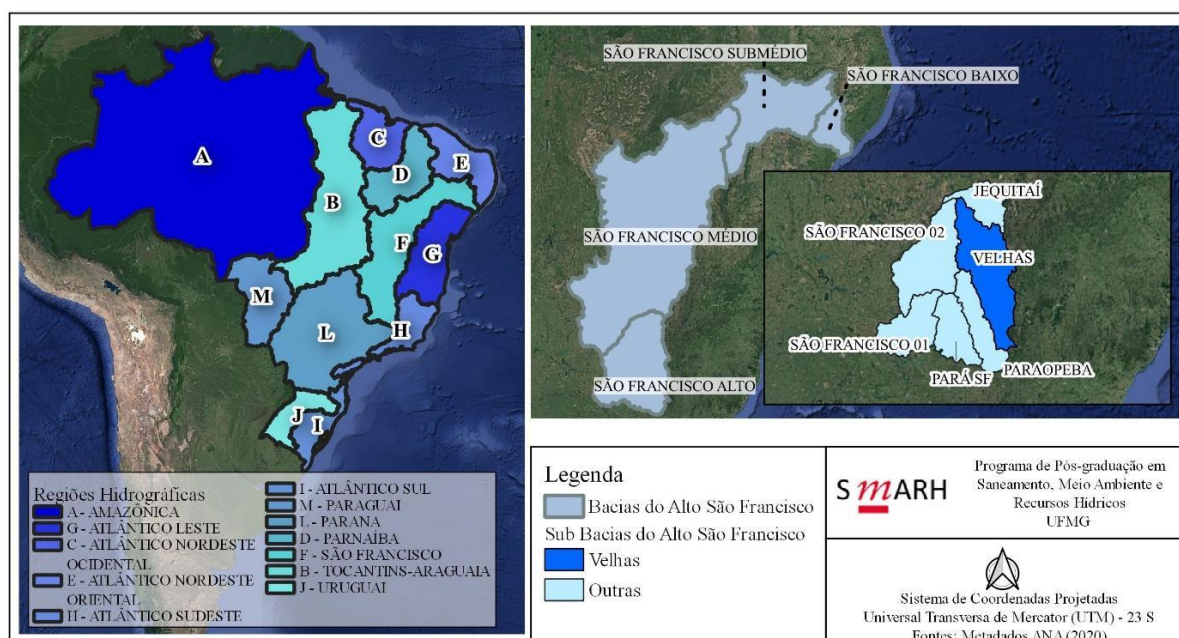
2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar quais são as variáveis explicativas mais representativas da geração de escoamento superficial na bacia;
- Definir as regiões homogêneas para as curvas de permanência na bacia do Rio das Velhas;
- Definir o método mais aderente para transferência de vazões na bacia do rio das Velhas;
- Estimar as séries de vazões diárias no período de 2012 a 2020 nos pontos de coleta de amostras para análise de Qualidade da Água da rede do IGAM.

3 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estado de Minas Gerais foi dividido em Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) (CERH, 2002). A bacia hidrográfica (BH) do Rio das Velhas está inserida no Alto São Francisco, uma das quatro sub-bacias do Rio São Francisco (Figura 2), e consiste em uma UPGRH. A área de drenagem desse rio representa uma das 12 regiões hidrográficas estabelecidas pela Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) n° 32 de 25 de Junho de 2003. Ela passa pelos estados Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Goiás, Minas Gerais e Distrito Federal.

Figura 2 – Localização Hidrográfica da Bacia do Rio das Velhas



A nascente do rio que dá nome a bacia em estudo está situada na cachoeira das Andorinhas, no município de Ouro Preto, em uma altitude de aproximadamente 1.500 metros. O rio principal desagua no rio São Francisco em barra do Guaicuí, Distrito de Várzea da Palma, em uma altitude de 478 m. Toda a bacia compreende uma área de 27.850 km², nos quais o rio principal percorre uma distância de 806,84 km (CBH Velhas, 2015). O deságua do rio das Velhas no rio São Francisco ocorre na localidade de Barra do Guaicuí, município de Várzea da Palma

Situada na região central do estado, a bacia abrange áreas de contribuição de 51 municípios, dos quais 44 tem sede inserida nos limites da BH. Estão totalmente

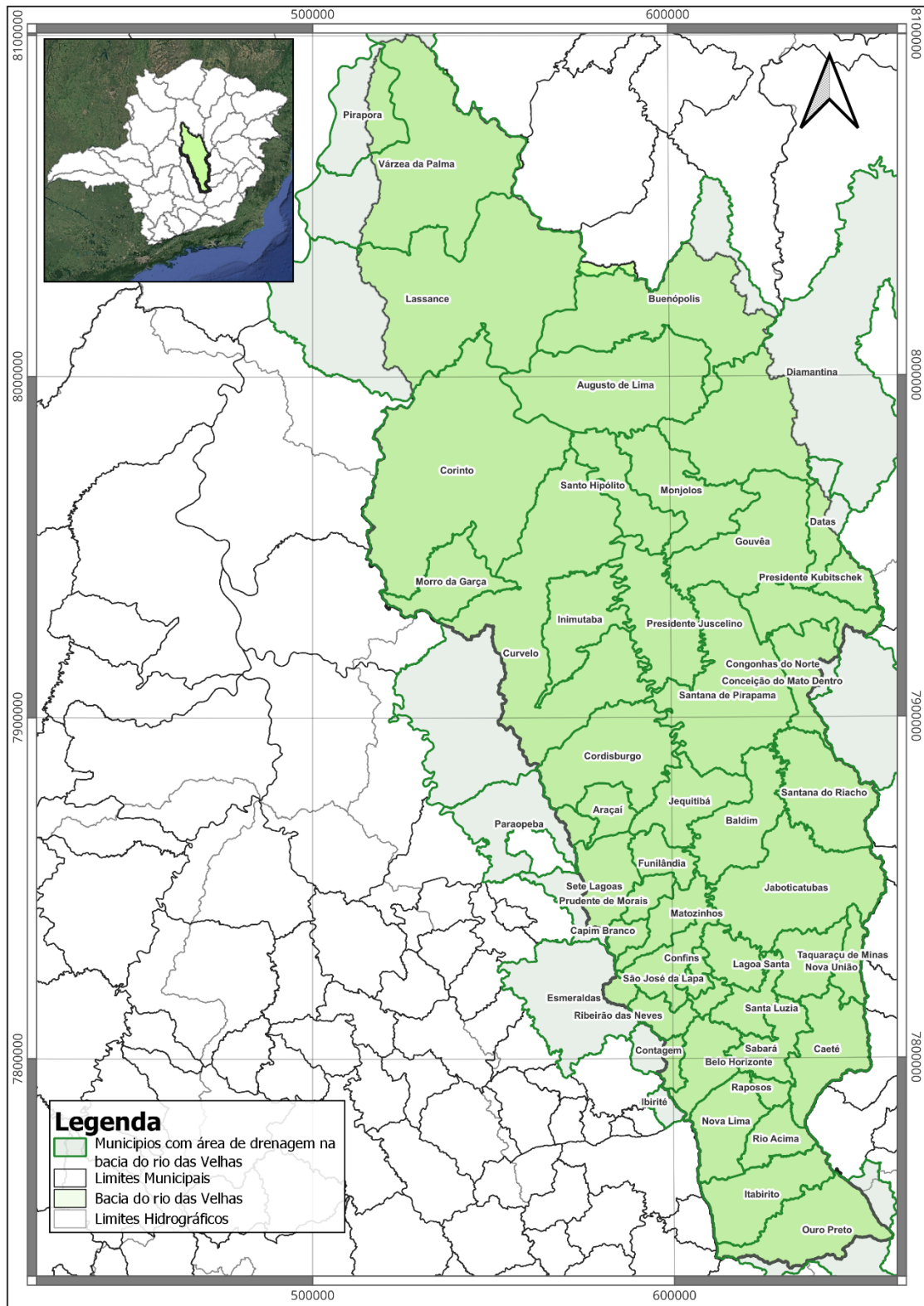
inseridos na bacia os municípios de Capim Branco, Confins, Funilândia, Lagoa Santa, Matozinhos, Nova União, Pedro Leopoldo, Prudente de Moraes, Ribeirão das Neves, São José da Lapa, Taquaraçu de Minas, Vespasiano, enquanto Baldim (60 %), Caeté (58 %), Esmeraldas (7 %), Jaboticatubas (68 %), Jequitibá (24 %), Sabará (37 %), Santa Luzia (96 %) e Sete Lagoas (66 %) tem seu território parcialmente inserido na bacia (CBH VELHAS, 2015). Na Tabela 1 é apresentada a relação de municípios inseridos na bacia e suas respectivas populações residentes e áreas, com base nos dados do censo 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A distribuição dos municípios na bacia hidrográfica é apresentada na Figura 3.

Tabela 1 – Municípios da Bacia do Rio das Velhas

Município	População ¹	Área (km²)	Município	População	Área (km²)
Araçaí	2.243	186.543	Matozinhos	33.955	252.28
Augusto de Lima	4.960	1.254	Monjolos	2.360	650.91
Baldim	7.913	556.266	Morro da Garça	2.660	414.771
Belo Horizonte	2.375.151	331,4	Nova Lima	80.998	429.063
Buenópolis	10.292	1.599	Nova União	5.555	172.131
Caeté	40.750	542.571	Ouro Preto*	70.281	1245.864
Capim Branco	8.881	95.333	Paraopeba*	22.563	625.623
Conceição do Mato Dentro*	17.908	1726.829	Pedro Leopoldo	58.740	292.989
Confins	5.936	42.355	Pirapora*	53.368	549.514
Congonhas do Norte	4.943	398.851	Presidente Juscelino	3.908	695.882
Contagem	603.442	195.268	Presidente Kubitschek	2.959	189.235
Cordisburgo	8.667	823.653	Prudente de Moraes	9.573	124.189
Corinto	23.914	2525.394	Raposos	15.342	72.169
Curvelo	74.219	3298.789	Ribeirão das Neves	296.317	154.501
Datas	5.211	310.099	Rio Acima	9.090	229.812
Diamantina*	45.880	3891.654	Sabará	126.269	302.173
Esmeraldas*	60.271	911.418	Santa Luzia	202.942	235.327
Funilândia	3.855	199.796	Santana de Pirapama	8.009	1255.83
Gouveia	11.681	866.6	Santana do Riacho	4.023	677.206
Inimutaba	6.724	524.467	Santo Hipólito	3.238	430.656
Itabirito	45.449	542.609	São José da Lapa	19.799	47.929
Jaboticatubas	17.134	1114.155	Sete Lagoas	214.152	537.638
Jequitibá	5.156	445.029	Taquaraçu de Minas	3.794	329.24
Joaquim Felício*	4.305	790.934	Várzea da Palma	35.809	2220.276
Lagoa Santa	52.520	230.082	Vespasiano	104.527	70.108
Lassance	6.484	3.204			

¹Valores segundo o Censo IBGE (2010).

Figura 3 – Municípios – Bacia do Rio das Velhas



Dentre os principais afluentes e cursos d'água inseridos nesta bacia hidrográfica, destacam-se o rio Bicudo, ribeirão Jequitibá, ribeirão da Mata, ribeirão Arrudas,

ribeirão do Onça e rio Itabirito (pela margem esquerda); e rio Curimataí, rio Pardo, rio Parauna/Cipó, rio Taquaraçu e ribeirão Caeté/Sabara (pela margem direita).

Segundo dados do Atlas Digital das Águas de Minas (Euclydes *et al.*, 2007) a rede de drenagem da maioria dos cursos d'água da bacia do rio das Velhas é do tipo dendrítico. A densidade da rede de drenagem natural apresenta maior riqueza hidrográfica entre os afluentes da margem direita, fato associado às características geológicas da bacia (Euclydes *et al.*, 2007).

ECOPLAN (2015) levantou dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) e do Atlas de Abastecimento de Água da ANA e afirmou que o abastecimento urbano (36,2 %) e a irrigação (32,8 %) eram os principais responsáveis pelo volume de água retirado na bacia do rio das Velhas. O valor total era de 19,7 m³/s e de 28,6 m³/s em 2035, considerando o pior cenário. A maior retirada de água ocorre no trecho alto da calha do Rio das Velhas, onde está localizada a captação do Sistema Integrado (SIN) Rio das Velhas, responsável por atender cerca de 74 % da demanda do abastecimento urbano de Belo Horizonte, como também dos municípios de Raposos, Nova Lima, Sabará e Santa Luzia.

Piazzzi *et al.* (2018) analisou as correlações espaciais no médio Velhas, entre outorga e qualidade de água e verificou que em locais com maior número de concessões de retirada de água (RMBH e Sete Lagoas) há grande número de desenquadramentos (concentrações observadas acima das permissíveis por lei).

Dentre os trabalhos de regionalização de vazões realizados na bacia do Rio das Velhas, destacam-se:

- (CPRM, 2001b): Desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), referente à regionalização de vazões das sub-bacias 40 e 41 (Alto São Francisco). No trabalho em questão, foram regionalizadas as vazões médias de longo termo e vazões médias anuais. As vazões médias de longo termo com base no ajuste de equações de regressão, equações lineares e potenciais. O método consiste na análise de regressão entre as vazões médias de longo termo e as características físicas e meteorológicas de regiões consideradas homogêneas. Quanto às vazões médias

anuais, foi aplicado do método “index-flood”, utilizando momentos-L e empregando as estatísticas-L.

- (CPRM, 2001c): Desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), referente à regionalização das curvas de permanência das curvas de regularização das sub-bacias 40 e 41 (Alto São Francisco). No trabalho em questão, foram regionalizadas as vazões médias de longo termo e vazões médias anuais. A regionalização da curva de permanência foi realizada através do ajuste a uma curva exponencial determinada a partir das permanências características de 50% e 95% e análise de regressão destas permanências com as características fisiográficas e climáticas da região.
- Pinto (2006): Avaliação de métodos para a regionalização de curvas de permanência de vazões, através da regionalização das CPLTs da bacia pelo método de Tucci (2009) e de Claps e Fiorentino, que corresponde à aplicação da distribuição log-normal de três parâmetros no ajuste da curva de permanência.
- Atlas Digital de Águas de Minas (Euclides *et al.*, 2007): Foram aplicados dois métodos de regionalização de vazão, sendo o primeiro deles um ajuste das distribuições teóricas de probabilidades às séries históricas (1970 a 2007) de vazões de cada uma das 20 estações utilizadas, para diferentes períodos de retorno e, a seguir, aplica regressão múltipla entre estas vazões e as características físicas e climáticas das sub-bacias. O segundo método aplicado neste estudo foi a adimensionalização das curvas individuais de probabilidades para obtenção de uma curva adimensional regional média das estações com a mesma tendência. O valor médio (das mínimas e das máximas) é regionalizado em função das características físicas e climáticas das sub-bacias, através de uma equação de regressão múltipla.
- Luiz (2013): Regionalização hidrológica de vazões mínimas de 7 dias de duração e dez anos de tempo de retorno ($Q_{7,10}$) por diferentes modelos de regressão dos métodos dos mínimos quadrados: generalizado, ordinário e ponderado, em bacias do Alto São Francisco;
- ECOPLAN (2015): Plano Diretor de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do rio das Velhas. No PDRH foi realizada a regionalização de vazões na foz da bacia

através da transferência espacial dos dados das vazões características da estação 41990000, utilizando uma relação de proporção entre a área de drenagem da bacia (27.850 km²) e a área de drenagem da estação (26.500 km²). No estudo em questão, a disponibilidade hídrica nas UTEs foi também averiguada com base na regionalização de vazões por proporção de áreas.

4 REVISÃO DE LITERATURA

Neste estudo foi avaliada a transferência de vazões para locais sem dados. Os métodos selecionados para estudo foram a proporção entre as áreas de drenagem, os métodos de regionalização das curvas de permanência (CP) anuais e de longo termo, através da técnica *index flow* e o ajuste de modelos de funções densidade de probabilidade.

4.1 Métodos de Regionalização das Curvas de Permanência

Naghattini e Pinto (2007) definem as curvas de permanência (CP) como a variação do diagrama de frequências relativas acumuladas, em que elas são substituídas pela porcentagem de um intervalo de tempo específico, em que o valor da variável indicado no eixo das ordenadas, foi igualado ou superado. Genericamente, a CP de uma dada seção fluvial com n registros fluviométricos, pode ser obtida pelos seguintes passos:

- Ordenação dos registros em ordem decrescente;
- Verificação do número de ocorrências (n) e de superações de cada vazão ordenada (m);
- Atribuição da frequência ou probabilidade empírica de ser igualada ou superada $P (Q \geq Q_m)$, a qual pode ser estimada pela razão (m/n) .

Costa (2012) argumenta que as CPs são representações gráficas do regime hidrológico de uma bacia e que sua forma expressa a variabilidade das vazões em uma seção transversal, de acordo com as características físicas, climáticas, morfológicas e de cobertura vegetal da bacia hidrográfica. As CPs são usualmente constituídas por três partes, extremo superior, trecho médio e extremo inferior. Os trechos extremos usualmente são marcados pela presença de inflexões marcantes, indicando o comportamento das vazões máximas e mínimas, enquanto o trecho médio indica a faixa de valores de vazão predominantes no rio (TUCCI, 2002).

Tucci (2009) descreve dois procedimentos para a regionalização das CPs: a regionalização dos parâmetros da distribuição, que podem ser correlacionados com as características físicas das bacias, e a regionalização de determinadas probabilidades, usualmente Q_{50} e Q_{90} obtidas na curva empírica.

Castellarin *et al.* (2007) propõem uma classificação dos procedimentos de regionalização das curvas de permanência em três categorias: métodos estatísticos, paramétricos e gráficos. O primeiro grupo correspondente a todos os métodos que tratam as CP como o complemento da distribuição de frequência acumulativa e o segundo corresponde aos procedimentos que não fazem nenhuma conexão entre a curva e a teoria da probabilidade. Tucci (2009) retrata-os como de ajuste de uma função matemática e metodologia empírica, respectivamente. O terceiro está atrelado à procedimentos regionais, que utilizam gráficos padronizados para a representação das CP em uma região, em detrimento da utilização de relações analíticas (Castellarin *et al.* 2007).

Cabe mencionar que, a construção das CP pode ser seguida por duas formas distintas. A primeira maneira de construção consiste na utilização de todos os dados do período de observação, e constitui a denominada curva de permanência de longo termo (CPLT). Para Castellarin *et al.* (2004b), a CPLT pode ser entendida como o completo da função acumulada de probabilidade, sendo elas sensíveis a períodos com estiagens severas e grandes cheias. Sendo assim, a utilização das CPLTs, em geral, é indicada quando o período de observação dos dados é longo o suficiente para conter as vazões retratadas (VOGEL e FENNESSEY, 1994a).

A segunda abordagem consiste em se construir curvas de permanência para cada ano, civil ou hidrológico, gerando as chamadas curvas de permanência anuais (CPA). Essa abordagem permite que cada curva seja analisada como uma realização de uma variável aleatória, de forma análoga à análise que poderia ser feita na perspectiva de avaliação de séries de máximos ou mínimos (CASTELLARIN *et al.*, 2007).

Dentre as possíveis aplicações das CPLT, Costa *et al.* (2020) e Costa e Fernandes (2021), apontam os estudos de baixas vazões para operação em reservatórios, a possibilidade de preenchimento de dados em séries temporais, a calibração de

parâmetros dos modelos chuva-vazão, assim como a elaboração de análises hidrológicas regionais e estudos de qualidade das águas.

Para Costa e Fernandes (2021) a CPA reflete as variações aleatórias anuais e é capaz de resumir a variabilidade das vazões entre os dias mais secos e mais úmidos do ano ao qual é representativa. No trabalho de Castellarin *et al.* (2007) é indicado que a partir da curva anual é possível estimar intervalos de confiança em torno de uma curva mediana, que deve refletir um ano típico que não é afetado por extremos, seja por períodos anormalmente secos ou úmidos, e atribuir tempos de retorno para determinados curvas. Cabe pontuar que o tempo de retorno de determinado evento é valor esperado em necessário (em anos) para que o evento recorra, em um ano qualquer, sendo igual ao inverso da probabilidade de que tal evento de referência ocorra.

4.1.1 Identificação e Delimitação de Regiões Hidrologicamente Homogêneas

Segundo Tucci (2017), a vazão em uma bacia corresponde a um valor dado de forma integrada por toda a sua área de drenagem, em função do comportamento combinado de todos os efeitos internos da bacia, em relação às suas características de solo, geologia, clima, entre outros. Nesse sentido, a definição de uma região homogênea está relacionada com um determinado tipo de comportamento em um sistema híbrido (Tucci, 2009). Para Castellarin *et al.* (2013) a noção de similaridade hidrológica, no contexto das CPs, nos ajuda a agrupar bacias hidrográficas semelhantes juntas.

Naghetini e Pinto (2007) consideram a identificação e delimitação de regiões hidrologicamente homogêneas (RHH) uma etapa difícil e sujeita a subjetividades em um estudo de regionalização. Para sua determinação, é necessária a existência de evidências suficientes de que as diferentes amostras do grupo possuem a mesma distribuição de frequências e que a metodologia empregada seja capaz de reconhecer eventuais valores anômalos nas séries e diferenças populacionais em relação ao modelo probabilístico proposto ou a flutuações amostrais.

A identificação de RHH pode ser feita por estatísticas locais (dispersão e assimetria), calculados a partir de séries históricas e por características locais, conhecidas ou estimadas, a partir das amostras pontuais (Naghetini e Pinto, 2007). Hosking e Wallis

(1997) recomendam que a identificação de regiões homogêneas seja feita em duas etapas consecutivas. A primeira baseada em características locais e a segunda por um teste estatístico, construído com base somente nas estatísticas locais, para verificar os resultados preliminarmente obtidos. Segundo esses autores, as RHH não precisam convergir geograficamente, uma vez que as variáveis hidrológicas podem apresentar descontinuidades acentuadas quando observadas em função da localização.

Castellarin *et al.* (2013) apontam que a compreensão dos aspectos climáticos e paisagísticos das bacias de contribuição permitem a extrapolação de CPs empíricas derivadas de dados monitorados para postos não monitorados dentro de uma região semelhante ou homogênea. Da mesma forma, a compreensão dos controles de processo de geração de vazões que geram as CPs observados ajudam não apenas a delinear regiões homogêneas, mas também a utilizar modelos apropriados para extrapolar/reconstruir CPs em bacias não medidas (Castellarin *et al.*, 2013).

Se uma relação robusta puder ser encontrada entre a forma da CP e as características físicas e/ou climáticas da BH, então tais características podem ser utilizadas para delinear as regiões hidrologicamente homogêneas em uma BH (Castellarin *et al.*, 2013).

Dentre os métodos de delimitação de RHH, destacam-se as análises de agrupamento, usualmente referenciadas como análises de *clusters*, método usual de análise estatística multivariada, no qual cada uma das estações/objetos de estudo é associada a um vetor de dados contendo as características e/ou estatísticas locais, e em seguida, são agrupados e reagrupados de forma que seja possível identificar a maior ou menor similaridade entre os seus vetores de dados (Naghetini e Pinto, 2007).

No trabalho de Albuquerque *et al.* (2020) na Bacia Hidrográfica do rio Itapicuru-BA, a determinação de RHH foi feita a partir do método de análise de agrupamento *clustering* híbrido com base em dados físico-climáticos e de sensoriamento remoto, e os resultados do estudo implicaram em três regiões homogêneas.

Gonçalves *et al.* (2018) usaram a análise de *cluster* na bacia hidrográfica do rio Tapajós, para a identificação de RHH. Eles usaram 27 estações e como variáveis explicativas as vazões, as precipitações médias mensais, os comprimentos dos rios principais e as áreas de drenagem. A medida de dissimilaridade usada foi a distância euclidiana e o método de agrupamento foi a técnica hierárquica aglomerativa de Ward (Farsadnia *et al.*, 2014; Rianna *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2010), tendo como resultado a formação de três regiões homogêneas bem definidas.

O método de Ward é um procedimento de agrupamento hierárquico no qual a medida de similaridade, usada para juntar agrupamentos, é calculado com a soma de quadrados (SQ) entre os dois agrupamentos e aplicada para todas as variáveis. O agrupamento *clustering* híbrido *k-means*, por sua vez, consiste em um método de análise de cluster usando um número estabelecido previamente de *grupos*, no qual o procedimento usualmente utilizado consiste em computar o agrupamento hierárquico e aplicar o corte na árvore em *k-clusters*, realizar o cálculo de centro de cada *cluster*, e, por fim, a realização do cálculo de *k-means* usando o conjunto de centros de cluster como os centros de cluster iniciais (Naghetini e Pinto, 2007).

O método de Ward é um procedimento de agrupamento hierárquico que busca minimizar a variabilidade dentro dos grupos ao longo do processo de fusão dos clusters. A medida de similaridade utilizada baseia-se na soma de quadrados das diferenças entre os pontos de dados e a média do grupo ao qual pertencem. A cada iteração, o algoritmo combina os dois *clusters* cuja fusão resulta no menor aumento na soma total dos quadrados dentro dos grupos. Esse processo é repetido até que todos os elementos incluídos sejam agrupados em um único *cluster*, formando uma estrutura hierárquica representada por um dendrograma. O corte nessa árvore em um determinado nível permite definir um número específico de clusters.

O agrupamento híbrido *k-means* consiste em um método de análise de cluster que combina técnicas hierárquicas e não hierárquicas. Inicialmente, um procedimento de agrupamento hierárquico, como o método de Ward, é aplicado para estruturar os dados e definir uma solução preliminar como grupos. Em seguida, os centróides desses *clusters* são calculados e utilizados como pontos iniciais para o algoritmo *k-means*. O *k-means* então refina a alocação dos elementos nos clusters por meio de

um processo iterativo: cada ponto é atribuído ao centróide mais próximo, os centróides são recalculados, e esse procedimento se repete até que não haja mais mudanças significativas nas alocações. Essa abordagem híbrida melhorou a robustez do agrupamento, aproveitando a estrutura inicial fornecida pelo método hierárquico e refinando os resultados com o k-means (Naghetini e Pinto, 2007).

Na bacia do Rio das Velhas, no estudo de regionalização de vazões nas sub-bacias 40 e 41 elaborado pelo CPRM no ano de 2001, no intuito de reduzir as subjetividades na determinação de RHH, estas as regiões homogêneas foram definidas a partir da análise das informações fisiográficas e climatológicas da bacia, além do uso de informações estatísticas e da utilização da medida de heterogeneidade proposta por Hosking e Wallis em 1993 (CPRM, 2001e). No método de Hosking e Wallis, segundo CPRM (2001e), a medida de heterogeneidade (H) tem como objetivo verificar o grau de heterogeneidade de uma região através da comparação da variabilidade amostral observada e a variabilidade esperada simulada através do método de Monte Carlo.

4.1.2 Métodos *Index-Flood* e *Index-Flow*

O método *index-flood* foi proposto por Dalrymple em 1960 e tem uso consagrado em estudos de regionalização de frequência de qualquer tipo de variável (Naghetini e Pinto, 2007). Tal método consiste na aplicação de um fator de adimensionalização qualquer em pontos distintos de uma região homogênea, com a finalidade de utilizá-los como um conjunto amostral único. Tal condição implica que nos postos situados em uma mesma RHH, uma distribuição de frequência equivalente é aplicável, com distinção apenas por um fator de escala (fator de adimensionalização), com isto, em uma região em que os dados estão disponíveis para um número n de locais, o modelo fornece o quantil $Q_i(p)$ correspondente à probabilidade de não excedência p no local i , como apresentado na Equação (1), em que μ corresponde ao fator de adimensionalização (Chebana e Ouarda, 2009).

$$Q_i(p) = \mu_i q(p), i = 1, \dots, N \text{ e } 0 < p < 1 \quad 1$$

Castellarin *et al.* (2004a) afirmam que o fator de adimensionalização do método corresponde à chave do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica. Ele é a variável dependente da regressão multivariada, que pode estar associada a

características físicas, climática ou geomorfológicas. Os dados adimensionais padronizados formam a base para se estimar a curva regional de quantis adimensionais, esta que pode ser paramétrica, obtida pelo ajuste de uma distribuição de probabilidades aos dados adimensionais regionais, ou não paramétrica. A curva regional não paramétrica é definida a partir das curvas empíricas das estações da mesma região homogênea, grafadas em papel de probabilidade (Naghetini e Pinto, 2007). A curva regional é traçada de modo que ela seja próxima da mediana das curvas empíricas individuais da região homogênea.

O modelo estocástico *index-flow* para CPs foi introduzido por Castellarin *et al.* (2004b), para a modelagem das relações entre as CPLTs e CPAs com os valores de vazões médias, medianas e variâncias de curvas de permanência anuais. Tal abordagem é análoga *index-flood*, sendo que as vazões diárias da curva de permanência são adimensionalizadas pela vazão de referência do período de estudo das CPs.

Segundo Costa e Fernandes (2021), usualmente para locais sem dados a obtenção das CP é frequentemente feita através dos modelos paramétricos (item 4.1.3) os quais estão geralmente associados às séries de durações de longo termo, ou quantis de interesse, entretanto, ainda que uma abordagem semelhante possa ser utilizada para as CPA, podem haver limitações na obtenção das distribuições para as curvas anuais. Tal limitação, ainda segundo Costa e Fernandes (2021), pode ser minimizada pelo modelo proposto por Castellarin *et al.* (2004b) porque permite a ligação direta entre as CPLT e as CPAs.

Segundo Castellarin *et al.* (2007), o modelo *index-flow* tem a capacidade de captar a variabilidade interanual das CPAs, isto sem indicar a correlação serial e a sazonalidade das vazões diárias. Tal condição se dá em decorrência da padronização das vazões diárias, adimensionalizando a vazão observada pela vazão anual, etapa a qual evita a necessidade de realização de análises estocásticas (persistência e sazonalidade).

4.1.3 Métodos que Regionalizam os Parâmetros da Distribuição de Probabilidades

O método de ajuste de parâmetros da distribuição de probabilidades, corresponde a um pressuposto de que uma mesma função de distribuição de probabilidades seja

válida para todas as estações de monitoramento localizadas em uma região homogênea do ponto de vista da variável a ser regionalizada (Naghattini e Pinto, 2007). Complementarmente, Pinto (2006) afirma que ao ajustar distribuições de probabilidade aos dados das estações de uma mesma RHH, presume-se que eles são oriundos de um mesmo fenômeno aleatório.

Como consequência do pressuposto apresentado, os dados de cada estação devem ser ajustados a uma função de distribuição de probabilidades previamente estudada para a região homogênea, a qual pode ser definida ao analisar o comportamento das distribuições empíricas das diferentes estações, adimensionalizadas pelas respectivas médias amostrais locais, em um único papel de probabilidades (Naghattini e Pinto, 2007).

A variabilidade espacial, ao longo da região em estudo, pode ser sintetizada por meio de um estudo de regressão entre os i -ésimos parâmetros que definem a distribuição de probabilidades em cada estação e características físicas locais, possibilitando desse modo a definição dos parâmetros da distribuição de probabilidades ajustada para a região, em qualquer ponto (Naghattini e Pinto, 2007).

Desta forma, a aplicação deste método, segundo Pinto (2006), consiste genericamente nas seguintes etapas:

- Definição das RHH;
- Cálculo dos parâmetros de ajuste;
- Análise da correlação entre as características físicas e climáticas aos parâmetros de ajuste;
- Estimar os quantis nos locais de interesse.

Considerando a curva de permanência como uma representação amostral da função acumulada de uma distribuição de probabilidades, Tucci (2009) introduz a distribuição Log-Normal sugerida por Beard, em 1943, para regionalização das CP. Entretanto, a utilização desta distribuição, ainda segundo Tucci (2009) apresenta limitações, como a existência de correlação serial entre as vazões diárias, implicando que a amostra, supostamente aleatória simples (AAS), não possui, de fato, $365n$ valores

independentes, sendo n o número de anos com disponibilidade de dados, implicando desta forma em uma incompatibilidade com os pressupostos de inferência estatística.

Ainda, vale salientar que no ajuste supracitado a curva é ajustada à amplitude total de valores, podendo apresentar desajustes e anomalias no trecho de interesse, no ramo inferior da CP.

4.1.3.1 Modelos de Distribuições de Probabilidade

Como supracitado, dentre os métodos de regionalização das curvas de permanência, uma abordagem comum é vincular os parâmetros de uma função de distribuição de probabilidade (FDP) às características físicas e climatológicas das bacias hidrográficas através de modelos de regressão (Costa *et al.* 2020). Tal abordagem tem como premissa que os dados das estações situadas em uma mesma região são oriundos de um mesmo fenômeno aleatório, oriundos de populações regidas por uma mesma distribuição teórica, em que apenas os parâmetros distributivos podem apresentar variação.

Segundo Hosking e Wallis (1997), é antiga a utilização da análise regional de frequência em hidrologia, tendo sido utilizada pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos dos Estados Unidos no estudo de vazões máximas anuais por meio da aplicação da distribuição log-Pearson Tipo III, ou mesmo Dalrymple (1960) na construção do método *index-flood*.

Após a definição das RHH, a etapa posterior em um estudo de análise regional de frequência consiste na determinação do modelo de distribuição de frequência, o qual assemelhe os dados simulados o mais próximo possível dos valores observados. Tal determinação, segundo Hosking e Wallis (1997), pode ser feita de forma eficiente a partir da avaliação das estatísticas dos momentos L.

Dentre as distribuições propícias à bons ajustes das curvas de permanência, ainda que Hosking e Wallis (1997) considerem que as distribuições de dois parâmetros produzam estimativas precisas de quantis quando as características distributivas populacionais se assemelhem, os mesmos autores recomendam que, deste que mantida a integridade estatística, recomenda-se o uso de distribuições de mais de dois parâmetros por produzirem estimativas menos tendenciosas dos quantis nas

caudas superior e inferior. Acredita-se que distribuições de três parâmetros confirmam flexibilidade de forma.

COSTA *et al.* (2020) citam que, tendo em vista a modelagem das CP através de uma abordagem estatística, usualmente a aproximação das CPs é obtida através de modelos de três ou mais parâmetros, uma vez que estes são mais flexíveis.

Existem diversas famílias de distribuição, dentre as quais destacam-se àquelas de três parâmetros, como as distribuições Generalizada de Valores Extremos (GEV), Person Tipo III, Logística Generalizada (GLO), Generalizada de Pareto e Log normal.

Dentre os estudos de regionalização das CP, destaca-se o trabalho realizado por Costa *et al.* (2020) onde foram identificados modelos regionais para CPs através da utilização de regressão polinomial evolutiva em cursos d'água intermitentes nos estados de Piauí e Ceará. Neste estudo foram utilizadas as funções acumulativas inversa (CDF) das distribuições Kappa, Wakeby, e Gamma generalizada.

Pinto (2006) utilizou duas abordagens para regionalização das CPs no rio das Velhas, pelo método de Tucci (1991), comumente utilizado no Brasil para regionalização de curvas de permanência de longo termo, e pelo método de Claps e Fiorentino (1997), utilizado para a regionalização de curvas de permanência anuais. O método de Claps e Fiorentino (1997) utilizado no estudo de Pinto (2006) consistiu no ajuste de uma distribuição log-normal de dois parâmetros (posição e escala) as curvas de permanência anuais no rio das Velhas.

Pinheiro e Naghettini (2013) e Costa e Fernandes (2021) utilizaram o modelo log-normal de dois e três parâmetros para regionalizar as CPLT nas bacias do rio Pará e Paraopeba.

4.1.3.2 Estimação de Parâmetros das Distribuições de Probabilidade

A maioria das funções de distribuição de probabilidades requer a definição dos parâmetros de posição e de escala, os quais devem ser obtidos a partir de uma amostra de dados observados (CPRM, 2001b).

Os momentos populacionais consistem, segundo CPRM (2001b), em uma síntese das características das distribuições de probabilidades, tal que o momento de ordem 1, em relação a origem dos X, representa a média populacional, enquanto os momentos centrais de outras ordens podem ser calculados como valores esperados das r-ésimas potências dos desvios da variável em relação ao centro da distribuição, como indicado na equação 2.

$$\mu = E(X) \quad 2$$

Segundo Fernandes (2005), para a hidrologia estatística os momentos centrais de ordem 2, 3 e 4 são de grande importância, uma vez que o momento de ordem 2 representa a variância da distribuição e é uma medida da dispersão desta em relação à média, enquanto os momentos centrais de ordem 3 e 4 define-se, respectivamente, o coeficiente de assimetria e o coeficiente de curtose.

Segundo Naghettini e Pinto (2007), dentre os métodos utilizados para a estimação de parâmetros das distribuições de probabilidades estão o método dos momentos (MOM), método da máxima verossimilhança (MVS), método dos mínimos quadrados (OLS), o método dos momentos mistos, o método da máxima entropia, o método generalizado dos momentos e o método dos momentos-L, dos quais os mais utilizados e estudados são os métodos MOM, MVS e os momentos-L.

O MVS, segundo Naghettini e Pinto (2007) é considerado um dos métodos de estimação mais eficientes por produzir estimadores com menor variância, ainda que demande um maior esforço computacional por envolver soluções numéricas de sistemas de equações, frequentemente, não lineares e implícitas.

De forma contrária, o método dos momentos (MOM) é um método de estimação mais simples, porém com estimadores não tão robustos para as distribuições de três ou mais parâmetros. Entretanto, Naghettini e Pinto (2007) salientam que para amostras pequenas, as quais são comuns em estudos hidrológicos, os estimadores MOM podem apresentar resultados tão bons, ou superiores, aos demais estimadores.

Quanto ao método dos momentos-L, de maneira similar ao dos momentos, a sua aplicação é de menor complexidade e produz estimadores de parâmetros comparáveis, em qualidade, àqueles produzidas pelo método da MVS. Segundo

CPRM (2001b), os momentos-L são derivados dos momentos ponderados por probabilidades (MPP's), o qual pode ser calculado para uma dada variável X, descrita por uma dada FAP, representada por F, através da equação:

$$M_{p,r,s} = E[X^p F^r (1 - F)^s] \quad 3$$

Segundo Fernandes (2005), os MPP's são de difícil interpretação. Por esta razão, Hosking e Wallis (1997) acabaram por definir os momentos-L, os quais são de mais fácil interpretação. Os momentos-L de uma variável aleatória X podem ser descritos como:

$$\lambda_r = \int_0^1 x(p) P_{r-1}(p) dx \quad 4$$

Os primeiros momentos L são então definidos pelos equacionamentos a seguir a partir dos estimadores por posição de plotagem, são dados por:

$$\lambda_1 = \alpha_0 = \beta_0 \text{ (média ou momento-L de posição)} \quad 5$$

$$\lambda_2 = \alpha_0 - 2\alpha_1 = 2\beta_1 - \beta_0 \text{ (momento-L de escala)} \quad 6$$

$$\lambda_3 = \alpha_0 - 6\alpha_1 + 6\alpha_2 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \quad 7$$

$$\lambda_4 = \alpha_0 - 12\alpha_1 + 30\alpha_2 - 20\alpha_3 = 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0 \quad 8$$

Os quocientes dos momentos L (τ) são adimensionais, dados pela razão entre os momentos L de ordem r pelo momento de ordem 2. Dessa forma, τ_3 e τ_4 são, respectivamente, as medidas de assimetria e curtose, independentes da escala da distribuição de probabilidades, enquanto λ_1 e λ_2 representam a média da distribuição e a escala L, respectivamente (Hosking e Wallis, 1997).

Dentre os estudos de regionalização que utilizaram os momentos L para a estimação de parâmetros, destacam-se o estudo de Pinto e Alves (2003) que utilizaram o método de regionalização da curva adimensional de frequência (método *index-flood*) para estimar as vazões máximas, mínimas com durações variadas, e médias de longo

termo, para a bacia do alto São Francisco, e os estudos de regionalização de vazões das sub-bacias 40 e 41 promovidos pelo CPRM em 2001.

Para o estudo de Costa *et al.* (2020) a estimativa de parâmetros foi realizada com um procedimento de 2 etapas, sendo que na primeira as séries temporais foram divididas em componentes nulos e não nulos componentes, de acordo com o teorema da probabilidade total. Para as séries não nulas foi utilizada a inferência paramétrica, baseada nos momentos L.

4.2 Estimativa das séries temporais de vazões diárias em bacias não monitoradas

Como mencionado anteriormente, as curvas de permanência são amplamente empregadas na engenharia de recursos hídricos, como por exemplo, na avaliação de disponibilidade hídrica, na definição de vazões para geração de energia firme, no estabelecimento de vazões de referência para outorga, na avaliação da qualidade da água dos cursos d'água etc. (Vogel e Fennessey, 1995).

Porém, a utilização das CPs para gerar séries temporais de vazões diárias em locais não monitorados das bacias hidrográficas é limitada. Segundo Zhang *et al.* (2015), os principais estudos estão na América do Norte (EUA e Canadá) (Bloeschl e Montanari, 2010; Shu e Ouarda, 2012).

A previsão de séries temporais de vazões diárias inicia-se com a estimativa, por meio de um método de regionalização, da CP no local de interesse da bacia não monitorada. Em seguida, define-se a permanência de qualquer dia baseando-se na observada na(s) bacia(s) vizinha(s) monitorada(s) naquele dia (Shu e Ouarda, 2012). A série temporal de vazões diárias é obtida usando a CP do local de interesse e a permanência estimada para o dia a partir dos pontos monitorados na vizinhança.

No caso de transferência de informações de uma única estação fluviométrica próxima ao ponto de interesse da bacia não monitorada, adota-se que a permanência dos locais/pontos monitorado e não monitorado são iguais.

No caso de transferência de informações de múltiplas estações fluviométricas com dados de vazões diárias, as séries temporais de vazões diárias para pontos não

monitorados de uma bacia hidrográfica são estimadas usando os n pontos mais próximos. Um exemplo da aplicação da obtenção das permanências a partir de diversas estações é apresentado a seguir.

Zangh *et al.* (2015) realizou um estudo onde comparou as estimativas de séries temporais em pontos não monitoradas das bacias hidrográficas por meio de um modelo chuva-vazão e empregando a regionalização de curvas de permanência. Na abordagem com as curvas de permanência foram aplicadas três etapas:

- (1) previsão da CP nos pontos não monitorados das bacias hidrográficas;
- (2) quantificação da permanência da vazão diária para um determinado dia; e
- (3) estimativa das séries temporais de vazões diárias para pontos não monitorados das bacias hidrográficas usando duas ponderações, média aritmética simples (SA) e IDW (Inverse Distance Weighted – Ponderação do Inverso da Distância).

Na primeira etapa foi feita a regionalização das curvas de permanência fazendo o ajuste da distribuição Log-Normal de três parâmetros desenvolvida por Li *et al.* (2010) e estabelecendo uma regressão dos parâmetros da distribuição com as características fisiográficas climáticas das bacias.

Na segunda etapa, a permanência para um determinado dia para o ponto não monitorado da bacia hidrográfica (p_{NM}) foi estimada usando a seguinte equação:

$$p_j = p_{NM}$$

9

Em que p_j é a permanência da vazão diária em um determinado dia para o j -ésimo ponto monitorado da bacia hidrográfica

Na etapa três, a série temporal de vazão diária para a bacia não monitorada foi determinada usando a CP definida para o local sem monitoramento e a permanência estimada a partir dos pontos monitorados. Quando são empregados os dados de n estações fluviométricas para estimar a permanência, foi necessário gerar n conjuntos de séries temporais de vazões diárias. A obtenção de um conjunto de séries temporais

de vazões diárias para o ponto não monitorado foi efetuado usando a seguinte equação:

$$Q_{NM} = \frac{\sum_{j=1}^n w_j Q_j}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad 10$$

sendo Q_{NM} é a vazão diária em altura equivalente (mm/d) para uma bacia hidrográfica não monitorada para um determinado dia, j é o j -ésimo ponto monitorado, n é o número total de estações fluviométricas com dados, w_j é o peso do doador j e Q_j é a vazão diária (mm/dia) do ponto monitorado j para um determinado dia.

Zangh *et al.* (2015) aplicou duas ponderações diferentes, SA e IDW. A ponderação SA utilizou o mesmo peso para os pontos monitorados, ou seja, $w_j = 1$. Isto significa que a vazão diária para um local não monitorado da bacia hidrográfica é calculada utilizando a média das vazões diárias dos pontos monitorados.

A ponderação IDW estima Q_{NM} calculando a média utilizando pesos diferentes que são determinados pelas distâncias entre os pontos monitorados e não monitorados. Quanto mais próximos estiverem os pontos, maior será o peso atribuído à interpolação do IDW. Este esquema estimou w_j usando a seguinte equação:

$$w_j = \frac{1/d_j}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{d_j}} \quad 11$$

Em que d_j é a medida de distância de similaridade entre os locais não monitorados e monitorado j . A distância d_j é frequentemente expressa como uma medida de distância euclidiana. É calculada usando esta equação:

$$d_j = \sqrt{(X_j - X)^2 + (Y_j - Y)^2} \quad 12$$

X_j e Y_j são a latitude e longitude do local monitorado j , X e Y são a latitude e longitude do local não monitorado.

5 METODOLOGIA / MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Obtenção e Análise de Consistência de Dados

5.1.1 Aquisição de Dados e Caracterização da Área de Estudo

Como supracitado, aspectos físicos como pedologia, geologia e os usos do solo, assim como as características hidrogeológicas e geoquímicas, são alguns dos elementos a serem consideradas na avaliação dos recursos hídricos de uma região, uma vez que os mesmos podem ser relacionados a qualidade e a disponibilidade hídrica, conforme item 3.

Neste contexto, foram utilizados os dados do Projeto RADAM Brasil, Serviço Geológico do Brasil (CPRM), do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomas), ANA, IBGE e Embrapa para caracterização da área. Os dados, extraídos nos formatos vetoriais e matriciais, foram processados e manipulados no *software*, QGIS versão 3.16.12, e no mesmo ambiente SIG foram elaborados mapas temáticos representativos.

5.1.2 Estações Fluviométricas

A Agência Nacional de Águas (ANA) é a entidade responsável pela coordenação da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), um sistema que hoje é constituído por aproximadamente 4.641 pontos de monitoramento distribuídos pelo país, dos quais cerca de 1.874 são referentes as estações de monitoramento fluviométrico, englobando variáveis tais como os níveis dos rios, vazões, qualidade da água e transporte de sedimentos, e outros 2.767 postos que monitoram principalmente as chuvas (ANA, 2021). Ainda, vale destacar que a ANA é a responsável pelo planejamento, normatização de procedimentos e equipamentos, fiscalização, organização dos dados hidrometeorológicos e sua publicação, enquanto a RHN é operada por entidades parceiras ou contratadas. Dentre as instituições parceiras responsáveis pela operação da RHN destacam-se o Serviço Geológico do Brasil (CPRM), a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI/SC), o Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE/SP), o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM/MG), e o Instituto das Águas do Paraná (AGUASPARANÁ).

As medições diárias de cotas nas estações fluviométricas ocorrem às 7:00 e 17:00 horas, sendo disponibilizado o valor médio diário para consulta no Portal Hidroweb, site mantido pela ANA para publicação dos dados. Na bacia do Rio das Velhas o primeiro registro de monitoramento é datado no ano de 1926, no município de Rio Acima. Nesses quase 100 anos de monitoramento, já foram utilizadas cerca de 73 estações fluviométricas.

A qualidade dos dados hidrológicos, é essencial para os estudos de regionalização. Desta forma, uma etapa imprescindível ao desenvolvimento de tais estudos é a realização da análise de consistência de tais medições, uma vez que se os dados não possuírem qualidade ou se não identificados e sanados os seus erros, a própria regionalização será tendenciosa com resultados inadequados.

O USGS (2002) propõe uma avaliação geral dos dados de vazão através de uma classificação quanto à presença de falhas, sendo atribuída a classe “excelente” quando cerca de 95 % da série está completa em um dado período, “bom” quando existem falhas entre 5 % e 10 %, “justo” quando as falhas não superam 15 %; e “pobre” quando as falhas superam mais do que 15 % dos dados. Sendo assim, essa classificação será atribuída neste trabalho.

Ainda, vale salientar que na série de dados podem ainda existir erros relacionados à qualidade dos mesmos, associados a erros de leitura, transcrição ou processamento. Desse modo, Naghettini e Pinto (2007) salientam sobre possíveis alterações na forma de obtenção dos dados, as quais podem implicar em problemas de validação dos mesmos, como: a alteração da localização do ponto de coleta, regime e equipamento de medição, uma vez que a alteração do regime hidrológico pode ser causada pela implantação de um reservatório de acumulação a montante de um posto fluviométrico e a utilização de equipamentos não aferidos, defeituosos ou incompatíveis com a sistemática padrão de coleta de dados primários.

Sendo assim, dentre as técnicas mais utilizadas para a identificação de tais erros, será utilizada neste trabalho a comparação de continuidade entre as vazões totais mensais das estações situadas na calha principal do Rio das Velhas. Ainda, a fim de compreender os resultados da análise dos dados de vazão, foram avaliados três fatores: a tendência nos dados de precipitação; as mudanças ocorridas no uso e

ocupação das terras e a evolução das demandas pelo uso dos recursos hídricos na bacia.

5.2 Regionalização de vazões

5.2.1 Identificação e Delimitação de Regiões Homogêneas

Os estudos de regionalização estão, quase sempre, atrelados à determinação de regiões homogêneas, que são regiões de comportamento hídrico semelhante, em que a homogeneidade é entendida como a semelhança na resposta das funções regionais obtidas (Tucci, 2009).

Para a determinação de regiões homogêneas na bacia do Rio das Velhas, foram analisadas inicialmente as informações fisiográficas, climatológicas e a distribuição dos valores de precipitação e evapotranspiração média anual na bacia. Posteriormente, foi utilizada a técnica de análise multivariada, análise de *Cluster*, na qual consiste na aglomeração dos elementos de análise em grupos de acordo com algum critério, tal como a distância Euclidiana generalizada¹. Os algoritmos de classificação podem ser separados em hierárquicos e de partição, os quais correspondem respectivamente as metodologias de aglomeração sequencial (ou divisão) de indivíduos/agrupamentos em grupos cada vez maiores (ou menores) enquanto os de partição são aqueles em que algum critério, tal como a distância ou medida de dissimilaridade, são utilizadas a fim de se obter um “agrupamento natural” dos dados por meio de uma divisão representante de todo o cluster, geralmente considerando o protótipo, como o centroide do cluster, como os valores de permanência.

A técnica utilizada neste trabalho em específico foi o método de Ward (Ward, 1963), a qual consiste em um agrupamento hierárquico no qual a medida de similaridade usada para formar os agrupamentos é calculada como a soma de quadrados entre os dois agrupamentos feita sobre todas as variáveis. As quais neste estudo correspondem as permanências de 0 a 99, cujos incrementos foram 0,1 % entre 0 e 7 % da permanência, entre 1 % e 3 % para permanências entre 7 e 99 %.

¹ Distância geométrica tomada em um determinado número de dimensões (x) no espaço.

Vale pontuar que os trechos superiores das curva de permanência foram melhor detalhados uma vez que estão suscetíveis a erros de leitura de cotas e possuem, em geral, um menor número de dados para avaliação.

Posteriormente a obtenção e avaliação do dendrograma, foram novamente estudadas as características físicas da bacia, as quais poderiam ser explicativas da geração de vazão e do agrupamento obtido, e com base em tais características foi realizada uma proposição de regiões hidrológicas homogêneas na bacia.

5.2.2 Regionalização pela Razão entre as áreas de drenagem

O primeiro método é razão entre as áreas de drenagem, um método comumente utilizado na estimativa de vazões regionais. Este método, intitulado por ELETROBRÁS (1985) como “Estimativa de Séries de Vazões a partir de Dados de Outros Postos” consiste na utilização de dados de postos fluviométricos situados em um mesmo rio, ou no caso da inexistência de estações no mesmo curso hídrico a utilização de dados de postos de outras bacias de uma mesma região considerada homogênea.

Desta forma, para um dado ponto em que se deseja conhecer a vazão, obtém-se um ponto, situado a montante, em que o valor de vazão é conhecido, e a partir daí, com base no método de razão de área de drenagem é aplicado no cálculo da vazão a partir da seguinte formulação:

$$Q_y = Q_x \frac{A_y}{A_x} \quad 13$$

Sendo que:

Q_y é a vazão a ser obtida no ponto de estudo;

Q_x é a vazão observada na estação de referência situada à montante;

A_y é a área de drenagem do ponto de estudo;

A_x é a área de drenagem no ponto de referência;

Nos casos de existência de duas estações de referência, no caso uma de montante e outra de jusante, Eletrobrás (1985) propõem a seguinte equação:

$$Q_y = Q_{x1} + \frac{(A_y - A_{x1})}{(A_{x2} - A_{x1})} (Q_{x2} - Q_{x1}) \quad 14$$

Sendo que:

Q_y é a vazão a ser obtida no ponto de estudo;

Q_{x1} é a vazão observada na estação de referência situada à montante;

A_y é a área de drenagem do ponto de estudo;

A_{x1} é a área de drenagem no ponto de referência;

Q_{x2} é a vazão observada na estação de referência situada à jusante;

A_{x2} é a área de drenagem no ponto de referência à jusante;

Nesta formulação a hipótese é de que a vazão no ponto de interesse será diretamente proporcional às áreas de drenagem do ponto de interesse e da estação de referência, se a relação entre áreas for próxima a 1, a robustez da equação será elevada, além de haver alta probabilidade de os pontos estarem dentro de uma mesma RHH.

Foram realizadas duas metodologias para análises preliminares de regionalização e preenchimento de falhas por proporção de áreas. Na primeira, foram selecionadas as estações fluviométricas localizadas no rio principal. Com isso, foram estimadas as vazões de jusante com a proporção de áreas.

Para a segunda metodologia foram incorporados os dados de vazão diária dos afluentes que estão localizados entre duas estações fluviométricas do rio principal, que possuam medições. A vazão estimada foi realizada pela ponderação entre as áreas de bacia das estações a montante e da estação a jusante.

5.2.3 Regionalização das Curvas de Permanência

O segundo método de transferência de informações é o de regionalização das CPs, referenciado como regionalização da Curva de Permanência de Longo Termo (CPLT), consiste em definir regiões homogêneas (RH) a partir das CPs adimensionalizadas pelas médias das vazões diárias do período utilizado para avaliação, e posteriormente, são obtidas curvas de permanências adimensionais médias para cada uma das RHH. Em seguida é efetuada a regressão das médias das vazões diárias com as características da bacia (CPRM 2001b, Castellarin *et al.* 2004a).

Com a Curva de Permanência adimensional média obtida, conhecidas as permanências (D_i) diárias, as características e a equação de regressão para obtenção das vazões médias, são calculadas as vazões diárias em no ponto de interesse. Vale salientar que a vazão média como medida de adimensionalização das CPs foi escolhido em decorrência dos bons resultados obtidos em trabalhos anteriores, como em Pinheiro e Naghettini (2013).

O terceiro método, identificado como regionalização da Curva de Permanência Anual (CPA), é semelhante ao primeiro, entretanto diferentemente do primeiro método onde é construída uma Curva de Permanência de Longo Termo (CPLT), considerando todo o período de dados disponível, e a vazão média, responsável pela adimensionalização dos dados, também se referem ao período completo, para o segundo método as etapas são aplicadas para cada ano hidrológico do período de dados.

O quarto método por sua vez consiste em ajustar uma distribuição de probabilidades as CPs de uma RH e, em seguida, os parâmetros das distribuições ajustadas as CPs são regionalizados por meio de uma regressão com as características da bacia (Castellarin *et al.*, 2004a, 2004b e 2007, Costa *et al.* 2012).

Na definição das equações de regressão para estimativa das vazões médias, também chamadas de fatores de adimensionalização, foram empregadas as variáveis explicativas associadas as características geomorfológicas e climáticas das bacias que foram testadas nas regressões são: área de drenagem, a precipitação média anual, o índice de escoamento de base, a declividade, evapotranspiração e a precipitação efetiva.

Foram testadas equações do tipo linear e não linear potencial como apresentados a seguir:

$$Y = \alpha + \beta X + e \quad 15$$

$$Y = \beta_0 X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} e \quad 16$$

Onde X_{is} são as variáveis explicativas, β_{is} são parâmetros e e são os erros ou resíduos da regressão.

Inicialmente foi calculada a matriz de correlação com a finalidade de se avaliar as correlações lineares de Pearson entre as variáveis. Também foram realizados experimentos adotando todas as possibilidades possíveis de permutação entre as variáveis independentes, mantendo-se sempre a área e a precipitação, com o objetivo de se obter a melhor equação de regressão, ou seja, aquela que apresenta o melhor coeficiente de determinação, associado ao menor erro padrão e menor número de

variáveis. As etapas empregadas na definição da regressão entre a vazão média e as características fisiográficas foi efetuada seguindo as recomendações mencionadas por Naghettini e Pinto (2007).

Segundo Naghettini e Pinto (2007), a fim de evitar a ocorrência de falsos ajustes em virtude de oscilações das variáveis independentes em amostras pequenas, o número de observações disponíveis para a análise de regressão deve três ou quatro vezes maior que o número de coeficientes da equação regressão que serão estimados. Sendo assim, para as análises de regressão as equações para estimativa das vazões médias foram obtidas considerando todas as estações da BH do Rio das Velhas.

Vale salientar que a aplicação dos métodos supracitados se justifica em virtude dos bons resultados obtidos em trabalhos pretéritos (Pinheiro e Naghettini, 2010; Smakhtin *et al.*, 1997; Castellarin *et al.*, 2004b; Costa *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2015), assim como em virtude da formulação matemática, a qual dispensa a suposição de hipóteses relativas à sazonalidade e à correlação serial das vazões médias diárias.

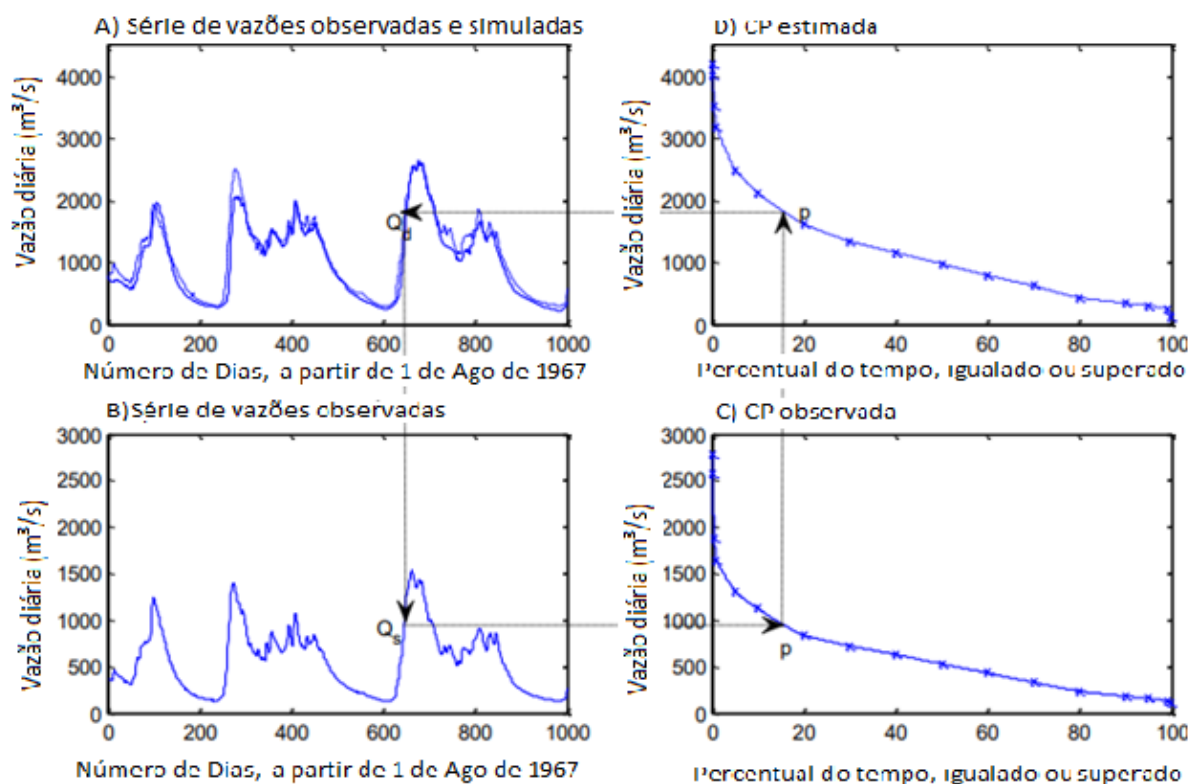
5.2.3.1 Regionalização das Curvas de Permanência de Longo Termo

A construção de curvas de permanência de longo termo consiste em utilizar todos os dados do período de observação, neste estudo considera-se o período completo os anos hidrológicos de Out/1994 a Set/2014. Como supracitado, o processo de regionalização neste método consistiu na adimensionalização das Curvas de Permanência de Longo Termo (CPLT) pelo valor da vazão média em cada estação. Em seguida foi definida a CPLT adimensionalizada representativa de cada RHH, ou seja, a curva adimensionalizada média, em acordo à metodologia gráfica proposta por Smakhtin *et al.* (1997). Após é efetuada a regressão das médias das vazões diárias de longo termo com as características da bacia.

A aplicação do método para estimativa da vazão diária e a avaliação do método consiste em, conhecendo a permanência diária em cada estação, obter a vazão adimensional associada na CPLT da RHH de referência da estação de estudo, e ela ser multiplicada pela vazão média da estação, a qual foi obtida por equação de regressão frente às variáveis físicas e climáticas da estação.

Castellarin *et al* (2013), apresentam o fluxograma da Figura 4 que ilustra a estimativa das vazões regionalizadas pelas curvas de permanência, para isto é demandado o valor de descarga observada, Q_s , no ponto de origem na mesma data na qual se deseja estimar a vazão na seção de destino, Q_d (Figura 2-A e B). Então, com base na CPLT do ponto de origem, define-se a permanência diária (p) de Q_s na data de interesse (Figura 2-C). Uma vez que se supõe que os locais de origem e de destino possuem a mesma permanência diária (p), estima-se a vazão na seção de destino, Q_d , na curva de permanência estimada pela regionalização (Figura 2-D). A Figura 2-A ilustra os fluviogramas observado e estimado na seção de destino.

Figura 4 – Método de interpolação espacial



Fonte: Adaptado de Castellarin *et al.* (2013).

A Figura 2 ilustra a interpolação espacial para um único local de origem. Em situações em que há várias estações fluviométricas de origem, podem ser empregadas as áreas de drenagem como ponderador para a estimativa da permanência diária (p) a ser utilizada na curva de permanência estimada pela regionalização para estimativa da vazão na seção de destino, Q_d (Figura 2D). Assim, com base na CPLT de cada ponto de origem j , definem-se as permanências diárias (p_j) das Q_{sj} na data de interesse

(Figura 2-C). O cálculo da estimativa combinada da permanência diária (p) no local não medido utilizando n locais de origem podem ser efetuado usando a equação a seguir, sendo A_j a área de drenagem na localidade:

$$p = \frac{\sum_{j=1}^n A_j p_j}{\sum_{j=1}^n A_j} \quad 17$$

5.2.3.2 Regionalização das Curvas de Permanência Anuais

A regionalização das vazões diárias a partir das Curvas de Permanência Anual (CPA) segue metodologia próxima àquela apresentada no item 5.2.3.1 para as CPLT. Inicialmente foram construídas as curvas de permanência para cada ano hidrológico em cada estação de estudo. Sequencialmente o processo de regionalização consistiu na adimensionalização das CPAs pelo valor da Vazão Média Anual em cada estação. Seguindo a mesma premissa de homogeneidade das CPs em uma mesma região homogênea, e a metodologia gráfica definida por Smakhtin *et al.* (1997), foram construídas as CPAs para cada RHH.

Para cada ano hidrológico também é estabelecida a regressão entre a vazão média anual e as características da bacia como descrito no item anterior.

Na avaliação do método é necessário o cálculo das séries de vazões diárias estimadas a partir da regionalização. Considerado um ano específico e sabendo a permanência diária em cada estação, foi obtida a vazão adimensional associada na CPA da RHH de referência da estação de estudo, e ela foi multiplicada pela Vazão Média Anual da estação calculada pela equação de regressão do ano.

5.2.3.3 Regionalização das Curvas de Permanência – Ajuste Modelo de Distribuição

Este método parte do princípio que as curvas de permanência podem ser representadas por modelos de distribuição de probabilidades, ou seja, a curva de permanência é o complemento da função de probabilidades das vazões observadas. Sendo assim, as séries de dados de vazões das estações fluviométricas, situadas na região de Estudo, são oriundas de populações regidas pela mesma distribuição teórica, com os parâmetros da distribuição variando no espaço.

Segundo Castellarin *et al.* (2004), a aplicação deste método é baseada em três etapas:

- 1) Selecionar a distribuição de probabilidades de melhor ajuste aos dados de vazões da região em estudo;
- 2) Estimar os parâmetros da distribuição para as séries de vazões da região em estudo, empregando, por exemplo, o método dos momentos, o método de máxima verossimilhança ou o método dos momentos L, dentre outros; e
- 3) Elaborar o modelo regional, por meio da regressão múltipla entre os parâmetros da distribuição e as características geomorfológicas e climáticas das áreas de drenagem das estações fluviométricas utilizadas no estudo.

Sendo assim, considerando a bacia do Rio das Velhas como uma única RHH, as curvas de permanência de cada estação de monitoramento foram ajustadas à diferentes de distribuições de probabilidade, a fim de selecionar a de melhor aderência frente aos dados observados. Neste estudo foram testados o ajuste das séries históricas às seguintes distribuições Wakeby, de 5 parâmetros, Logística Generalizada – GLO, Generalizada de Valores Extremos – GEV e Normal Generalizada – GNO, as quais contam com 3 parâmetros. Para fins comparativos, quanto à aderência, foi também ajustada da distribuição Gama, de dois parâmetros.

Os ajustes entre as curvas de permanência e as distribuições candidatas foram realizados utilizando os momentos-L. Tais ajustes foram efetuados empregando as rotinas propostas por Hosking (1996) em ambiente R, por meio da biblioteca Lmom.

Os ajustes foram plotados em um mesmo gráfico por estação, e foram verificadas as métricas de desempenho dos ajustes. Além das curvas de todas as distribuições candidatas aceitáveis e métricas de desempenho, também foram plotados os pontos médios regionais da assimetria-L e da curtose-L (τ_3 e τ_4), e verificado graficamente a melhor distribuição ajustada.

Vale enfatizar que, em acordo com Hosking e Wallis (1993) *apud* Naghettini e Pinto (2007) caso o ponto médio regional esteja acima da curva da distribuição Logística Generalizada-GLO, nenhuma distribuição, seja de dois ou três parâmetros, deverá ser aceita, devendo então ser ajustada uma distribuição mais genérica, como a Wakeby de cinco parâmetros ou a Kappa de quatro parâmetros.

Definida a distribuição de melhor ajuste as curvas de permanência, os parâmetros da distribuição escolhida foram correlacionados as características físicas e climáticas da bacia, e posteriormente foram testadas equações de regressão para estimativa da variável predita (parâmetros da distribuição de probabilidade) e características da bacia (preditoras).

Segundo Naghettini e Pinto (2007) a avaliação de uma equação de regressão múltipla consiste em: (a) verificar se o erro padrão da estimativa é inferior ao desvio padrão da variável independente; (b) a fim de garantir que uma parcela maior da variância seja explicada pelo modelo, o valor do coeficiente de determinação deve ser próximo de 1; (c) aplicar os testes do F total e F parcial para avaliar a significância do modelo; (d) aplicar o teste t aos coeficientes de regressão para avaliar a significância de cada preditor empregado na regressão; (e) avaliar a hipótese de homoscedasticidade a partir dos resíduos da regressão; e (f) comparar os valores previstos com os dados observados.

Na avaliação do método é necessário o cálculo das séries de vazões diárias estimadas a partir da regionalização. Para tanto, aplica-se as equações de regressão para estimativa dos parâmetros da distribuição escolhida e calcula-se a curva de permanência no local desejado. Posteriormente, conhecidas as permanências diárias nos postos de estudo são geradas as séries de vazões.

5.2.4 Avaliação de Desempenho

Para avaliação de desempenho dos métodos de regionalização, foram utilizadas como métricas de desempenho das estimativas o coeficiente de determinação (R^2), raiz do erro quadrático médio (RMSE), coeficiente de Kling Gupta (KGE) e a média do erro percentual absoluto (EPMA).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad 18$$

Em que n é o número de elementos da série, x_i é vazão observada; $\bar{x}$ é a média das vazões observadas e $\bar{\hat{x}}$ corresponde à média das vazões estimadas.

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2 \right)^{0,5} \quad 19$$

Sendo n o número de elementos da série, x_i é a vazão observada e $\hat{x}_i$ é a vazão estimada.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1 \right)^2} \quad 20$$

Sendo r o coeficiente de correlação linear; σ_{sim} , σ_{obs} são os desvios padrão simulado e observado respectivamente, μ_{sim} é a média simulada e μ_{obs} é a média simulada .

$$EPMA = \frac{1}{n} * \sum_{t=1}^n \left| \frac{Obs - Est}{Obs} \right| \quad 21$$

Em que n é o número de elemento da série, Obs é a vazão observada e Est a vazão estimada

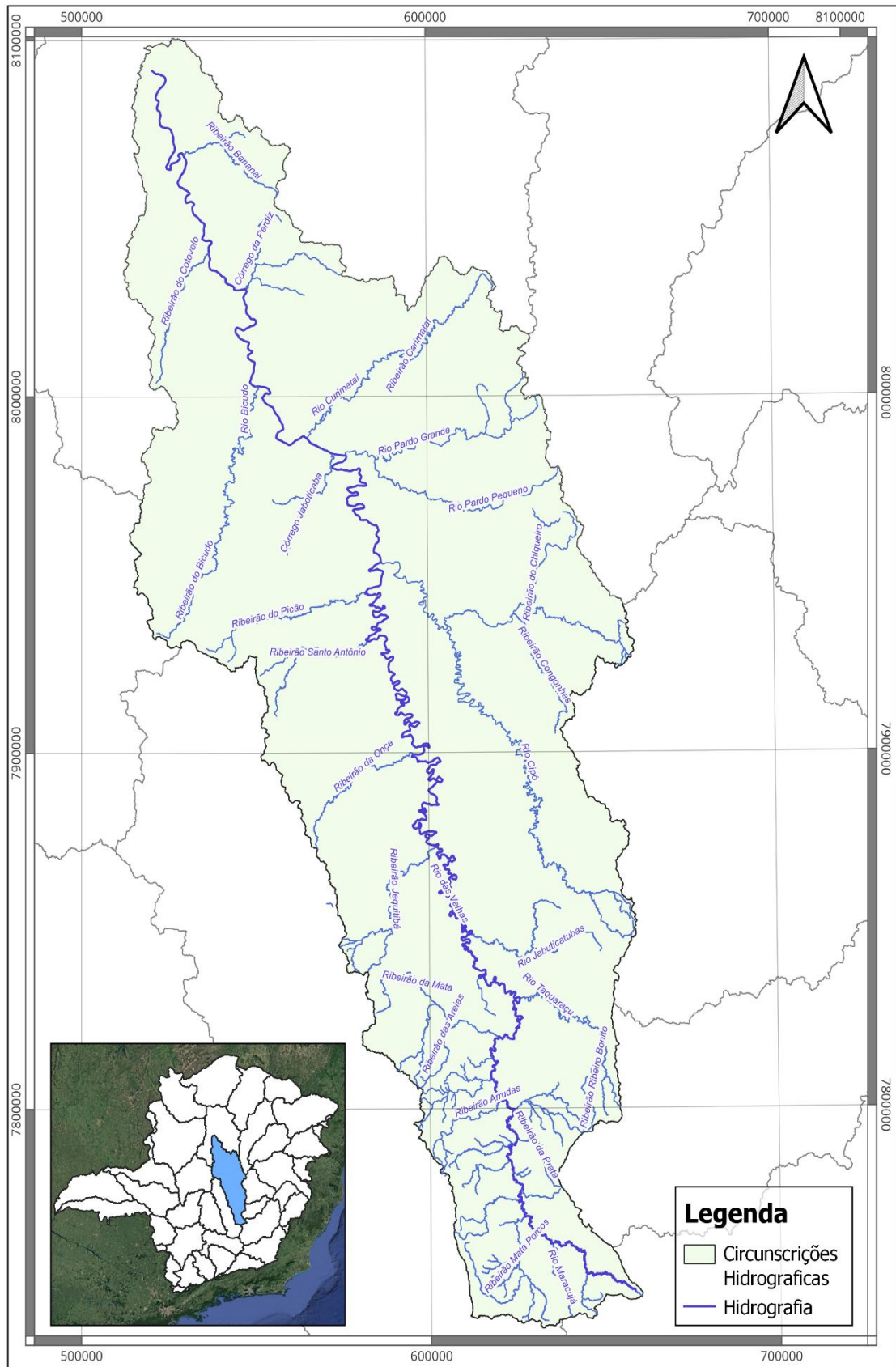
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Caracterização Física da bacia do Rio das Velhas

6.1.1 Hidrografia

A principal nascente do rio das Velhas é na cachoeira das Andorinhas, situada no município de Ouro Preto, em uma altitude de, aproximadamente, 1.500 metros. Toda a bacia compreende uma área de 27.850 km², nos quais o rio principal percorre uma distância de 806,84 km, desaguando no rio São Francisco, na altura de Várzea da Palma (ECOPLAN, 2015). Dentre os principais afluentes e cursos d'água inseridos nesta bacia hidrográfica, destacam-se o rio Bicudo, ribeirão Jequitibá, ribeirão da Mata, ribeirão Arrudas, ribeirão do Onça e rio Itabirito (pela margem esquerda); e rio Curimataí, rio Pardo, rio Parauna/Cipó, rio Taquaruçu e ribeirão Caeté/Sabará (pela margem direita).

Figura 5 – Principais Cursos d'água – Bacia do Rio das Velhas

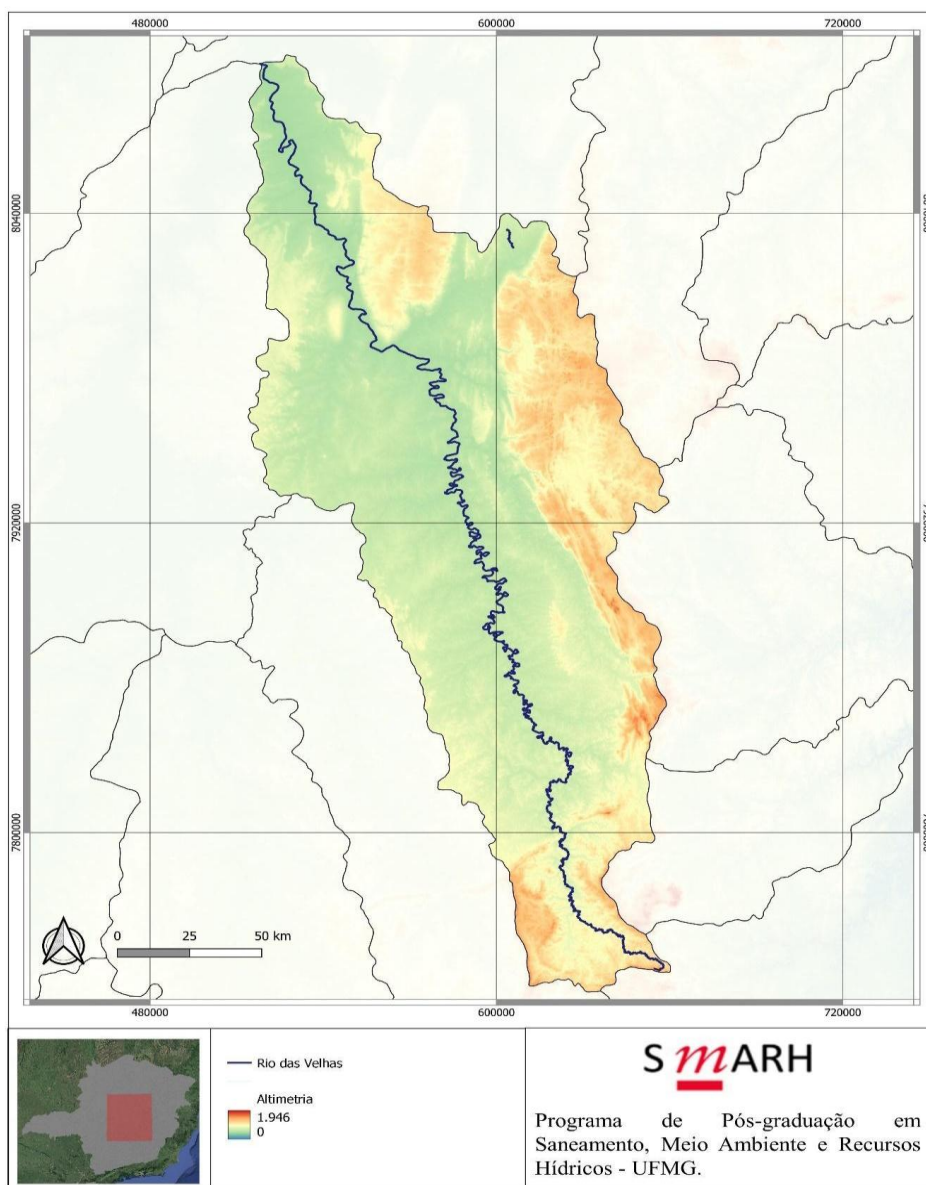


6.1.2 Altimetria e Declividade

Para a realização da representação altimétrica da bacia foi necessária utilização de Modelos Digitais de Elevação (MDE). Eles representam as altitudes da superfície topográfica agregada aos elementos geográficos existentes sobre ela, como cobertura vegetal e edificações (IBGE, 2019). Os MDE utilizados foram obtidos pela Missão Topográfica Radar Shuttle, sendo denominados de SRTM em resolução espacial de 90 metros, foram extraídos da plataforma Brasil em Relevo, mantida pela Embrapa. O processamento do modelo foi realizado com *software* QGIS versão 2.18.22. Vale salientar que ainda que existam bases de MDE que sejam de melhor resolução espacial e sejam de acesso livre, a base STRM foi escolhida vista a elevada área de drenagem e limitações computacionais.

As cotas altimétricas observadas na bacia estão compreendidas entre 438 e 1600 metros, sendo estas áreas correspondentes às planícies de inundação dos corpos d'água. As maiores cotas estão na região próxima à nascente do rio principal e na porção nordeste da bacia, nas áreas de drenagem de Diamantina, Gouvêa, Presidente Kubitschek, Datas, Monjolos, Conceição do Mato Dentro, Congonhas do Norte e Santana de Pirapama. Elevadas altitudes estão presentes na região norte da bacia, em Lassance e Buenópolis Figura 6.

Figura 6 – Altimetria – Bacia do Rio das Velhas



Nesse trabalho, adotou-se a classificação de declividades utilizada pela Embrapa, a qual é apresentada na Tabela 2. O grau de inclinação do terreno está ligado à susceptibilidade da região aos processos erosivos, deslizamentos e ao aumento do fluxo de escoamento superficial de águas pluviais. Tucci (2002) admite que locais mais íngremes apresentam maiores velocidades de escoamento e grandes aclives no trecho superior das curvas de permanência, por serem áreas com menor cobertura vegetal e maior conversão de chuva em escoamento.

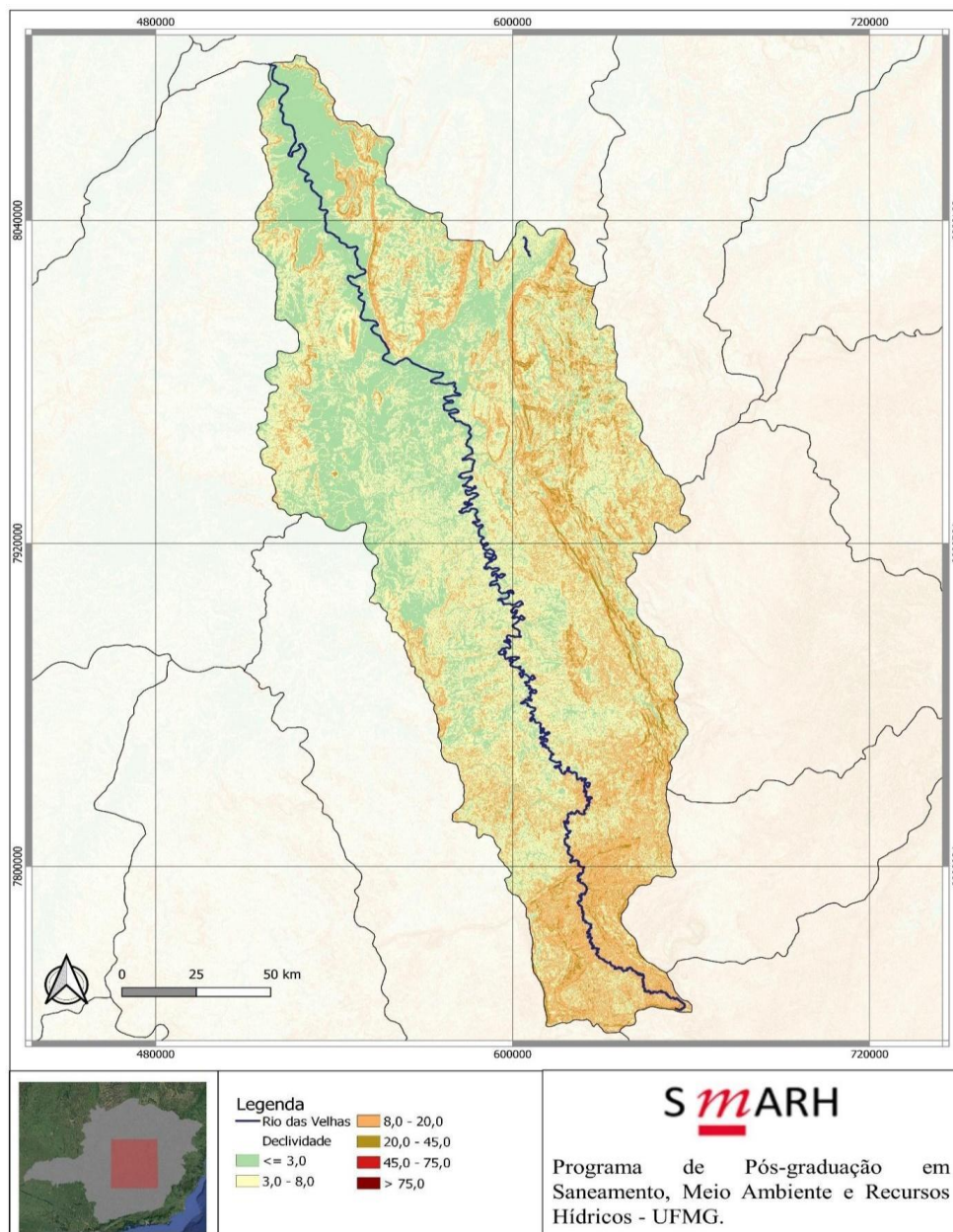
Tabela 2 – Classes de declividade por tipo de relevo

Declividade (%)	Tipo de Relevo
0 a 3	Plano
3 a 8	Suave ondulado
8 a 20	Ondulado
20 a 45	Fortemente ondulado
45 a 75	Montanhoso
Acima de 75	Escarpado

Fonte: EMBRAPA, 2019

Observa-se na Figura 7 a estrita correlação entre altimetria e declividade. As maiores declividades (onduladas e fortemente onduladas) ocorrem nas regiões da cabeceira do Rio das Velhas e nas regiões noroeste e norte.

Figura 7 – Declividade – Bacia do Rio das Velhas



6.1.3 Hidrogeologia

Pinto *et al.* (2001) divide a Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas em quatro sistemas aquíferos principais, granulares, cársticos, fissurado-cársticos e fissurados, os quais se diferenciam pela forma como a água percola no interior do solo.

As unidades cársticas são caracterizadas pelos maciços rochosos constituídos por rochas sedimentares químicas cuja porosidade evoluiu por dissolução em virtude da circulação da água em vazios pré-existentes, altamente anisotrópicos e heterogêneos (CPRM, 2018). Observa-se, que são predominantes os terrenos cársticos nas regiões de Curvelo, Santo Hipólito, Lagoa Santa e Sete Lagoas.

Os aquíferos granulares ou porosos, são formados basicamente por depósitos sedimentares ou cobertura detríticas, capazes de armazenar e transmitir água por meio dos vazios entre os grãos originados durante seu processo de formação (ANA, 2018). Os aquíferos granulares podem ser subdivididos em sistemas sedimentos aluviais e colúvio-eluvionares. Os sedimentos aluviais geralmente apresentam níveis potenciométricos rasos, raramente excedendo 20 metros, e produtividade limitada devido à heterogeneidade e pequena espessura dos sedimentos (ECOPLAN, 2015). Os aquíferos granulares estão presentes, principalmente, nas áreas das margens dos cursos d'água do baixo curso do Rio das Velhas, condição a qual pode ser associada pela conformidade caudalosa da bacia.

A unidade Fissurado-cárstico é formada por um conjunto de rochas sedimentares que encerram rochas carbonáticas alternadas com camadas de rochas siliciclásticas, onde a água flui em um sistema de condutos interconectados gerados por dissolução (porosidade cárstica) e planos de descontinuidade típicos dos sistemas de porosidade fissural. Há aspectos hidráulicos contrastantes, desde aquíferos cársticos a fissurados, ou a junção de ambos. Tal unidade aquífera é predominante na bacia, com presença majoritária na região central/ médio curso do Rio das Velhas.

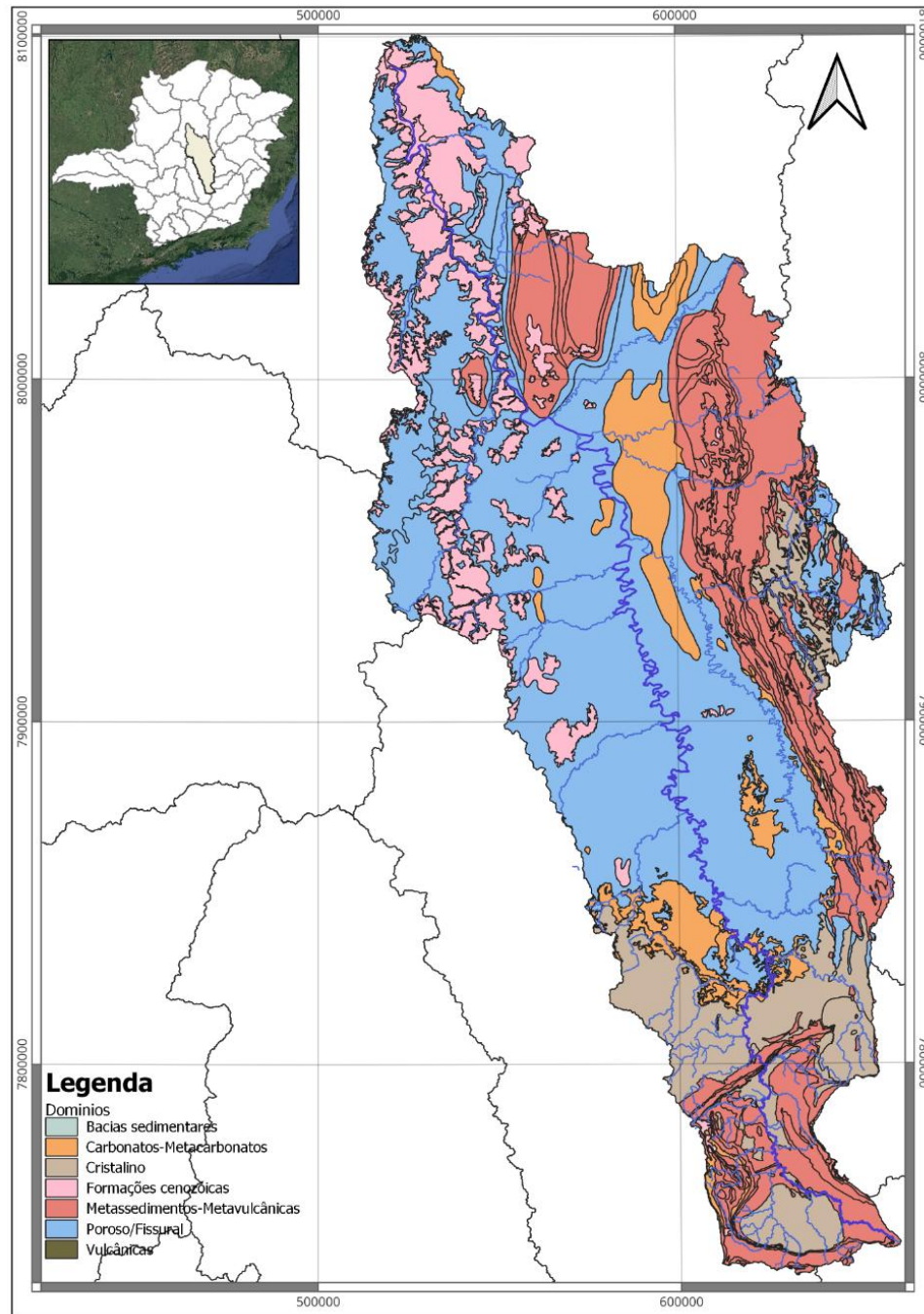
Quanto às produtividades, segundo ANA (2018), pode-se observar que nos sistemas cársticos, os quais estão associadas as litologias Formação Sete Lagoas, a qual corresponde à formação basal do Grupo Bambuí, e a Formação Salitre do Grupo Uma, predominam vazões entre específicas entre 0,4 e 1,0 m³/h/m.

As unidades granulares, ainda segundo ANA (2018), apresentam valores bem de produtividade superiores às unidades cársticas, podendo atingir vazões específicas da ordem de 4,0 m³/h/m. Tal condição é atrelada à presença de arenitos dos grupos Urucuia e Areado. Nos sistemas fissuro-cársticos (Fraturados), associados às formações Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade, do Grupo Bambuí, as produtividades verificadas são similares às aquelas do meio cárstico, de baixas a muitas baixas, entre 0,4 e 1,0 m³/h/m.

Quanto as relações entre a disponibilidade hídrica superficial e a hidrogeologia, segundo CPRM (2008), vale enfatizar que, em meios cársticos, os rios alógenos, que nascem fora da região carste, desenvolvem sistemas de drenagem subterrânea nos carstes, com sumidouros, cavernas e condutos, com desenvolvimento de aquíferos suspensos, ou “rios subterrâneos” em meios cársticos em decorrência da não uniformidade da permeabilidade e a presença de aquicludes locais intercalados. Podendo tais aquíferos suspensos ser somente pequenos “bolsões” de água ou formar correntes de água perenes ou sazonais.

Sendo assim, cabe evidenciar as relações entre a drenagem superficial e as águas subterrâneas, que nos carstes, as águas superficiais se infiltram no subsolo e podem retornar à mesma bacia hidrográfica, mais a jusante, ou desviar-se para outra bacia hidrográfica ou outros aquíferos.

Figura 8 – Unidades Hidrogeológicas – Bacia do Rio das Velhas



6.1.4 Uso e Ocupação do Solo e Coberturas Vegetais

Para elaborar o mapa de uso e cobertura do solo na bacia do Rio das Velhas, foram utilizados os arquivos produzidos e disponibilizados pelo Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomas), Coleção 6.0. O MapBiomas é uma iniciativa que envolve uma rede colaborativa com especialistas nos biomas, usos da terra, sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas e ciência

da computação, que utiliza processamento em nuvem e classificadores automatizados desenvolvidos e operados a partir da plataforma *Google Earth Engine* para gerar uma série histórica de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil (MAPBIOMAS, 2021). Esse projeto foi lançado em julho de 2015, com o objetivo de contribuir para o entendimento da dinâmica do uso e ocupação do solo no Brasil.

Os mapas de uso e cobertura do solo produzidos nesse projeto são baseados no *Landsat Data Archive (LDA)*, disponível na plataforma do *Google Earth Engine*, abrangendo os anos de 1985 até os dias atuais (MAPBIOMAS, 2021). Visando ampliar a consistência espacial dos dados, são aplicados filtros espaciais, eliminando pixels isolados ou de borda, e regras temporais e de vizinhança que pode levar à alteração da classificação do pixel, de acordo com a característica dos pixels vizinhos. A descrição das classes de uso e ocupação/cobertura do solo adotadas para tal mapeamento são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Descrição das classes de uso e ocupação do solo

Classe Nível 1	Classe Nível 2	Descrição
Floresta	Floresta Natural	Florestas naturais, como formações florestais (Floresta Ombrófila Densa, Aberta e Mista e Floresta Estacional Semi-Decidual, Floresta Estacional Decidual e Formação Pioneira Arbórea) ou formações savânicas (Savanas, Savanas-Estépicas Florestadas e Arborizadas).
	Formação Natural Não Florestal	Espécies arbóreas plantadas para fins comerciais (ex. eucalipto, pinus, araucária).
Agropecuária	Agropecuária	Áreas de pastagens, naturais ou plantadas, vinculadas a atividade agropecuária. Em especial nos biomas Pampa e Pantanal, uma parte da área classificada como Formação Campestre inclui também áreas pastejadas.
Área Não Vegetada	Área Não Vegetada	Áreas de superfícies não permeáveis (infraestrutura, expansão urbana ou mineração) não mapeadas em suas classes Áreas urbanizadas com predomínio de superfícies não vegetadas, incluindo estradas, vias e construções.
Corpos D'água	Corpos D'água	Rios, lagos, represas, reservatórios e outros corpos d'água

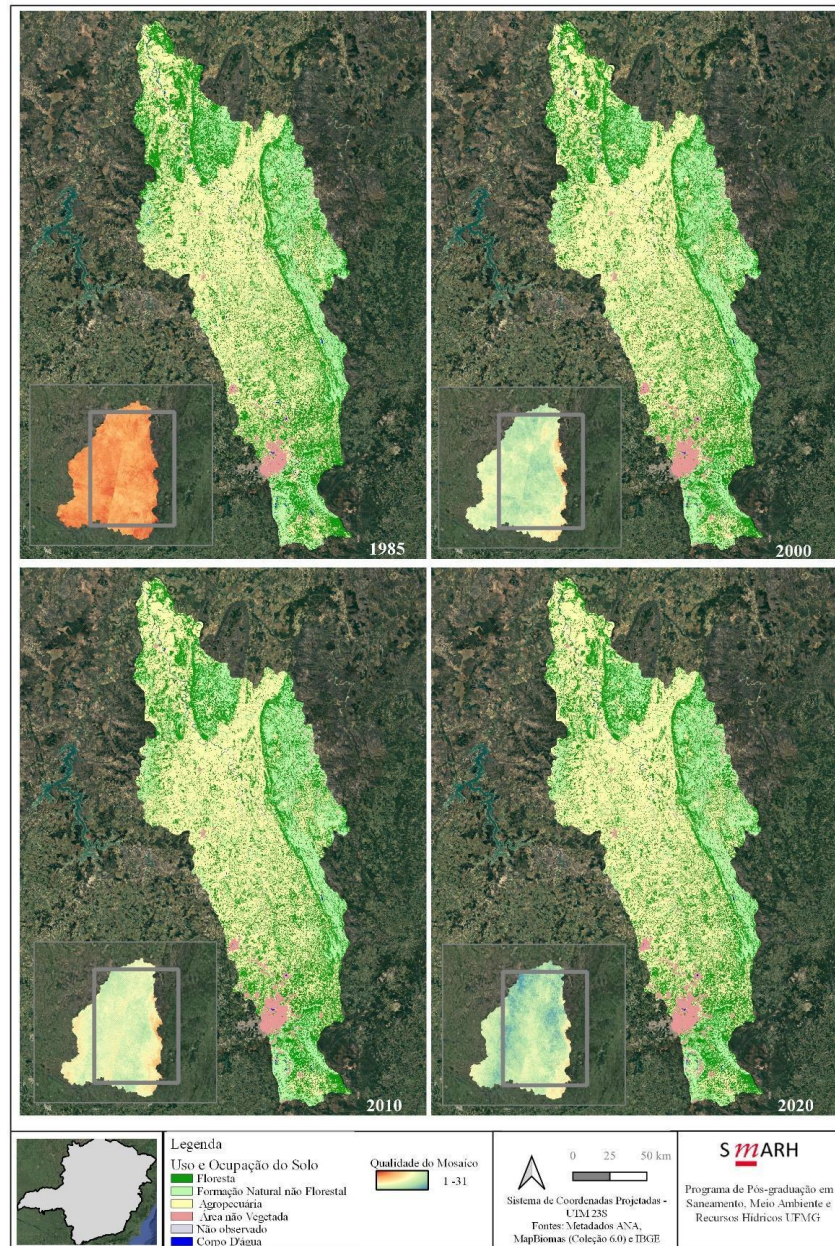
Fonte: Mapbiomas (2021).

Foram eleitos para representação da evolução dos usos e ocupação do solo os anos de 1985, 2000, 2010 e 2020. Na Figura 9 são apresentados os mosaicos de uso e ocupação do solo na bacia nos anos supracitados, assim como as indicações da qualidade dos mosaicos utilizados, relativo ao número de imagens sem nuvens por pixel para o ano selecionado.

Com base nos dados mapeados e representados, pode-se observar que a região oeste da bacia, na região próxima ao rio Cipó, assim como nas áreas de cabeceira e na porção mais ao norte da bacia, predomina áreas de cobertura vegetal. Cabe destacar a relação da distribuição e maior densidade vegetal na bacia, com a topografia e pluviometria na região, conforme apresentado nos itens 6.1.2 e 6.1.5.

Na região do médio curso do Rio das Velhas, os usos do solo predominantes foram de coberturas vegetais e áreas classificadas como de pastagem. Ainda, cabe pontuar a grande área de usos antrópicos na porção sudoeste da bacia, porção onde está situada a região metropolitana do estado de Minas Gerais. Ademais, a evolução temporal indica ligeiros decréscimos de área vegetal na bacia, enquanto a expansão urbana se mostrou expressiva, principalmente na região sudoeste da bacia.

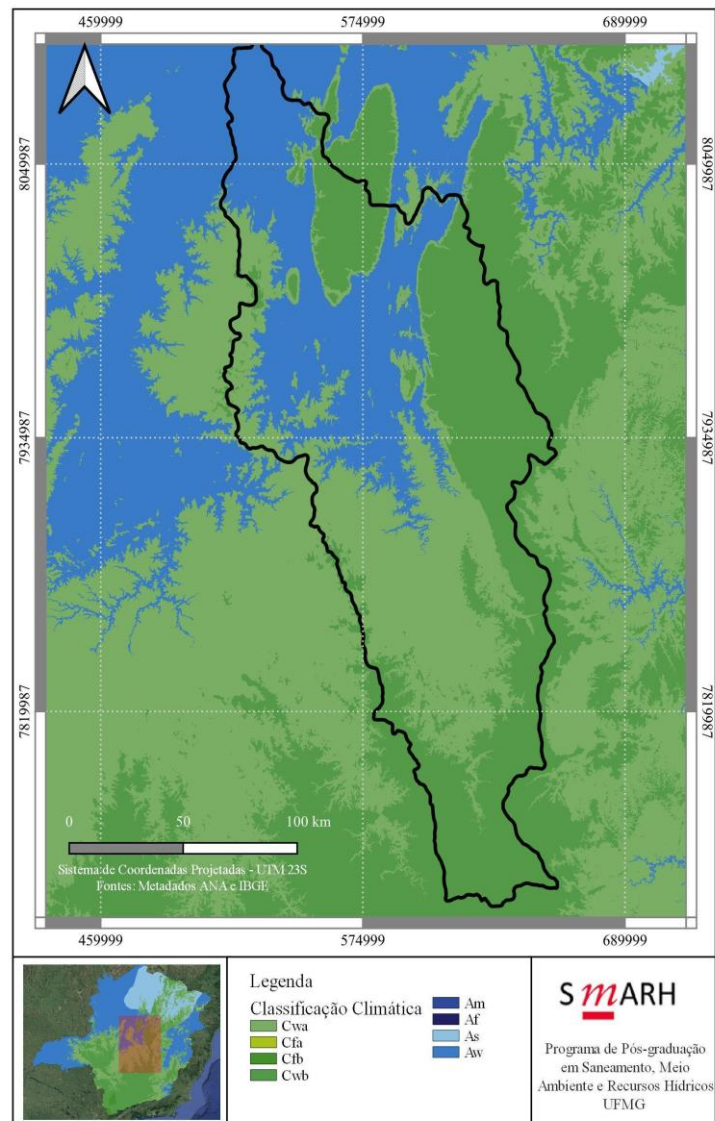
Figura 9 – Evolução do Uso e Ocupação do Solo – Bacia do Rio das Velhas



6.1.5 Clima e Tempo

Existem três tipos climáticos na bacia do Rio das Velhas, segundo a classificação de Köppen (Figura 10): tropical úmido (Aw), mesotérmico com verão quente e inverno seco (Cwa) e mesotérmico com verão ameno e inverno seco (Cwb). O tipo climático Aw é caracterizado por elevadas temperaturas (média mensal do mês mais frio $> 18^{\circ}\text{C}$) e baixos valores de precipitação no mês mais seco. Sua ocorrência na área de estudos está restrita à região mais ao norte da bacia, a jusante do município de Pedro Leopoldo. Os climas mesotérmicos estão presentes nas regiões de maior altimetria na bacia, na região do alto e médio curso do Rio das Velhas.

Figura 10 – Classificação Climática de Koppen – Bacia do Rio das Velhas



6.1.5.1 Pluviometria

ECOPLAN (2015) realizou estudos que identificaram a distribuição espacial da precipitação média anual na Bacia do Rio das Velhas utilizando 29 estações pluviométricas, com dados diários de chuva, no período entre 1976 e 2005. Os valores mais altos de precipitação média anual foram verificados na região onde está localizada a região metropolitana do estado, com valores próximos à 1.778 mm, enquanto os valores mais baixos, da ordem de 1.050 mm, foram observados na região onde se tem a afluência do Rio das Velhas no Rio São Francisco, condição a qual é associada no estado ao relevo da região. Por isso, há grandes diferenças nas precipitações maiores (chuvas orográficas) e temperaturas mais baixas (maior

altitude), como na Serra do Curral, do Espinhaço e do Caraça em relação a regiões vizinhas.

Considerando o período de estudo adotado nesse trabalho, foram também coletados os dados de precipitação obtidos nas estações pluviométricas mantidas na bacia do rio das Velhas entre os anos de 1994 e 2014, assim como dados de evapotranspiração real (ETR) obtidos por produtos de sensoriamento remoto GLEAM (*Global Land Surface Evaporation: The Amsterdam Methodology*). Os dados pluviométricos anuais obtidos para verificação de correlação nos estudos de regionalização foram obtidos a partir das séries históricas das estações pluviométricas inseridas nas bacias de estudo. Esses dados foram obtidos na rede hidrometeorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) da Agência Nacional de Águas (ANA).

Foram utilizados dados de 17 estações pluviométricas, cujas localizações e códigos estão apresentados na Tabela 4. Com base nos dados históricos adquiridos nas estações supracitadas, entre o período de 1994 e 2014, foram obtidos os dados médios anuais, assim como a média geral para o período de avaliação, em todas as estações utilizadas, uma vez que tais dados foram utilizados na avaliação de correlação realizadas nos estudos de regionalização. Cabe salientar acerca da escassez de estações na região norte da bacia.

Os dados médios foram processados em ambiente SIG, *software* QGIS versão 2.18.22, foram ponderados pelo IDW para a região de estudo. A interpolação por IDW determina os valores dos pontos usando uma combinação linear ponderada dos pontos amostrados, sendo que o peso de cada ponto é o inverso de uma função da distância (Marcuzzo *et al.*, 2011).

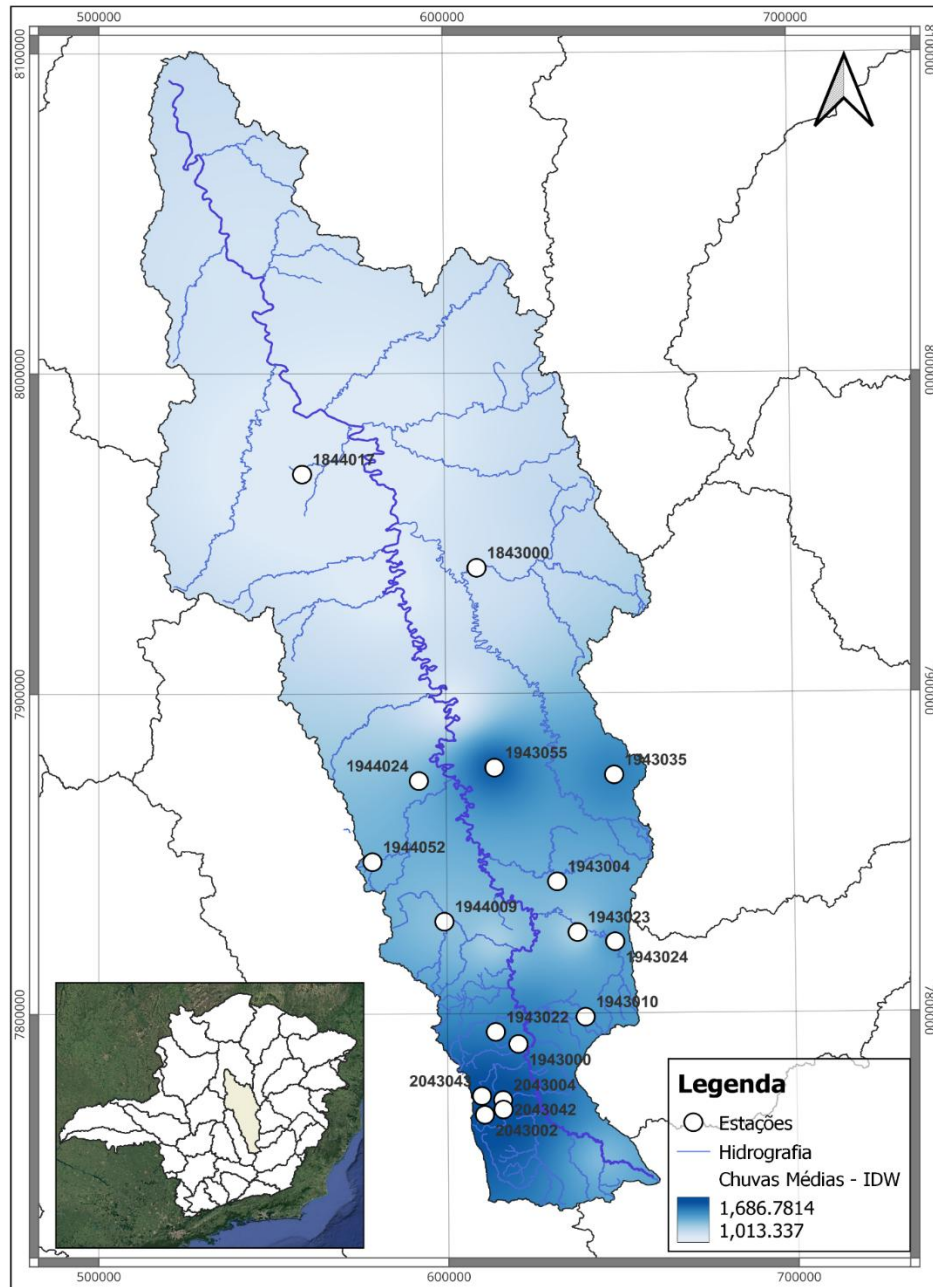
Na Figura 11 é apresentado o mosaico obtido para a pluviometria anual média, distribuição obtida considerando o período de dados de 1994 a 2014. Cabe enfatizar que os dados obtidos nas estações supracitadas, corroboraram a descrição já apresentada, em que maiores índices pluviométricos são verificados nas regiões de cabeceira e na porção oeste da bacia, onde predominam ocupações vegetais e maiores declividades.

Conforme verificado no trabalho de Marcuzzo *et al.* (2011), e como pode-se observar na Figura 11, uma das características da interpolação IDW é a geração de pequenas áreas com maiores valores de precipitação, destoantes da região de entorno. Tal condição, conforme apontado pelos autores supracitados, se deve ao fato de que conforme a distância do ponto a ser interpolado, em relação a um ponto com dados, tende a zero, o peso da influência desse ponto sobre o ponto a ser interpolado tende ao infinito.

Tabela 4 – Estações Pluviométricas – Bacia do Rio das Velhas

Código	Descrição	Coordenadas (UTM – 23S)	
		X	Y
1844017	CORINTO	558841	7968566
1843000	USINA PARAUNA	609173	7939243
1943035	VAU DA LAGOA	648430	7874448
1944009	PEDRO LEOPOLDO	599291	7828743
1944024	FAZENDA VARGEM BONITA	592175	7872716
1943004	JABOTICATUBAS	631786	7841151
1943023	TAQUARAÇU	637541	7825280
1944052	SETE LAGOAS	578716	7847437
1943055	BELO HORIZONTE (HORTO)	613959	7876798
1943000	MINERAÇÃO MORRO VELHO	620318	7790429
1943024	JOSÉ DE MELO	648316	7822316
1943010	CAETÉ	639639	7798809
1943022	CAIXA DE AREIA	613855	7794236
2043002	LAGOA GRANDE (MMV)	610551	7768358
2043043	REPRESA DO MIGUELÃO (MMV)	609752	7774229
2043004	RIO DO PEIXE (MMV)	615807	7772972
2043042	REPRESA DAS CODORNAS (MMV)	615892	7769983

Figura 11 – Pluviometria Média Ponderada 1994-2014 – Bacia do Rio das Velhas



6.1.5.2 Evapotranspiração

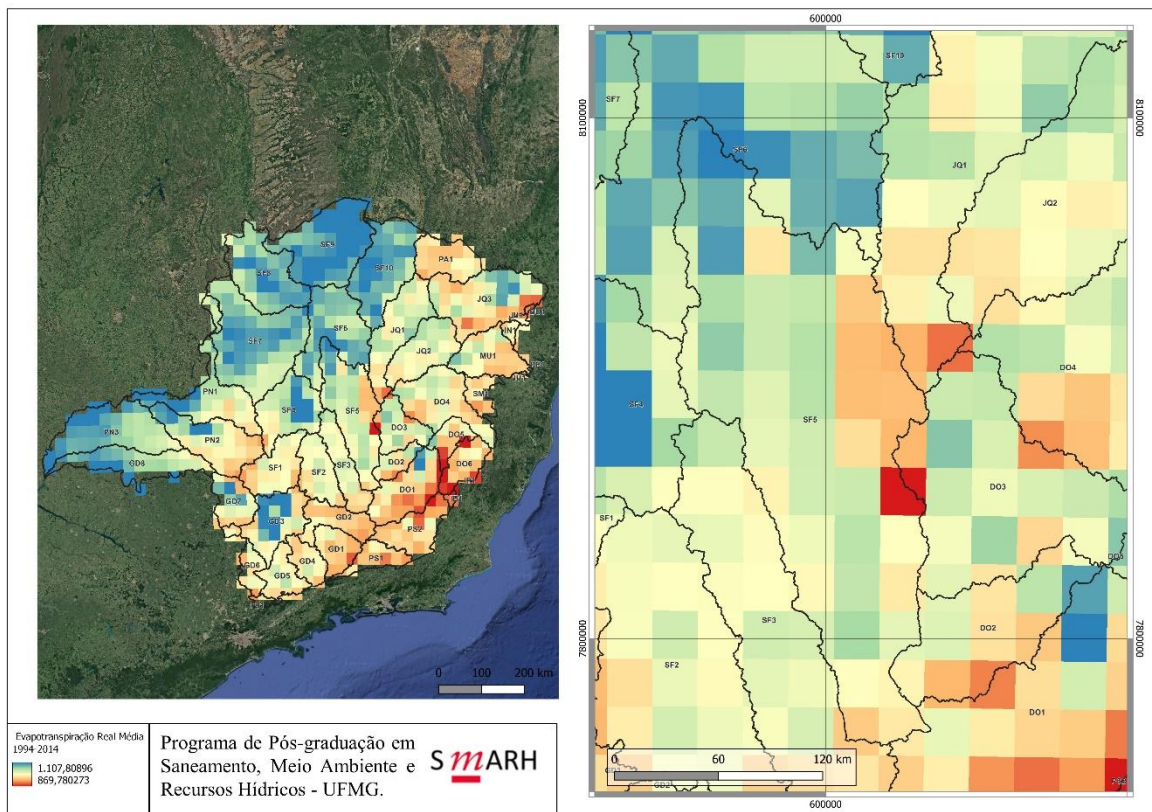
O GLEAM (Global Land Surface Evaporation: The Amsterdam Methodology) é um modelo criado para estimar os diferentes componentes da evaporação da terra. Os produtos obtidos pelo modelo são: Evaporação Real (E), Evaporação do Solo (Eb), Perda de Interceptação (Ei), Evaporação Potencial (Ep), Sublimação de Neve (Es), Transpiração (Et), Evaporação em águas abertas (Ew), Estresse Evaporativo (S) e Umidade do solo na zona da raiz (SMroot) e Umidade de Superfície do Solo (SMSurf), os quais são diferenciadas em três tipos de superfície terrestre: (1) solo descoberto,

(2) vegetação curta e (3) vegetação com copa alta e distribuídos em resolução espacial de 0,25° em formato nc, um arquivo de Controle Numérico Computadorizado (CNC) criado com o software Mastercam CNC (GLEM, 2022).

O GLEAM foi desenvolvido em 2011 e desde então é revisado regularmente. Martens *et al.* (2017) apresentam a versão mais atual desse modelo (v3) a qual foi utilizada no presente trabalho. Foram adquiridos mosaicos anuais do produto GLEAM v3 do período de 1994 a 2014, e tais imagens foram processadas em ambiente SIG, *software* QGIS versão 2.18.22, onde foram também computadas as médias do período de avaliação deste estudo.

Na Figura 12 são apresentados os valores médios observados, com base em imagens de satélite para a região de estudo. Observa-se que na bacia hidrográfica do rio das Velhas os menores valores de ETR ocorreram nas regiões de maior altimetria.

Figura 12 – Evapotranspiração Real – Bacia do Rio das Velhas



6.2 Aquisição e Análise de Consistência de dados Fluviométricos

Os dados de vazão média diária de todas as estações fluviométricas situadas na bacia hidrográfica do rio das Velhas foram obtidos pelo Sistema Nacional de Recursos Hídricos da ANA.

A partir da disponibilidade dos dados, foram selecionadas 18 estações, das quais nove estão situadas na calha do Rio das Velhas, cinco em afluentes da margem esquerda e outras quatro em afluentes da margem direita. Na Tabela 5 são apresentados os dados relativos as estações eleitas para o estudo, as quais são espacializadas na Figura 13.

Observa-se que na calha do rio das Velhas existem nove postos de monitoramento, número que está subdimensionado, conforme estudo da rede fluviométrica da bacia realizado por Pádua *et al.* (2019). Segundo Pádua *et al.* (2019), em acordo as recomendações da OMM, o número de postos de monitoramento na calha principal deveria ser igual ou próximo de 12.

Tabela 5 – Dados das Estações de Monitoramento de Vazão

Estação	Curso d'água	Operadora	Área (km²)	Coordenadas (UTM – 23S)	
				X	Y
41151000	Rio das Velhas	CPRM	175	644526	7754371
41180000	Rio Itabirito		315	625304	7756215
41199998	Rio das Velhas		1.550	623014	7785353
41250000	Ribeirão da Mata		709	613137	7822740
41260000	Rio das Velhas		3.730	624225	7820730
41300000	Rio Taquaraçu		618	637602	7826320
41340000	Rio das Velhas		4.860	614223	7836878
41380000	Rio Jabuticatubas		564	615079	7847696
41410000	Rio das Velhas		7.080	602512	7873314
41440005	Ribeirão Jequitibá		238	588971	7857859
41600000	Rio das Velhas		8.050	601216	7897668
41650002	Rio das Velhas		10.700	585009	7935184
41685000	Ribeirão do Picão		534	575463	7942816
41780002	Rio Paraúna		3.980	600138	7938187
41818000	Rio das Velhas		16.600	581818	7975775
41890000	Rio Curimatai		1.420	587076	8010020
41940000	Rio do Bicudo		2.070	546995	7988648
41990000	Rio das Velhas		26.500	530419	8054476

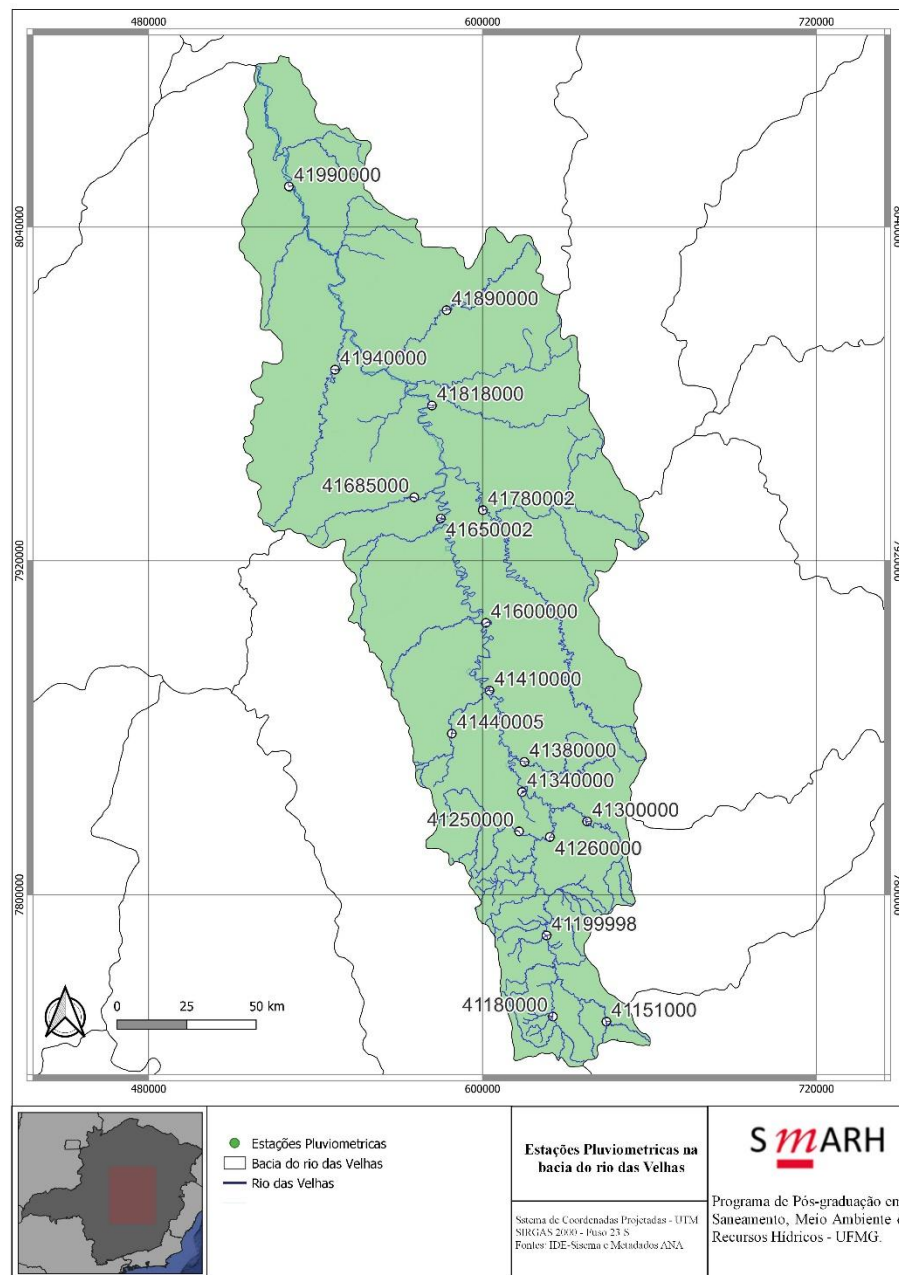
Fonte: ANA, 2022 (Adaptado).

Depois da aquisição dos dados, avaliou-se a presença de falhas no período inicialmente selecionado (entre os anos hidrológicos de 2012/2013 e 2019/2020). Nesse intervalo, quatorze estações foram classificadas como excelentes, sendo que

em sete delas não houve falhas (41151000, 41199998, 41250000, 41300000, 41380000, 41600000 e 41818000) e em sete o percentual foi inferior a 5 % (41180000, 41260000, 41650002, 41685000, 41780002, 41890000, 41940000 e 41990000). A estação 41440005 foi classificada como boa (percentual de falhas = 9 %), a série de vazões da estação 41260000 foi classificada como boa (percentual de falhas = 13 %) e as séries das estações 41340000 e 41410000 foram classificadas como ruins, segundo critério adotado (USGS, 2002).

Para averiguar a consistência dos dados e a continuidade das vazões, foram plotados os gráficos das séries temporais de vazões diárias e mensais das estações situadas na calha principal do Rio das Velhas. Para compreender os resultados obtidos, foram avaliados três fatores: os de precipitação, as mudanças ocorridas no uso e ocupação das terras e a evolução das demandas pelo uso dos recursos hídricos na bacia.

Figura 13 – Localização – Estações de Monitoramento de Vazão – Bacia do Rio das Velhas



Segundo Tucci (2002), a análise de continuidade em um rio, através da análise dos dados de vazões médias mensais nos pontos de monitoramento de montante e jusante, consiste em um bom indicador da qualidade dos dados no trecho avaliado. Com base nos dados foram observadas discontinuidades das vazões médias mensais, majoritariamente, nas áreas situadas entre as estações 41600000 e 41650002. As estações em questão estão situadas em um trecho de Cárstico Fraturado, cuja produtividade, em geral, é baixa e que as discontinuidades das vazões foram observadas majoritariamente no período de estiagem. Ainda, foram

levantados através da Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema), os dados das outorgas de captação existentes na bacia, entretanto, a soma das captações mensais no trecho não se mostrou significativa frente aos volumes de descontinuidade, indicando haver problemas nas curvas chaves do período.

Tucci (2002) relata que a causa mais frequente na descontinuidade das vazões em um rio se dá por erros de superestimação de vazões em postos de montante ou pela subestimação das vazões no ponto de jusante, que pode ser causada pela precariedade dos ramos de exploração superior da curva-chave do ponto de monitoramento.

Sendo assim, optou-se pela alteração do período de dados fluviométricos utilizados no estudo. A avaliação dos quatro métodos de transferências de vazões foi realizada com os dados de outubro de 1994 a setembro de 2014, período no qual os dados estão completos para todas as estações e as decontinuidades são poucas e pontuais.

Segundo Koefender e Marcuzzo (2016), os fluxogramas esquemáticos dos cursos d'água, comumente denominados como diagrams unifilares, representam a bacia de forma ordenada, indicando de forma ordenada as estações de medição de vazão e demais obras nos cursos d'água, sempre mostrando o percurso da nascente para a foz. Ainda, segundo os mesmos autores, o diagrama unifilar proporcionam um melhor entendimento do funcionamento sistemático e funcional da bacia, promovendo subsídios visuais do funcionamento organizacional do escoamento superficial de água da região.

Sendo assim, considerando as estações fluviométricas (FLU) e de qualidade das águas (6.4), as quais são estudadas neste trabalho, foi elaborado um fluxograma esquemático da posição de tais estruturas. No APÊNDICE A é apresentado o diagrama unifilar englobando as estações de fluviométricas e de qualidade da água.

Ainda, com base nos estudos das características físicas e climáticas da bacia, apresentados no item 6.1 e dados obtidos no estudo do CPRM (2001a), foram compilados os atributos referente à cada estação de monitoramento fluviométrico, os

quais foram utilizados nos estudos de regionalização. Os dados supracitados são apresentados na Tabela 6.

Vale salientar que as características físicas utilizadas neste estudo coincidem àquelas usualmente utilizadas nos estudos de regionalização de vazões. Pinto (2006) utilizou o índice de escoamento de base, a área de drenagem, o comprimento do rio principal, a declividade média, a precipitação média da bacia, o coeficiente de escoamento da bacia e a densidade de drenagem, variáveis também utilizadas no estudo realizados pelo CPRM em 2001. Costa e Fernandes (2021) utilizaram a área, o comprimento, a declividade equivalente, a diferença altimétrica do trecho drenado, assim como as cotas máxima e mínima, densidade de drenagem e coeficientes de compacidade e forma, enquanto Melati e Marcuzzo (2016) utilizaram a área de drenagem e variáveis climáticas.

Na Tabela 6 são também apresentados os valores de vazão média observada no período de outubro de 1994 a setembro de 2014.

Tabela 6 – Variáveis Físicas e Climáticas – Estações Fluviométricas.

	A (km²)	L (km)	I (m/km)	Dd (Junções/km)	P (mm/ano)	ET (mm/ano)	P – ET (mm/ano)	Qmed (m³/s)
41151000	175	26,0	8,6	0,12	1.329,0	1042,6	286,4	2,91
41180000	330	48,0	5,3	0,25	1.546,7	1008,7	538,0	7,08
41199998	1.698	90,0	2,6	0,21	1.543,5	1060,3	483,2	28,84
41250000	676	56,0	2,4	0,18	1.255,0	1078,0	177,0	8,16
41260000	3.727	157,0	1,4	0,2	1.336,2	1078,0	258,2	59,39
41300000	626	46,0	7,0	0,3	1.250,1	1019,3	230,8	8,90
41340000	4.874	200,0	1,1	0,20	1.331,1	1078,0	253,1	74,99
41380000	553	55,0	2,6	0,13	1.365,2	1074,9	290,3	5,95
41410000	6.558	289,0	0,8	0,20	1.442,3	1047,6	394,6	94,05
41440005	243	26,2	5,3	0,18	1.355,9	1043,1	312,8	2,82
41600000	8.086	361,0	0,6	0,16	1.087,1	1047,6	39,5	101,52
41650002	10.712	474,0	0,5	0,14	1.036,1	1066,3	-30,2	119,67
41685000	547	53,0	1,2	0,03	1.087,3	1047,1	40,2	2,32
41780002	3.996	100,0	2,5	0,10	1.133,0	1066,3	66,7	68,07
41818000	16.722	566,0	0,5	0,12	1.028,0	1068,3	-40,3	183,14
41890000	1.435	76,0	1,0	0,13	1.126,5	1113,4	13,2	19,52
41940000	2.023	112,0	1,1	0,04	1.089,9	1081,5	8,4	15,98
41990000	26.553	707,0	0,4	0,10	1.154,0	1108,8	45,2	270,77

6.3 Regionalização de vazões

6.3.1 Regionalização de Vazões Diárias pela Razão entre as áreas de drenagem

Para estimar as vazões pela proporção de áreas de drenagem, utilizou-se como estações previstas apenas aquelas presentes no rio principal. No cenário 01, utilizou-se apenas uma estação a montante como preditora. No segundo, incorporou-se também os afluentes mais próximos. Os resultados estão sintetizados nas Tabela 7 e Tabela 8.

Observa-se que nos dois métodos houve ligeiro decaimento das métricas de desempenho com o aumento da razão entre as áreas (Prevista/Preditora), com destaque aos valores observados para as vazões regionalizadas para a estação fluviométrica 41199998 em ambos os cenários ($R^2 = 0,61$ e $R^2 = 0,68$). Para as vazões estimadas em outros pontos de monitoramento, os métodos se mostraram mais aderentes, com valores de R^2 superiores a 0,778. Cabe destacar que, houve uma ligeira melhora nos coeficientes de determinação ao inserir tributários na estimativa de vazões.

Tabela 7 – Métricas de desempenho de regionalização utilizando o Cenário 01

Estação Fluviométrica	Razão de áreas	Área (Km ²)	Incremento de área (Km ²)	R ²	KGE	RMSE	EPMA
41199998	9,70	1.698	1.523	0,614	0,608	21,99	21,12
41260000	2,19	3.727	2.029	0,813	0,809	28,82	26,81
41340000	1,31	4.874	1.147	0,864	0,916	32,39	15,58
41410000	1,35	6.558	1.684	0,778	0,861	55,14	19,55
41600000	1,23	8.086	1.528	0,905	0,835	46,45	17,12
41650002	1,32	10.712	2.626	0,836	0,838	59,93	27,61
41818000	1,56	16.722	6.010	0,831	0,909	88,42	20,51
41990000	1,59	26.533	9.831	0,898	0,844	114,23	25,20

Tabela 8 – Métricas de desempenho de regionalização utilizando o Cenário 02

Estação Fluviométrica	Razão de áreas	Área (Km ²)	Soma das Áreas das Estações Consideradas (Km ²)	R ²	KGE	RMSE	EPMA
41199998	3,36	1.698	505	0,684	0,644	23,80	25,11
41260000	1,57	3.727	2.374	0,877	0,909	23,20	15,61
41340000	1,12	4.874	4.353	0,872	0,931	31,74	13,10
41410000	1,21	6.558	5.427	0,781	0,866	54,99	17,28
41600000	1,19	8.086	6.801	0,906	0,843	45,33	16,58
41818000	1,10	16.722	15.255	0,888	0,820	98,41	15,70
41990000	1,32	26.533	20.180	0,904	0,876	110,36	17,64

Quanto aos valores de KGE, observa-se que predominaram valores foram superiores a 0,60 em ambos os cenários. De maneira geral, observa-se uma melhoria das estimativas ao se inserir as medições nos afluentes.

As médias dos erros percentuais absolutos variaram entre 15,58 % e 27,61 % no cenário 1, enquanto no cenário 02 valores estiveram entre 13,10 e 25,11 %. Observa-se, que de maneira similar as demais métricas, os piores resultados ocorreram na estação 41199998 (detém proporções de áreas maior que três nos dois cenários) e nas estações 4199000, 41818000, 41650002 e 41260000 no cenário 01. A elevação do RMSE ocorreu com aumento da vazão que passa pelos pontos de jusante na bacia.

Além disso, é interessante observar que o EPMA é mais susceptível à variação em bacias com menores áreas de drenagem. Por exemplo, em estações fluviométricas localizadas mais próximas da nascente, pequenos erros de cota e flutuações normais de vazão podem representar maiores diferenças percentuais em pequenas vazões, como acontece no ramo inferior de curvas de permanência.

Os valores de RMSE variaram significativamente entre as estações, tanto no Cenário 1 quanto no Cenário 2, ainda que com sutis melhorias com a incorporação de afluentes (Cenário 2). Observam-se valores de RMSE proporcionais à área de drenagem e consequentemente à vazão. Como há uma parcela quadrática na equação desse indicador, erros percentuais iguais em estações fluviométricas localizadas a jusante trazem diferenças absolutas maiores nesse contexto, elevando sobremaneira o indicador.

No desenvolvimento desse trabalho, percebeu-se que a razão de áreas próximas de 1,30 é um indicativo de limite máximo para utilização desta metodologia no cenário 1, pois o EPMA é inferior a 16 %. Incorporando os tributários, cenário 2, o indicativo de limite máximo para utilização desta metodologia passa a ser 1,65, pois o EPMA é inferior a 18 %.

De maneira geral, observa-se que a inserção de afluentes para a predição de vazões no rio principal foi válida, sobretudo pela elevação de R^2 e que em geral o desempenho do método se mostrou adequado para aplicação na calha principal da bacia, ainda que para a aplicação do segundo cenário seja desejável a existência de estações

fluviométricas nos cursos d'água afluentes entre a estação de montante e o ponto de interesse, condição a qual não é factível com a atual densidade de estações fluviométricas na bacia.

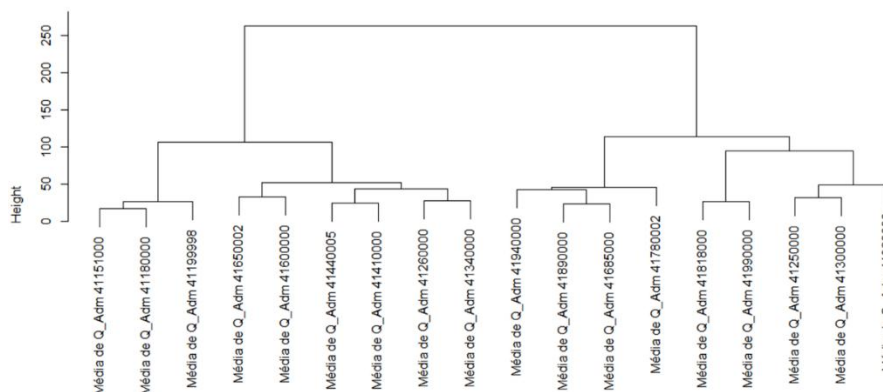
Ainda, vale salientar que Ries e Friesz (2000), no âmbito do estudo de métodos para estimar estatísticas de vazões mínimas para rios em Massachusetts, indicam que o método de proporção por áreas pode ser aplicável para estimativa de vazões mínimas quando a proporção entre as áreas de denagem estiverem entre 0,5 a 1,5..

6.3.2 Determinação de Regiões Hidrologicamente Homogêneas

Para determinação das RHH foram obtidas as curvas de permanência de cada estação fluviométrica adimensionalizada pela vazão média no período de 1994 a 2014.

Posteriormente, foi aplicado o método aglomerativo hierárquico de Ward, utilizando a distância euclidiana como medida de dissimilaridade, sobre os quantis adimensionais das curvas de permanência das 18 séries para agrupamento de regiões similares. Os quantis tiveram incremento 0,1 % entre 0 e 7 % da permanência, entre 1 % e 3 % para permanências entre 7 e 99 %. O dendrograma obtido é apresentado na Figura 14. Com base nos ramos obtidos, as curvas de permanência de cada estação em um mesmo ramo foram plotadas em um mesmo gráfico e pode-se observar a grande aderência entre elas. Posteriormente, foi realizada uma análise crítica do agrupamento, baseado nas características locais (geologia, declividade, precipitação média anual, evapotranspiração hidrogeologia e o uso e cobertura do solo), culminando na subdivisão das estações em cinco RHH. A espacialização de tais RHH é apresentada na Figura 15.

Figura 14 – Dendrograma – RHH



As formas das curvas de permanência indicam a variabilidade do comportamento das vazões e são associadas as características físicas, climáticas e de cobertura vegetal/ ocupação do solo da bacia hidrográfica. As curvas com declividade acentuada indicam uma elevada variabilidade das vazões e maior fluxo de escoamento superficial, enquanto curvas com menos declividade indicam trechos de vazões mais regularizadas, com maior de armazenamento de água em camadas subsuperficiais e profundas de solo (Searcy, 1959).

Neste sentido, destaca-se o trabalho de Chouaib *et al.* (2018) que estudou a variabilidade das CPs a partir da avaliação da interação entre clima e aspectos como o relevo local. No trabalho supracitado, dentre as variáveis observadas, a intensidade de chuva se mostrou o parâmetro mais notável na delimitação de três regiões homogêneas na região leste dos Estados Unidos, as quais diferiram significativamente dentre as características entre as CPs: uma na qual as vazões oscilavam significativamente, menor permanência no trecho médio da CP, condição a qual era associada a uma menor variabilidade na intensidade de chuvas, e outras nas quais as CPs apresentavam uma menor variação, sendo associadas as regiões de elevadas precipitações.

No estudo de regionalização das CPs realizado por Ganora *et al.* (2009), as regiões hidrologicamente homogêneas foram delimitadas com base na análise de cluster pelo método aglomerativo hierárquico de Ward. Método similar, utilizando as características das bacias de contribuição foi realizado por Rianna *et al.* (2010).

No estudo de regionalização de vazões realizado pelo CPRM nas Bacias Sub 40 e Sub 41 em 2001 (CPRM, 2001B), as regiões homogêneas foram delimitadas realizada a partir da análise das tendências das vazões Q_{50} e Q_{95} , assim como nas características da área de drenagem das estações selecionadas para estudo. No estudo de CPRM (2001B) foram também consideradas as características físicas, climáticas, dos sistemas de aquíferos e os aspectos geológicos da região, definindo-se assim três regiões homogêneas na bacia do rio das Velhas.

No estudo de CPRM (2001) as estações utilizadas neste estudo estavam alocadas nas seguintes regiões: Alto rio das velhas (41151000, 41160000, 41180000, 41190000, 41199998, 41260000, 41340000, 41250000 e 41300000), Médio rio das

velhas (41380000, 41410000, 41600000, 41650002, 41780002 e 41818000) e Alto (41685000, 41890000, 41940000 e 41990000). Vale salientar que no estudo supracitado foram consideradas diversas outras estações e diferentes séries temporais. Ainda, vale salientar que, as regiões homogêneas determinadas em CPRM (2001B) foram também utilizadas no estudo de métodos de regionalização de curvas de permanência elaborado por Pinto (2006).

No Atlas Digital de Águas de Minas foram delimitadas RHH na Bacia do Rio das Velhas com base em critérios físicos e estatísticos, baseados no escoamento superficial, características fisiográficas, distribuição de frequência das vazões adimensionalizadas e nos resíduos da equação de regressão múltipla da vazão média. No trabalho supracitado foram obtidas duas RHH, sendo a primeira a área da nascente do rio das Velhas até a confluência com o rio Jequitibá (estação 41410000), exclusive. A segunda região corresponde à área do restante da bacia, abrangendo os afluentes: Jequitibá, Onça, Santo Antônio, Cipó, Picão, Bicudo, Pardo Pequeno, Pardo Grande, Curimataí, Vinho Cotovelo e Corrente.

Nos limites definidos no Atlas Digital de Águas de Minas, a região 1 do estudo se assemelha parcialmente a RHH01 definida neste estudo, com exceção da área da estação 41410000 (confluência do rio Jequitibá e rio das Velhas), a qual foi alocada na RHH02 deste estudo. A região 02 definida no Atlas engloba todas as demais áreas delimitadas neste estudo.

Conforme apresentados nos gráficos de permanências das RHH (Figura 16 a Figura 20), observa-se que na RHH01 existem curvas de permanência com a presença de inflexões marcantes, o que não é tão evidente nas demais regiões, cujas inflexões se restringem majoritariamente ao trecho extremo superior. Ele correspondente à parcela de trânsito das maiores vazões e o trecho médio indica a faixa de valores de vazão predominantes no rio.

Figura 15 – Estações por RHH

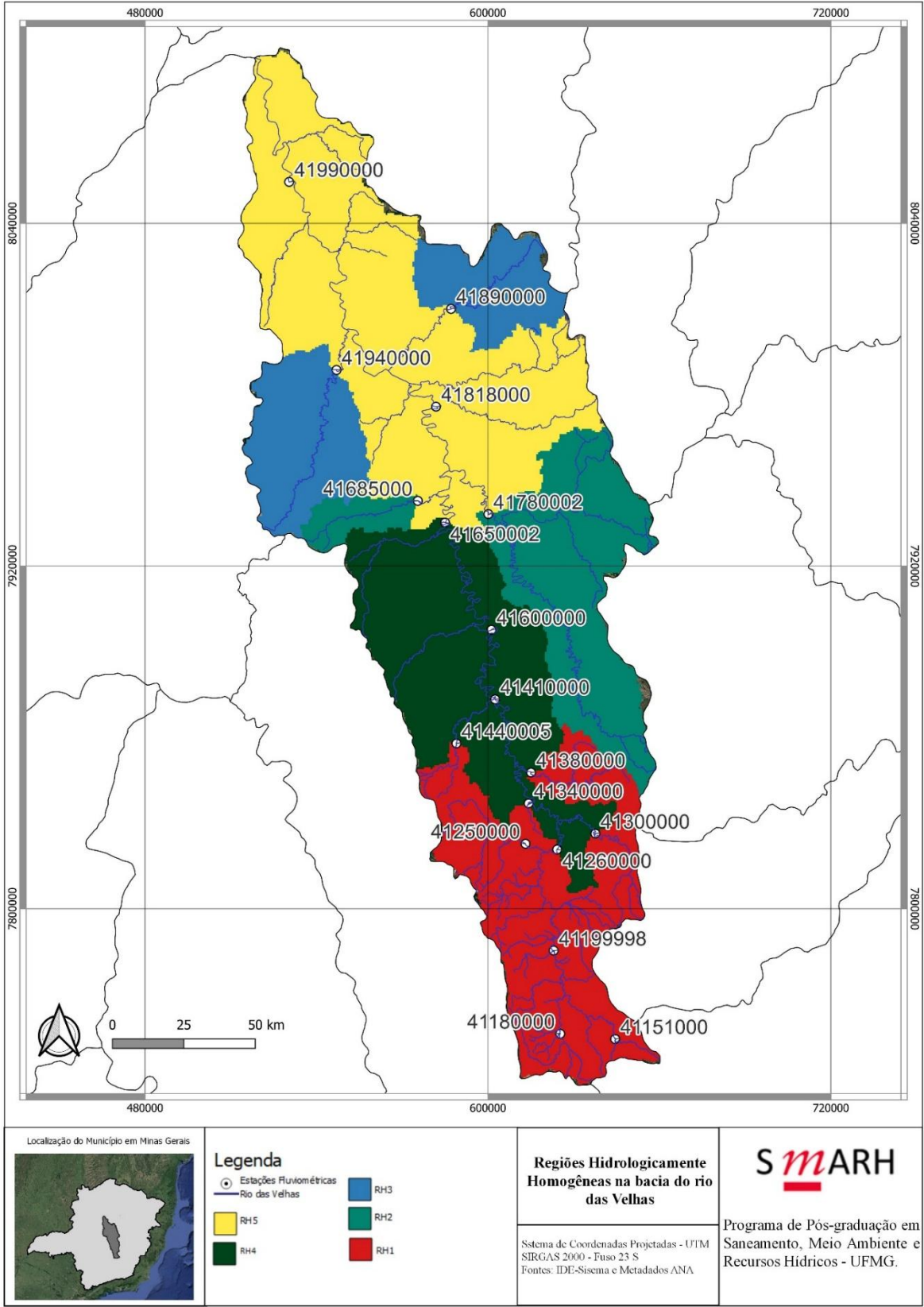


Figura 16 – Curvas de Permanência RHH01: 41150000; 41180000; 41199998; 41260000; 41380000; 41250000; 41340000

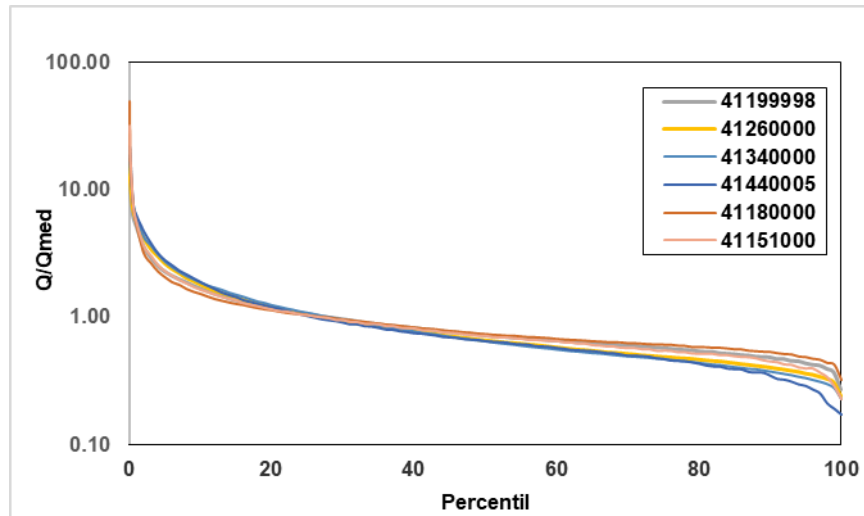


Figura 17 – Curvas de Permanência RHH02: 41410000; 41600000; 41650002

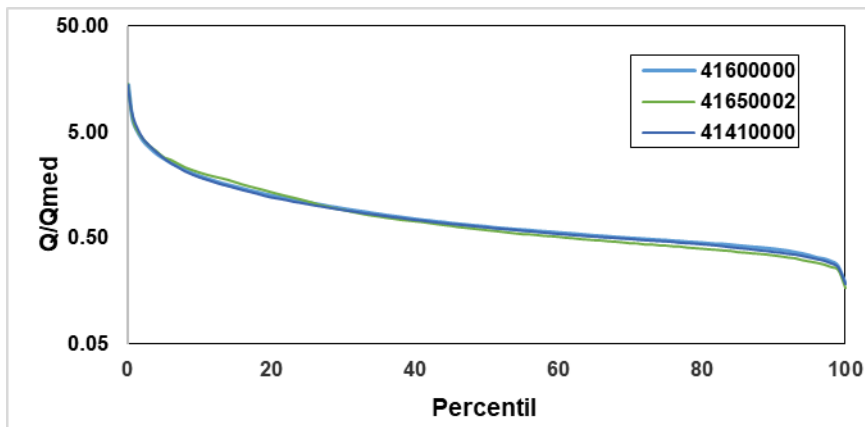


Figura 18 – Curvas de Permanência RHH03: 41685000 e 41780002

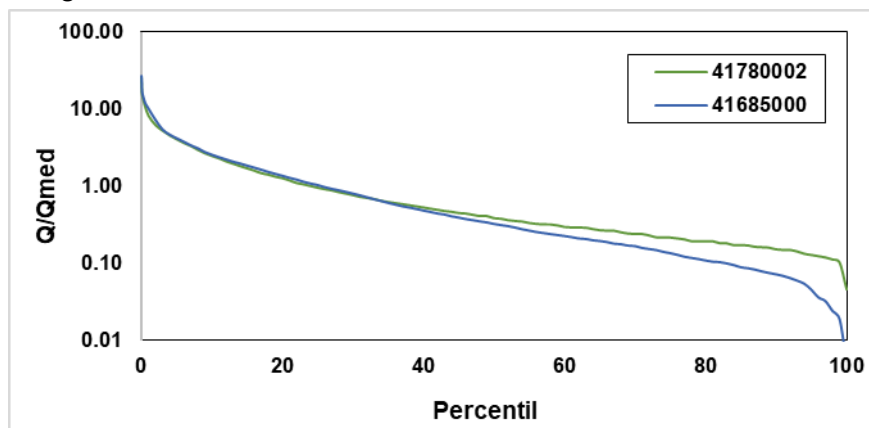


Figura 19 – Curvas de Permanência RHH04: 41890000 e 41940000

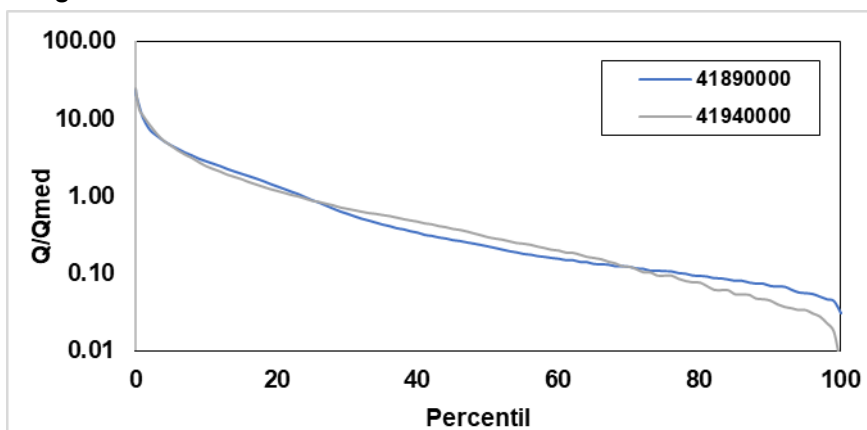
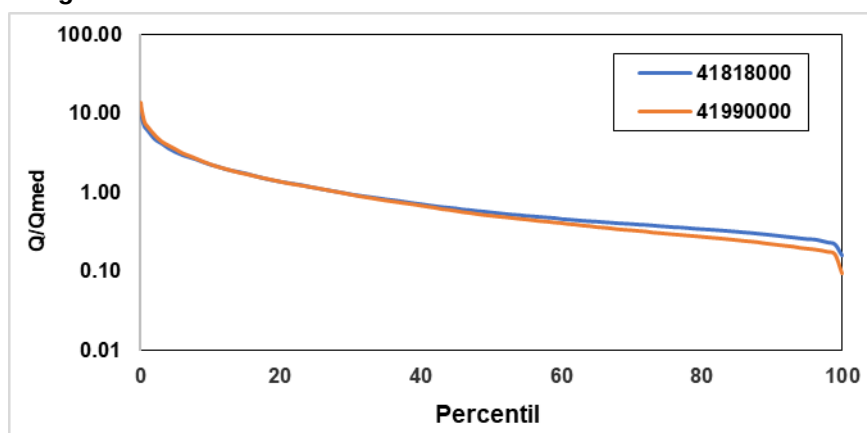


Figura 20 – Curvas de Permanência RHH05: 41818000 e 41990000



6.3.3 Regionalização das Curvas de Permanência de Longo Termo

Inicialmente foi realizada uma regressão entre a vazão média de longo termo e as variáveis físicas nas estações de referências, obtida entre outubro de 1994 e setembro de 2014. A correlação entre as variáveis pode ser visualizada na Tabela 9. Observa-se a maior correlação entre a vazão média e a área de drenagem (A) e comprimento (L). Contudo, as variáveis independentes possuem um certo grau de correlação, e dependendo do conjunto de variáveis selecionadas, pode haver colinearidade. Após as análises dos diferentes modelos de regressão, a Q_{med} foi definida apenas em função da área de drenagem, conforme descrito na Equação 17 e ilustrada na Figura 24.

Vale salientar que, foram também ajustadas equações do tipo linear, exponencial, potência e polinomial, e que considerando a métrica de desempenho R^2 , a melhor aderência foi obtida no modelo do tipo potência.

No estudo de métodos de regionalização de curvas de permanência elaborado por Pinto (2006) as equações das vazões médias foram obtidas por modelos não lineares através do procedimento *Jack knife* (re-amostragem) utilizando como variáveis explicativas o índice de escoamento de base, a área de drenagem, o comprimento do rio principal, a precipitação média da bacia, o coeficiente de escoamento da bacia e a densidade de drenagem. Os coeficientes das equações obtidas no estudo supracitado foram estimados pelo método dos mínimos quadrados. Para todas as validações de vazão média do estudo de Pinto (2006) a variável explicativa associada foi exclusivamente a área de drenagem, o fator multiplicativo foi da ordem de 0,018, os expoentes próximos de 1 e R^2 em torno de 0,975.

Ribeiro *et al.* (2022), no âmbito do estudo de regionalização de vazões realizado na bacia do rio Grande, também uma sub bacia do rio São Francisco, obteve equações de vazões médias de longo termo não lineares considerando como variáveis explicativas a precipitação efetiva (P_{eq}), a precipitação efetiva decrescida de 750 mm (referente à uma parcela de abstração) (P_{eq750}); a precipitação efetiva decrescida da evapotranspiração (W_{Beq}) e a precipitação efetiva decrescida de um fator de abstração da região hidrológica (W_{BeqM}), sendo que as variáveis W_{Beq} e W_{BeqM} foram obtidas considerando duas fontes de dados de evapotranspiração de sensoriamento remoto. As equações obtidas indicaram uma boa aderência entre as variáveis dependentes e independentes, com valores de R^2 iguais ou superiores a 0,92.

Tabela 9 – Correlação – Variáveis Físicas e Climáticas e Vazão média de Longo Termo

	A (km ²)	L (km)	I (m/km)	Dd (Juncões/km)	P (mm/ano)	ET (mm/ano)	P – ET (mm/ano)	QMédia
A (km ²)	1,00							
L (km)	0,97	1,00						
I (m/km)	-0,51	0,57	1,00					
Dd (Juncões/km)	-0,17	0,13	0,26	1,00				
P (mm/ano)	-0,42	0,45	0,45	0,57	1,00			
ET (mm/ano)	0,42	0,36	-0,63	-0,37	-0,40	1,00		
P – ET (mm/ano)	-0,45	0,48	0,51	0,59	0,99	-0,52	1,00	
QMédia	0,99	0,97	-0,54	-0,11	-0,39	0,41	-0,42	1,00

$$Q = 0,060A^{0,83}$$

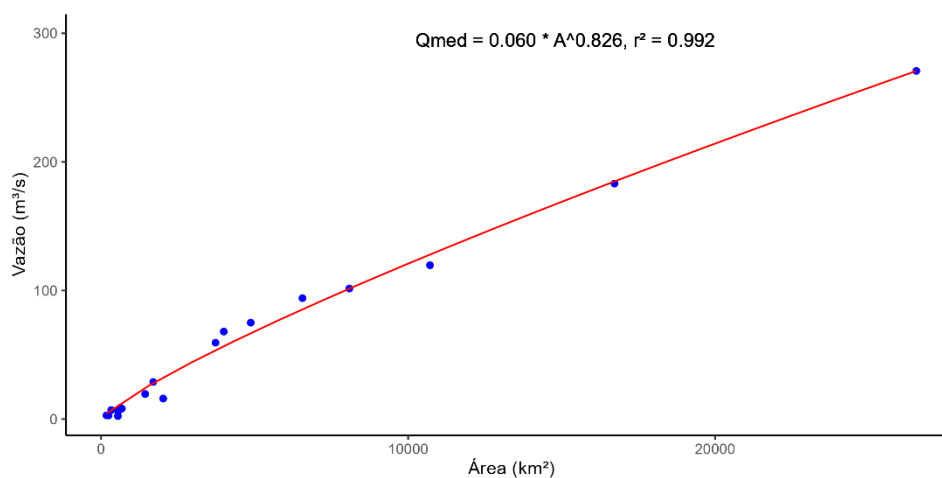
$$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$$

$$r^2 = 0.992$$

22

Em que: A é a Área de drenagem (km²) e Q é a Vazão média de longo termo (m³/s).

Figura 21 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão média de longo termo



Os resultados das métricas obtidos para o método de regionalização das vazões diárias através do método das CPLT, são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Métricas de Desempenho de Regionalização CPLT

Estação Fluviométrica	RHH	R ²	KGE	RMSE	EPMA (%)	Área (Km ²)
41151000	RHH01	0,979	0,64	2,31	20,47	175
41180000		0,916	0,68	3,03	33,48	330
41199998		0,979	0,28	12,53	34,51	1.698
41250000		0,994	0,66	4,73	37,67	676
41260000		0,966	0,49	20,34	34,89	3.727
41300000		0,990	0,85	3,08	20,51	626
41340000		0,964	0,52	25,77	34,30	4.874
41380000		0,977	0,38	4,28	82,52	553
41440005		0,979	0,27	4,54	51,23	243
41410000	RHH02	0,998	0,88	17,52	13,65	6.558
41600000		0,999	0,92	6,22	7,05	8.086
41650002		0,997	0,96	10,51	5,97	10.712
41685000	RHH03	0,996	-2,54	16,93	367,37	547
41780002		0,999	0,79	21,80	34,10	3.996
41818000	RHH04	0,998	0,91	17,60	9,16	16.722
41890000		0,997	0,81	10,38	20,08	1.435
41940000	RHH05	0,997	0,07	35,92	84,02	2.023
41990000		0,998	0,94	31,23	0,64	26.553

Os valores do coeficiente de determinação (R²) obtidos foram satisfatórios, com dezessete das dezoito estações tendo explicadas mais de 92 % da variância pelos modelos. Verificou-se que locais com maiores áreas de drenagem tiveram melhores resultados porque há maior variabilidade de características que influenciam no escoamento superficial, representado pelas curvas de permanência de vazões.

O KGE é amplamente utilizado por conter conjuntamente medidas de correlação, viés e variabilidade (Ortega, Mudarra e Hartmann, 2022), razão pela qual ele apresentou maior sensibilidade que o coeficiente de determinação.

A média da raiz quadrado do erro variou entre 2,31 e 35,92, cabendo destacar a grande oscilação de resultados entre as estações de uma mesma RHH. Vale também salientar a influência da área de drenagem nos resultados obtidos nas RHH, onde os maiores valores de RMSE foram verificados nas estações de maior área de drenagem porque as vazões mais elevadas aumentam de forma mais acentuada essa métrica, que está mais relacionada à variância dos erros em torno do valor real.

Por fim, quanto à métrica EPMA, os valores estiveram entre 0,64 % (41990000) e 367,37 % (41685000), com melhores desempenhos nas estações que possuem maiores áreas de drenagem. A exemplo, observa-se que para a estação 41685000, cuja área de drenagem é de 547 km², conforme corroborado nos gráficos apresentados no APÊNDICE B – Curvas de Permanência de Longo Termo (CPLT), os valores de vazões simuladas foram muito superiores àqueles observados, condição a qual pode ser associada a superestimativa da vazão média, utilizada como fator de adimensionalização, tal condição não é refletida nas estações de maiores áreas, como a 41890000 e 41990000.

Observa-se que os resultados foram, em geral, homogêneos em uma mesma região, exceto nas RHH01 e RHH03. A série de vazões observadas e simuladas da estação 41151000 (localizada na RHH 01) está representada na Figura 22. Os gráficos das demais estações está no APÊNDICE B – Curvas de Permanência de Longo Termo (CPLT).

Costa e Fernandes (2021), no estudo de regionalização das CPs em bacias vizinhas a do rio das Velhas, dos rios Pará e Paraopebas, obtiveram resultados satisfatórios com o método de *index flow*. No estudo supracitado as métricas de desempenho também indicaram um nível razoável de concordância entre os dados empíricos e simulados, com coeficientes de determinação, em geral, superiores a 0,98 e valores de RMSE relativamente baixos.

De maneira geral, observa-se que o método em questão apresentou um bom desempenho para a regionalização das vazões diárias, ainda que de maneira geral os dados tenham sido superestimados em algumas das estações, como apresentado na Figura 22 para a estação 41151000, e no APÊNDICE B para as estações 41199998, 41440005, 41940000 e 41685000. Vale salientar que os valores mais elevados de EPMA foram verificados nas estações supracitas.

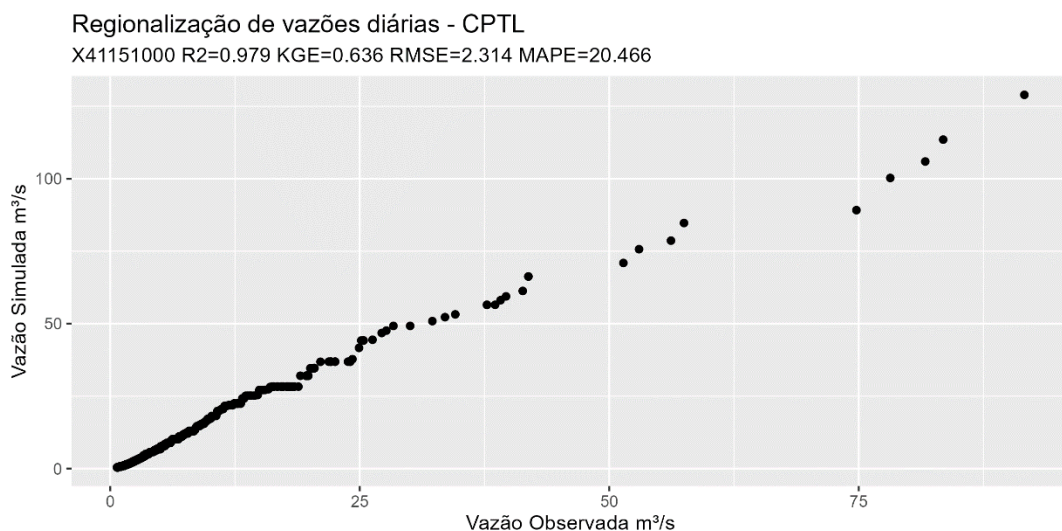
Ademais, observam-se os ótimos ajustes obtidos nas estações 41650002 e 41600000. Para as demais estações destaca-se a baixa aderência dos resultados de maiores vazões, associadas ao trecho superior das CPs. Zhang *et al.* (2015) utilizou as CP para regionalização das vazões diárias em uma bacia na região da Austrália, também

verificou um menor desempenho da regionalização por CP na cauda superior das CPs, porção associada a passagem de cheias.

Costa e Fernandes (2021) também observaram grandes desvios dos registros observados, em termos relativos, na cauda inferior das CPs, com erros superiores a 25 % nas permanências superiores a 90 %.

Ainda foi verificado por Costa e Fernandes (2021) a forte influência da hierarquia fluvial nos resultados por ele obtidos, uma vez que nas estações não situadas nas calhas principais os resultados foram menos satisfatórios. Neste trabalho não foram verificadas grandes distinções entre os resultados verificados para as estações de monitoramento situadas na calha principal ou em afluentes da bacia.

Figura 22 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41151000 – RHH01



6.3.4 Regionalização das Curvas de Permanência Anuais

De maneira similar ao estudo de regionalização através da CPLT, foi estimativa a equação de regressão da Vazão Média Anual através do estudo de correlação entre as variáveis físicas e o valor médio de vazão observado no ano de interesse. Os resultados obtidos no estudo de correlação são apresentados no Apêndice C.

De maneira similar à matriz de correlações obtida no período completo de dados, observa-se o maior coeficiente de determinação entre as vazões médias anuais e a

área de drenagem (entre 0,96 e 0,99) e o comprimento do rio principal. Como há alta correlação entre o comprimento e a área de drenagem, utilizou-se apenas a área.

As regressões finais obtidas estão apresentadas nas equações 23 a 42, destaca-se que em todas as regressões o valor encontrado para o R^2 foi muito satisfatório, em geral superior a 0,98. Os gráficos de ajuste das equações de regressão são apresentados nas Figuras do

APÊNDICE C – Curvas de Permanência Anuais (CPA).

Os valores médios de vazão anual em cada uma das estações são apresentados no

APÊNDICE C – Curvas de Permanência Anuais (CPA), observa-se que em geral as vazões médias variaram muito anualmente nas estações, destacando-se os valores observados para a estação 41650002, onde o valor máximo de vazão média foi igual a 4,97 m³/s no ano de 1997, enquanto o valor mínimo foi igual a 0,60 m³/s no ano de 2014.

Vale salientar que, de acordo com Tucci (2002), as principais alterações dos valores de vazão média em um rio se devem a duas condições: a primeira a alteração do uso do solo na bacia, com o aumento ou decréscimo de áreas vegetadas, e uma segunda referente a modificações no sistema de fluxo da bacia, como por exemplo pela construção de reservatórios. Segundo o autor, as alterações de uso e ocupação do solo na bacia, as quais podem ser classificadas quanto ao tipo de mudança como: desmatamento ou reflorestamento, alteração de superfície como pela urbanização e alterações como queimadas, levam a correlações como o aumento das vazões em função da redução da cobertura vegetal, aumento do grau de impermeabilização e redução da evapotranspiração na bacia. As alterações de escoamento podem ser descritas da seguinte forma: construção de reservatórios implicando no aumento da massa líquida e consequente aumento da evaporação, e alterações de drenagem, com aumento de cursos d'água e consequente redução de evaporação.

Conforme indicado no item 6.1.4, na bacia hidrográfica do rio das velhas as alterações de uso e ocupação do solo no período de estudo se deram principalmente na área do alto/médio curso da bacia, onde está situada a região metropolitana de Minas Gerais, local onde é perceptível o aumento de áreas urbanizadas.

$Q_{m1995} = 0,059 * A^{0,806} \quad r^2 = 0,984$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	23
$Q_{m1996} = 0,086 * A^{0,794} \quad r^2 = 0,982$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	24
$Q_{m1997} = 0,073 * A^{0,853} \quad r^2 = 0,994$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	25
$Q_{m1998} = 0,053 * A^{0,830} \quad r^2 = 0,992$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	26
$Q_{m1999} = 0,031 * A^{0,871} \quad r^2 = 0,985$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	27
$Q_{m2000} = 0,046 * A^{0,859} \quad r^2 = 0,990$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	28
$Q_{m2001} = 0,041 * A^{0,823} \quad r^2 = 0,985$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	29
$Q_{m2002} = 0,069 * A^{0,818} \quad r^2 = 0,990$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	30
$Q_{m2003} = 0,142 * A^{0,741} \quad r^2 = 0,976$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	31

$Q_{m2004} = 0,075 * A^{0,808} \quad r^2 = 0,991$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	32
$Q_{m2005} = 0,039 * A^{0,879} \quad r^2 = 0,985$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	33
$Q_{m2006} = 0,050 * A^{0,836} \quad r^2 = 0,986$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	34
$Q_{m2007} = 0,020 * A^{0,959} \quad r^2 = 0,986$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	35
$Q_{m2008} = 0,079 * A^{0,766} \quad r^2 = 0,990$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	36
$Q_{m2009} = 0,093 * A^{0,802} \quad r^2 = 0,993$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	37
$Q_{m2010} = 0,105 * A^{0,765} \quad r^2 = 0,984$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	38
$Q_{m2011} = 0,079 * A^{0,802} \quad r^2 = 0,987$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	39
$Q_{m2012} = 0,091 * A^{0,822} \quad r^2 = 0,985$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	40
$Q_{m2013} = 0,047 * A^{0,811} \quad r^2 = 0,983$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	41
$Q_{m2014} = 0,015 * A^{0,921} \quad r^2 = 0,988$	$175,0 \leq A \text{ (km}^2\text{)} < 26.553,00$	42

Os resultados das métricas obtidos para o método de regionalização das vazões diárias através do método das CPA, são apresentados na Tabela 11. Os valores obtidos por ano e por estação são apresentados no

APÊNDICE C – Curvas de Permanência Anuais (CPA). Vale destacar que no método foram utilizados como fator de adimensionalização a vazão média anual.

Tabela 11 – Métricas de Desempenho de Regionalização CPA

Estação Fluviométrica	RHH	R ²	KGE	RMSE	EPMA (%)	Área (Km ²)
41151000	RHH01	0,802	0,57	3,30	36,29	175
41180000		0,779	0,79	4,67	30,71	330
41199998		0,943	0,46	13,11	28,93	1.698
41250000		0,939	0,50	6,71	56,66	676
41260000		0,966	0,65	17,15	27,28	3.727
41300000		0,925	0,71	5,48	39,41	626
41340000		0,943	0,68	25,20	26,65	4.874
41380000		0,895	0,20	6,57	109,38	553
41440005		0,862	0,12	5,23	79,52	243
41410000	RHH02	0,990	0,89	20,34	12,01	6.558
41600000		0,991	0,95	10,86	7,49	8.086
41650002		0,985	0,95	18,22	9,77	10.712
41685000	RHH03	0,745	-2,57	17,40	470,70	547
41780002		0,953	0,79	32,56	28,19	3.996
41818000	RHH04	0,991	0,90	27,02	9,46	16.722
41890000		0,803	0,78	21,36	43,38	1.435
41940000	RHH05	0,764	0,06	40,01	114,48	2.023
41990000		0,994	0,96	33,96	2,33	26.553

Comparativamente ao primeiro método de regionalização das CPs, os valores de R² foram, em geral, inferiores, destacando-se a redução de desempenho desta métrica na estação 41940000, condição a qual também é refletida no resultado de KGE desta estação. Diferentemente, na estação 41151000 houve um decréscimo das métricas R², RMSE e EPMA, enquanto observou-se uma ligeira melhoria da métrica KGE.

Vale salientar que, em geral, os valores de KGE foram satisfatórios, prevalecendo valores superiores a 0,50, e menores valores entre -2,57 e 0,46, indicando que essa métrica apresentou uma correlação satisfatória entre as amostras simuladas e observadas.

As médias dos erros percentuais absolutos variaram entre 3,30 e 40,01, sem grande correlação dos valores obtidos com o padrão de resultados verificado para as demais métricas de desempenho. Cabe salientar que, o método em questão apresentou um pior desempenho para as vazões mais extremas.

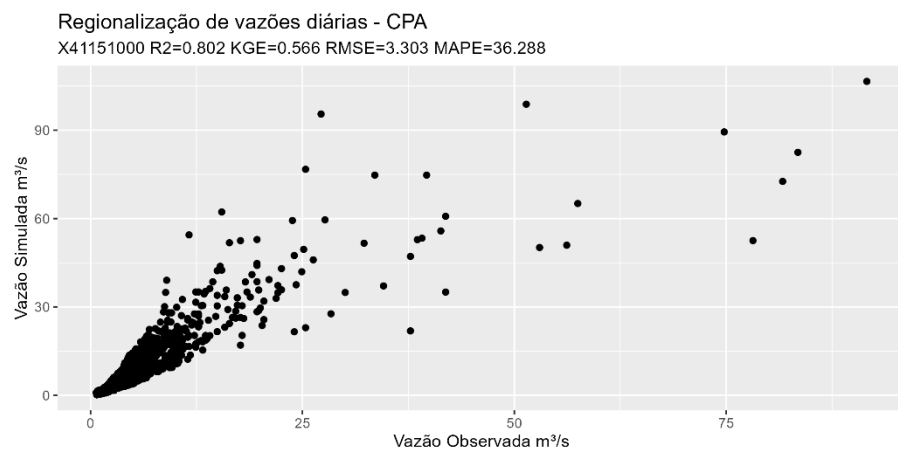
Por fim, quanto à métrica EPMA, as maiores oscilações de resultado foram verificadas nas estações da RHH03, entre 28,19 % (41780002) e 470,70 % (41685000).

Na Figura 23 é apresentada, de forma a ilustrar os resultados obtidos, o da série observada e simulada da estação 41151000. Os demais gráficos apresentados nas Figuras do

APÊNDICE C – Curvas de Permanência Anuais (CPA).

Em geral, as métricas de desempenho foram ligeiramente inferiores às verificadas ao primeiro método de regionalização da CP. Cabe enfatizar que os melhores resultados de desempenhos foram obtidos nas RHH02, RHH03, RHH04 e RHH05, condição a qual pode ser associada ao menor número de curvas de permanência compondo as curvas médias das regiões, uma vez que na RHH01 foram considerados dados de um número de estações muito superior ao das demais regiões.

Figura 23 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41151000 – RHH01



Considerando os resultados obtidos em cada um dos anos regionalizados, os quais são apresentados no

APÊNDICE C – Curvas de Permanência Anuais (CPA), observa-se que para as estações para algumas estações a variabilidade das métricas foram mais expressivas entre os anos.

A exemplo, na estação 41150000 o melhor resultado de R^2 foi obtido no ano de 2011, enquanto o pior no ano de 2002. Para a métrica KGE os resultados oscilaram entre - 0,44 (2010) e 0,84 (2007), entre 7,29 (2003) e 0,67 (2014) para o RMSE, enquanto para o EPMA os valores estiveram entre 17,36 (1997) e 91,98 (2010). Os gráficos de vazões observadas e simuladas para a estação 41150000 nos anos de 1997, 2003, 2007, 2010 e 2014 são apresentados nas figuras a seguir.

Em geral observa-se que todas as vazões foram muito superestimada no ano de 2010, condição similar a que é verificada no ano de 2003. Em geral observa-se que as maiores vazões foram pior ajustadas em todos os anos na estação 41150000.

Como supracitado, resultados similares foram observados nas demais estações, sendo eles aderentes à condição observada por Smakhtin *et al.* (1997), em que, no geral, as curvas calculadas apresentaram uma elevada concordância entre as CPs calculadas nas estações no trecho médio, com distorções nos trechos superior e inferior.

Costa e Fernandes (2021) também observaram no estudo realizado que os modelos regionais por eles utilizados também não foram capazes de descrever as CPAs de baixo percentil, verificando-se uma tendência de subestimação em praticamente todas as durações. Ademais, no estudo supracitado, observa-se a grande aderência das CPAs na obtenção das vazões associadas as permanências médias, até o percentil 95, na maioria dos sites, sugerindo que, pelo menos para anos típicos e chuvosos.

Figura 24 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41151000 (RHH01) – 1997

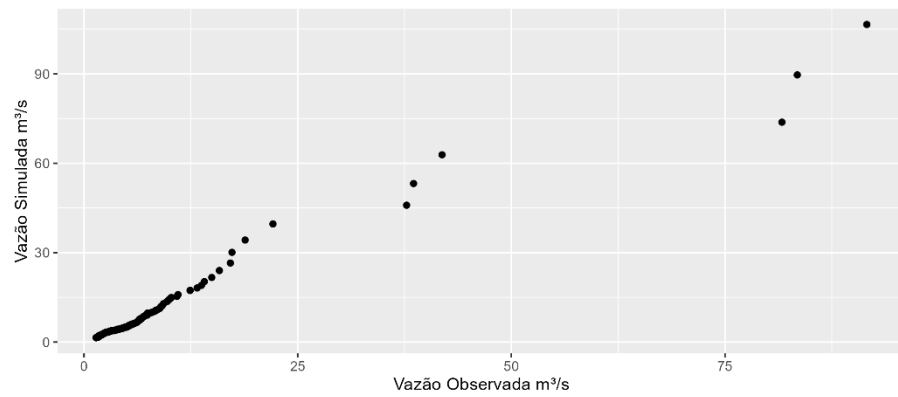


Figura 25 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41151000 (RHH01) – 2003

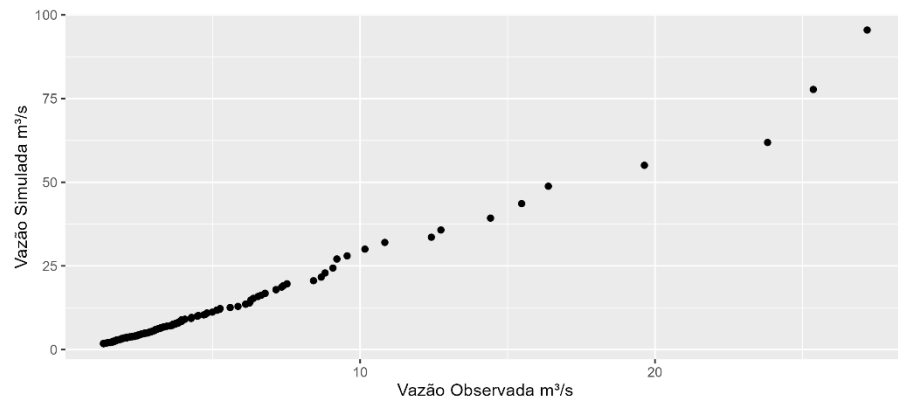


Figura 26 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41151000 (RHH01) – 2007

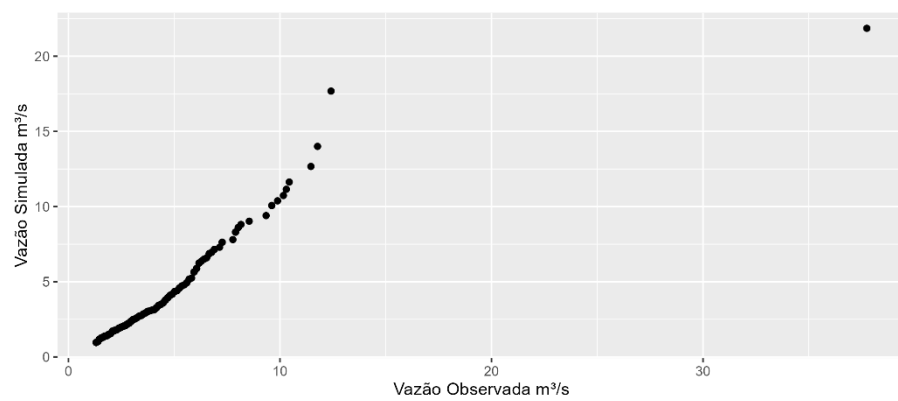


Figura 27 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41151000 (RHH01) – 2010

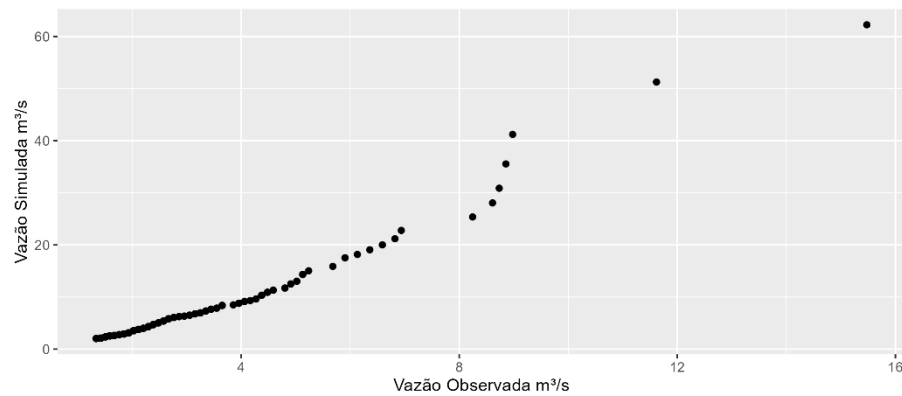
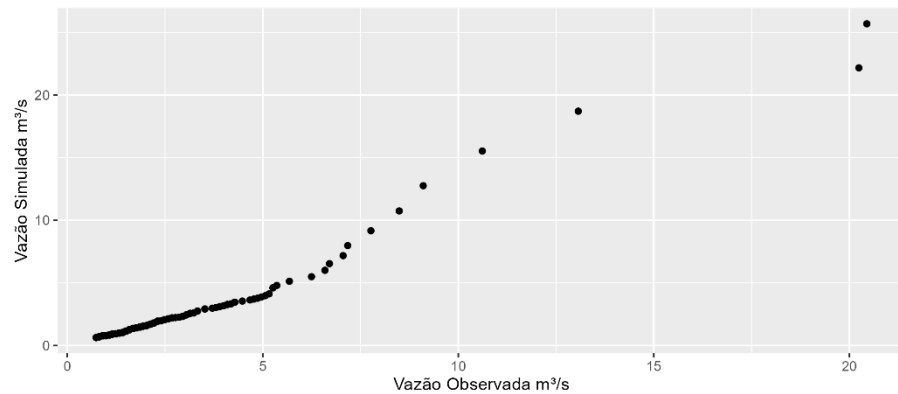


Figura 28 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41151000 (RHH01) – 2014



6.3.5 Regionalização das Curvas de Permanência – Ajuste de um Modelo de Distribuição

Para o ajuste dos modelos de distribuição, foram obtidos os momentos amostrais de cada série de dados, os quais são apresentados na Tabela 12, e com base nos mesmos foram ajustados diferentes modelos de distribuição a cada uma das séries de dados.

Tabela 12 – Momentos Amostrais – Séries de Dados 1994 a 2014

Estações	l_1	l_2	t_3	t_4	t_5
41151000	2,91	1,06	0,53	0,41	0,30
41180000	7,08	2,26	0,55	0,42	0,32
41199998	28,84	9,76	0,51	0,36	0,25
41250000	8,16	4,19	0,60	0,45	0,34
41260000	59,39	23,76	0,54	0,37	0,25
41300000	8,90	4,62	0,56	0,40	0,30
41340000	74,99	31,49	0,53	0,35	0,24
41380000	5,95	3,44	0,68	0,53	0,41
41410000	94,05	39,90	0,54	0,36	0,24
41440005	2,82	1,23	0,53	0,39	0,26
41600000	101,52	41,67	0,52	0,34	0,21
41650002	119,67	53,57	0,52	0,32	0,19
41685000	2,32	1,58	0,60	0,37	0,24
41780002	68,07	42,24	0,60	0,38	0,24
41818000	183,14	88,02	0,52	0,29	0,17
41890000	19,52	14,13	0,65	0,40	0,25
41940000	15,98	11,46	0,64	0,42	0,29
41990000	270,77	143,42	0,53	0,31	0,20

As distribuições de Wakeby, GAMA, GLO, GEV e GNO foram ajustadas às curvas de permanência de cada uma das estações eleitas para o estudo na bacia do Rio das Velhas, considerando o período completo de aquisição de dados (entre 1994 e 2014). Na Tabela 23, apresentada no APÊNDICE D, são apresentadas as métricas de desempenho do ajuste realizado à cada um dos modelos supracitados.

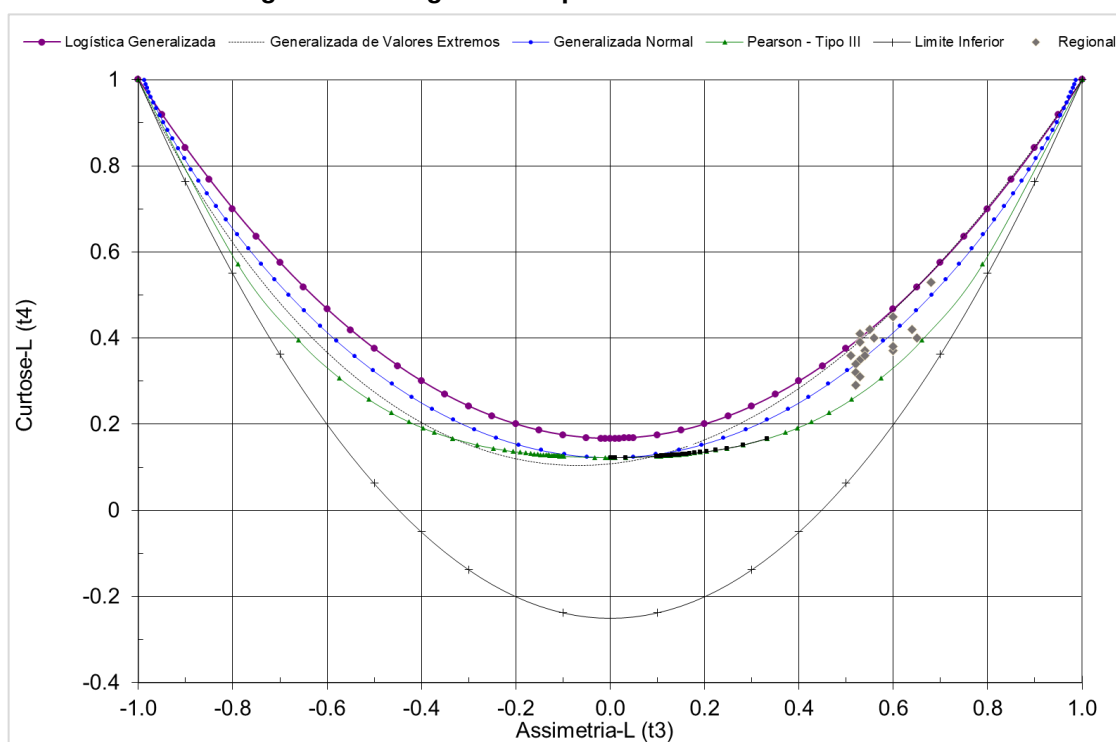
De maneira similar à condição verificada entre os momentos-L obtidos nas estações de estudo, BOOKER e SNELDER (2012) obtiveram uma grande correlação entre os momentos-L calculados no estudo de regionalização realizado. Em geral, quando os dados se adequarem a diversas funções de probabilidade pode ser avaliada comparando os padrões empíricos entre os momentos-L e as relações teóricas definidas pelas funções de distribuição de probabilidade (Booker e Snelder, 2012; Hosking e Wallis, 1997).

Na Figura 29 é apresentado o diagrama de quocientes de momentos-L. Vale enfatizar que, os diagramas de momentos-L, construídos a partir das medidas de assimetria-L e Curtose-L dos modelos com os valores teóricos correspondentes. No diagrama, a distância entre um ponto da amostra e uma curva ou ponto de uma certa distribuição pode ser tomada como uma medida que indica a qualidade do ajuste (quanto menor a distância, melhor o ajuste), entretanto, observa-se que no caso em questão não foram obtidos bons ajustes.

As funções de distribuição de probabilidade, em geral, são definidas por relações entre os momentos-L ou por transformações logarítmicas dos dados, sendo assim, quando se observa uma pequena variação nos valores de curtose-L e maiores variações na assimetria-L, em geral é indicativo de um bom ajuste da distribuição de Pearson tipo III, enquanto quando são observadas maiores variações ou uma maior curvatura, em geral são obtidos bons ajustes a funções tais como GEV e log Pearson tipo III, respetivamente. (Booker e Snelder, 2012; Laio *et al.*, 2009, Ganora *et al.*, 2009).

Os gráficos dos ajustes dos modelos de distribuição às séries de dados de cada estação são apresentados no APÊNDICE D – Modelo de Distribuição . Das distribuições testadas para as séries de dados diárias das estações de monitoramento fluviométrico da bacia do Rio das Velhas, a que apresentou melhor ajuste às curvas de permanência traçadas foi a distribuição generalizada Normal de três parâmetros (GNO).

Figura 29 – Diagrama de quocientes de momentos-L



Com base na verificação do modelo de melhor ajuste, foram avaliadas as correlações entre as variáveis físicas e climatológicas da bacia e os parâmetros da distribuição escolhida, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 13. Com base na avaliação de correlação foram testados ajuste lineares e exponenciais

correlacionando as variáveis mais aderentes e os parâmetros em questão, conforme apresentado nas equações a seguir, as variáveis mais aderentes aos parâmetros foram àquelas relacionadas às características climáticas da região.

Tabela 13 – Correlação – Variáveis Físicas e Climáticas e Parâmetros GNO

	A	L	I	Dd	P	ET	P – ET	QMédia	X1	Alfa	β
A (km²)	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L (km)	0,97	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I (m/km)	-0,51	-0,57	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Dd (Junções/km)	-0,17	-0,13	0,26	1,00	-	-	-	-	-	-	-
P (m)	-0,42	-0,45	0,45	0,57	1,00	-	-	-	-	-	-
ET (mm/ano)	0,42	0,36	-0,63	-0,37	-0,40	1,00	-	-	-	-	-
P – ET (mm/ano)	-0,45	-0,48	0,51	0,59	0,99	-0,52	1,00	-	-	-	-
QMédia	0,99	0,97	-0,54	-0,11	-0,39	0,41	-0,42	1,00	-	-	-
X1	0,98	0,98	-0,55	-0,06	-0,36	0,37	-0,39	0,99	1,00	-	-
Alfa	1,00	0,96	-0,51	-0,15	-0,40	0,43	-0,44	0,99	0,98	1,00	-
B	0,41	0,46	0,07	0,32	0,17	-0,32	0,20	0,45	0,51	0,41	1,00

$$X (\text{Posição}) = -1,8801 + 0,0093(P - ET) + 0,5943 (A) \quad r^2 = 0,989 \quad (43)$$

$$\alpha (\text{Escala}) = 1,2029 + 0,0054 (A) \quad r^2 = 0,991 \quad (44)$$

$$\beta (\text{Forma}) = -1,411 + 0,0004 (P - ET) + 0,0013 (Qm) \quad r^2 = 0,397 \quad (45)$$

Com base nas equações apresentadas para os parâmetros da distribuição GNO, e sabidas as permanências nas estações de interesse, foram obtidas as curvas/vazões associadas as permanências de cada dia da série estudada. Os resultados das métricas obtidos para o método de regionalização da curva de permanência através do ajuste do ajuste da distribuição GNO, são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Métricas de desempenho de regionalização GNO

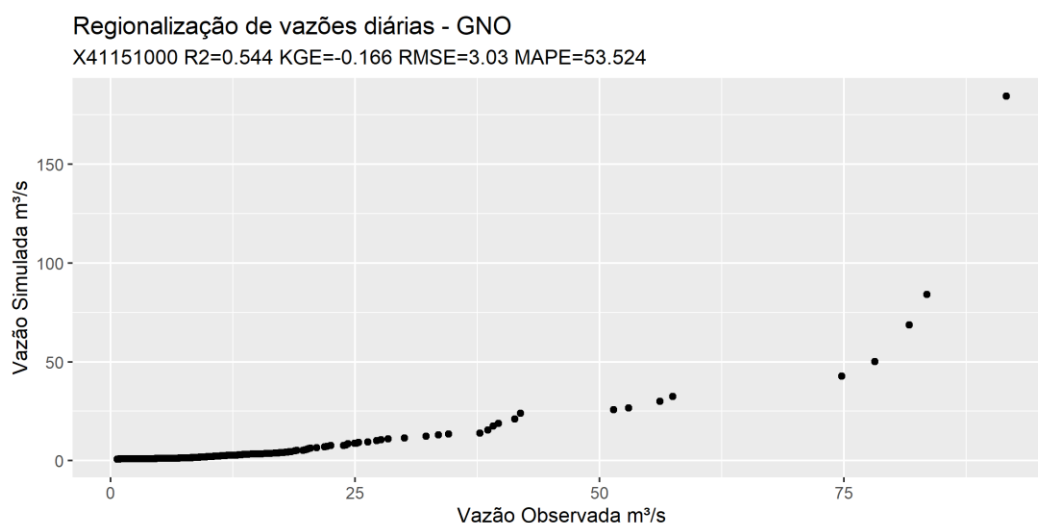
Estação Fluviométrica	R²	KGE	RMSE	EPMA (%)
41151000	0,54	-0,17	3,03	53,52
41180000	0,95	0,50	5,29	22,48
41199998	0,60	0,41	24,85	44,23
41250000	0,60	-0,30	11,85	70,71
41260000	0,72	0,36	49,48	44,47
41300000	0,71	0,30	10,61	48,30
41340000	0,67	0,34	68,82	45,59
41380000	0,48	0,17	12,27	53,71
41440005	0,55	0,31	95,80	49,20
41410000	0,76	0,39	2,83	48,69
41600000	0,58	0,02	93,95	55,08
41650002	0,42	-0,46	131,00	60,53
41685000	0,53	-2,24	5,90	894,71
41780002	0,28	0,19	109,99	64,04
41818000	0,42	-0,24	200,49	58,89
41890000	0,40	0,16	36,71	81,27
41940000	0,31	-9,73	31,79	140,46
41990000	0,62	0,04	323,61	65,99

Em geral, os resultados obtidos foram insatisfatórios e inferiores aos demais métodos utilizados. O coeficiente de determinação, em geral, se manteve próximo a 0,60, KGE < 0 e EPMA > 50 %.

Em geral, os valores de R² oscilaram muito, em menores valores nas estações 41780002 e 41940000, cujos valores foram próximos a 0,30, a estação 41180000, situada na região de cabeceira da bacia, foi àquela cujos valores foram melhores ajustados pela metodologia, com valor de r² igual a 0,95, KGE igual a 0,50, RMSE igual a 5,29 e EPMA de 22,48 %.

Quanto à métrica EPMA/MAPE, os valores oscilaram entre 894,71 % e 22,48 %, indicando a grande discrepância entre os dados observados e simulados. Por fim, quanto aos valores obtidos para o RMSE, a baixa aderência entre os dados modelados e os observados é mais uma vez evidenciada, com valor máximo igual a 323,61 .

Na Figura 30 é apresentado o gráfico de evolução da série simulada e da observada para a estação 41151000. Para as demais estações, os gráficos são apresentados no APÊNDICE D – Modelo de Distribuição .

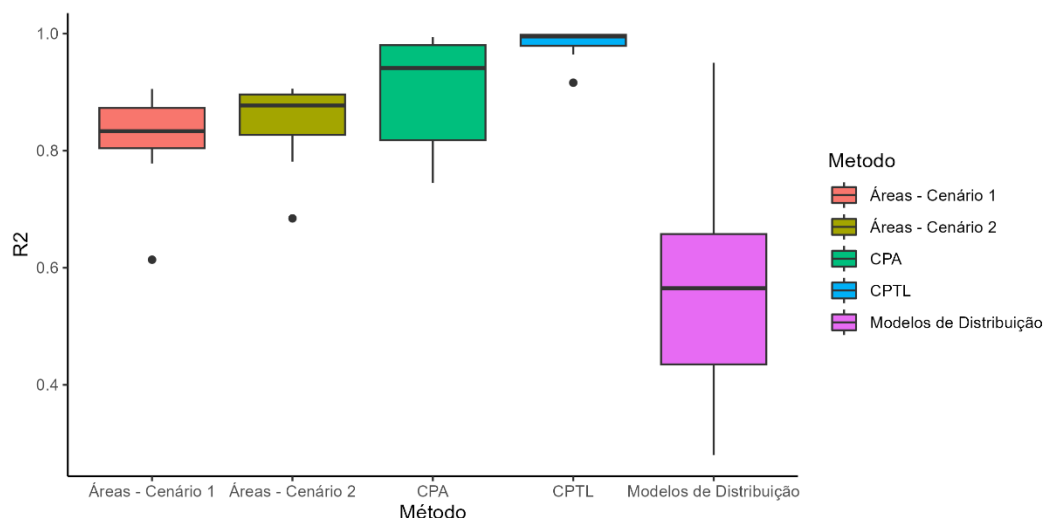
Figura 30 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41151000

Vale enfatizar que, neste método, as vazões, em geral, foram subestimadas, e que tal subestimativa, na perspectiva da avaliação conjunta entre qualidade e quantidade da água pode implicar prejuízos, como no estudo de cargas e potencial de depuração.

6.3.6 Discussão dos Resultados

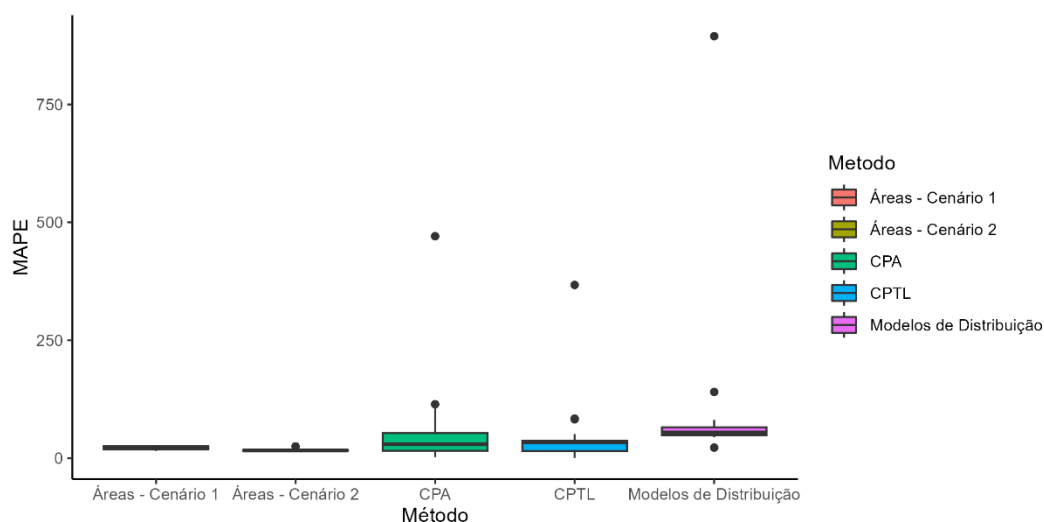
Neste item são avaliados e discutidos os resultados obtidos para os modelos de regionalização de vazões estudados neste trabalho. Vale salientar que o método de regionalização por proporção entre as áreas de drenagem, em ambos os cenários testados, foi somente aplicado nas estações situadas na calha principal do rio das Velhas.

Na Figura 31 são apresentados os box-plots obtidos com os valores de R² verificados em cada um dos métodos utilizados. Observa-se que para esta métrica a que apresentou maior variabilidade de resultados, implicando em um valor mediano de R² próximo a 0,60, foi a regionalização através dos modelos de distribuição. Costa *et al.* (2020) aplicaram a regionalização de curvas de permanência de longo termo em rios intermitentes nos estados do Ceará e Piauí e obtiveram valores de R² muito dispersos na aplicação da distribuição estendida de Burr XII.

Figura 31 – Box-plot – R²

Para a média do erro percentual absoluto (EPMA), Figura 32, o gráfico de box-plot revela resultados mais elevados no método de regionalização por modelo de distribuição. Para esta métrica os resultados verificados para a regionalização da CPA e da CPLT apresentaram comportamento muito similar, ainda que para as CPAs os resultados de EPMA tenham sido ligeiramente mais elevados, condição a qual é justificada pela variabilidade das vazões médias e das curvas de permanência, além da limitação dos métodos em modelos o trecho inferior das CPs. Para as regionalizações por proporções por área esta métrica não apresentou variação significativa.

Figura 32 – Box-plot – MAPE



Para o RMSE e para o KGE, Figura 33 e Figura 34 respectivamente, de maneira similar as demais métricas de desempenho a pior situação foi observada nos modelos de distribuição, e um comportamento similar foi observado entre os cenários de regionalização por proporção de áreas, assim como para as CPAs e CPLT.

Figura 33 – Box-plot – RMSE

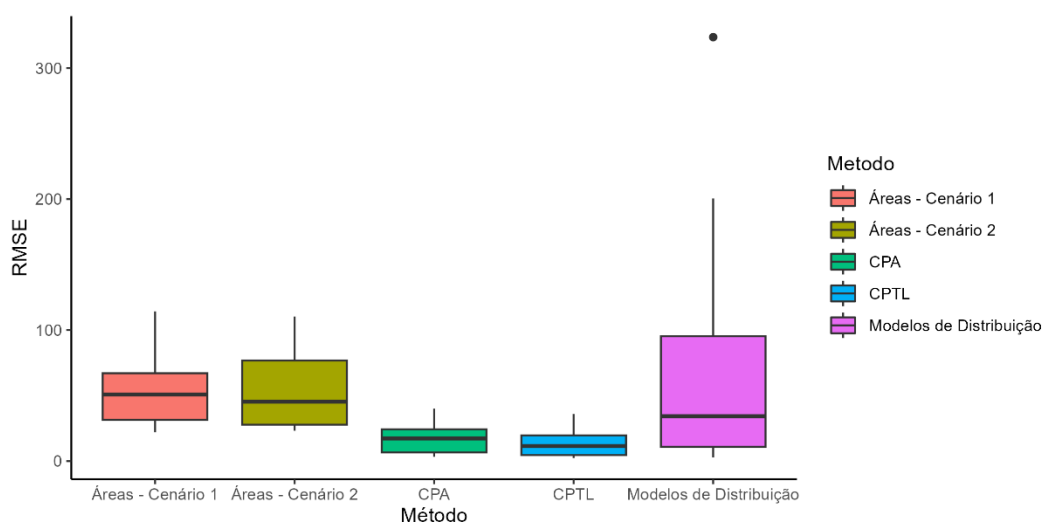
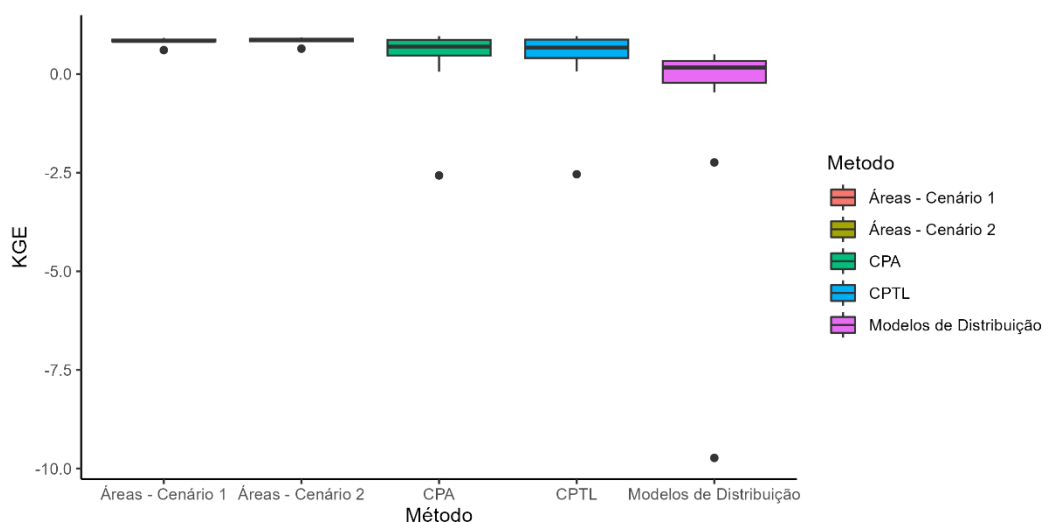


Figura 34 – Box-plot – KGE



Conforme gráficos de series observadas e simuladas apresentadas nos APÊNDICES B, C e D, observa-se que os métodos de regionalização das CPLT e CPA foram muito aderentes aos baixos e médios valores ajustados, tendo um pior desempenho em ambos os cenários nas vazões superiores. Tais resultados são aderentes aqueles obtidos no trabalho de Smakhtin *et al.* (1997).

Os resultados obtidos para o modelo de regionalização pelo modelo GNO se mostraram em geral pouco satisfatórios. Neste trabalho os parâmetros da distribuição foram obtidos a partir de ajustes lineares. Costa e Fernandes (2021) indicam que, em comparação com as equações de regressão linear tradicionais, a utilização de equações polinomiais evolucionárias, ainda que mais complexas, podem ser mais eficazes, uma vez que em estudo de caso realizado o método em questão foi capaz de explicar mais de 90 % da variabilidade dos parâmetros, o que não pode ser observado com a utilização de modelos lineares.

6.4 Regionalização das Vazões Diárias nas Estações de Qualidade das Águas

As cargas de contaminação, obtidas pela multiplicação de concentrações e vazões medidas no mesmo local, apresentam características e dinâmica complexas, por vezes, relativas às condições pluviométricas e climatológicas da região em que são geradas, podendo ocorrer a afluência de cargas nos cursos de água tanto em períodos de baixa pluviometria quanto na ocorrência de eventos chuvosos, cujas distribuições de cargas são relativas às características das precipitações (intensidade, duração e frequência das chuvas), se concentram majoritariamente na fase inicial do evento de chuva em razão de efeito de lavagem (*first flush*) (SILVA, 2009).

Neste sentido, Righetto *et al.* 2017 apontam que frente aos deflúvios superficiais urbanos, os quais influenciam diretamente a qualidade dos corpos hídricos, é de suma relevância a observação da variação da qualidade das águas escoadas superficialmente ao longo do tempo, associando a esta qualidade observada a ocorrência de eventos chuvosos, e a possibilidade de verificação de cargas mais elevadas de poluentes nas águas escoadas no início do período chuvoso, uma vez que tal verificação pode ser considerada na perspectiva da gestão pública.

Em alinhamento à demanda de estudo integrado da quantidade e da qualidade das águas, após a seleção do método mais adequado para obtenção de vazões, foram geradas séries de vazões diárias no período de 2012 a 2020 nos pontos de coleta de amostras para análise de Qualidade da Água da rede do IGAM no Rio das Velhas, séries que serão avaliadas em trabalhos que serão desenvolvidos posteriormente no intuito de avaliar a variação da qualidade das águas escoadas superficialmente ao longo do tempo frente a ocorrência de eventos chuvosos.

Cabe enfatizar que, conforme apresentado nos itens anteriores, dentre os métodos testados para a regionalização de vazões diárias na bacia do Rio das Velhas, o mais aderente foi a regionalização a partir das curvas de permanência de longo termo.

Para o período alvo de estudo nas estações de qualidade das águas, entre os anos de 2012 e 2020, a série de dados não está completa para todas as estações fluviométricas com um elevado número de falhas nas estações, conforme ilustrado na Figura 35.

Para o período de estudos dos dados de qualidade das águas, entre out/2012 e set/2020, há um substancial número de falhas, sobretudo no último ano hidrológico (Figura 35). Tucci (2002) indica que para o preenchimento de falhas nas séries históricas, devem existir estações de monitoramento com séries completas que permitam que as séries incompletas sejam preenchidas. O mesmo autor indica que a seleção do tamanho da amostra para preenchimento deve ser cautelosa, uma vez que, para ao preenchimento por regressão existe um limite, que se superado causará mais prejuízos do que benefícios, devido a inserção de maiores incertezas.

A escolha da estação fluviométrica utilizada para o preenchimento de dados em outra, segundo Tucci (2002), deve ser feita analisando-se os coeficientes de correlação linear entre as séries de dados e se as estações em questão possuem correlação hidrológica.

Desta forma, para o preenchimento de falhas, foram utilizados quatro métodos, a fim de verificar o de melhor aderência, considerando os valores de R^2 . As metodologias utilizadas consistiram em:

- i) utilização da série completa para geração de uma equação de regressão entre estação de referência (ER) com dados completos e estação com dados faltantes (EF);
- ii) utilização da série completa filtrada por meses para obtenção de uma equação de regressão entre EF e ER;
- iii) utilização de séries parciais entre 2012-2016 e 2017 a 2020 e obtenção de equações de regressão mensais; e
- iv) utilização de séries parciais entre 2012-2016 e 2017 a 2020 filtradas mensalmente da ER filtrada no intervalo máximo de ocorrência de vazões na ocasião de falhas na EF e obtenção de equações de regressão mensais.

Tal metodologia, de preenchimento dos dados considerados apenas os dados obtidos na faixa de valor da série ausente, é esquematizada na Figura 35. Tais métodos de preenchimento de falhas foram executados através de algoritmos no *software* RStudio, e os resultados obtidos estão sintetizados no APÊNDICE E.

Pela baixa disponibilidades de estações com dados completos durante todo o período, conforme ilustrado na Figura 35, observa-se a elevada utilização da estação 41250000 como estação de referência nos dois primeiros métodos. Dos resultados obtidos para o método (i), nota-se que para as estações 41180000 e 41990000 os valores de R^2 foram inferiores a 0,5 em 3 dos seis meses com falhas, entre janeiro e maio, enquanto para a estação 41410000 as baixas correlações entre as séries foram verificadas em seis dos meses ajustados, estando eles concentrados majoritariamente no período de baixa incidência pluviométrica. Para a estação 41890000, cujos ajustes de falhas são necessários para 11 dos 12 meses do ano, foram obtidas baixas aderências em seis meses.

Cabe destacar que das estações supracitadas, cujos valores de aderência às séries ajustadas foram predominantes, três estão situadas em cursos d'água afluentes ao rio das Velhas, nos quais inexistem estações fluviométricas. Ainda, vale mencionar que foram considerados e testados os *delays*/atrasos entre as séries de dados, e que os mesmos não foram significativos a ponto de integrarem a análise de regressão. Quanto aos resultados obtidos para o método (ii), não foram obtidas melhorias significativas.

Os resultados verificados para os métodos nos quais as séries de dados foram divididas em dois períodos, de 2012 a 2016 e de 2017 a 2020, indicaram uma expressiva melhoria de desempenho. Tal melhora se justifica majoritariamente pela alteração das estações de referência, uma vez que tratando as séries de dados de forma distinta um maior número de estações apresentaram séries de dados completas.

Comparativamente aos métodos (iii) e (iv), cujos resultados também são apresentados no APÊNDICE E, observa-se a ligeira melhoria de desempenho do método (iv), no qual as séries da ER são filtradas mensalmente no intervalo máximo de ocorrência de vazões na ocasião de falhas na EF, condição na qual limitam-se as incertezas de ajuste. Desta forma, tal método (iv) foi eleito para o preenchimento de falhas na bacia.

Figura 35 – Disponibilidade de Dados Fluviométricos – Período de 2012- 2020

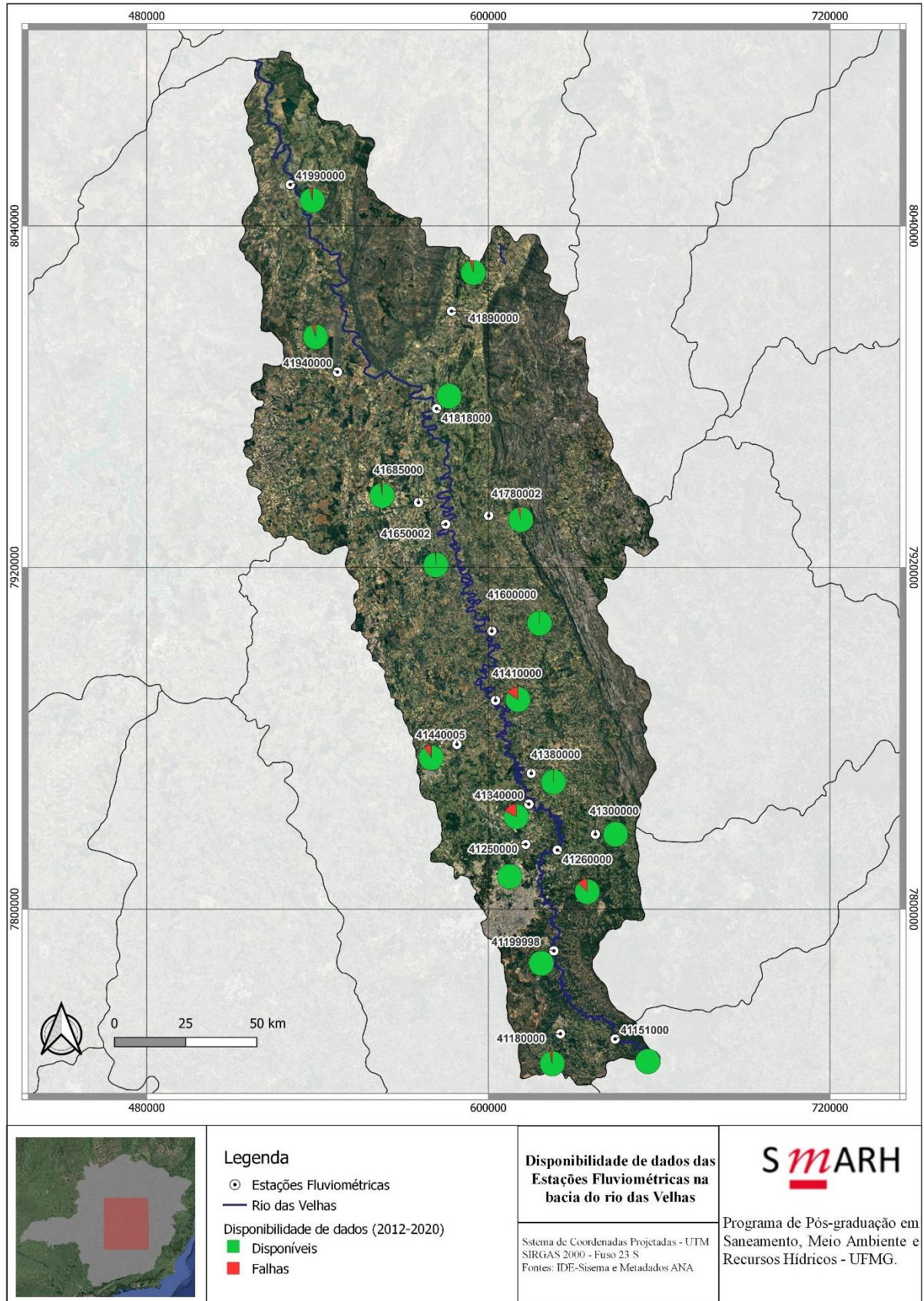
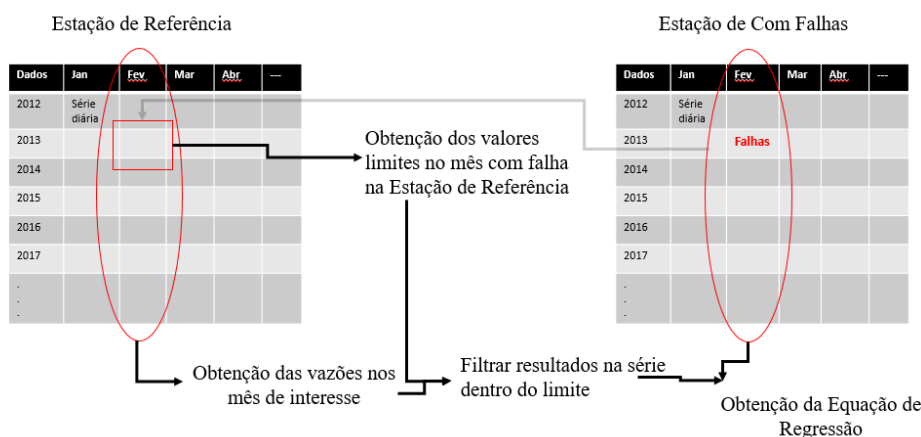


Figura 36 – Simplificação da metodologia de preenchimento de falhas



Sendo assim, em posse das séries completas de dados nas estações fluviométricas, e considerando a proximidade espacial entre as estações fluviométricas e as de qualidade das águas, APÊNDICE A, foram definidas as permanências nas estações de QA, considerando o método 5.2.2. Ainda, tendo em vista a determinação de RHH apresentada no item 6.3.1, e a necessidade da distribuição das estações nas regiões para aplicação do método, o qual foi descrito no item 4.1, as estações de QA foram distribuídas nas regiões homogêneas, conforme indicado na Tabela 15.

Os resultados das vazões geradas para as estações de qualidade das águas são apresentados em planilha excel anexa a este documento (APÊNDICE F).

Tabela 15 – RHH e Estações Fluviométricas de Referência

Estação QA	Área Estação QA (km²)	RHH	ER 01	Área ER 01 (km²)	ER 02	Área ER02 (km²)
BV035	90,4	RHH01	41180000	48,0	-	
BV013	42,9	RHH01	41151000	26,0	-	
BV037	54,6	RHH01	41151000	26,0	-	
AV200	65,6	RHH01	41180000	48,0	-	
AV210	69,0	RHH01	41199998	90,0	-	
BV063	41,9	RHH01	41199998	90,0	-	
BV067	78,6	RHH01	41199998	90,0	-	
BV076	91,2	RHH01	41199998	90,0	-	
BV083	54,2	RHH01	41199998	90,0	-	
BV105	191,0	RHH01	41199998	90,0	-	
BV133	19,0	RHH01	41300000	46,0	-	
SC21	79,5	RHH01	41250000	56,0	-	
SC17	51,1	RHH01	41250000	56,0	-	
BV130	30,9	RHH01	41250000	56,0	-	
BV153	123,0	RHH01	41260000	157,0	41250000	56,0
BV137	24,7	RHH05	41340000	200,0	-	
BV135	151,0	RHH05	41300000	46,0	-	
BV136	72,6	RHH05	41380000	55,0	-	
BV140	175,0	RHH05	41440005	26,2	-	
BV141	29,5	RHH05	41600000	361,0	-	
BV162	208,0	RHH03	41780002	100,0	-	
BV143	943,0	RHH03	41780002	100,0	-	
BV142	1.155,0	RHH06	41650002	474,0	-	
BV150	282,0	RHH06	41650002	474,0	41780002	100,0
BV152	809,0	RHH06	41818000	566,0	-	
BV145	406,0	RHH06	41780002	100,0	-	
BV146	522,0	RHH06	41818000	566,0	-	
BV147	350,0	RHH06	41940000	112,0	-	
BV151	126,0	RHH06	41990000	707,0	-	
BV161	569,0	RHH05	41685000	53,0	-	
SC30	1.197	RHH06	41780002	100,0	-	

7 CONCLUSÕES

Observou-se que o método de proporção por áreas apresentou bons resultados, especialmente em ocasiões em que a razão entre as áreas de drenagem das estações fluviométricas preditoras e previstas seja inferior a 1,30. Também se visualizou a melhoria na qualidade das estimativas ao incorporar a vazão dos tributários como variável independente.

A regionalização de vazões médias apresentou proporção direta com a área, o que é comum em vazões ordinárias, conforme a literatura científica abordada.

No trabalho, foram identificadas cinco regiões hidrologicamente homogêneas. A região localizada mais a montante da bacia apresentou estimativas piores que as demais, possivelmente por conter estações com menores áreas de drenagem.

Desta forma, todos os métodos discutidos neste trabalho se mostraram aplicáveis à bacia de estudo. Contudo, dentro do escopo e recorte metodológico realizado nesta dissertação, observa-se que dos métodos retratados para a estimativa de vazões diárias na bacia do rio das Velhas, o método de regionalização das Curvas de Permanência de Longo Termo se mostrou o método mais aderente. Tal resultado se dá em função da melhoria das métricas de desempenho em todas as estações, destacando-se a melhoria dos resultados obtidos para a métrica de KGE. Isto é, uma reformulação do teste de Nash Sutcliffe, o qual corresponde à um índice de comparação entre os dados observados e estimados em termos da correlação linear, viés e variabilidade das amostras. Quanto aos valores de R^2 e MAPE, as melhorias de desempenho também foram observadas, porém, em menor amplitude.

Diante das conclusões supra, demonstra-se que os objetivos gerais e específicos do projeto de pesquisa foram concluídos com satisfação, pois, tornou-se possível o teste de variados métodos com a obtenção de resultados que permitiram a escolha de um melhor método de regionalização e obtenção das vazões diárias nos pontos de monitoramento de qualidade das águas. Ainda, foi possível investigar quais as variáveis explicativas associadas a geração de escoamento superficial na BH do Rio das Velhas.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Recursos Hídricos**. Disponível em <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em 12 jun. de 2020.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Hidrogeologia dos Ambientes Cársticos da Bacia do Rio São Francisco para a Gestão de Recursos Hídricos, Relatório Final – Volume II – Hidrogeologia**. Elaboração e Execução: Consórcio TPF – Techne. – Brasília: ANA, 2018.

AGRA, Camila de Carvalho. **Metodologia para estimativa de cargas poluentes em bacias urbanas. Estudo de caso : bacia do Riacho do Sapo**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Maceió, 2017.

ALBUQUERQUE, Ytallo Rafaell Teixeira de; ALMEIDA, André Quintão de ; MENDES, Ludmilson Abritta ; CRUZ, Marcus Aurélio Soares. **Regionalização das vazões mínimas, médias e máximas na bacia hidrográfica do rio Itapicuru – BA**. Research, Society and Development, 2020-09-12, Vol.9 (9), p.e898997740. Disponível em: https://capes-primo.ez27.periodicos.capes.gov.br/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_cdi_crossref_primary_10_33448_rsd_v9i9_7740&context=PC&vid=CAPES_V3&lang=pt_BR&search_scope=default_scope&adaptor=primo_central_multiple_fe&tab=default_tab&query=any,contains,regionaliza%C3%A7%C3%A3o%20de%20vaz%C3%A3o&offset=0. Acesso em: 21 maio 2022.

ARCHFIELD, S. A., P. A. STEEVES, J. D. GUTHRIE, and K. G. Ries III. 2013. **Towards a publicly available, map-based regional software tool to estimate unregulated daily streamflows at ungauged rivers**. Geosci. Model Dev. 6 (1): 101–115. Disponível: <<https://doi.org/10.5194/gmd-6-101-2013>>. Acesso em: 02 set. 2023.

BECK, H. E., A. I. J. M. VAN DIJK, A. DE ROO, D. G. MIRALLES, T. R. MCVICAR, J. SCHELLEKENS, AND L. BRUIJNZEEL. 2016. **A global-scale regionalization of hydrologic model parameters**. Water Resour. Res. 52 (5): 3599–3622. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/2015WR018247>>. Acesso em: 02 set. 2023.

BLOESCHL, G., MONTANARI, A., 2010. **Climate change impacts-throwing the dice?** Hydrol. Process. 24 (3), 374–381.

BLÖSCHL, G., M. SIVAPALAN, H. SAVENIJE, T. Wagener, and A. Viglione, eds. 2013. **Runoff prediction in ungauged basins: Synthesis across processes, places and scales**. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

BOOKER, D. J., SNELDER T. H. 2012. **Comparing methods for estimating flow duration curves at ungauged sites**. J. Hydrol. 434–435 (Apr): 78–94. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.031>>. Acesso em: 01 de set. 2023.

BRASIL. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes,

complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho CONAMA. 2011.

BRASIL. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução no 357, de 17 de março de 2005.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. 2005.

BRASIL. COPAM. Conselho Estadual de Política Ambiental. **Deliberação Normativa COPAM nº 14, de 28 de dezembro de 1995.** Dispõe sobre o enquadramento das águas da Bacia do rio Paraopeba. Minas Gerais – MG. 1995.

CASTELLARIN, Attilio; VOGEL, Richard. M.; BRATH, Armando. **Stochastic Index Flow Model Of Duration Curves.** Water Resour. Res., 40, W03104, 2004a.

CASTELLARIN, Attilio; GALEATI, Giorgio; BRANDIMARTE, Luigia; MONTANARI, Alberto; BRATH, Armando. A. **Regional Flow Duration Curves: Reliability For Ungauged Basins.** Advances In Water Resources, 27, 2004b, p. 953-965.

CASTELLARIN, Attilio; CAMORANI, Giorgio.; BRATH, Armando. **Predicting annual and long-term flow-duration curves in ungauged basins.** Advances and Water Resources, v.30, 2007, p. 937-953.

CASTELLARIN, Attilio; BOTTER, G.; HUGHES, G. A.; LIU, B.; OUARDA, T. B. M. J.; PARAJKA, J.; POST, D. A.; SIVAPALAN, M.; SPENCE, C.; VIGLIONE, A.; VOGEL, R. M. **Prediction of flow duration curves in ungauged basins. Chapt. 7 In:** Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., & Savenije, H. (Eds.). (2013). Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis across Processes, Places and Scales. Cambridge: Cambridge University Press. 2013, p. 1–43.

CASTIGLIONI, S., CASTELLARIN, A., MONTANARI, A. **Prediction of low-flow indices in ungauged basins through physiographical space-based interpolation.** J. Hydrol. 378 (3–4), 2009, p. 272–280.

CHEBANA, Fateh, OUARDA, Taha, B. M. J. **Index Flood–based Multivariate Regional Frequency Analysis.** Water Resources Research 45.10. 2009.

CHOKMANI, K., OUARDA, T.B.M.J., 2004. **Physiographical space-based kriging for regional flood frequency estimation at ungauged sites.** Water Resour. Res. 40 (12), W12514. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2003wr002983>>. Acesso em: 02 set. 2023.

CHOUAIB, Wafa; CALDWELL, Peter V.; ALILA, Younes. **Regional variation of flow duration curves in the eastern United States: Process-based analyses of the interaction between climate and landscape properties.** Journal of Hydrology, 10.1016/j.jhydrol.2018.01.037, 559. 2018, p. 327-346.

COSTA, Andréia Silva; CARIELLO, Brunna Lucena; BLANCO, Claudio José Cavalcante; PESSOA, Francisco Carlos Lira. **Regionalização de Curvas de Permanência de Vazão de Regiões Hidrográficas do Estado do Pará.** Revista

Brasileira de Meteorologia, 2012-12, Vol.27 (4), P.413-422. Disponível em: <<https://www.scielo.br/J/Rbmet/A/Whbssq5Ghzrxqnby5Gnnqjd/?Lang=Pt>>. Acesso em: 21 maio. 2022.

COSTA, Veber; FERNANDES, Wilson; NAGHETTINI, Mauro. 2014. **Regional models of flow-duration curves and their use for calibrating the parameters of a rainfall-runoff model**. Hydrol. Sci. J. 59 (2): 262–277. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/02626667.2013.802093>>. Acesso em: 02 set. 2023.

COSTA, Veber; FERNANDES, Wilson; STARICK, Ângelo. **Identifying Regional Models for Flow Duration Curves with Evolutionary Polynomial Regression: Application for Intermittent Streams**, Journal of Hydrologic Engineering, 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001873, 25, 1, (2020).

COSTA, Veber; FERNANDES, Wilson. **Regional Modeling of Long-Term and Annual Flow Duration Curves: Reliability for Information Transfer with Evolutionary Polynomial Regression**, Journal of Hydrologic Engineering, 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002051, 26, 2, (2021).

DAVIS, Elisabeth G.; NAGHETTINI, Mauro C. **Estudo de chuvas intensas no estado do Rio de Janeiro**. 2ª ed. revisada e ampliada. CD-ROM, Brasília: CPRM, 2000.

ECOPLAN. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas: Resumo Executivo**. Belo Horizonte: Comitê da Bacia do Rio das Velhas, 2015.

ELAMIR, Elsayed. A. H., SEHEULT, Allan. H. **Trimmed L-moments**. Computational Statistics and Data Analysis, 43. 2003, p. 299-314.

GANORA, D., CLAPS, P., LAIO, F., VIGLIONE, A., **An approach to estimate nonparametric flow duration curves in ungauged basins**. Water Resour. Res., 45, W10418. 2009.

GONÇALVES, Edkeyse D.; PESSOA, Francisco C. L.; NEVES, Raísa R.; RODRIGUES, Rodrigo S. S.; DE SOUSA, Ana C. S. R. **IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES HOMOGÊNEAS E ANÁLISE DE REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA REGIONALIZAÇÃO DE VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TAPAJÓS**. Revista Brasileira de Cartografia, [S. l.], v. 69, n. 9, 2018. Disponível em: <<https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44082>>. Acesso em: 21 maio. 2022.

GONÇALVES, Fabricia. **Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul: Avaliação Integrada da Qualidade das Águas dos Estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo** / Fabricia Moreira Gonçalves. – 2016. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/1174M.PDF>>. Acesso em 06 jun. 2022.

HOPE, A.; BART, R. **Evaluation of a regionalization approach for daily flow duration curves in central and southern California Watersheds**. J. Am. Water Resour. Assoc. 48 (1). 2012, p.123–133.

HOSKING, Jonathan R. M. **L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics**. Journal of the Royal Statistical Society, Series B, 52, 105-124. 1990.

HOSKING, Jonathan R. M.; WALLIS, James R. **Some statistics useful in regional frequency analysis**. Water Resources Research 29(2):. 634. 1993, p. 271-281.

HOSKING, Jonathan R. M. **Fortran routines for use with the method of L-moments**, Version 3. Research Report RC20525, IBM Research Division, Yorktown Heights, N.Y. 1996.

HOSKING, Jonathan R. M.; WALLIS, James R. **Regional frequency analysis : an approach based on L-moments**. Cambridge, Cambridge University Press. 1997.

HOSKING, Jonathan R. M. Some theory and practical uses of trimmed L-moments. **Journal of Statistical Planning and Inference**, 137. 2007, p. 3024-3039.

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. 2016, p. 201-229.

LAZZARO, G., S. BASSO, M. SCHIRMER, AND G. BOTTER. 2013. **Water management strategies for run-of-river power plants: Profitability and hydrologic impact between the intake and the outflow**. Water Resour. Res.49 (12): 8285–8298. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/2013WR014210>>. Acesso em: 02 set. 2023.

LI, M., SHAO, Q.X., ZHANG, L., CHIEW, F.H.S., 2010. **A new regionalization approach and its application to predict flow duration curve in ungauged basins**. J. Hydrol. 389 (1–2). 2010, p. 137–145.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas, SP: Editora Átomo, 3a Ed, 2010.

LIMA, Ricardo Neves de Souza ; Ribeiro, Celso Bandeira de Melo ; BARBOSA, CLÁUDIO CLEMENTE FARIA ; ROTUNNO FILHO, OTTO CORRÊA . **Estudo da poluição pontual e difusa na bacia de contribuição do reservatório da usina hidrelétrica de Funil utilizando modelagem espacialmente distribuída em Sistema de Informação Geográfica**. Engenharia Sanitária e Ambiental (Online) , v. 21. 2016, p. 139-150.

LIUCCI, L., D. VALIGI, AND S. CASADEI. 2014. **A new application of flow duration curve (FDC) in designing run-of-river power plants**. Water Resour. Manage. 28 (3): 881–895. Acesso em: <<https://doi.org/10.1007/s11269-014-0523-4>>. Disponível em: 02 set. 2023.

MARCUZZO, F. F. N.; Andrade, L. R. ; Melo, D. C. R. . **Métodos de Interpolação Matemática no Mapeamento de Chuvas do Estado do Mato Grosso**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 4. 2011, p. 793-804.

MELATI, M. D. ; MARCUZZO, F. F. N. . **Regressões Simples e Robusta na Regionalização da Vazão Q95 na Bacia do Taquari-Antas.** *Ciência e Natura*, v. 38. 2016, p. 722-739.

MINAS GERAIS. Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) – **Monitoramento da Qualidade das Águas.** Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/monitoramento-da-qualidade-das-aguas2>. Acesso Em: 21 Maio. 2022.

MOHAMOUD, Y.M., **Prediction of daily flow duration curves and streamflow for ungauged catchments using regional flow duration curves.** *Hydrol. Sci. J. – J. Sci. Hydrol.* 53 (4). 2008, p. 706–724.

NAGHETTINI, Mauro; PINTO, Éber José de Andrade. **Hidrologia estatística.** Belo Horizonte: CPRM, 552 p. Executado pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2007.

PADUA, L.; NASCIMENTO, N. O. ; SILVA, F. . **Analysis of the fluviometric network of Rio das Velhas using Entropy.** *REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS*, v. 24, p. 1/e42-14, 2019.

PIAZI, Julia; LOPES, Frederico Azevedo; RUCHKYS, Úrsula de Azevedo. **Correlação Entre Qualidade das Águas e Outorgas Superficiais No Trecho Alto da Bacia do Médio Rio das Velhas, Minas Gerais, Brasil / Water Quality And Granting Of Permits For Water Use In The Middle Course Of Velhas River Basin, Minas Gerais, Brazil.** *Caderno de Geografia (Belo Horizonte, Brazil)*, 2018-10-30, Vol.28 (55), P.828-844. Disponível em: <<http://Periodicos.Pucminas.Br/Index.Php/Geografia/Article/View/17222>>. Acesso em: 21 mai. 2022.

PINHEIRO, Viviane B.; NAGHETTINI, Mauro. **Calibration of the parameters of a rainfall-runoff model in ungauged basins using synthetic flow duration curves as estimated by regional analysis.** *J. Hydrol. Eng.* 18 (12). 2013, p. 1617–1626.

PINHEIRO, Viviane B.; NAGHETTINI, Mauro 2010. **Calibração de um modelo chuva-vazão em bacias sem monitoramento fluviométrico a partir de curvas de permanência sintéticas. [In Portuguese.]** *Rev. Bras. Recursos Hídricos* 15 (2): 143–156. Disponível em: <<https://doi.org/10.21168/rbrh.v15n2.p143-156>>. Acesso em: 02 ago. 2023.

PINTO, Jorge A. O. **Avaliação de Métodos para a Regionalização de Curvas de Permanência de Vazões para a Bacia do Rio das Velhas.** 2006. 219 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2006.

PIRES, C. L. F. **Análise de Frequência – Revisão Metodológica.** In: *A Água em Revista*, n. 3. CPRM, Belo Horizonte, Out. 1994, p. 13-22.

Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas (PDRH): Plano Diretor Consolidado – Volume I. **Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas.** Belo Horizonte, 2015.

Portal da Geologia. **Mapeamento Geológico**. Disponível em: <<http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/>>. Acesso em: 21 mai. 2023.

PRUSKI, Fernando F.; NUNES, Aline de A.; REGO, Fernando S.; de SOUZA, Marlon F. **Extrapolação de Equações de Regionalização de Vazões Mínimas: Alternativas para Atenuar os Riscos**. Water Resources And Irrigation Management, P. 10, 2012.

PRUSKI, Fernando F.; BOF, Luiz H. N.; SILVA, Luciano M. C. da; SILVA, José M. A.; REGO, Fernando S.; JUSTINO, Flávio B. **Impact Of The Substitution Of Reference Annual Streamflow By Monthly Streamflow On The Potential Use Of Water Resources**. Engenharia Agrícola, V. 34, N. 3, Jun. 2014, p. 496–509.

PRUSKI, Fernando F.; RODRIGUEZ, Renata D. G.; NUNES, Aline A.; PRUSKI, Pedro L.; SINGH, Vijay P. **Low-Flow Estimates in Regions Of Extrapolation Of The Regionalization Equations: A New Concept**. Engenharia Agrícola, V. 35, N. 5, Out. 2015, p. 808–816.

PUMO, D., L. V. NOTO, AND F. VIOLA. 2013. **Ecohydrological modelling of flow duration curve in Mediterranean river basins**. Adv. Water Resour. 52 (Feb): 314–327. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.05.010>>. Acesso em: 02 ago. 2023.

REQUENA, A. I., F. CHEBANA, AND T. B. M. J. OUARDA. 2018. **A functional framework for flow duration curves and daily streamflow estimation at ungauged sites**. Adv. Water Resour. 113 (Mar): 328–340. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.01.019>>. Acesso em: 01 ago. 2023.

RAZAVI, Tara, COULIBALY, Paulin. **Streamflow prediction in ungauged basins: Review of regionalization methods**. ASCE Journal of Hydrologic Engineering, 8(8). 2013, p. 958-975.

RIANNA, Maura. **Regionalization of flow duration curves in flow regimes of intermittent streams**. PhD thesis, 130 pages, Università di Roma "La Sapienza", December. 2010.

RIANNA, M., RUSSO, F., NAPOLITANO, F., 2011. **Stochastic index model for intermittent regimes: from preliminary analysis to regionalisation**. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 11 (4). 2011, p. 1189–1203.

RIES, K. G.; FRIESZ, P. J. **Methods for Estimating Low-Flow Statistics for Massachusetts Streams**. In: **United States Geological Survey (USGS)**. Massachusetts Department of Environmental Management, Office of Water Resources. Northborough, Massachusetts. 2000. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/publication/wri004135>>. Acesso em: 02 set. 2023.

RIGHETTO, Antônio. M.; GOMES, Kaline M.; FREITAS, Francisco R.S. **Poluição difusa nas águas pluviais de uma bacia de drenagem urbana**. Engenharia Sanitária e Ambiental 22 (6). 2017, p. 1109-1120.

SMAKHTIN, V.U., HUGHES, D.A., CREUSE-NAUDIN E. 1997. **Regionalization of Daily Flow Characteristics in Part of the Eastern Cape, South Africa**. Hydrological Sciences Journal, 46: 919-936. Sciences Journal.

SEARCY, J. K. **Flow duration curves**. In: **Manual of Hydrology, part. 2. Low – flow techniques**. **USGS Supply Paper 1542A**. Washington: US Government Printing Office, 33. 1959. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/wsp/1542a/report.pdf>>. Acesso em: 03 ago. 2023.

Serviço Geológico do Brasil (CPRM). **Caracterização Física e Análise dos dados Básicos**, Convênio: 015/2000 Aneel-013/CPRM/2000, Relatório Final, Volume I, 2001a.

Serviço Geológico do Brasil (CPRM). **Regionalização de Vazões Médias**, Convênio: 015/2000 Aneel-013/CPRM/2000, Relatório Final, Volume II, 2001b.

Serviço Geológico do Brasil (CPRM). **Regionalização das Curvas de Permanência e Curvas de Regularização**, Convênio: 015/2000 Aneel-013/CPRM/2000, Relatório Final, Volume III, 2001c.

Serviço Geológico do Brasil (CPRM). **Regionalização de Vazões Máximas**, Convênio: 015/2000 Aneel-013/CPRM/2000, Relatório Final, Volume IV, 2001d.

Serviço Geológico do Brasil (CPRM). **Regionalização de Vazões Mínimas**, Convênio: 015/2000 Aneel-013/CPRM/2000, Relatório Final, Volume V, 2001e.

SHAO, Q., ZHANG, L., CHEN, Y.D., SINGH, V.P., **A new method for modelling flow duration curves and predicting streamflow regimes under altered land-use conditions**. Hydrol. Sci. J. – J. Sci. Hydrol. 54 (3). 2009, p. 606–622.

SHU, C., OUARDA, T., 2012. **Improved methods for daily streamflow estimates at ungauged sites**. Water Resour. Res. 48, W02523. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2011wr011501>>. Acesso em: 02 set. 2023.

SILVA, André H. **Controle da Poluição Difusa de Origem Pluvial em uma Via de Tráfego Intenso por Meio de Trincheira de Infiltração e Vala de Detenção**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SMAKHTIN, V.Y; HUGHES, D.A; CREUSE-NAUDINE, E. **Regionalization of daily flow characteristics in part of the Eastern Cape, South Africa**. Hydrol. Sci. J., 42 (6). 1997, p. 919-936.

STEDINGER, J. R.; VOGEL, R. M. & FOUFULA-GEORGIOU, E. (1992). Chap. 18.5 – **Regionalization, in Maidment, D. R. (ed.): Handbook of Hydrology**. McGraw-Hill, N. York, p.18.33-18.66.

TUCCI, Carlos E. M., **Regionalização de Vazões, Coleção ABRH de Recursos Hídricos, Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, Editora da Universidade, Porto Alegre -RS, 2002.

TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH. 2009.

United States Geological Survey (USGS). **The National Flood Frequency Program, Ver. 3: Acomputer program for estimating magnitude and frequency of floods for ungauged sites**, K.G. Ries, III, and M.Y. Crouse (compilers), Report 02–4168. 2002.

EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; FARIA FILHO, R. F. R. **Atlas digital das águas de Minas**. Viçosa, MG: UFV, RURALMINAS, IGAM, 2007. 78 p.

VOGEL, Richard M., FENNESSEY, Neil M. **Flow duration curves I: new interpretation and confidence intervals**. J. Water Resources Planning Management, 120 (4). 1994a, p. 485-504.

VOGEL, Richard M., FENNESSEY, Neil M. **Flow duration curves: II: a review of applications e in water resources planning**. Water Resources Bulletin, 31(6). 1994b, p.1029-1039.

VON SPERLING, Marcos. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. 2. ed – Belo Horizonte. Editora UFMG, 2014a .

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed – Belo Horizonte. Editora UFMG, 2014b.

VRUGT, J., AND M. SADEGH. 2013. **Toward diagnostic model calibration and evaluation: Approximate Bayesian computation**. Water Resour. Res. 49 (7): 4335–4345. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/wrcr.20354>>. Acesso em: 02 ago. 2023.

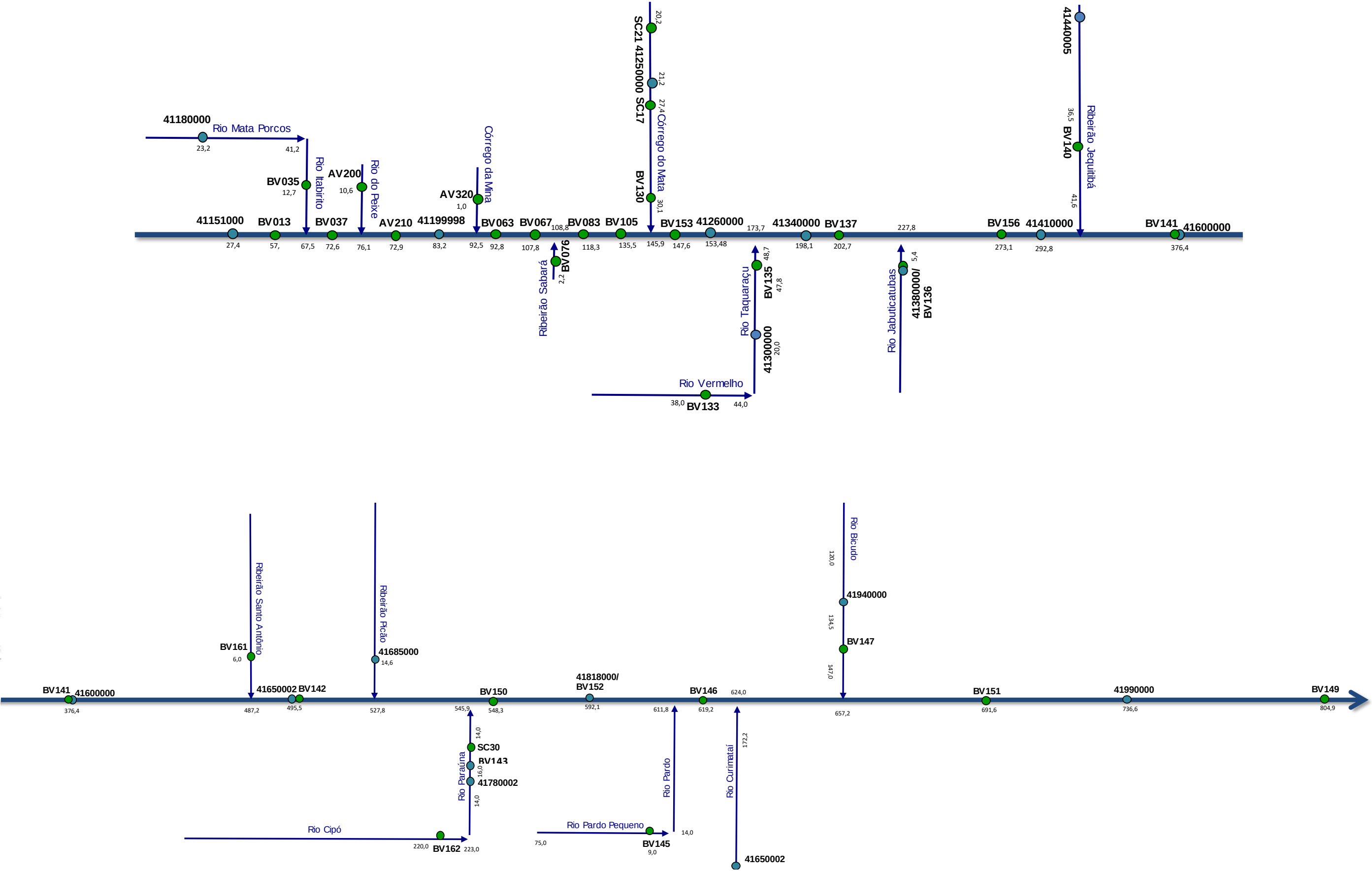
Ward, J. H. 1963. **Hierarchical grouping to optimize an objective function**. J. Am. Stat. Assoc. 58 (301): 236–244. <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>

WESTERBERG, I. K., AND H. K. MCMILLAN. 2015. **Uncertainty in hydrological signatures**. Hydrol. Earth Syst. Sci. 19 (9): 3951–3968. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/hess-19-3951-2015>>. Acesso em: 03 set. 2023.

ZAFFANI, Aline G. **Poluição difusa da drenagem urbana com base ecohidrológica: diagnóstico atual e cenários de longo prazo em bacias urbanas de São Carlos, SP**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

ZHANG, Y., J. VAZE, F. H. S. CHIEW, AND M. LI. 2015. **Comparing flow duration curves and rainfall-runoff modelling for prediction daily runoff in ungauged catchments**. J. Hydrol. 525 (Jun): 72–86. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.043>>. Acesso em: 01 set. 2023.

APÊNDICE A – Diagrama Unifilar das Estações da Bacia do Rio das Velhas



APÊNDICE B – Curvas de Permanência de Longo Termo (CPLT)

Figura APÊNDICE B 1 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41151000 – RHH01

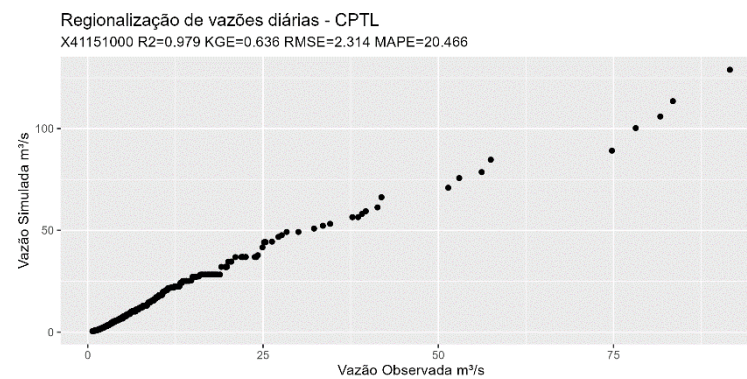


Figura APÊNDICE B 2 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41180000 – RHH01

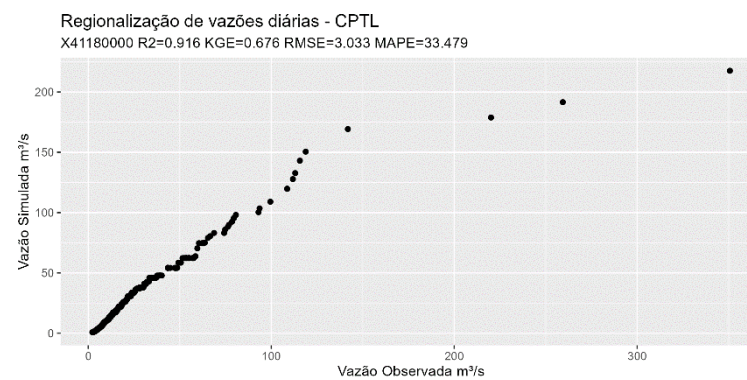


Figura APÊNDICE B 3 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41199998 – RHH01

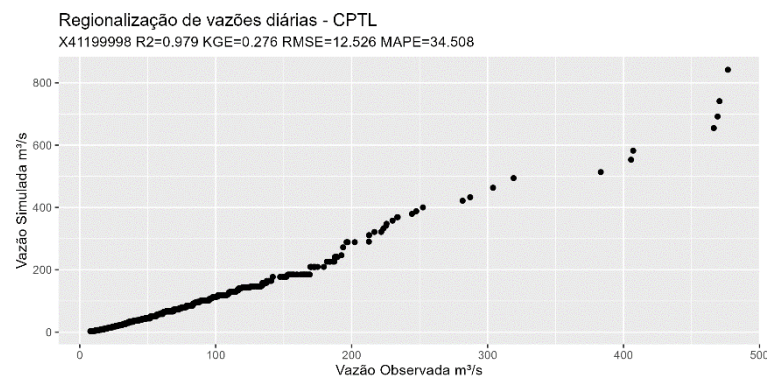


Figura APÊNDICE B 4 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41250000 – RHH01

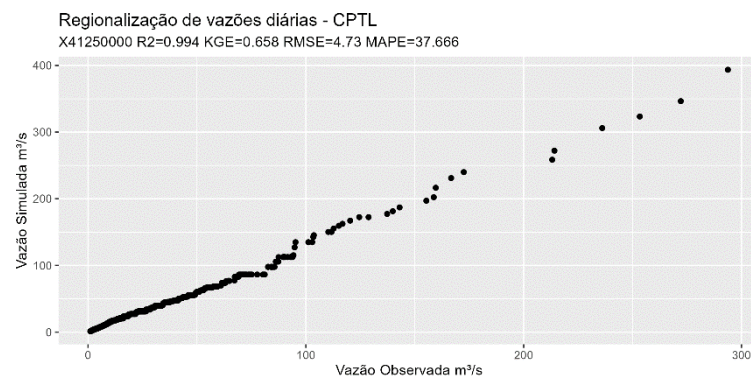


Figura APÊNDICE B 5 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41260000 – RHH01

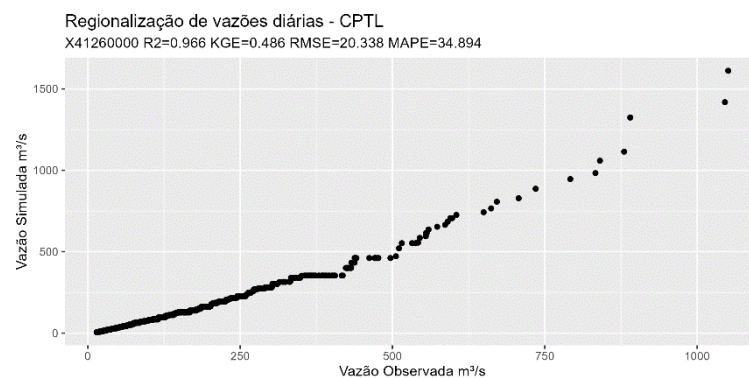


Figura APÊNDICE B 6 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41300000 – RHH01

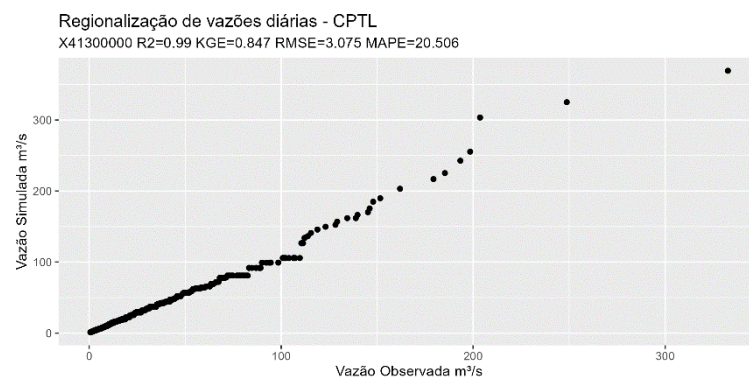


Figura APÊNDICE B 7 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41340000 – RHH01

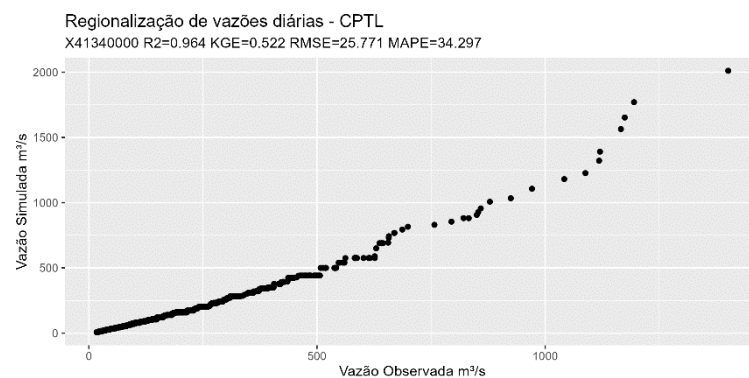


Figura APÊNDICE B 8 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41380000 – RHH01

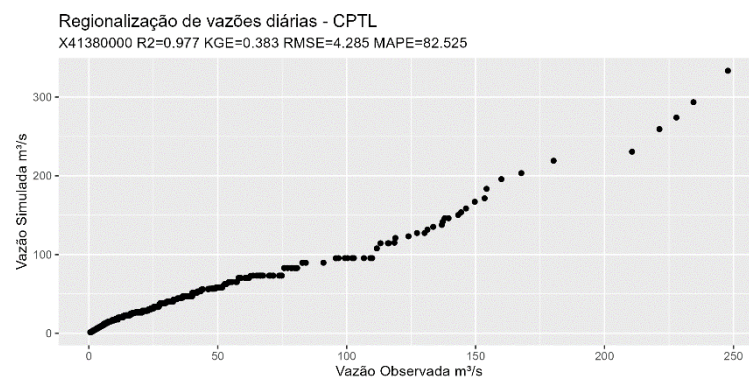


Figura APÊNDICE B 9 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41440005 – RHH01

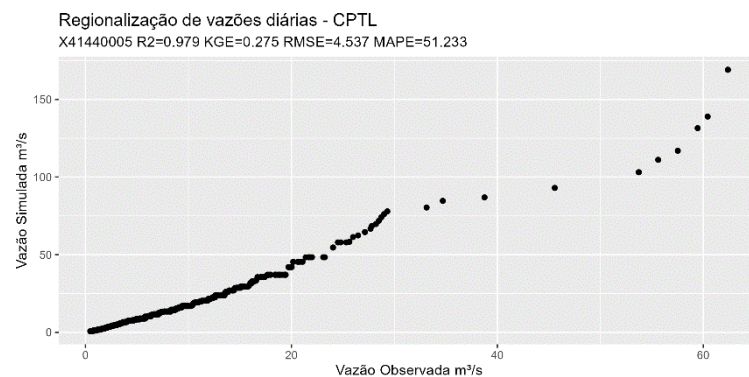


Figura APÊNDICE B 10 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41410000 – RHH02

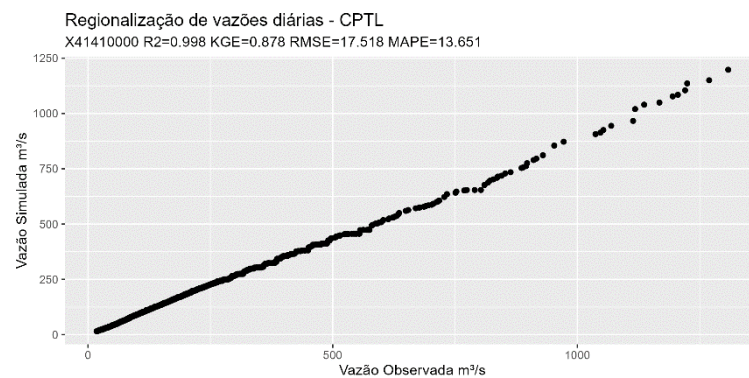


Figura APÊNDICE B 11 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41600000– RHH02

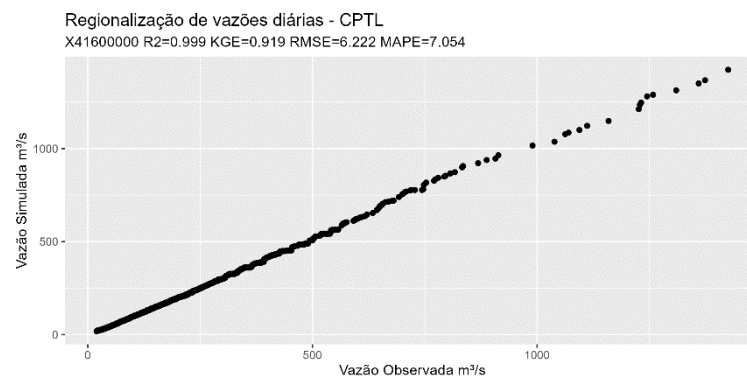


Figura APÊNDICE B 12 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41650002– RHH02

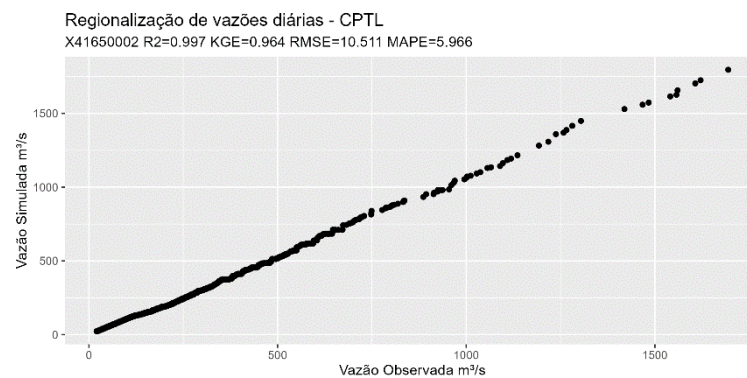


Figura APÊNDICE B 13 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41685000– RHH03

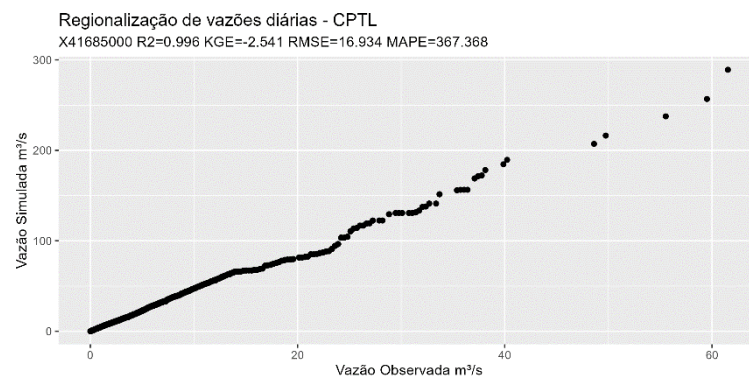


Figura APÊNDICE B 14 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41780002– RHH03

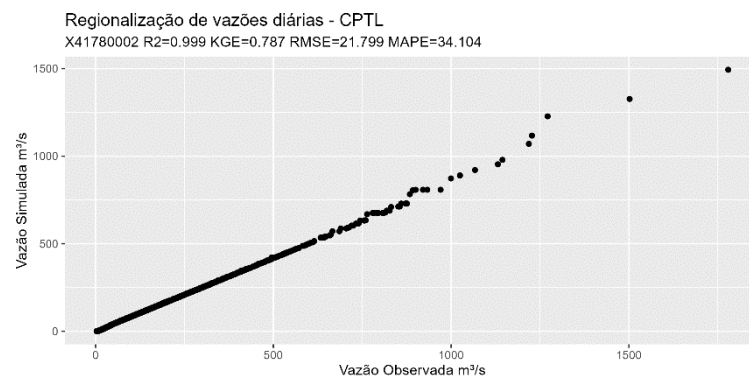


Figura APÊNDICE B 15 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41890000 – RHH04

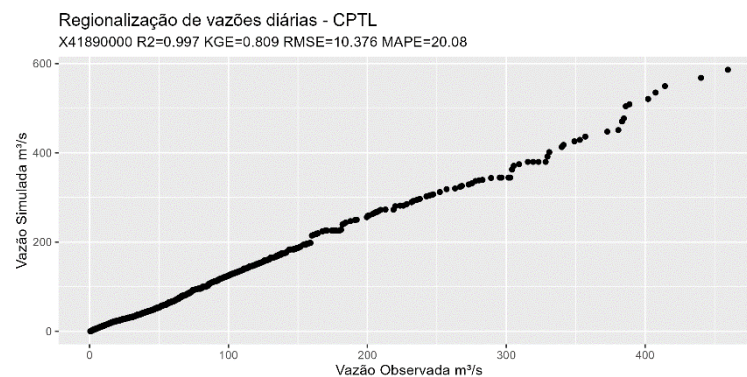


Figura APÊNDICE B 16 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41940000– RHH04

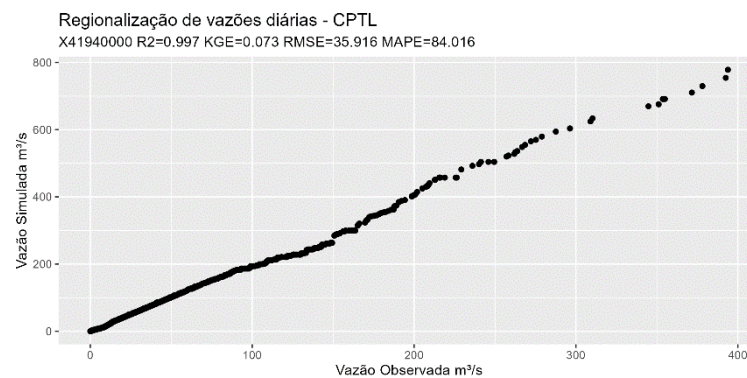


Figura APÊNDICE B 17 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41990000– RHH05

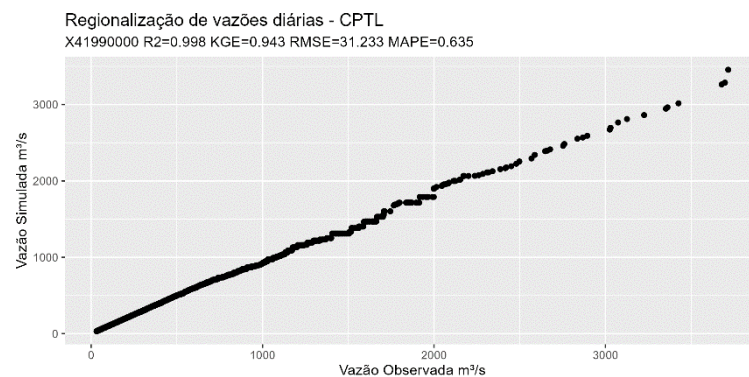
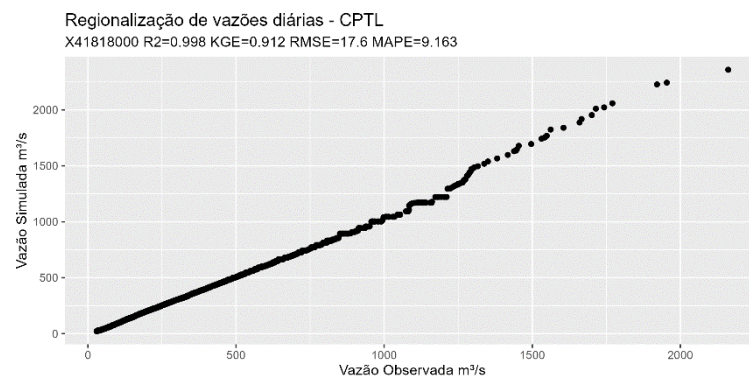


Figura APÊNDICE B 18 – Dados Simulados e Dados Observados – CPLT – Estação 41818000– RHH05



APÊNDICE C – Curvas de Permanência Anuais (CPA)

Tabela 16 – Vazões Médias.

Ano	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Média
Estação	Vazão média (m³/s)																				
41151000	2,31	3,10	5,04	2,77	2,21	2,43	1,91	3,19	3,12	2,59	3,03	2,62	3,23	2,14	3,79	2,58	3,04	4,47	2,49	2,07	2,91
41180000	5,64	7,30	11,25	6,43	4,82	7,67	5,47	6,59	6,87	7,04	6,71	6,47	5,64	6,84	9,85	7,97	7,21	10,63	6,58	4,63	7,08
41199998	25,42	30,25	44,95	26,81	18,43	28,28	20,51	27,83	28,64	26,42	29,54	29,47	27,62	25,25	41,12	32,45	27,64	42,92	26,04	17,27	28,84
41250000	6,11	9,24	13,21	8,57	5,76	7,71	5,25	9,20	10,11	8,46	7,80	7,30	7,65	6,00	9,81	8,60	10,39	14,58	3,93	3,57	8,16
41260000	50,12	64,94	84,56	52,38	44,05	63,00	41,72	63,15	70,42	63,54	58,60	53,62	52,46	49,37	76,58	65,46	68,40	89,23	41,65	34,36	59,38
41300000	6,40	9,04	13,30	8,22	5,50	9,49	6,35	12,00	12,81	11,23	10,37	7,09	9,28	5,76	10,33	7,73	8,11	13,68	5,39	5,93	8,90
41340000	66,11	85,64	106,86	66,95	56,38	76,52	49,02	81,09	96,07	87,14	67,32	70,85	60,37	58,36	95,31	81,43	80,55	116,61	55,46	41,63	74,98
41380000	5,17	8,45	10,91	5,48	4,81	5,58	3,78	6,64	7,41	7,11	6,84	4,23	6,43	3,80	5,53	5,18	5,66	8,65	3,18	4,19	5,95
41410000	77,80	111,79	141,97	83,17	64,23	92,18	64,76	103,76	112,94	99,82	99,41	80,99	93,71	71,42	114,13	99,33	103,73	146,03	64,89	54,89	94,05
41440005	2,05	3,43	5,83	3,49	2,03	3,02	1,66	3,58	3,48	2,79	3,02	2,44	2,89	2,11	2,58	2,51	3,36	3,79	1,21	1,18	2,82
41600000	85,55	119,32	161,46	96,73	72,77	101,67	62,07	109,42	122,83	106,94	101,25	88,96	102,92	79,87	123,24	104,19	110,14	154,53	68,49	57,91	101,51
41650002	91,81	138,96	201,86	117,41	85,84	123,82	76,23	123,04	132,87	128,04	114,72	98,55	121,27	101,18	155,31	132,75	132,19	173,65	76,43	67,22	119,66
41685000	1,89	2,54	4,91	1,40	1,61	2,96	0,99	1,97	1,49	4,45	3,15	3,48	4,43	1,13	3,39	1,02	1,47	2,03	1,43	0,60	2,32
41780002	57,64	62,00	104,64	63,21	58,51	76,22	51,44	69,74	66,41	69,50	85,72	67,94	89,80	47,83	81,75	58,02	68,13	95,70	43,79	43,34	68,07
41818000	155,59	187,42	283,65	167,07	137,83	192,30	126,22	190,29	192,66	191,13	203,79	162,36	215,42	138,73	233,50	177,44	197,67	264,72	128,49	116,26	183,13
41890000	11,17	10,02	16,55	15,59	29,16	27,56	17,08	31,19	20,00	21,68	15,09	22,24	26,50	15,59	23,18	32,23	17,64	17,02	8,84	12,06	19,52
41940000	11,04	9,92	32,31	12,70	22,47	15,49	9,95	17,11	8,12	18,76	20,94	18,92	35,12	13,91	24,74	8,28	9,85	13,22	8,38	8,48	15,99
41990000	213,90	276,91	436,69	250,02	226,13	298,20	182,39	288,20	258,16	281,25	304,67	252,97	349,84	189,06	324,77	250,94	273,74	394,81	178,14	184,46	270,76

Tabela 17 – Correlações – Variáveis Físicas e Climáticas e Vazões Médias Anuais

	QMédia	A (km²)	L (km)	I (m/km)	Dd (Junções/k m)	P (mm/an o)	ET (mm/ano)	P – ET (mm/ano)
1995								
QMédia	1.00							
A	0.98	1.00						
L	0.97	0.97	1.00					
I	-0.54	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	-0.01	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.10	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.38	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.39	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00
1996								
QMédia	1.00							
A	0.98	1.00						
L	0.98	0.97	1.00					
I	-0.55	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	0.01	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.08	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.37	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.37	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00
1997								
QMédia	1.00							
A	0.99	1.00						
L	0.98	0.97	1.00					
I	-0.53	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	-0.04	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.13	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.40	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.40	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00
1998								
QMédia	1.00							
A	0.99	1.00						
L	0.97	0.97	1.00					
I	-0.53	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	-0.03	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.11	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.40	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.40	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00
1999								
QMédia	1.00							
A	0.99	1.00						
L	0.95	0.97	1.00					
I	-0.54	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	-0.10	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.16	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.41	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.47	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00

Continuação Tabela 17 – Correlações – Variáveis Físicas e Climáticas e Vazões Médias Anuais

	QMédia a	A (km ²)	L (km)	I (m/km)	Dd (Junções/k m)	P (mm/an o)	ET (mm/ano)	P – ET (mm/ano)
2000								
QMédia	1.00							
A	0.99	1.00						
L	0.96	0.97	1.00					
I	-0.53	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	-0.06	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.13	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.40	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.43	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00
2001								
QMédia	1.00							
A	0.99	1.00						
L	0.96	0.97	1.00					
I	-0.53	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	-0.04	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.12	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.38	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.42	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00
2002								
QMédia	1.00							
A	0.99	1.00						
L	0.97	0.97	1.00					
I	-0.54	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	-0.05	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.11	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.39	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.42	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00
2003								
QMédia	1.00							
A	0.97	1.00						
L	0.97	0.97	1.00					
I	-0.56	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	0.02	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.06	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.38	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.38	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00
2004								
QMédia	1.00							
A	0.99	1.00						
L	0.97	0.97	1.00					
I	-0.55	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	-0.04	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.11	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.40	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.41	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00
2005								
QMédia	1.00							
A	0.99	1.00						
L	0.96	0.97	1.00					
I	-0.51	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	-0.06	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.14	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.39	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.41	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00

Continuação Tabela 17 – Correlações – Variáveis Físicas e Climáticas e Vazões Médias Anuais

	QMédia a	A (km²)	L (km)	I (m/km)	Dd (Junções/k m)	P (mm/an o)	ET (mm/ano)	P – ET (mm/ano)
2006								
QMédia	1.00							
A	0.99	1.00						
L	0.96	0.97	1.00					
I	-0.54	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	-0.05	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.13	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.39	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.43	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00
2007								
QMédia	1.00							
A	0.99	1.00						
L	0.95	0.97	1.00					
I	-0.50	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	-0.11	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.19	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.41	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.44	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00
2008								
QMédia	1.00							
A	0.98	1.00						
L	0.98	0.97	1.00					
I	-0.56	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	-0.01	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.10	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.40	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.40	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00
2009								
QMédia	1.00							
A	0.99	1.00						
L	0.98	0.97	1.00					
I	-0.55	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	-0.03	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.11	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.40	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.41	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00
2010								
QMédia	1.00							
A	0.98	1.00						
L	0.98	0.97	1.00					
I	-0.57	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	-0.02	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.08	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.38	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.41	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00
2011								
QMédia	1.00							
A	0.98	1.00						
L	0.98	0.97	1.00					
I	-0.55	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	-0.01	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.10	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.39	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.39	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00

Continuação Tabela 17 – Correlações – Variáveis Físicas e Climáticas e Vazões Médias Anuais

	QMédia a	A (km ²)	L (km)	I (m/km)	Dd (Junções/k m)	P (mm/an o)	ET (mm/ano)	P – ET (mm/ano)
2012								
QMédia	1.00							
A	0.98	1.00						
L	0.97	0.97	1.00					
I	-0.53	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	0.00	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.09	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.37	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.39	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00
2013								
QMédia	1.00							
A	0.98	1.00						
L	0.97	0.97	1.00					
I	-0.54	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	0.00	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.09	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.36	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.39	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00
2014								
QMédia	1.00							
A	0.99	1.00						
L	0.96	0.97	1.00					
I	-0.51	-0.51	-0.57	1.00				
Dd	-0.06	-0.10	-0.06	0.41	1.00			
P	-0.13	-0.17	-0.13	0.26	0.74	1.00		
ET	-0.38	-0.42	-0.45	0.45	0.67	0.57	1.00	
P – ET	0.42	0.42	0.36	-0.63	-0.53	-0.37	-0.40	1.00

Tabela 18 – Métricas de desempenho por ano – RHH1.

Ano	Estação	R ²	KGE	RMSE	EPMA	Estação	R ²	KGE	RMSE	EPMA	Estação	R ²	KGE	RMSE	EPMA
1995	41180000	0,968	-0,42	3,63	24,10	41199998	0,898	0,77	6,86	16,54	41250000	0,990	0,09	5,95	112,38
1996		0,965	0,44	6,87	19,22		0,974	0,47	20,66	13,26		0,982	0,29	8,50	99,81
1997		0,884	0,79	8,90	8,78		0,968	0,62	19,49	17,87		0,970	0,54	13,36	47,70
1998		0,924	0,44	2,85	16,21		0,952	0,47	9,01	14,97		0,938	0,45	4,85	73,85
1999		0,987	0,47	1,55	16,69		0,983	0,55	6,35	9,60		0,992	0,40	3,49	84,50
2000		0,948	0,90	2,17	22,87		0,952	0,64	11,35	12,11		0,974	0,35	6,83	76,77
2001		0,956	0,46	1,93	25,62		0,973	0,74	4,48	15,58		0,959	0,23	4,35	109,54
2002		0,983	0,56	4,54	18,82		0,975	0,72	11,66	11,81		0,994	0,43	6,89	72,26
2003		0,942	0,36	9,18	32,66		0,933	0,57	23,81	14,44		0,922	0,18	11,15	110,41
2004		0,905	0,81	3,23	17,31		0,982	0,62	13,78	14,19		0,986	0,27	8,50	91,18
2005		0,957	0,56	2,39	22,66		0,959	0,37	11,67	20,02		0,893	0,36	6,18	73,20
2006		0,733	0,66	3,05	21,30		0,982	0,55	6,61	21,59		0,983	0,31	4,48	85,70
2007		0,969	0,13	2,06	26,39		0,981	0,60	5,88	19,88		0,992	0,61	2,70	49,76
2008		0,953	0,36	2,98	15,04		0,966	0,54	7,89	15,56		0,972	-0,01	6,89	120,97
2009	41300000	0,958	0,78	3,15	12,66	41340000	0,985	0,64	9,94	20,74	41380000	0,985	0,21	10,61	93,10
2010		0,971	0,63	3,73	8,88		0,952	0,41	13,39	16,22		0,986	0,18	8,85	115,68
2011		0,966	0,29	4,55	16,15		0,965	0,35	15,73	14,97		0,986	0,51	4,82	76,10
2012		0,843	0,76	8,22	14,27		0,992	0,68	13,80	19,65		0,979	0,61	6,36	49,98
2013		0,888	0,71	2,93	21,58		0,991	0,55	6,69	28,87		0,951	-0,36	6,79	138,40
2014		0,961	-1,20	2,82	44,92		0,932	-0,16	9,88	30,19		0,989	0,26	3,94	92,51
1995		0,889	0,31	6,30	90,41		0,972	0,83	15,38	14,66		0,967	0,03	4,75	143,21
1996		0,982	0,34	6,92	97,34		0,989	0,84	21,28	14,01		0,982	0,33	5,53	130,17
1997		0,975	0,61	7,38	49,28		0,973	0,69	43,22	12,13		0,978	0,41	6,64	110,34
1998		0,997	0,59	3,30	56,37		0,986	0,88	8,93	9,64		0,942	0,04	5,23	125,33
1999		0,983	0,46	3,40	72,08		0,988	0,80	8,09	14,35		0,959	0,30	3,06	93,42
2000		0,971	0,74	3,77	41,48		0,881	0,71	29,71	12,02		0,972	0,06	6,73	122,76
2001		0,975	0,65	2,62	59,24		0,971	0,83	9,51	9,06		0,974	-0,09	4,18	157,62
2002		0,982	0,75	3,61	38,43		0,954	0,79	20,98	14,24		0,981	0,13	7,11	136,96
2003		0,989	0,66	5,46	61,26		0,976	0,79	36,49	17,49		0,959	-0,15	9,80	222,84
2004	41300000	0,983	0,77	3,72	37,90		0,922	0,71	27,65	19,32	41380000	0,985	0,14	5,57	165,93
2005		0,987	0,76	2,87	35,10		0,941	0,57	28,95	7,40		0,984	0,40	3,67	107,41
2006		0,984	0,47	4,92	69,09		0,967	0,84	17,33	12,24		0,932	-0,35	7,15	160,55
2007		0,957	0,68	4,38	36,35		0,946	0,75	21,35	9,67		0,964	0,50	3,17	75,83
2008		0,985	0,04	6,35	128,58		0,974	0,87	10,63	8,58		0,983	-0,69	8,12	206,69
2009		0,990	0,40	9,04	78,21		0,952	0,82	25,28	11,37		0,928	-0,77	12,21	243,58
2010		0,992	0,09	8,53	126,86		0,971	0,79	17,66	15,68		0,876	-0,68	9,71	252,22
2011		0,966	0,25	7,25	112,24		0,951	0,79	18,80	12,88		0,952	-0,30	8,08	189,79
2012		0,937	0,66	10,51	53,84		0,960	0,77	34,20	17,75		0,976	0,02	9,78	170,59
2013		0,997	0,34	3,42	84,72		0,983	0,81	12,60	17,47		0,976	-0,50	5,29	191,63
2014		0,980	0,61	5,69	40,58		0,941	0,46	19,05	18,06		0,952	0,36	7,19	119,63
1995	41151000	0,946	0,23	2,47	57,22	41260000	0,980	0,88	10,56	9,29	41440005	0,979	-0,44	4,01	137,02
1996		0,959	0,22	5,37	51,27		0,966	0,78	19,76	10,84		0,953	0,00	7,16	91,00
1997		0,960	0,80	2,58	17,36		0,979	0,80	26,47	8,85		0,933	0,57	6,36	30,79
1998		0,973	0,32	2,33	29,63		0,957	0,78	11,14	10,53		0,955	0,50	2,73	44,72
1999		0,972	0,75	0,79	22,77		0,983	0,75	6,78	15,00		0,991	0,17	2,26	78,96
2000		0,897	0,31	2,24	71,41		0,957	0,75	16,01	15,98		0,974	0,24	3,92	68,53
2001		0,971	0,22	2,22	41,67		0,957	0,86	11,38	15,49		0,970	-0,37	3,60	120,93
2002		0,731	0,45	3,39	41,72		0,948	0,72	18,40	14,97		0,981	0,26	4,28	77,19
2003		0,986	-0,20	7,29	80,86		0,987	0,88	15,47	11,62		0,976	-0,44	9,75	116,21
2004		0,977	0,02	4,15	73,59		0,947	0,79	16,53	12,48		0,899	-0,30	5,70	124,48
2005		0,949	0,74	1,18	21,73		0,950	0,63	18,23	14,52		0,960	0,34	3,42	65,42
2006		0,893	0,53	1,70	41,84		0,970	0,74	10,24	14,31		0,956	-0,03	3,60	100,35
2007		0,885	0,84	1,02	18,30		0,968	0,80	10,78	6,34		0,968	0,64	1,58	27,38
2008		0,955	-0,01	3,41	81,93		0,988	0,80	8,03	15,40		0,988	-0,56	4,80	152,50
2009		0,914	0,43	3,90	46,02		0,966	0,79	17,90	13,74		0,968	-0,98	8,36	193,88
2010	41410000	0,957	-0,44	5,43	91,98	41600000	0,965	0,74	14,71	17,23	41650002	0,974	-0,84	6,90	185,09
2011		0,986	0,29	3,40	52,64		0,951	0,73	17,05	19,21		0,993	0,05	4,38	99,76
2012		0,971	0,56	3,86	34,30		0,975	0,76	21,54	18,39		0,907	-0,24	9,22	121,64
2013		0,908	0,74	1,00	19,61		0,983	0,81	6,16	14,44		0,985	-1,42	3,67	221,89
2014		0,959	0,57	0,67	20,41		0,983	0,56	9,86	21,60		0,990	-0,11	1,92	136,36

Tabela 19 – Métricas de desempenho por ano – RHH2.

Ano	Estação	R ²	KGE	RMSE	EPMAe	Estação	R ²	KGE	RMSE	EPMAe	Estação	R ²	KGE	RMSE	EPMA
1995	41410000	0,995	0,87	14,59	6,57	41600000	0,995	0,96	4,79	3,89	41650002	0,991	0,83	21,82	12,68
1996		0,998	0,82	41,04	15,41		0,996	0,89	13,92	11,03		0,996	0,98	13,49	2,06
1997		0,996	0,93	18,79	8,19		0,995	0,98	14,41	3,20		0,996	0,99	14,12	4,57
1998		0,997	0,94	7,10	5,82		0,998	0,92	5,28	6,21		0,995	0,95	8,35	6,80
1999		0,995	0,98	3,59	2,11		0,998	0,93	7,22	5,52		0,994	0,84	16,31	18,66
2000		0,995	0,95	8,93	5,37		0,997	0,93	11,56	3,39		0,993	0,90	16,77	14,49
2001		0,989	0,88	13,06	10,27		0,995	0,89	10,46	9,04		0,988	0,85	18,59	13,89
2002		0,992	0,88	21,46	13,61		0,998	0,96	6,12	3,16		0,990	0,89	21,54	15,06
2003		0,995	0,84	31,88	17,51		0,997	0,90	16,77	11,43		0,997	0,96	10,74	11,20
2004		0,986	0,90	18,68	9,73		0,997	0,98	5,88	4,42		0,977	0,94	20,86	12,95
2005		0,995	0,89	17,29	11,00		0,998	0,92	12,10	3,26		0,996	0,80	27,71	21,49
2006		0,996	0,95	6,65	5,34		0,995	0,86	11,67	3,72		0,997	0,79	18,82	22,94
2007		0,988	0,93	13,50	4,74		0,997	0,88	16,55	4,36		0,991	0,81	29,07	23,37
2008		0,997	0,93	6,27	7,77		0,995	0,80	11,83	9,69		0,992	0,82	24,49	10,93
2009	41410000	0,992	0,93	16,71	6,14	0,996	0,97	9,12	3,83	0,978	0,95	24,72	8,23		
2010		0,991	0,87	21,65	11,79	0,997	0,96	6,16	5,42	0,985	0,96	16,68	6,57		
2011		0,988	0,88	20,60	12,82	0,993	0,96	8,79	5,52	0,986	0,96	15,23	9,51		
2012		0,999	0,86	37,12	12,84	0,996	0,93	13,11	6,65	0,998	0,91	21,01	9,71		
2013		0,996	0,89	7,68	10,73	0,997	0,99	2,44	1,86	0,997	0,86	11,39	14,51		
2014		0,996	0,91	9,49	9,12	0,993	0,90	11,98	2,68	0,996	0,81	15,59	21,77		

Tabela 20 – Métricas de desempenho por ano – RHH3.

Ano	Estação	R²	KGE	RMSE	EPMA	Estação	R²	KGE	RMSE	EPMA
1995	41685000	0,985	-3,05	12,97	528,40	41780002	0,966	0,75	16,32	27,95
1996		0,998	-3,08	22,47	567,99		0,998	0,92	11,56	16,04
1997		0,994	-1,24	22,63	223,69		0,996	0,80	54,14	11,07
1998		0,989	-5,16	16,18	604,65		0,988	0,80	31,21	14,54
1999		0,975	-2,66	11,39	595,12		0,915	0,55	27,91	42,44
2000		0,980	-1,54	13,22	322,19		0,988	0,75	41,16	26,02
2001		0,995	-5,50	13,77	890,92		0,993	0,72	20,36	36,19
2002		0,980	-4,08	18,46	548,47		0,987	0,87	23,90	14,69
2003		0,990	-8,18	25,86	807,13		0,993	0,87	18,36	21,33
2004		0,988	-0,75	13,25	222,95		0,977	0,88	18,55	20,55
2005		0,990	-1,17	13,16	223,42		0,993	0,66	63,32	32,50
2006		0,991	-0,77	10,88	198,36		0,987	0,75	28,56	27,54
2007		0,997	0,13	6,64	98,36		0,997	0,62	60,18	39,28
2008		0,983	-6,89	17,24	907,15		0,967	0,81	16,39	14,58
2009		0,992	-2,34	21,17	414,31		0,987	0,87	17,56	17,46
2010		0,977	-10,87	20,59	1137,17		0,979	0,94	13,23	10,24
2011		0,955	-6,50	20,34	700,35		0,980	0,80	34,87	9,07
2012		0,989	-6,06	31,70	808,41		0,982	0,82	25,98	19,98
2013		0,995	-3,42	9,99	506,82		0,994	0,86	6,42	18,18
2014		0,994	-6,49	11,90	1124,07		0,990	0,66	17,95	41,72

Tabela 21 – Métricas de desempenho por ano – RHH4.

Ano	Estação	R²	KGE	RMSE	EPMA	Estação	R²	KGE	RMSE	EPMA
1995	41890000	0,974	0,12	22,13	81,21	41940000	0,975	-0,51	42,97	165,51
1996		0,982	-0,78	40,67	143,97		0,985	-1,69	56,46	376,53
1997		0,981	-0,20	42,56	109,45		0,982	0,49	34,97	73,86
1998		0,985	0,57	18,00	47,06		0,982	-0,36	43,55	162,29
1999		0,986	0,59	30,57	38,83		0,982	0,95	6,99	33,52
2000		0,941	0,81	10,48	17,30		0,969	-0,10	30,25	118,62
2001		0,986	0,96	3,80	17,45		0,989	-0,21	25,55	136,17
2002		0,995	0,83	14,07	23,47		0,994	-0,04	38,99	81,37
2003		0,989	0,43	18,78	108,46		0,978	-2,93	69,30	312,31
2004		0,997	0,77	9,03	36,07		0,996	0,12	31,61	82,85
2005		0,983	0,44	18,90	47,45		0,991	0,49	19,70	63,91
2006		0,977	0,90	10,15	11,92		0,960	0,47	29,11	50,40
2007		0,987	0,78	9,78	23,20		0,990	0,82	14,55	16,04
2008		0,971	0,65	12,15	56,34		0,980	0,04	24,57	82,25
2009		0,975	0,61	14,63	64,77		0,977	0,30	37,65	49,90
2010		0,987	0,85	10,90	27,23		0,986	-2,33	51,71	278,60
2011		0,992	0,47	15,57	58,05		0,994	-1,61	47,59	263,21
2012		0,953	-0,12	42,44	95,77		0,949	-1,62	78,15	307,10
2013		0,955	0,03	21,13	75,64		0,982	-0,71	28,00	200,90
2014		0,990	0,90	5,54	17,27		0,986	0,00	32,68	115,23

Tabela 22 – Métricas de desempenho por ano – RHH5.

Ano	Estação	R²	KGE	RMSE	EPMA	Estação	R²	KGE	RMSE	EPMA
1995	41990000	0,997	0,98	11,43	4,11	41818000	0,997	0,96	10,37	5,05
1996		0,998	0,95	23,81	7,36		0,998	0,93	29,90	4,56
1997		0,995	0,89	72,15	9,41		0,988	0,86	62,59	5,86
1998		0,998	0,93	22,29	7,52		0,997	0,92	20,20	5,51
1999		0,995	0,89	37,75	9,89		0,993	0,86	27,47	7,87
2000		0,997	0,95	25,95	7,93		0,996	0,95	20,88	6,23
2001		0,998	0,93	17,97	9,09		0,998	0,92	11,51	8,03
2002		0,996	0,93	33,97	6,25		0,995	0,92	27,97	4,70
2003		0,998	0,96	19,34	5,25		0,998	0,98	10,14	2,69
2004		0,998	0,97	15,59	3,45		0,998	0,97	11,46	2,60
2005		0,999	0,95	25,01	6,16		0,998	0,94	13,00	6,13
2006		0,996	0,91	34,29	5,47		0,995	0,89	25,06	4,53
2007		0,994	0,93	48,23	8,19		0,993	0,93	29,04	6,57
2008		0,993	0,97	17,30	9,51		0,993	0,98	11,76	7,36
2009		0,997	0,96	22,40	5,14		0,997	0,95	16,40	5,14
2010		0,997	0,96	15,82	6,79		0,996	0,96	13,49	4,35
2011		0,996	0,97	21,33	5,85		0,997	0,98	14,13	4,92
2012		0,994	0,89	78,96	8,96		0,991	0,86	59,58	5,87
2013		0,998	0,95	8,27	7,02		0,998	0,94	6,59	6,86
2014		0,998	0,90	39,41	11,34		0,996	0,88	26,06	8,60

Figura APÊNDICE C 1 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão Média Anual – 1995.

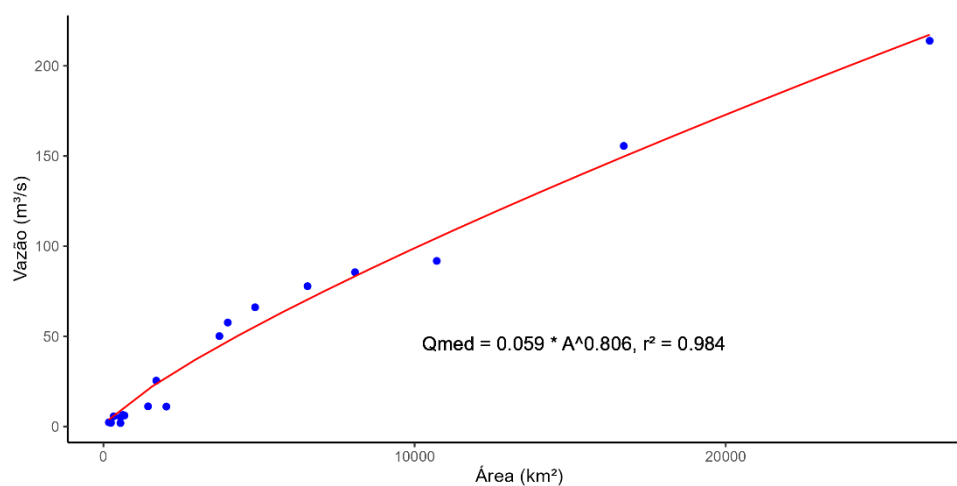


Figura APÊNDICE C 2 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão Média Anual – 1996.

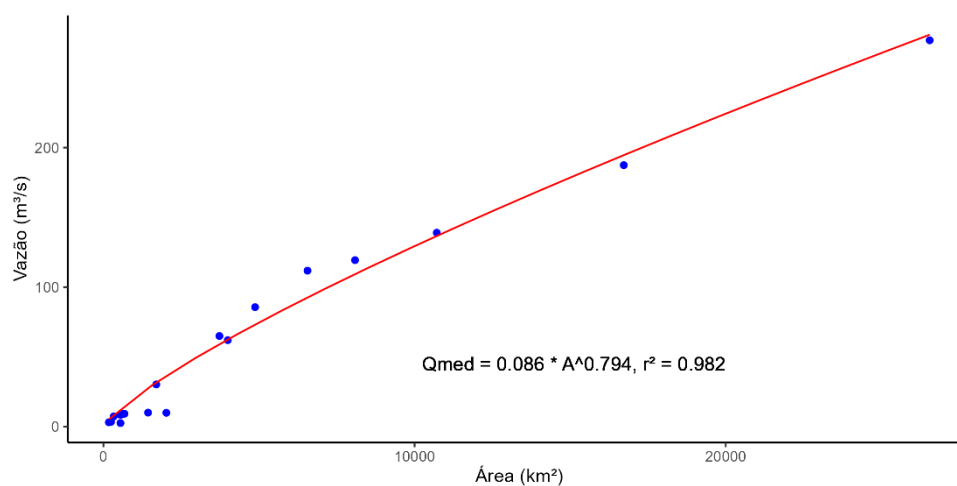


Figura APÊNDICE C 3 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão Média Anual – 1997.

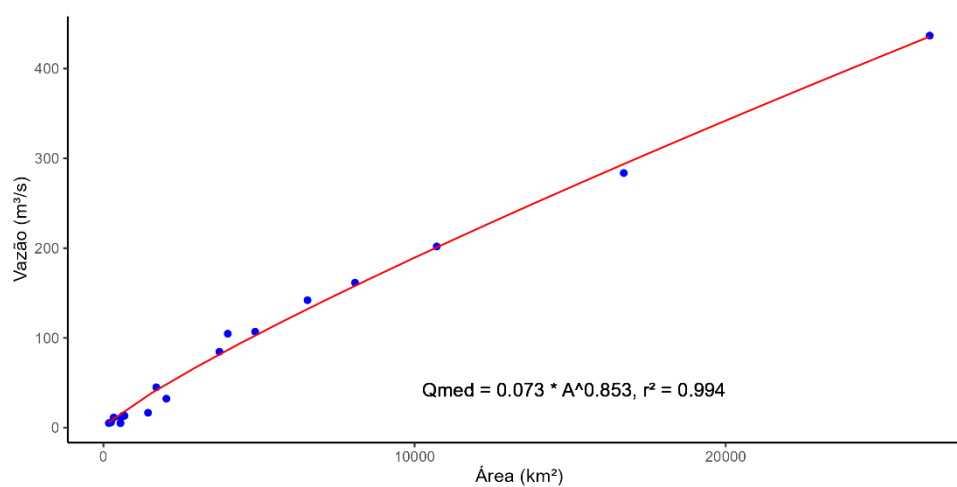


Figura APÊNDICE C 4 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão Média Anual – 1998.

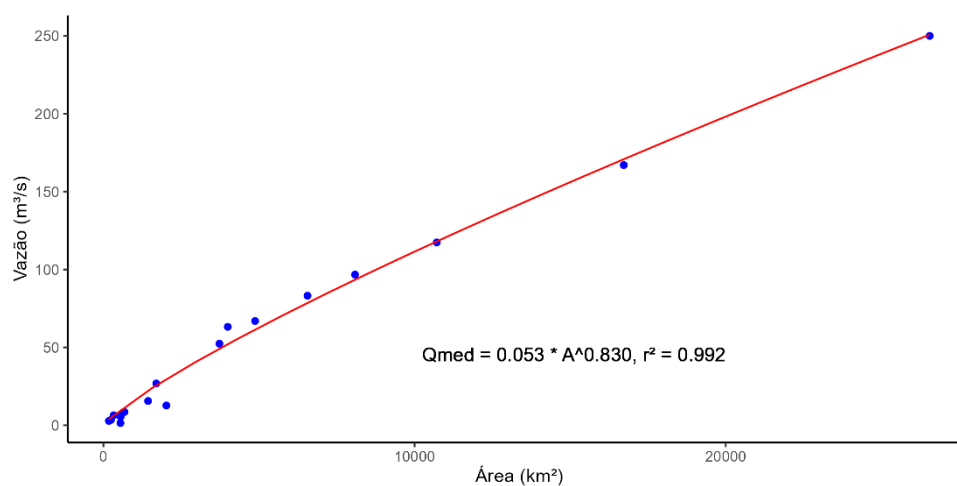


Figura APÊNDICE C 5 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão Média Anual – 1999.

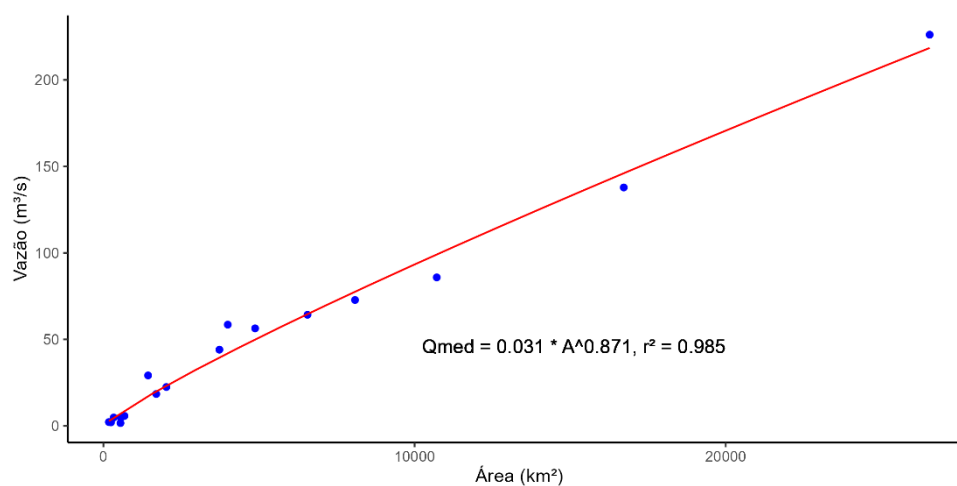


Figura APÊNDICE C 6 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão Média Anual – 2000.

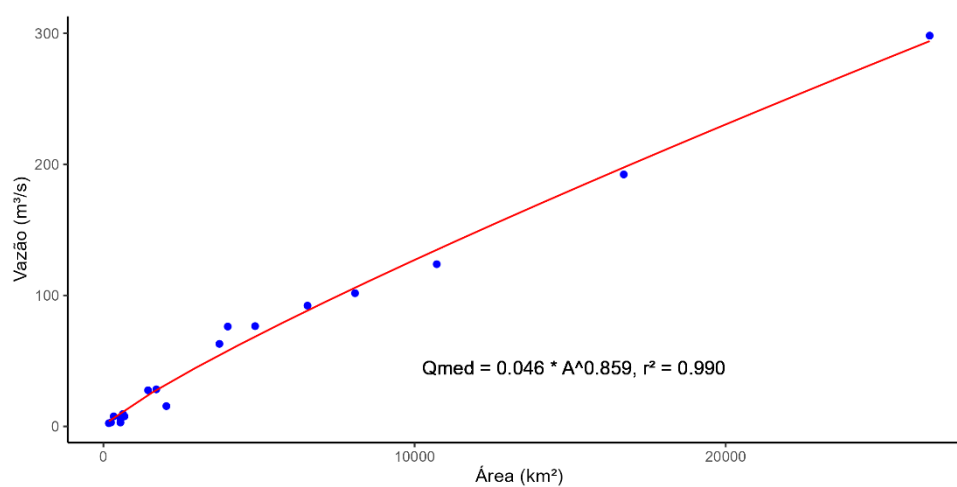


Figura APÊNDICE C 7 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão Média Anual – 2001.

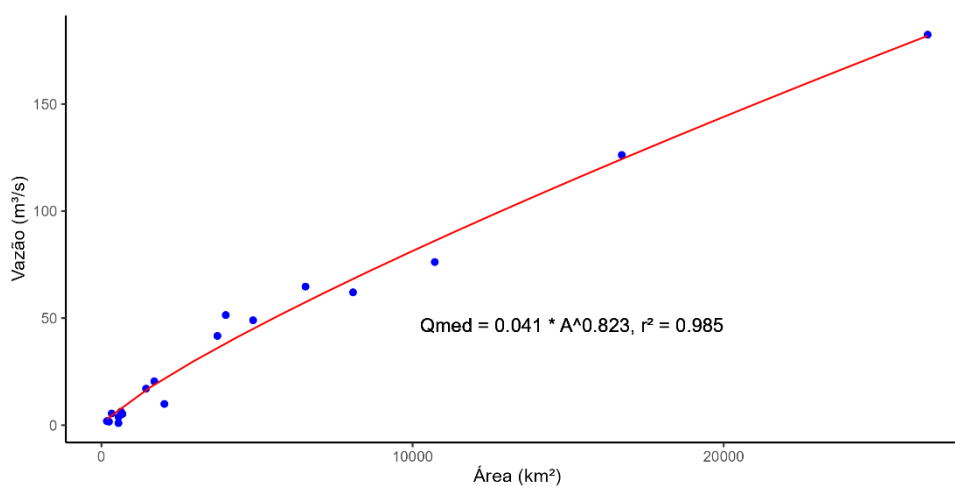


Figura APÊNDICE C 8 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão Média Anual – 2002.

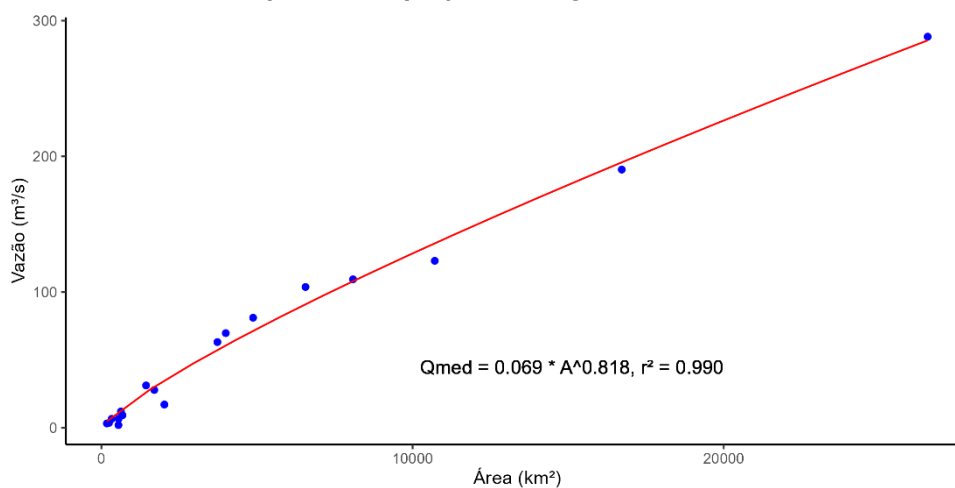


Figura APÊNDICE C 9 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão Média Anual – 2003.

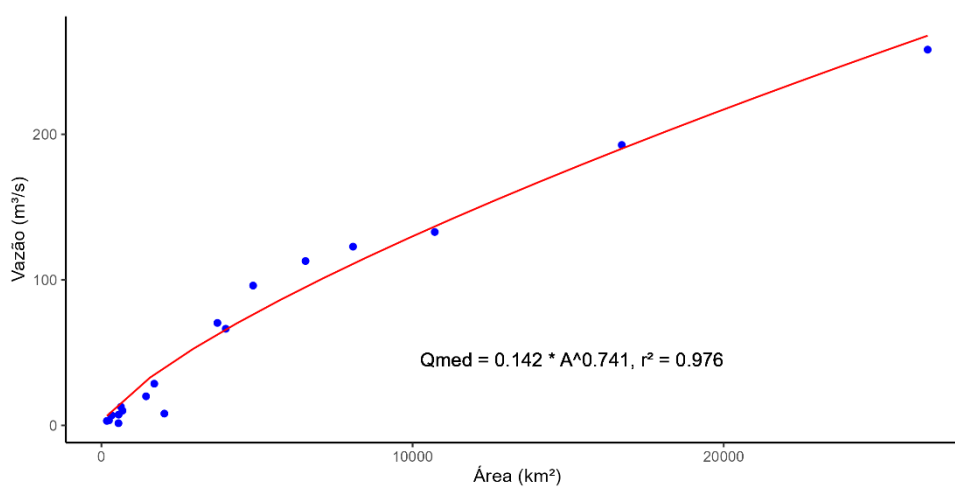


Figura APÊNDICE C 10 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão Média Anual – 2004.

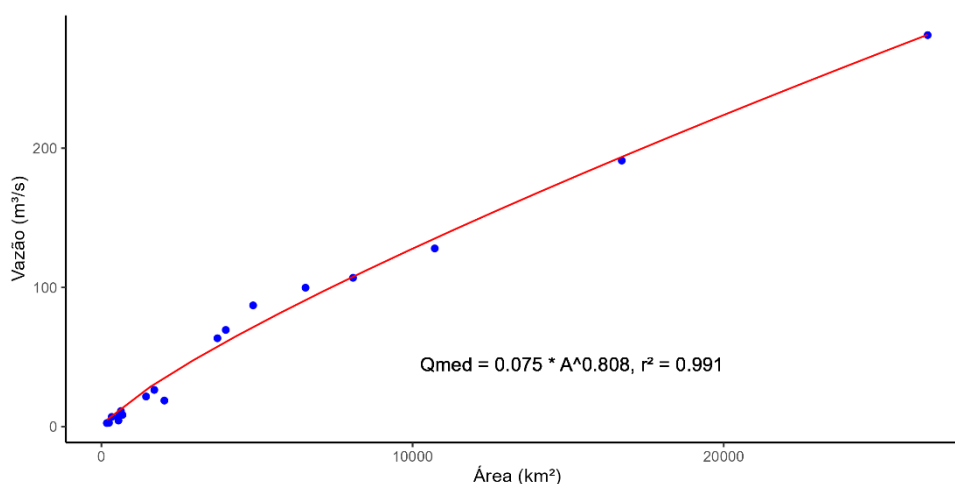


Figura APÊNDICE C 13 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão Média Anual – 2007.

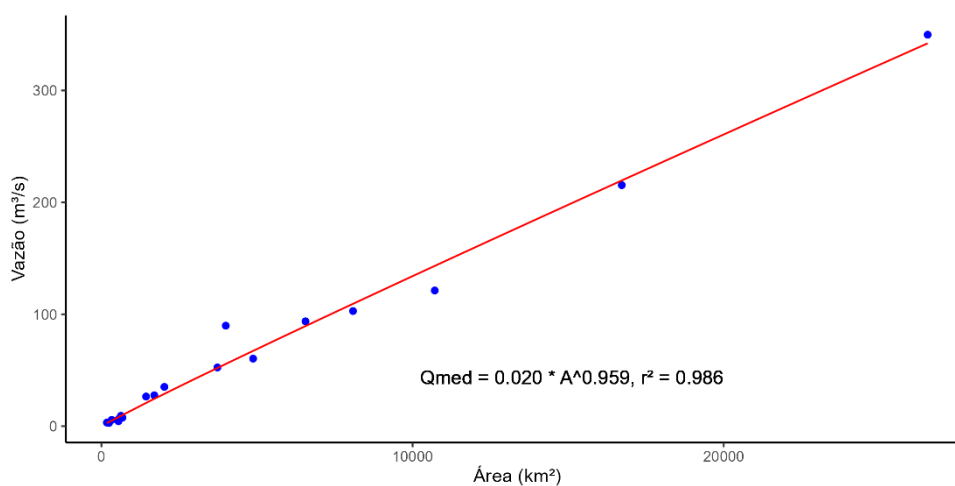


Figura APÊNDICE C 14 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão Média Anual – 2008.

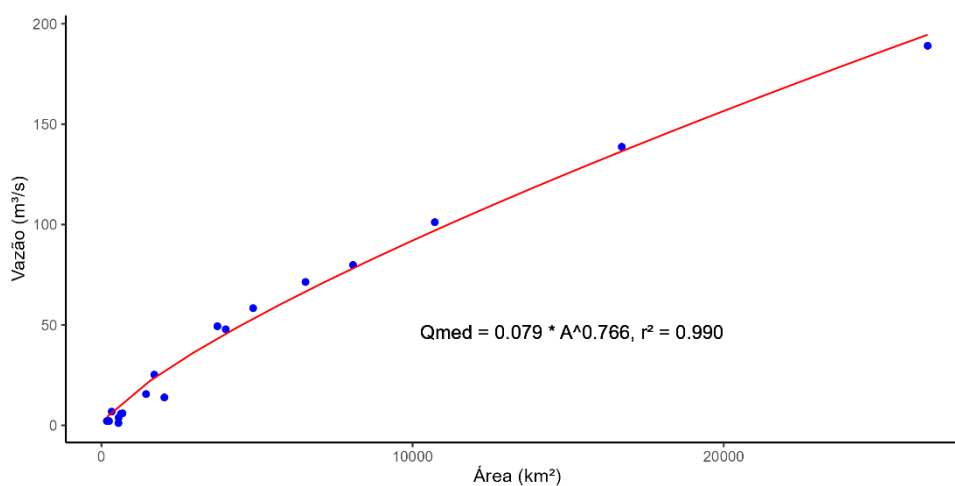


Figura APÊNDICE C 15 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão Média Anual – 2009.

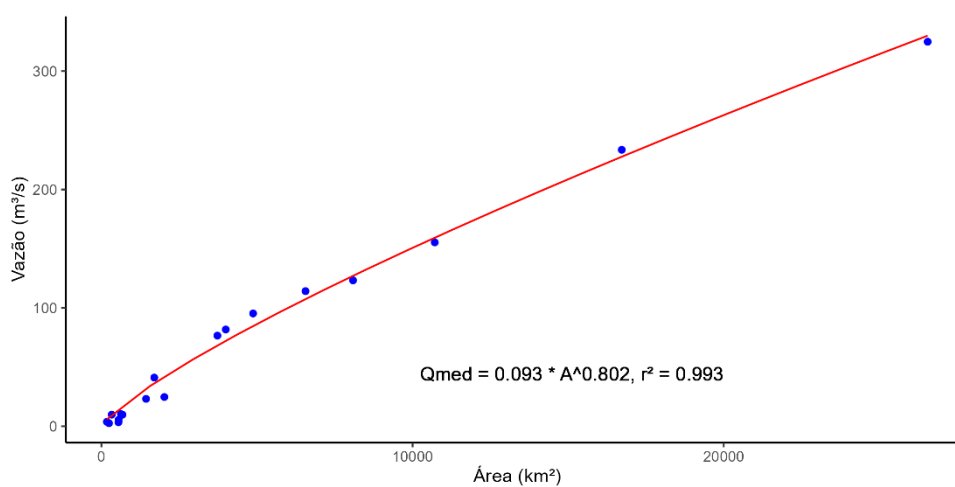


Figura APÊNDICE C 16 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão Média Anual – 2010.

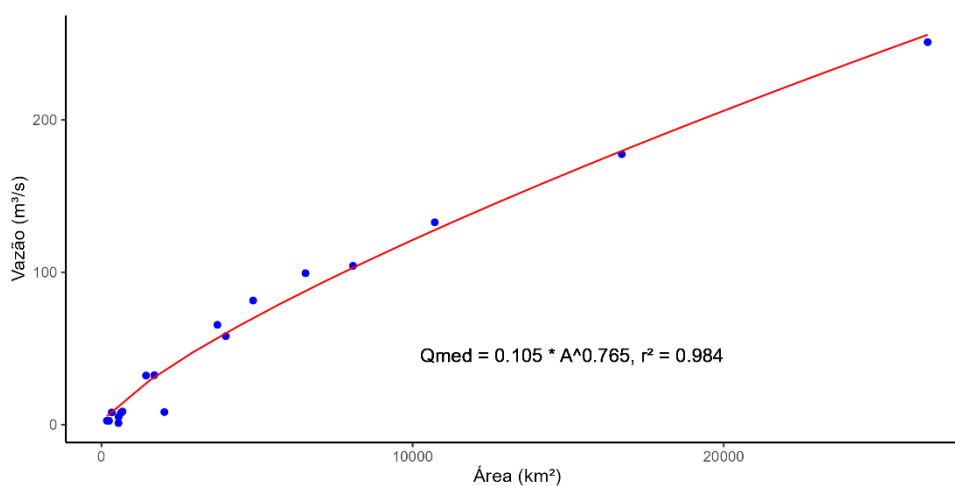


Figura APÊNDICE C 17 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão Média Anual – 2011.

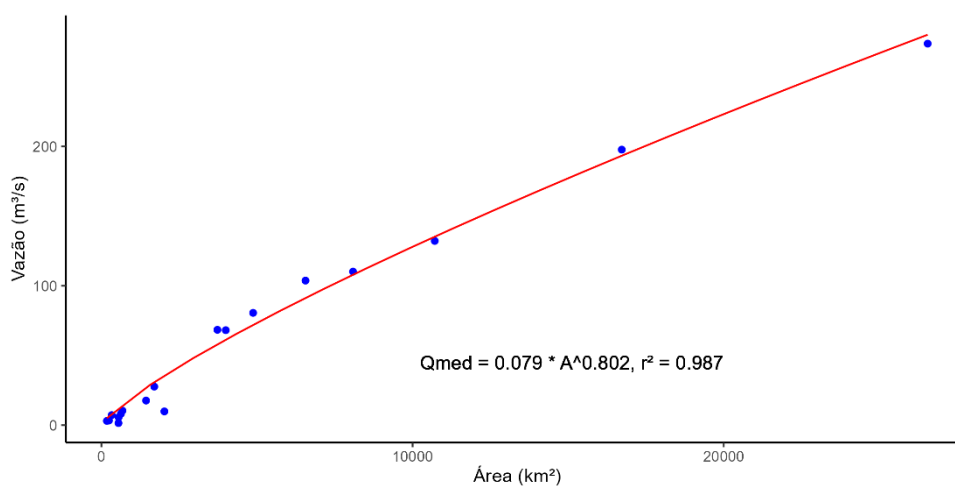


Figura APÊNDICE C 18 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão Média Anual – 2012.

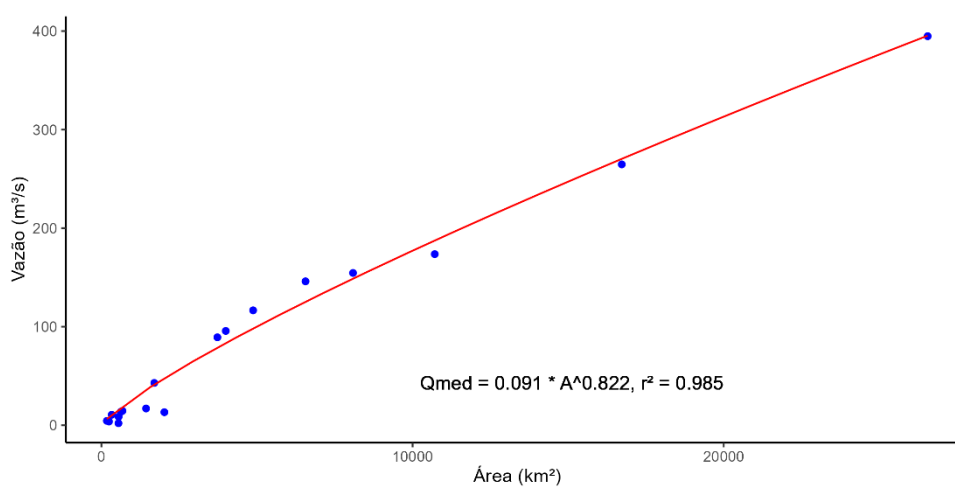


Figura APÊNDICE C 19 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão Média Anual – 2013.

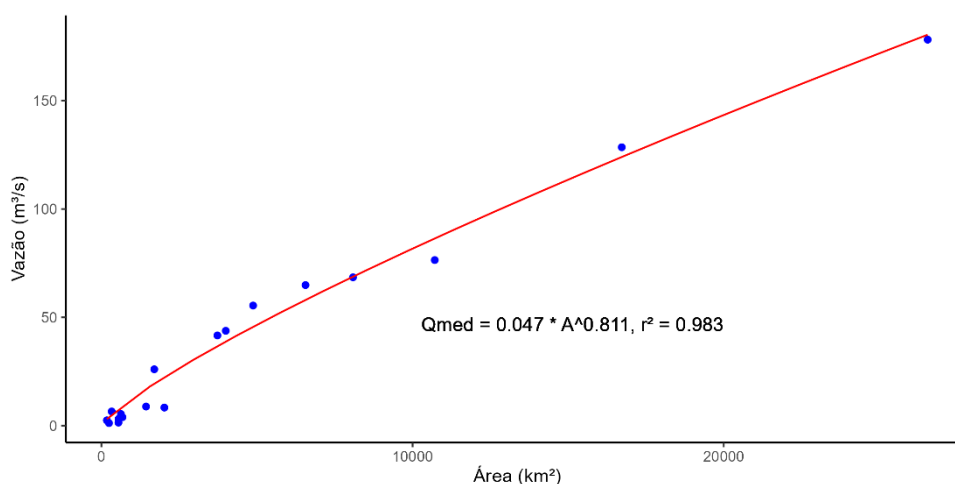


Figura APÊNDICE C 20 – Ajuste de Equação de Regressão – Vazão Média Anual – 2014.

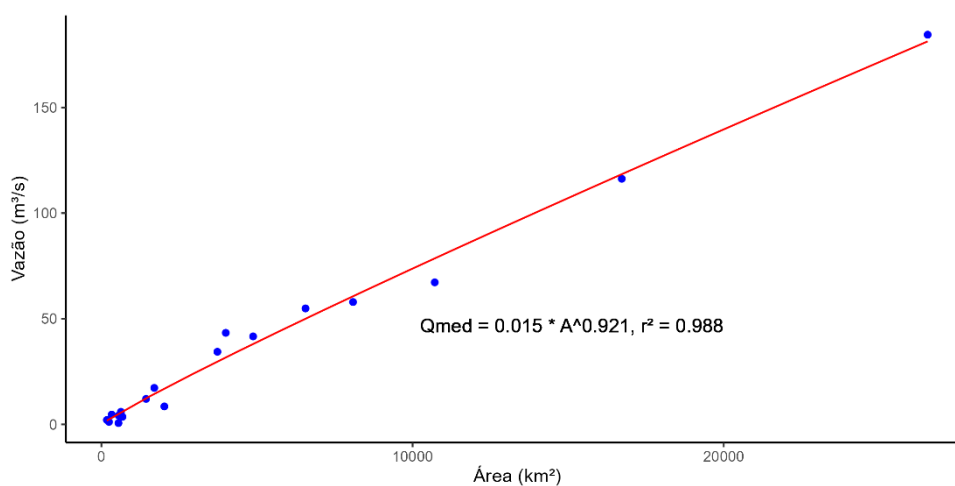


Figura APÊNDICE C 21 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41151000 – RHH01

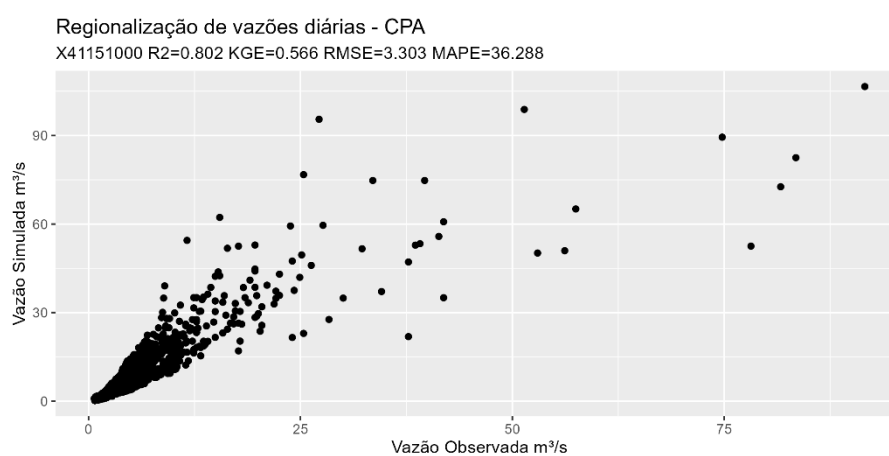


Figura APÊNDICE C 22 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41180000 – RHH01

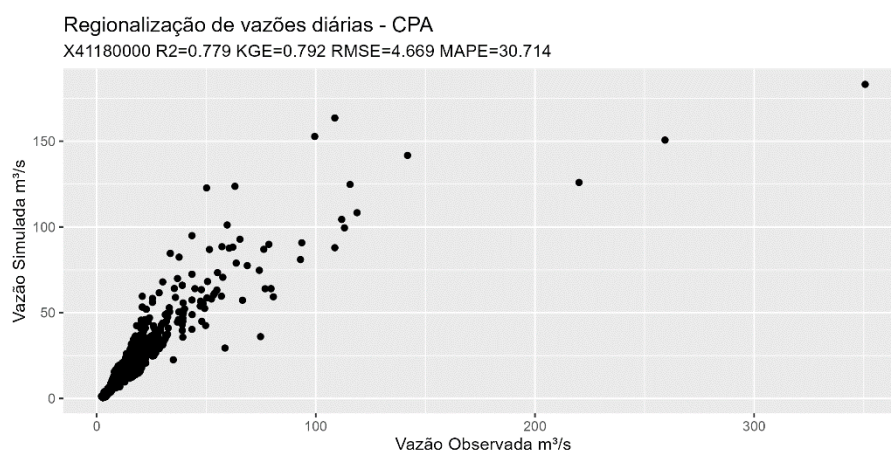


Figura APÊNDICE C 23 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41199998 – RHH01

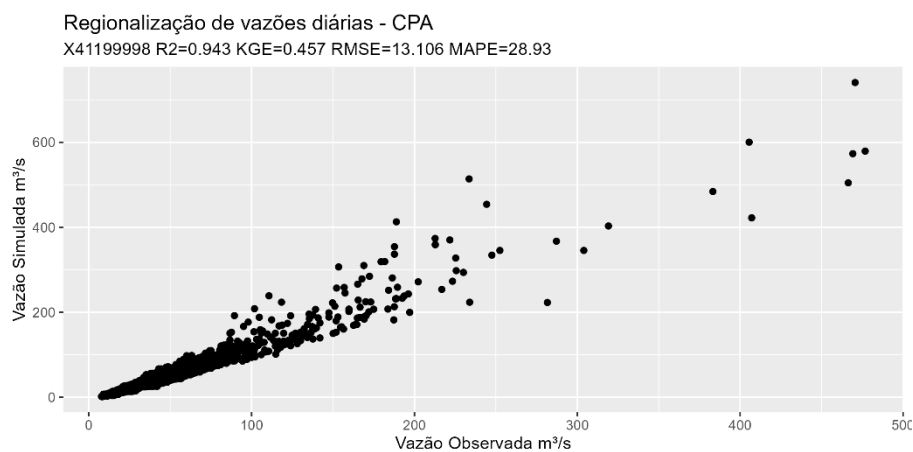


Figura APÊNDICE C 24 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41250000 – RHH01

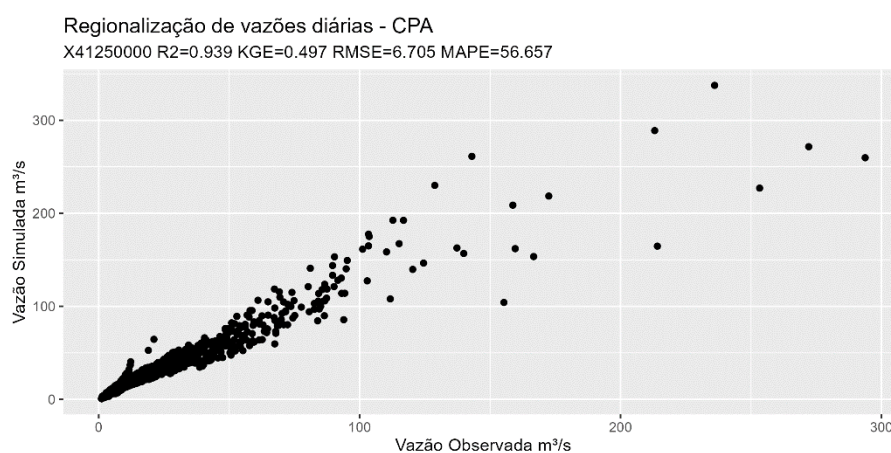


Figura APÊNDICE C 25 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41260000 – RHH01

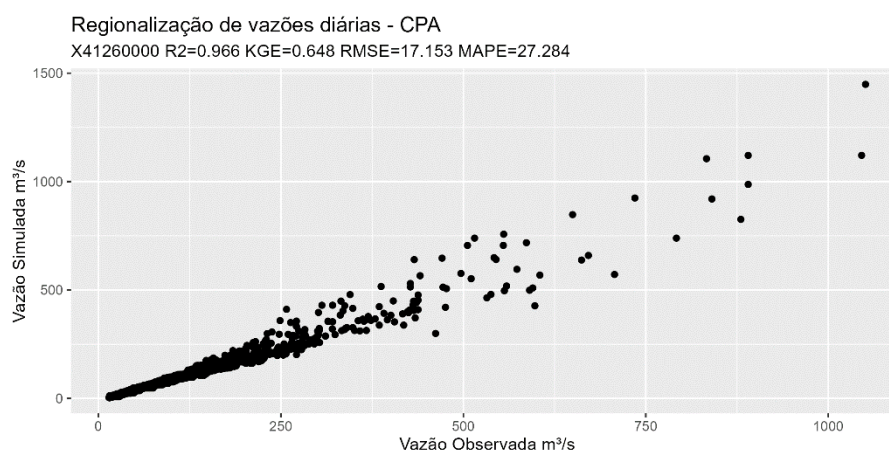


Figura APÊNDICE C 26 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41300000 – RHH01

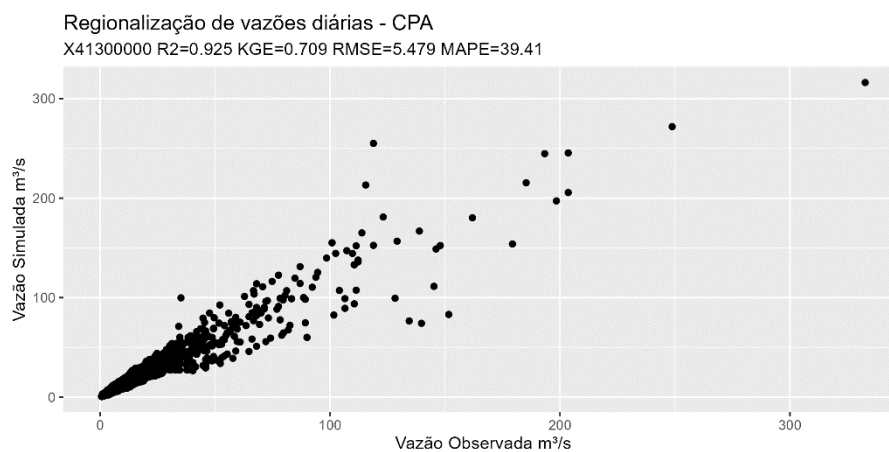


Figura APÊNDICE C 27 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41340000 – RHH01

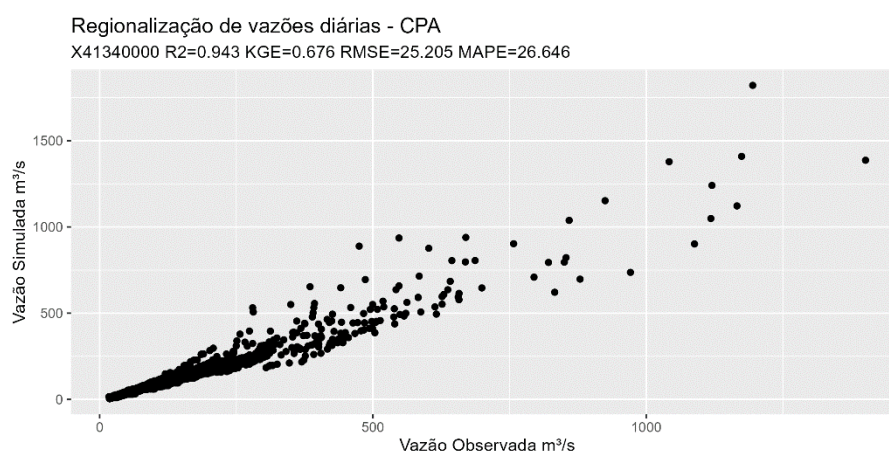


Figura APÊNDICE C 28 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41380000 – RHH01

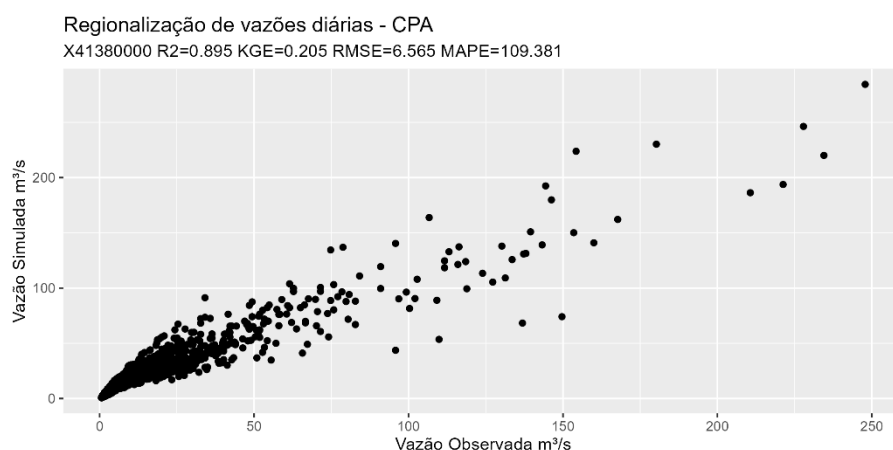


Figura APÊNDICE C 29 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41440005 – RHH01

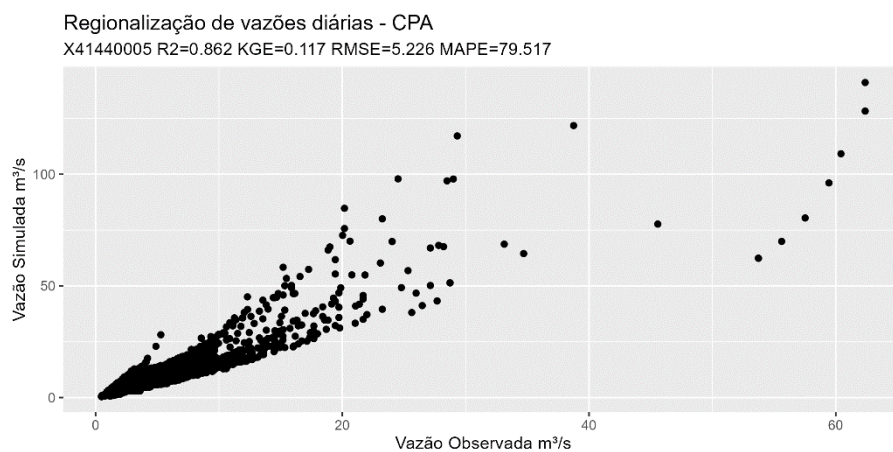


Figura APÊNDICE C 30 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41410000 – RHH02

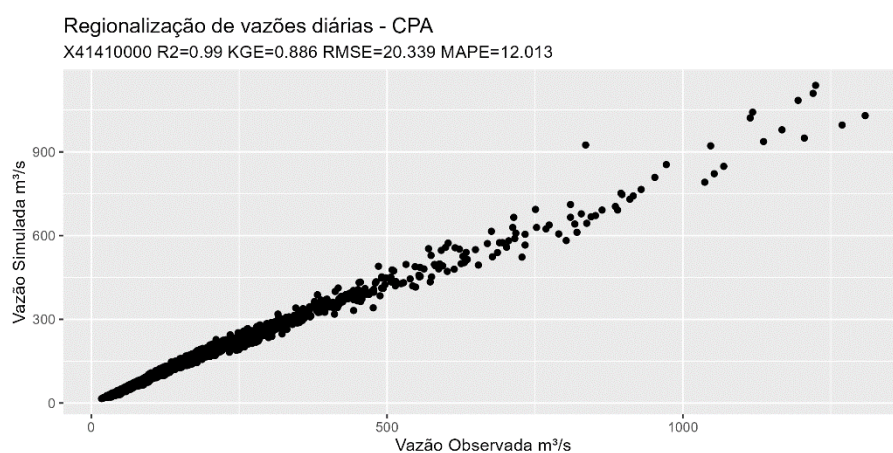


Figura APÊNDICE C 31 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41600000–RHH02

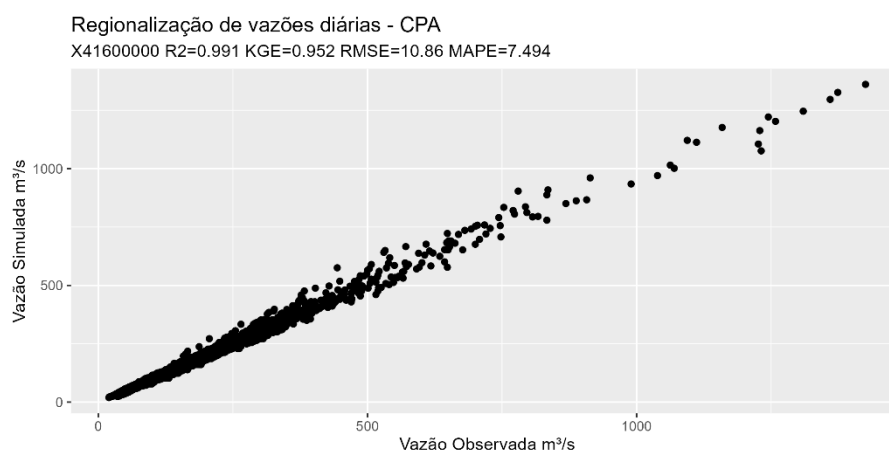


Figura APÊNDICE C 32 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41650002–RHH02

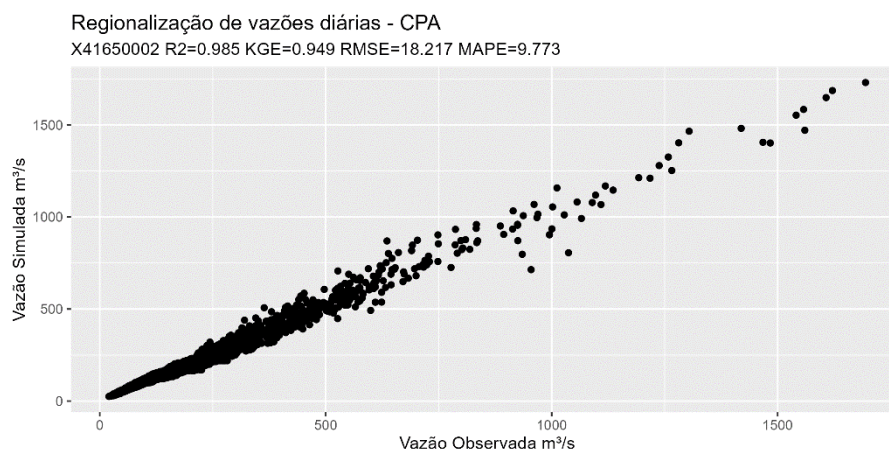


Figura APÊNDICE C 33 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41685000–RHH03

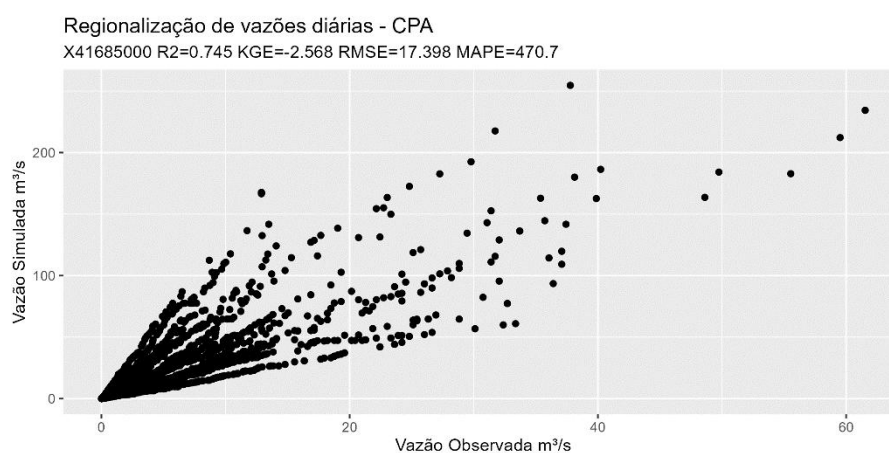


Figura APÊNDICE C 34 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41780002–RHH03

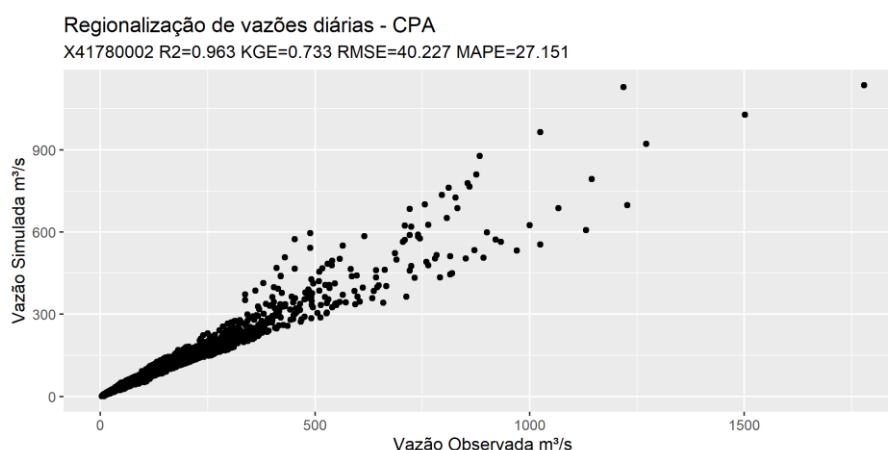


Figura APÊNDICE C 35 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41890000 –RHH04

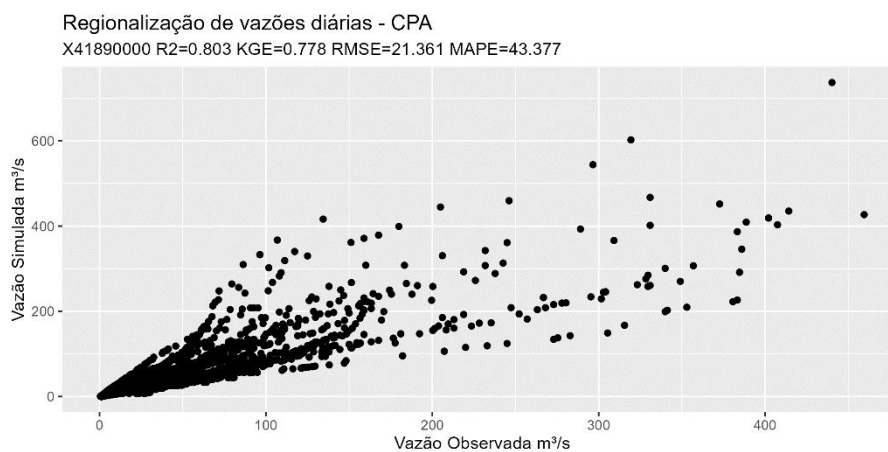


Figura APÊNDICE C 36 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41940000–RHH04

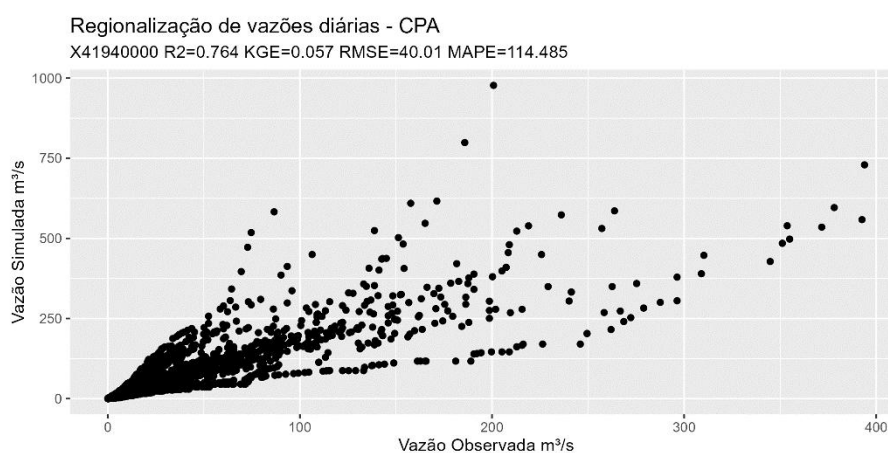


Figura APÊNDICE C 37 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41990000–RHH05

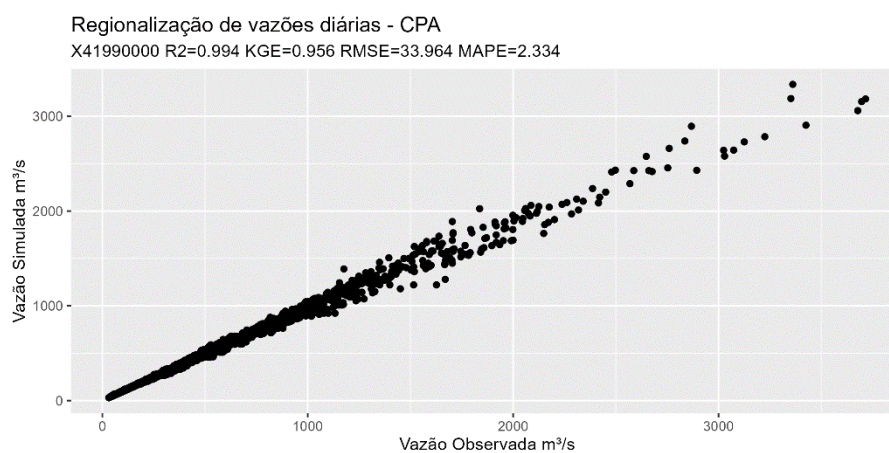
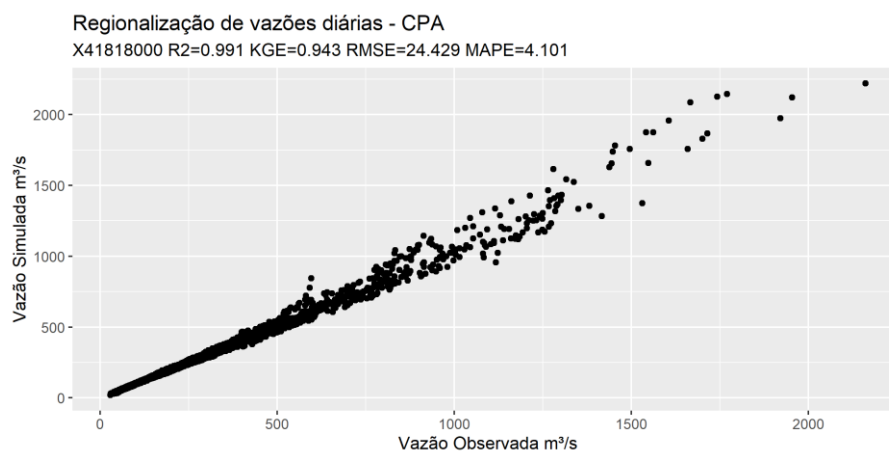


Figura APÊNDICE C 38 – Dados Simulados e Dados Observados – CPA – Estação 41818000–RHH05



APÊNDICE D – Modelo de Distribuição

Tabela 23 – Métricas – Ajuste das Distribuições às Séries de Dados

Modelo de Ajuste	R2	KGE	RMSE	EPMA	Estação
Gama	0,54	0,47	2,59	22,07	41151000
	0,43	0,36	6,92	21,48	41180000
	0,71	0,63	15,55	20,14	41199998
	0,69	0,57	8,38	34,68	41250000
	0,76	0,66	34,54	24,64	41260000
	0,75	0,62	7,84	30,05	41300000
	0,79	0,68	42,72	24,75	41340000
	0,63	0,49	8,81	45,15	41380000
	0,81	0,70	50,56	26,17	41410000
	0,68	0,60	2,13	26,17	41440005
	0,82	0,72	49,11	24,57	41600000
	0,87	0,75	54,58	25,98	41650002
	0,94	0,82	1,28	36,06	41685000
	0,93	0,79	37,03	37,46	41780002
	0,94	0,83	60,42	26,67	41818000
	0,96	0,84	10,21	43,64	41890000
	0,95	0,82	9,32	40,46	41940000
	0,94	0,82	104,39	28,02	41990000
GEV	0,92	0,84	1,16	2,15	41151000
	0,97	0,80	2,40	1,59	41180000
	0,96	0,96	5,22	2,05	41199998
	0,96	0,93	3,03	2,72	41250000
	0,89	0,83	24,92	3,28	41260000
	0,95	0,94	3,12	3,87	41300000
	0,90	0,83	32,51	4,02	41340000
	0,95	0,72	5,28	4,92	41380000
	0,82	0,77	54,02	4,43	41410000
	0,91	0,75	1,38	4,03	41440005
	0,89	0,84	40,87	5,27	41600000
	0,85	0,76	64,44	8,45	41650002
	0,84	0,76	1,93	51,25	41685000
	0,73	0,57	78,24	20,28	41780002
	0,80	0,71	119,05	11,29	41818000
	0,81	0,70	19,62	55,40	41890000
	0,84	0,74	14,71	58,85	41940000
	0,87	0,78	152,81	13,41	41990000

Modelo de Ajuste	R2	KGE	RMSE	EPMA	Estação
GLO	0,91	0,87	1,19	2,38	41151000
	0,98	0,81	2,18	1,65	41180000
	0,95	0,93	6,50	2,68	41199998
	0,95	0,93	3,24	3,23	41250000
	0,86	0,79	29,41	4,01	41260000
	0,94	0,91	3,61	4,51	41300000
	0,86	0,78	38,73	4,81	41340000
	0,95	0,72	5,36	5,31	41380000
	0,79	0,71	61,68	5,21	41410000
	0,91	0,75	1,39	4,47	41440005
	0,86	0,80	48,19	6,14	41600000
	0,81	0,71	74,72	9,35	41650002
	0,82	0,75	2,03	49,94	41685000
	0,71	0,53	83,37	20,84	41780002
	0,75	0,65	135,04	12,39	41818000
	0,80	0,69	19,98	55,41	41890000
	0,83	0,73	15,10	56,62	41940000
	0,84	0,75	169,96	14,55	41990000
GNO	0,89	0,74	1,42	4,73	41151000
	0,87	0,69	3,90	4,01	41180000
	0,99	0,91	4,01	2,36	41199998
	0,98	0,87	2,73	6,09	41250000
	0,99	0,98	7,01	1,87	41260000
	0,99	0,90	2,22	4,75	41300000
	0,99	0,99	9,07	1,63	41340000
	0,95	0,76	4,69	7,71	41380000
	0,97	0,97	19,88	2,50	41410000
	0,89	0,76	1,38	6,18	41440005
	0,99	0,98	13,25	2,91	41600000
	0,97	0,95	23,22	4,43	41650002
	0,95	0,92	0,95	18,60	41685000
	0,93	0,85	33,55	8,71	41780002
	0,94	0,89	58,31	5,94	41818000
	0,93	0,84	11,77	30,32	41890000
	0,94	0,88	8,24	18,47	41940000
	0,96	0,92	71,89	6,24	41990000
Wakeby	0,92	0,84	1,14	2,01	41151000
	0,97	0,80	2,38	1,97	41180000
	0,98	0,96	3,60	1,65	41199998
	0,98	0,91	2,63	5,07	41250000
	0,97	0,97	12,45	2,49	41260000
	0,98	0,96	2,20	1,80	41300000
	0,97	0,97	15,61	2,28	41340000
	0,95	0,73	5,11	5,72	41380000
	0,92	0,92	31,50	3,44	41410000
	0,89	0,75	1,40	6,87	41440005
	0,96	0,96	20,77	3,75	41600000
	0,94	0,91	34,84	5,28	41650002
	0,90	0,85	1,45	24,80	41685000
	0,83	0,72	56,92	12,29	41780002
	0,91	0,86	72,39	6,27	41818000
	0,86	0,76	16,73	40,91	41890000
	0,88	0,81	12,13	30,55	41940000
	0,94	0,89	94,40	6,71	41990000

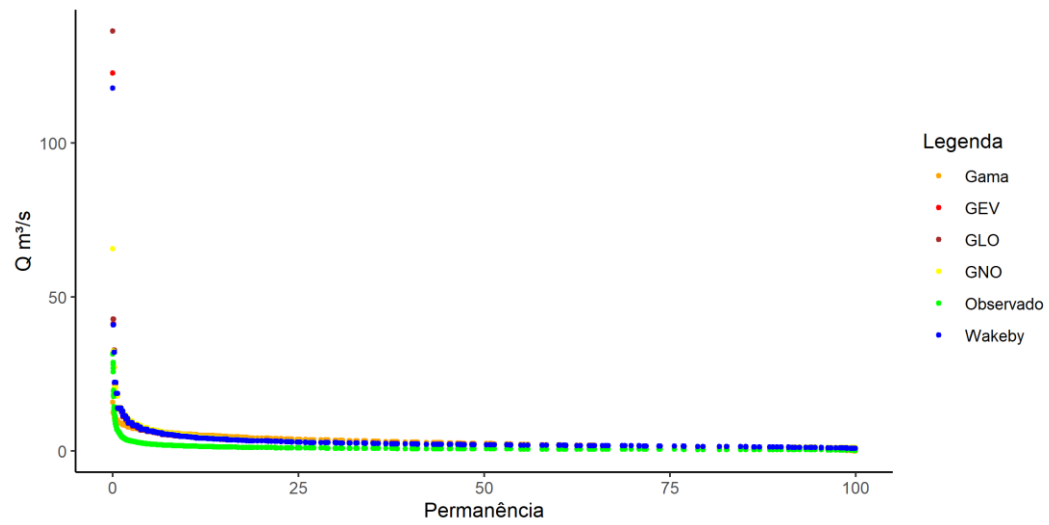
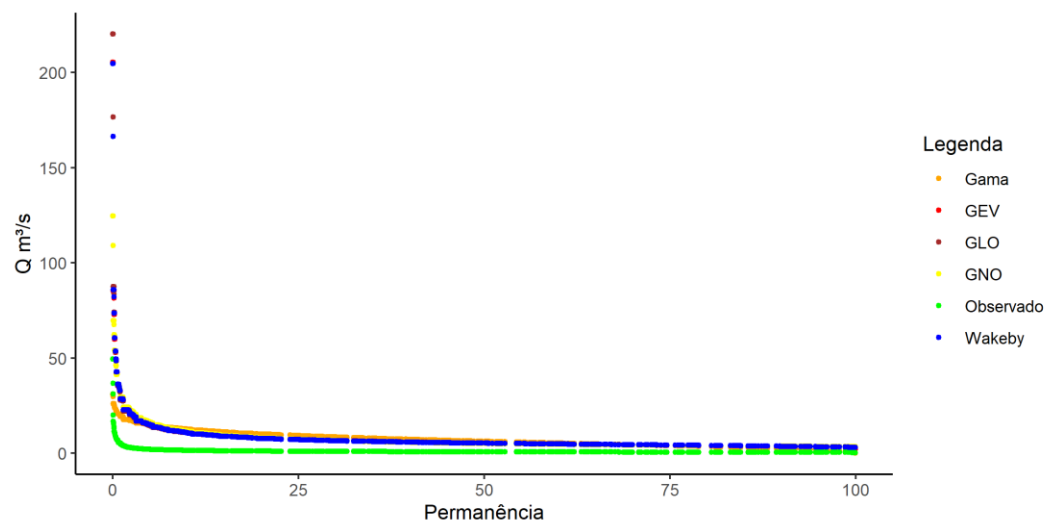
Figura APÊNDICE D 1 – Ajuste dos Modelos de Distribuição – Estação 41151000**Figura APÊNDICE D 2 – Ajuste dos Modelos de Distribuição – Estação 41180000**

Figura APÊNDICE D 3 – Ajuste dos Modelos de Distribuição – Estação 41199998

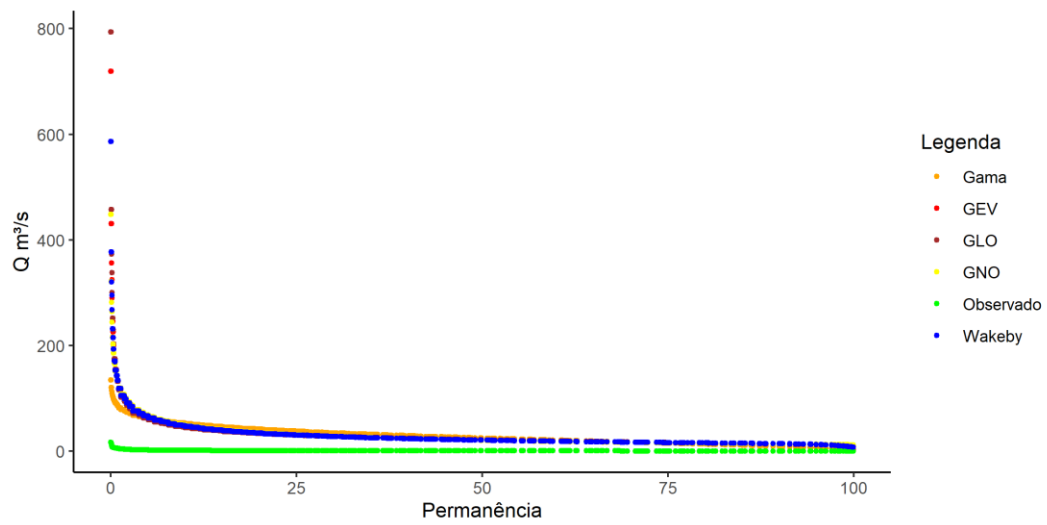


Figura APÊNDICE D 4 – Ajuste dos Modelos de Distribuição – Estação 41250000

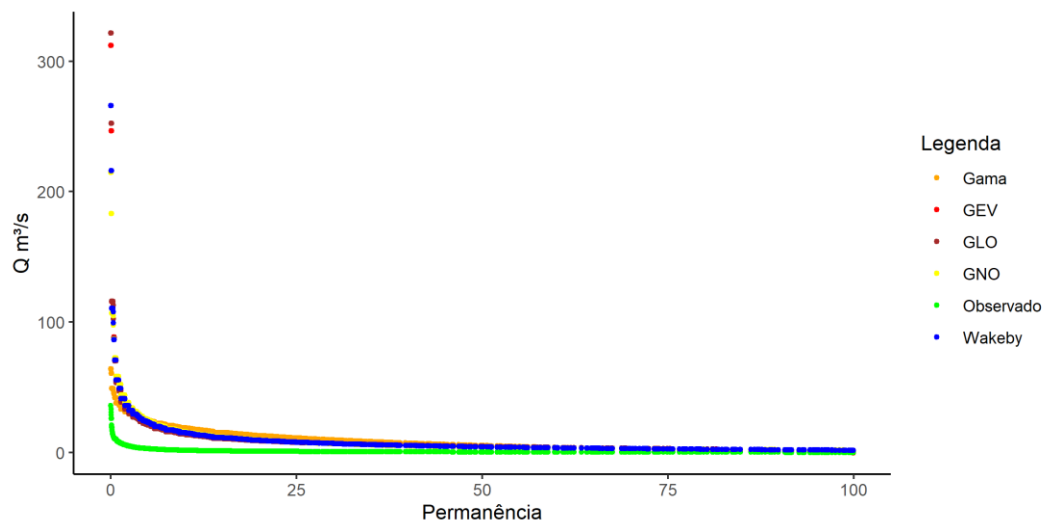


Figura APÊNDICE D 5 – Ajuste dos Modelos de Distribuição – Estação 41260000

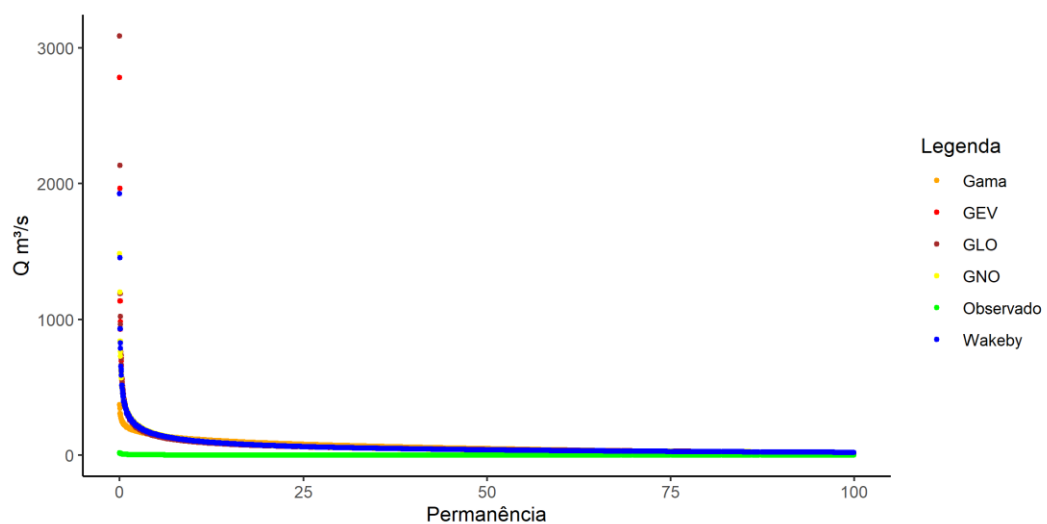


Figura APÊNDICE D 6– Ajuste dos Modelos de Distribuição – Estação 41300000

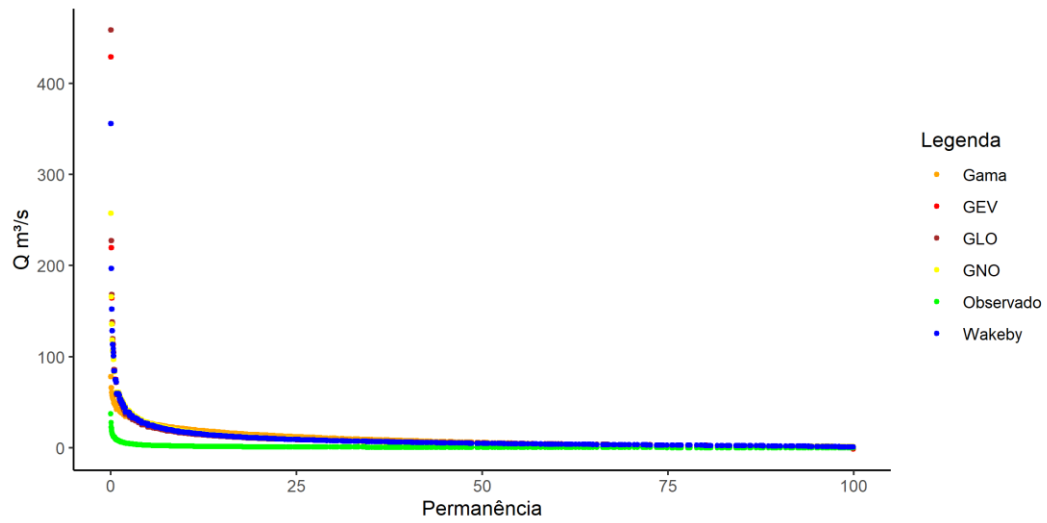


Figura APÊNDICE D 7 – Ajuste dos Modelos de Distribuição – Estação 41340000

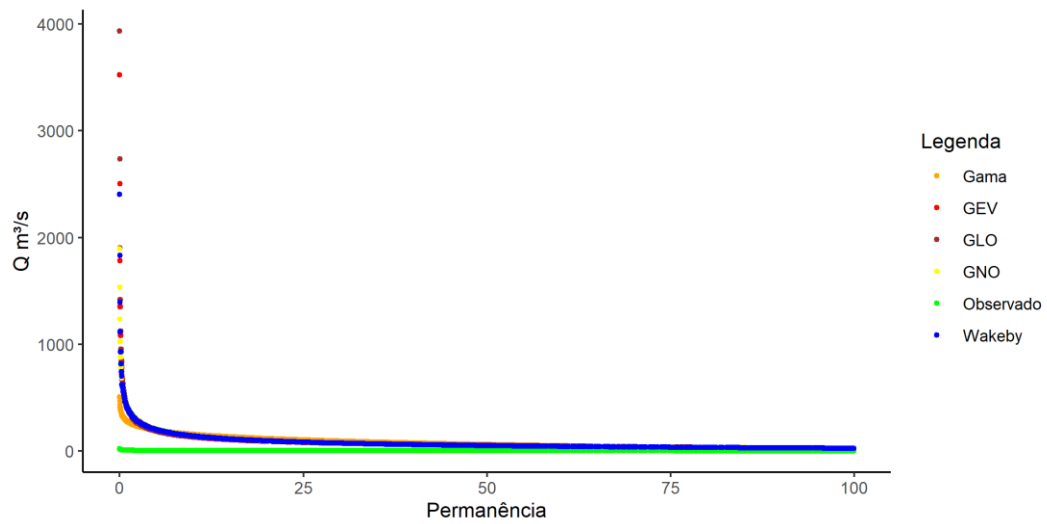


Figura APÊNDICE D 8 – Ajuste dos Modelos de Distribuição – Estação 41380000

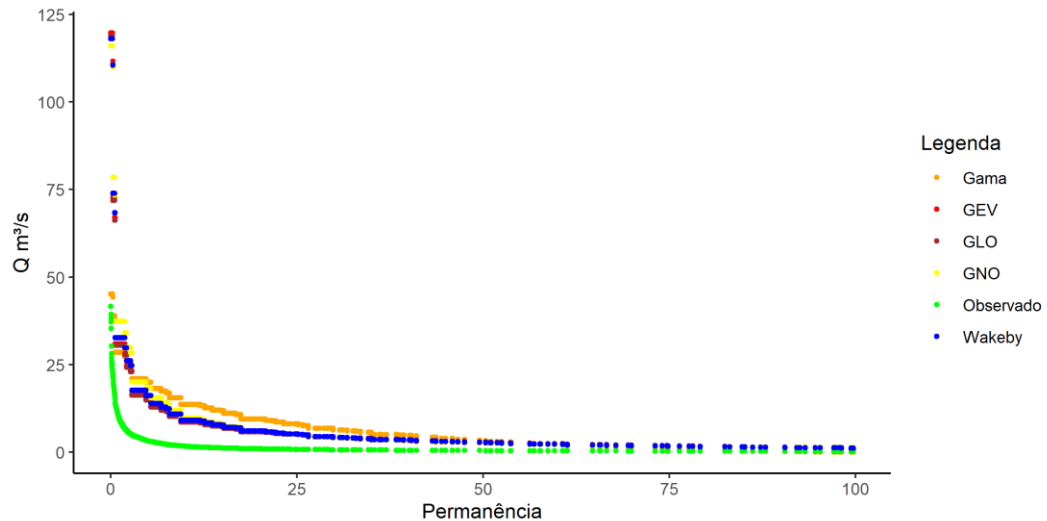


Figura APÊNDICE D 9 – Ajuste dos Modelos de Distribuição – Estação 41440005

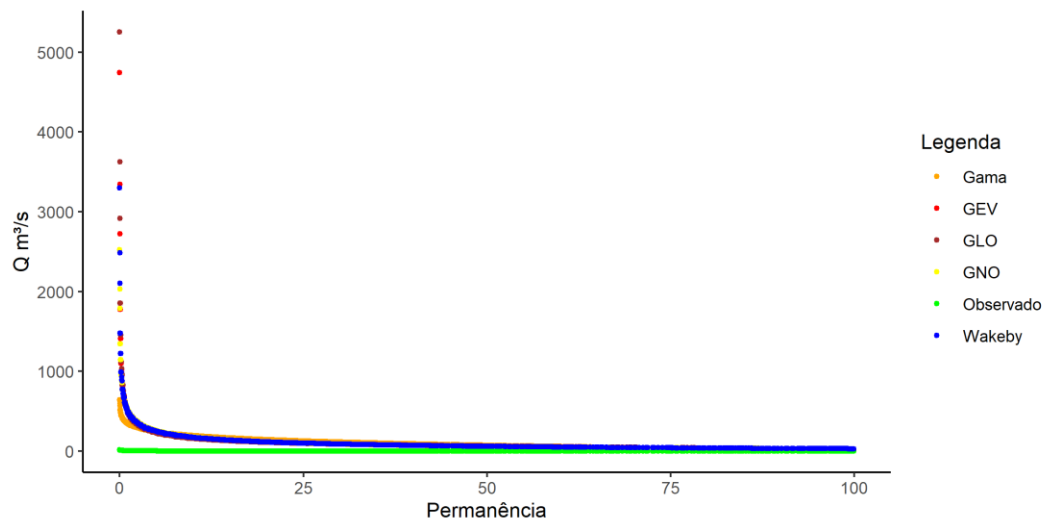


Figura APÊNDICE D 10 – Ajuste dos Modelos de Distribuição – Estação 41410000

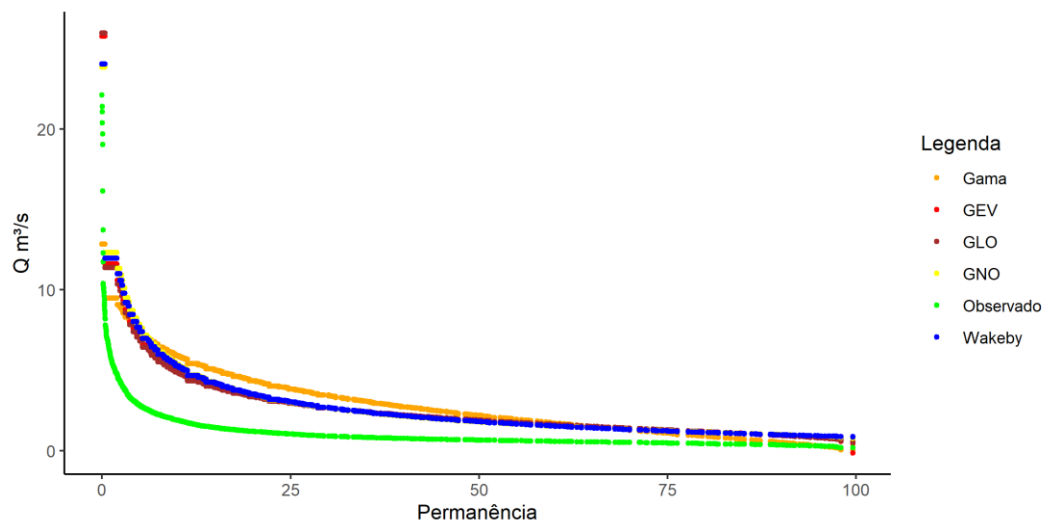


Figura APÊNDICE D 11 – Ajuste dos Modelos de Distribuição – Estação 41600000

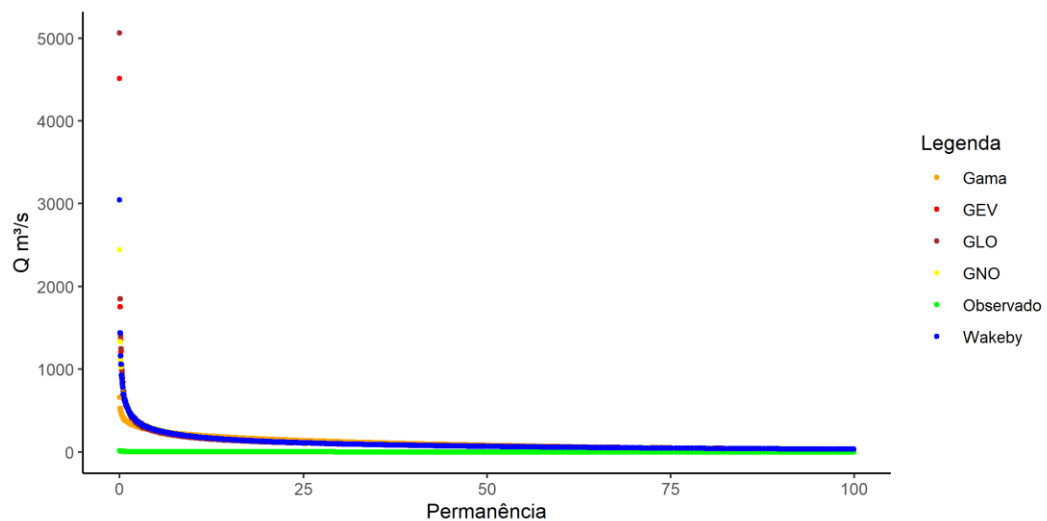


Figura APÊNDICE D 12 – Ajuste dos Modelos de Distribuição – Estação 41650002

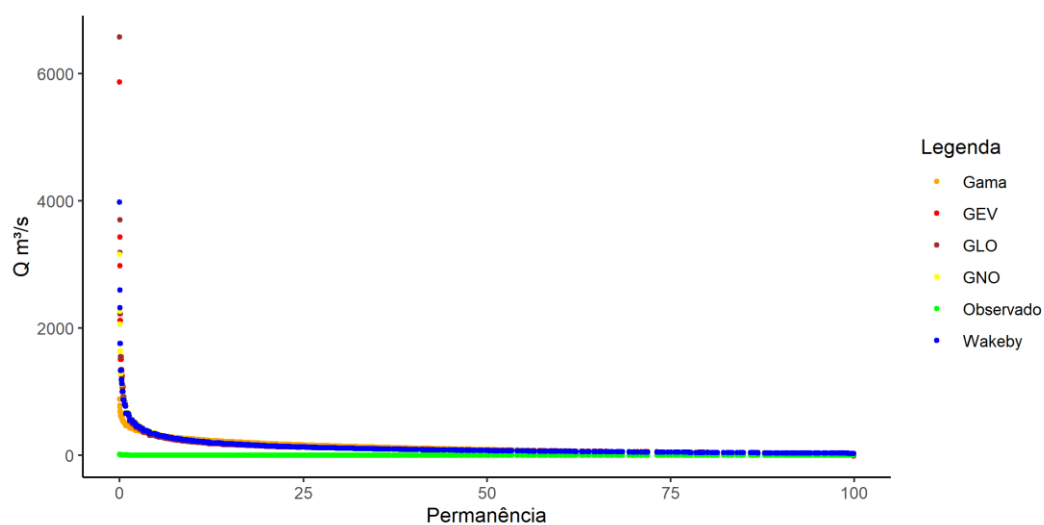


Figura APÊNDICE D 13 – Ajuste dos Modelos de Distribuição – Estação 41685000

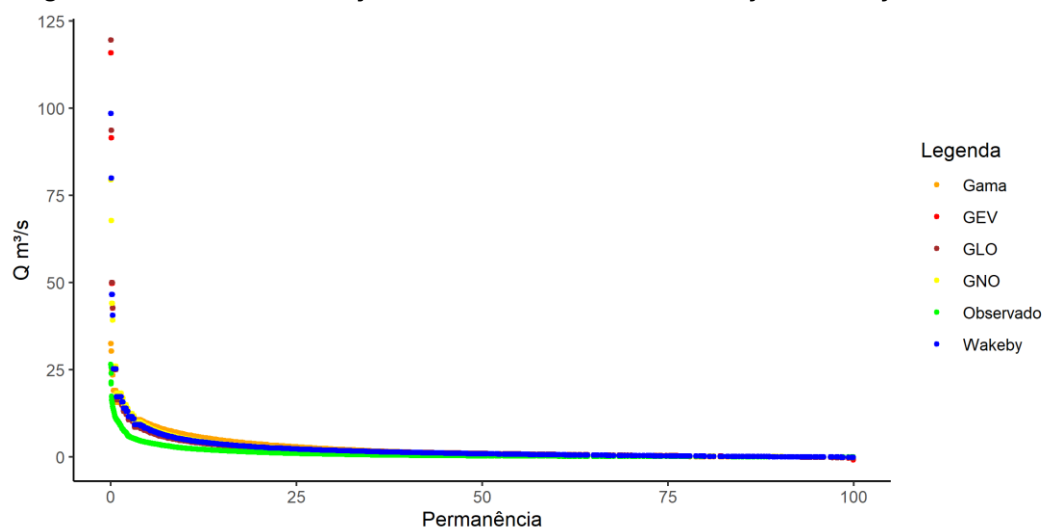


Figura APÊNDICE D 14 – Ajuste dos Modelos de Distribuição – Estação 41780002

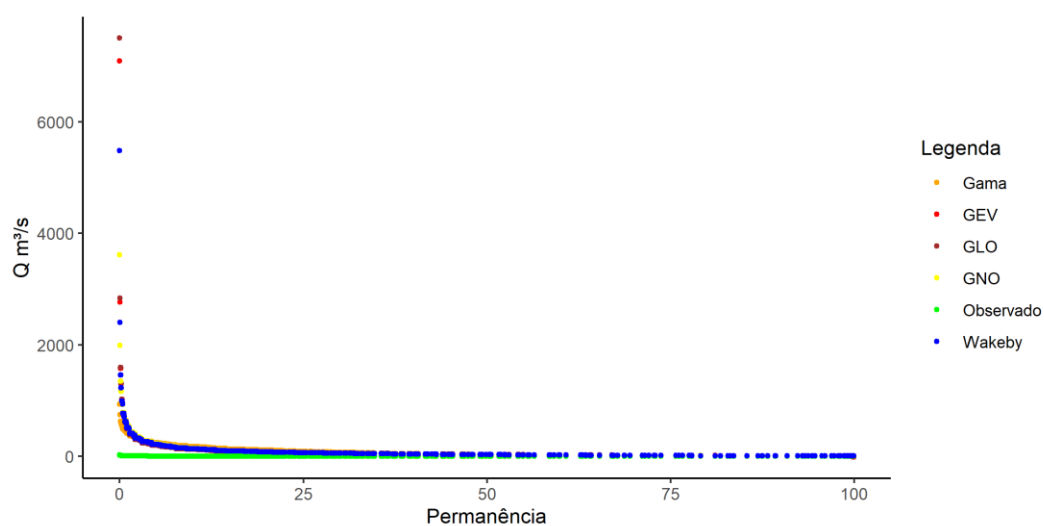


Figura APÊNDICE D 15 – Ajuste dos Modelos de Distribuição – Estação 41890000

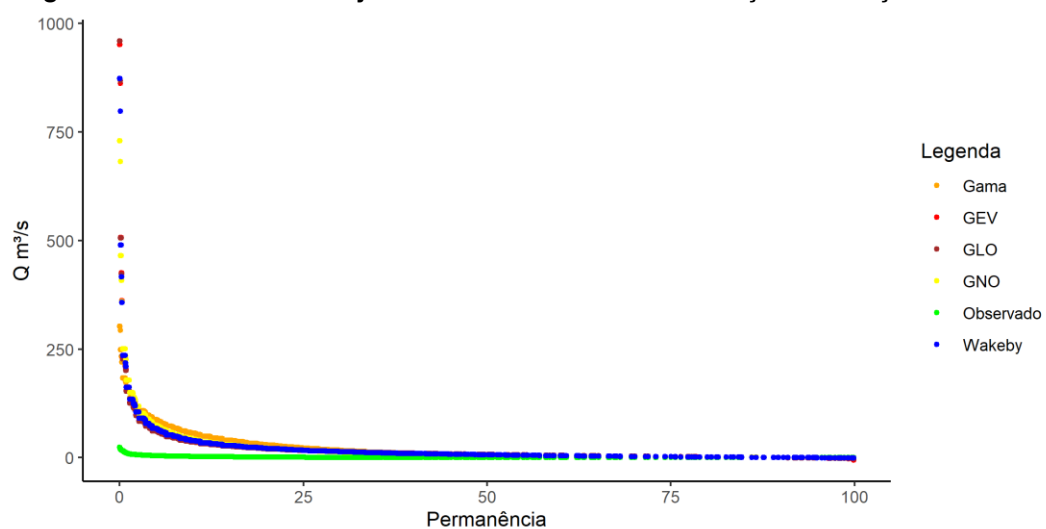


Figura APÊNDICE D 16 – Ajuste dos Modelos de Distribuição – Estação 41940000

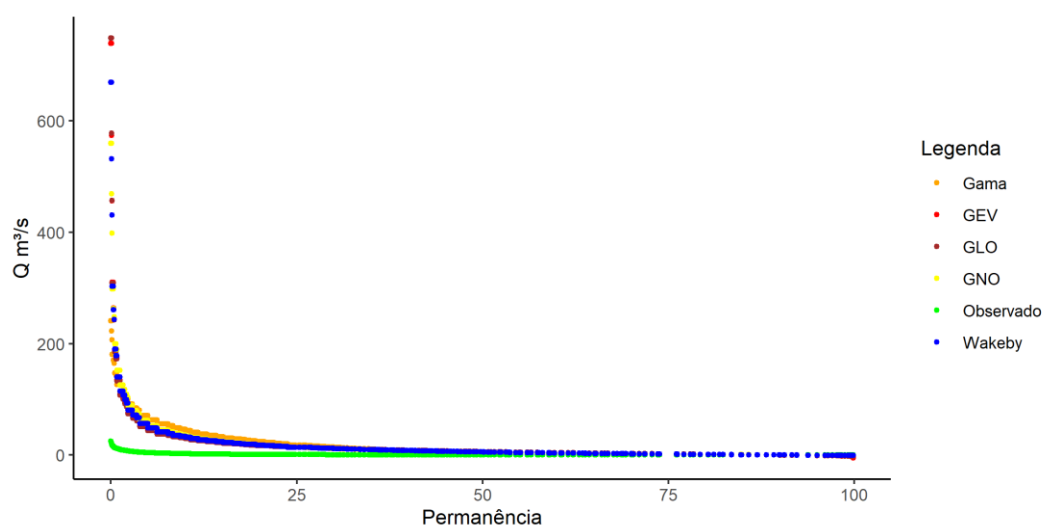


Figura APÊNDICE D 17 – Ajuste dos Modelos de Distribuição – Estação 41990000

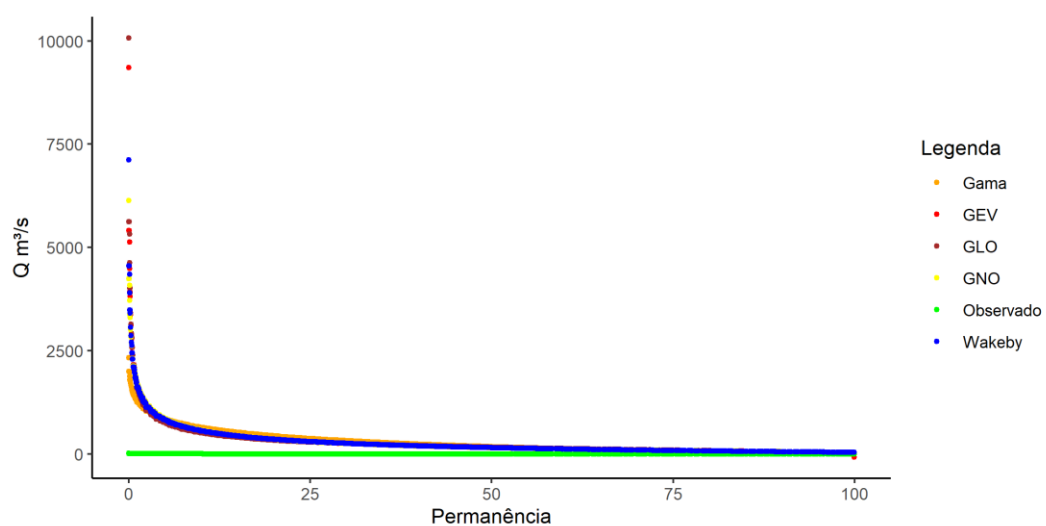


Figura APÊNDICE D 18 – Ajuste dos Modelos de Distribuição – Estação 41818000

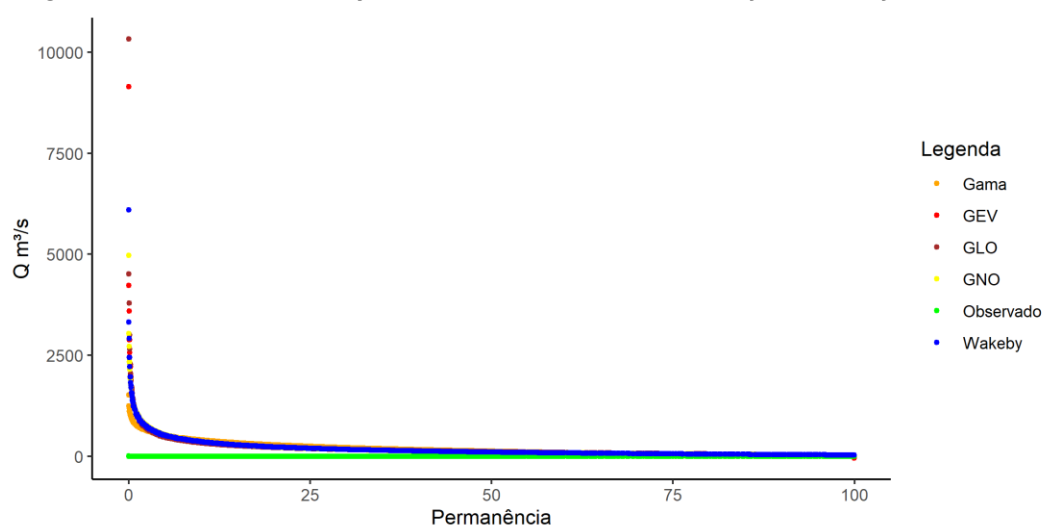


Figura APÊNDICE D 19 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41151000

Regionalização de vazões diárias - GNO

X41151000 R2=0.544 KGE=-0.166 RMSE=3.03 MAPE=53.524

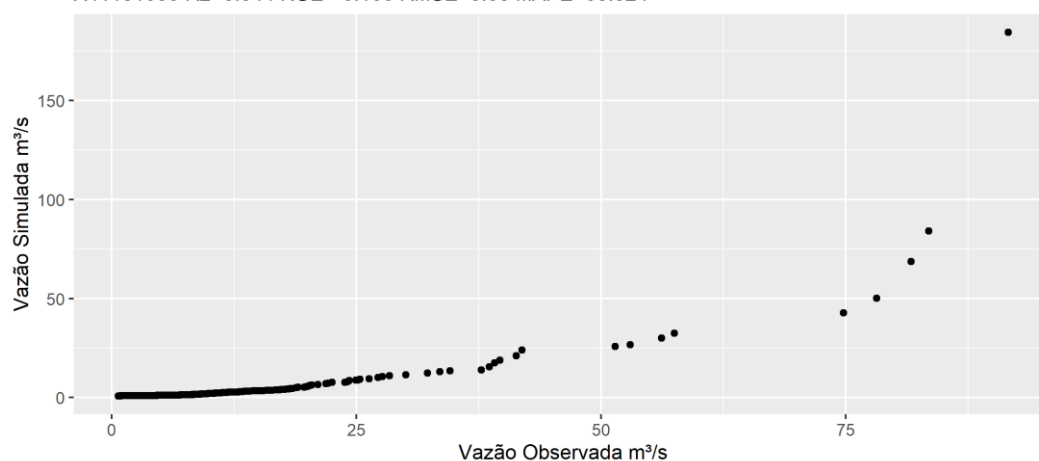


Figura APÊNDICE D 20 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41180000

Regionalização de vazões diárias - GNO

X41180000 R2=0.946 KGE=0.501 RMSE=5.292 MAPE=22.483

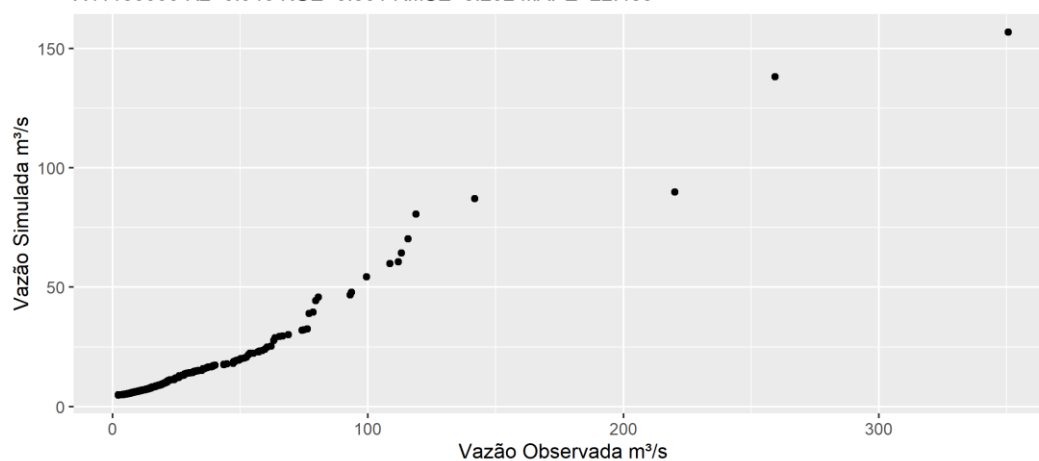


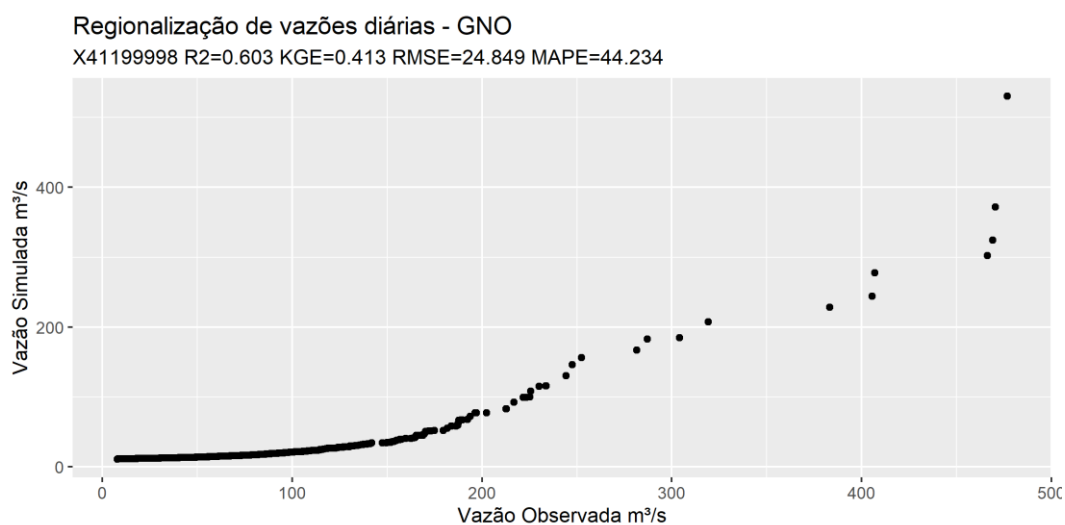
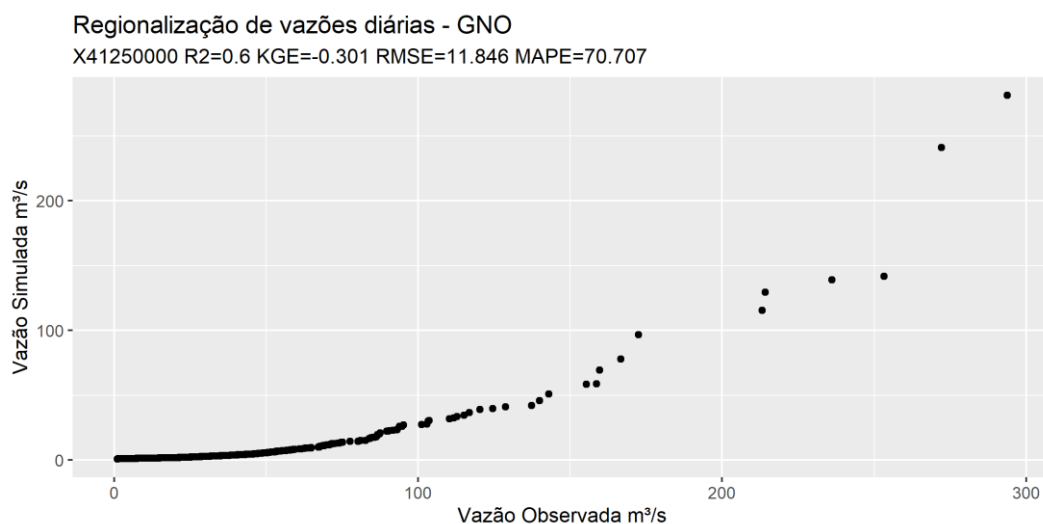
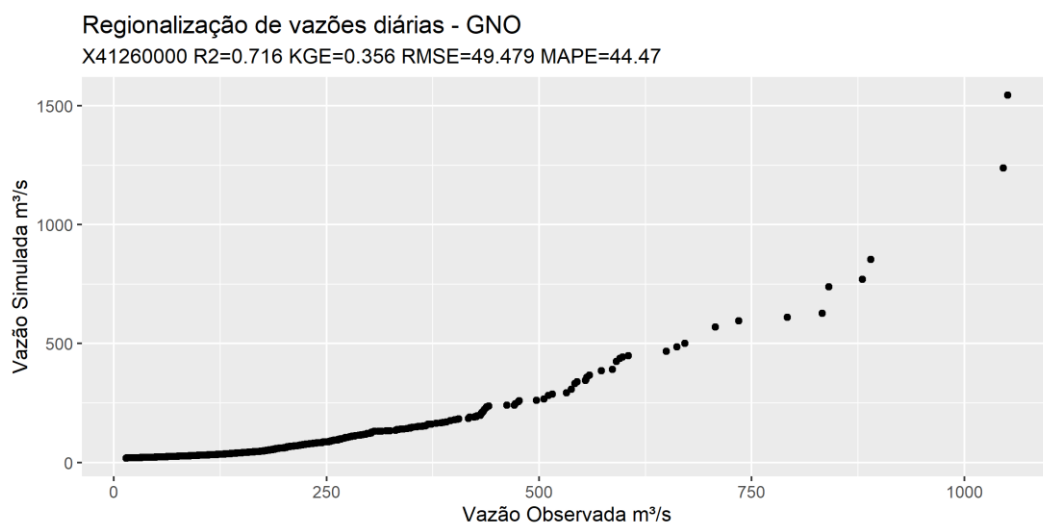
Figura APÊNDICE D 21 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41199998**Figura APÊNDICE D 22 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41250000****Figura APÊNDICE D 23 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41260000**

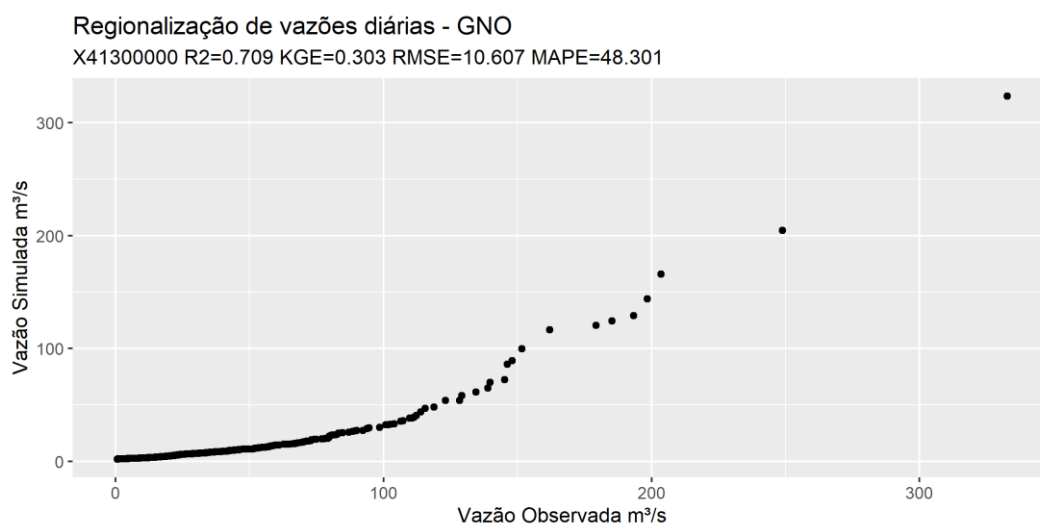
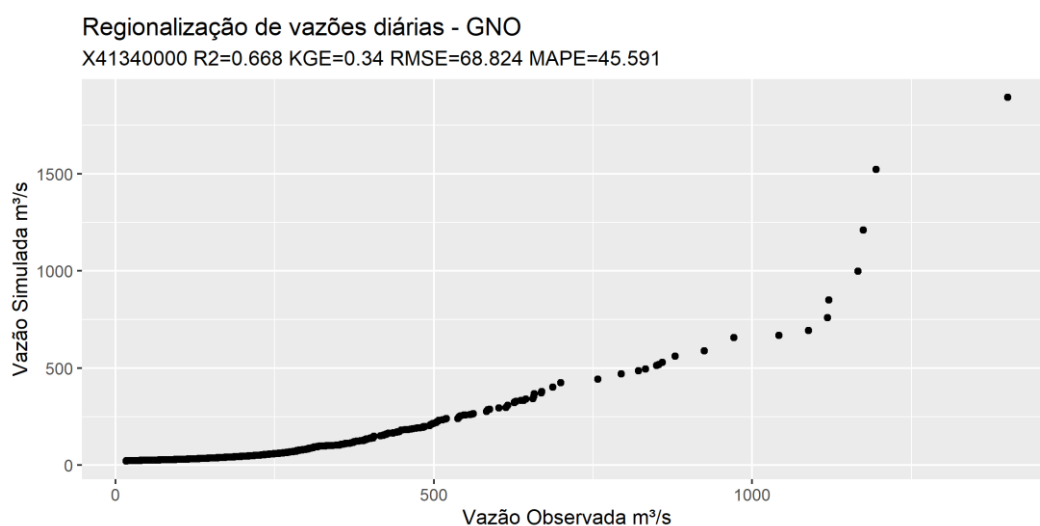
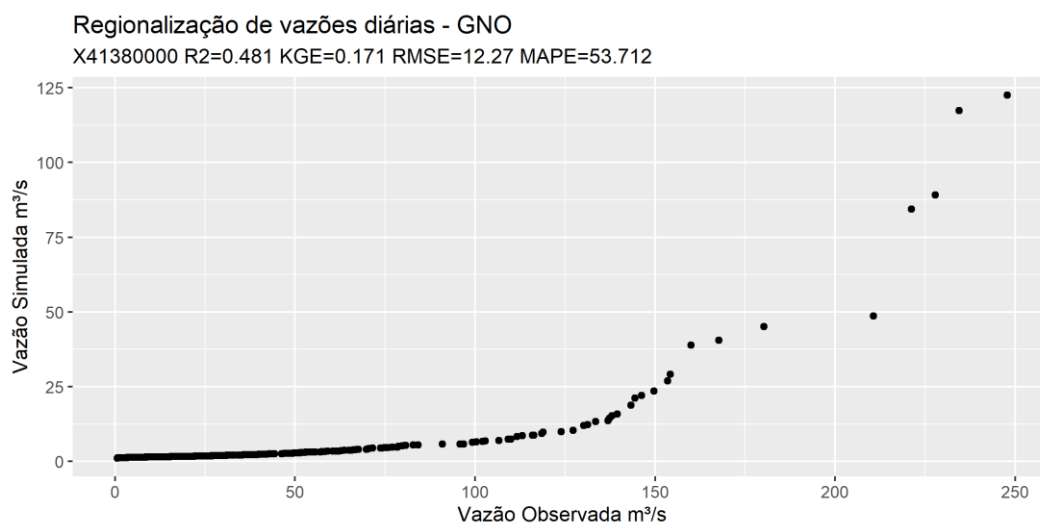
Figura APÊNDICE D 24 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41300000**Figura APÊNDICE D 25 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41340000****Figura APÊNDICE D 26 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41380000**

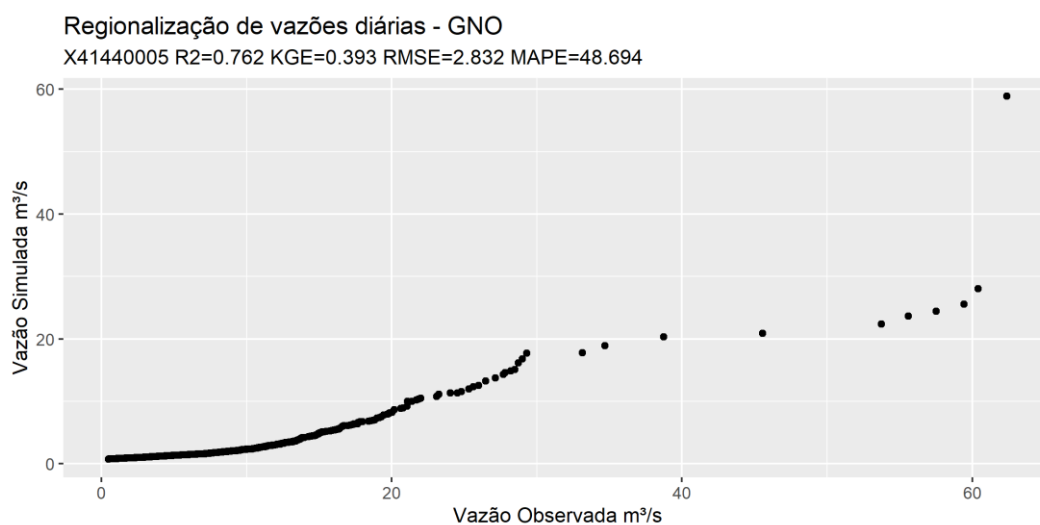
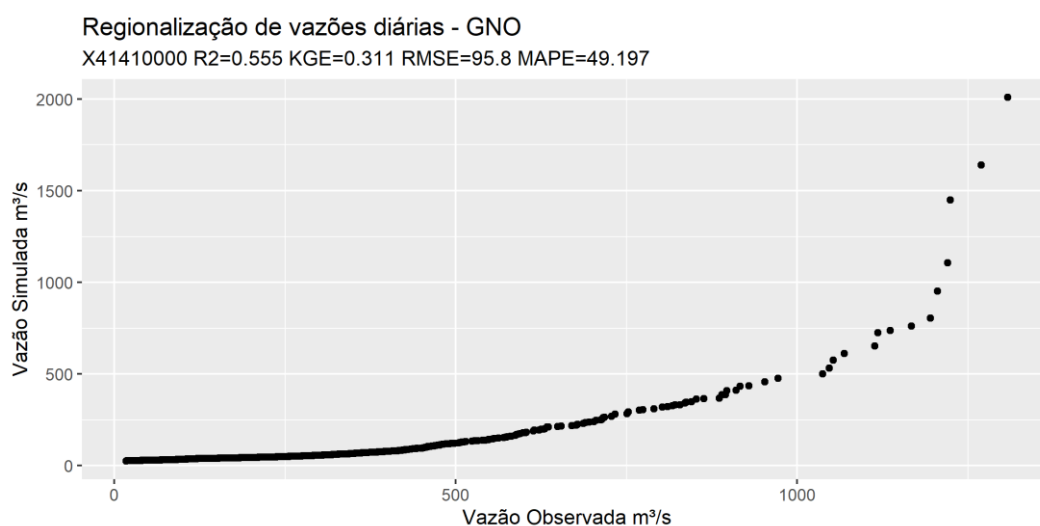
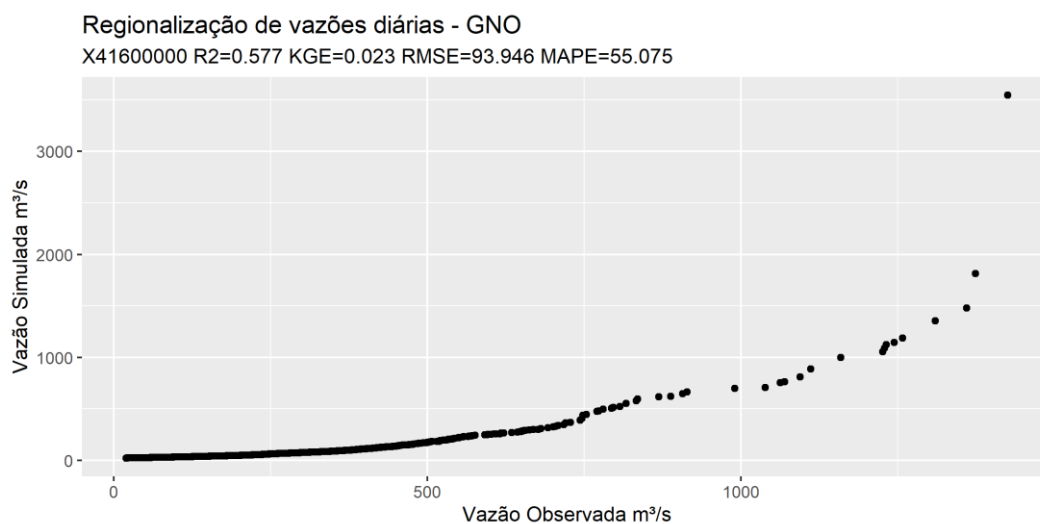
Figura APÊNDICE D 27 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41440005**Figura APÊNDICE D 28 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41410000****Figura APÊNDICE D 29 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41600000**

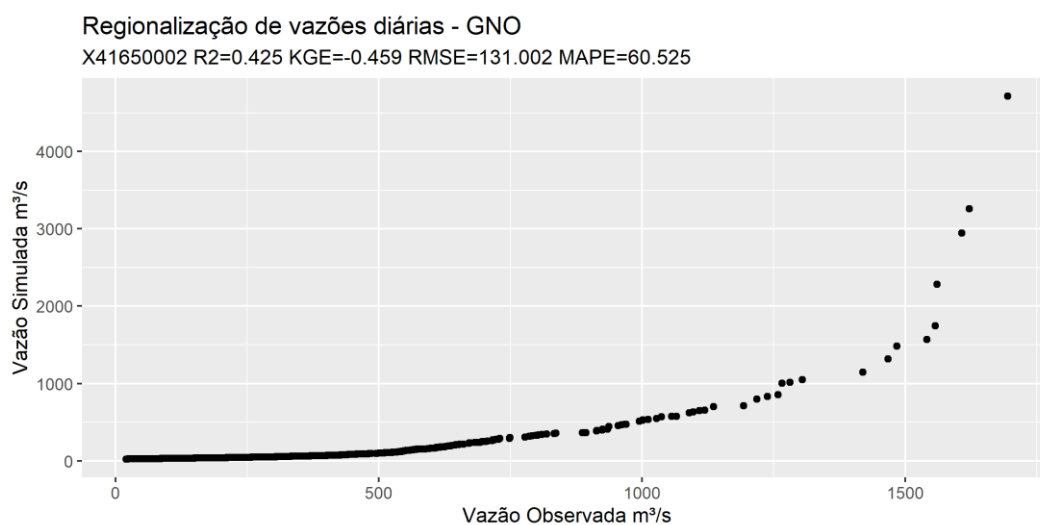
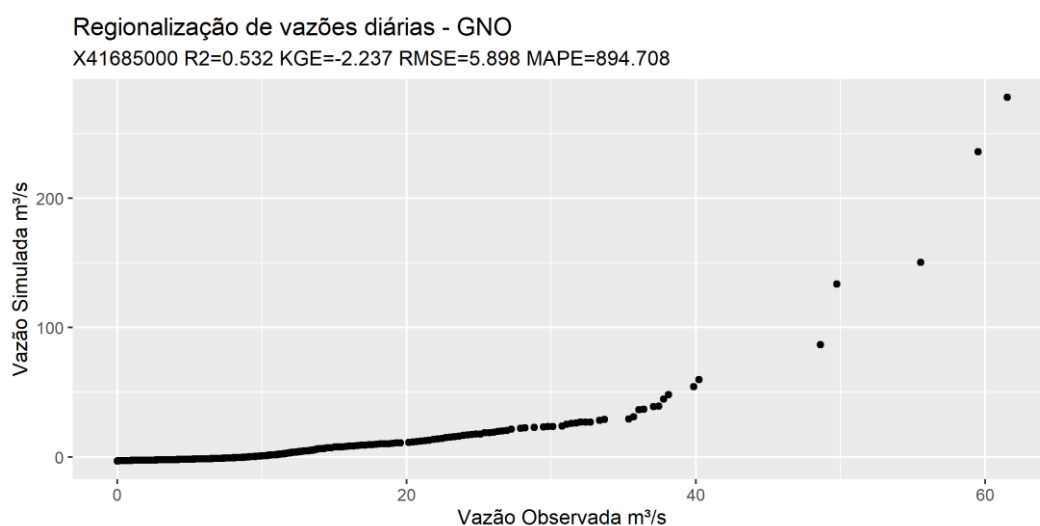
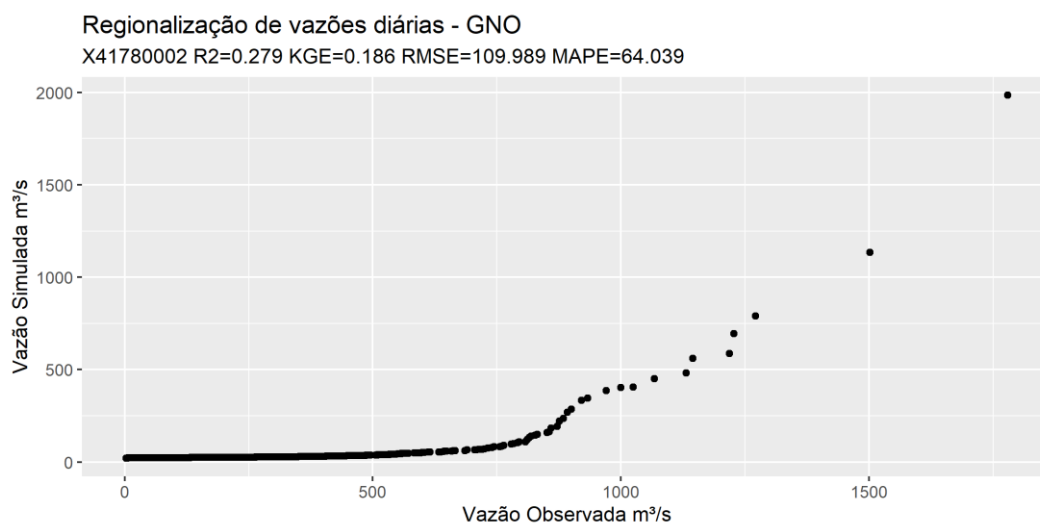
Figura APÊNDICE D 30 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41650002**Figura APÊNDICE D 31 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41685000****Figura APÊNDICE D 32 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41780002**

Figura APÊNDICE D 33 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41890000

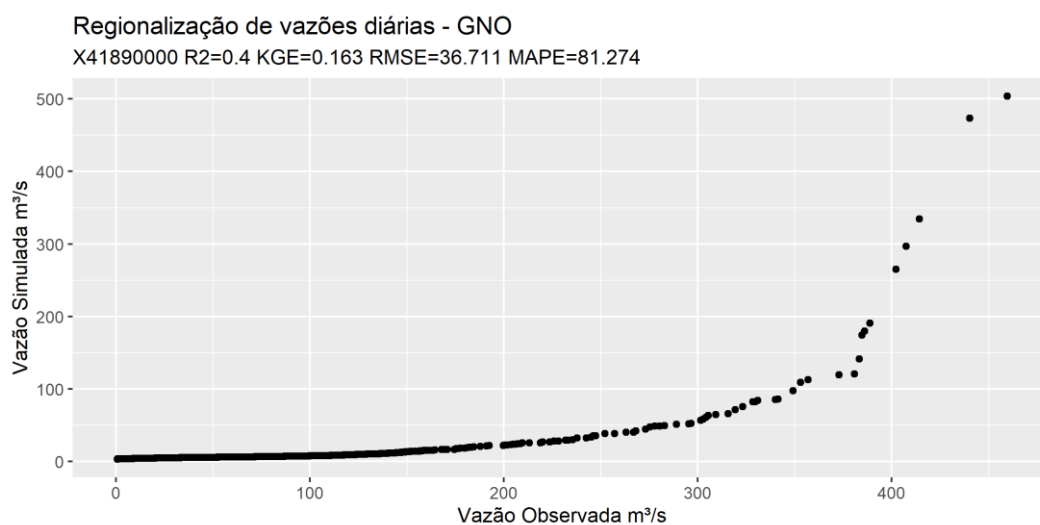


Figura APÊNDICE D 34 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41940000

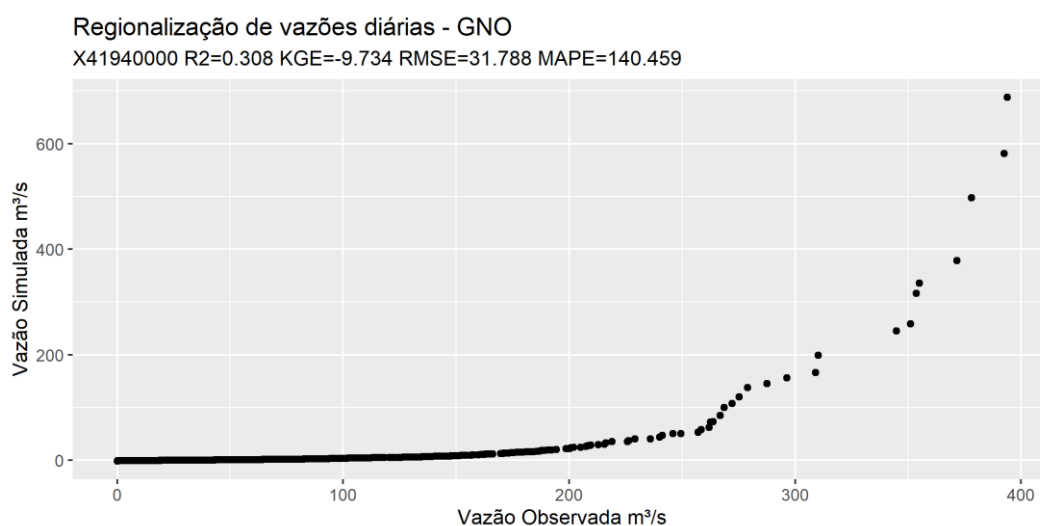


Figura APÊNDICE D 35 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41990000

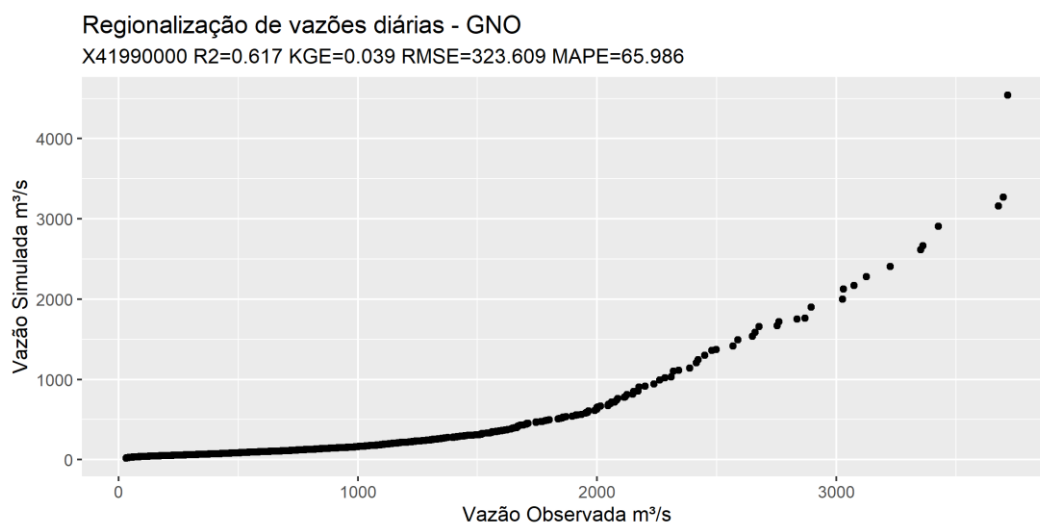
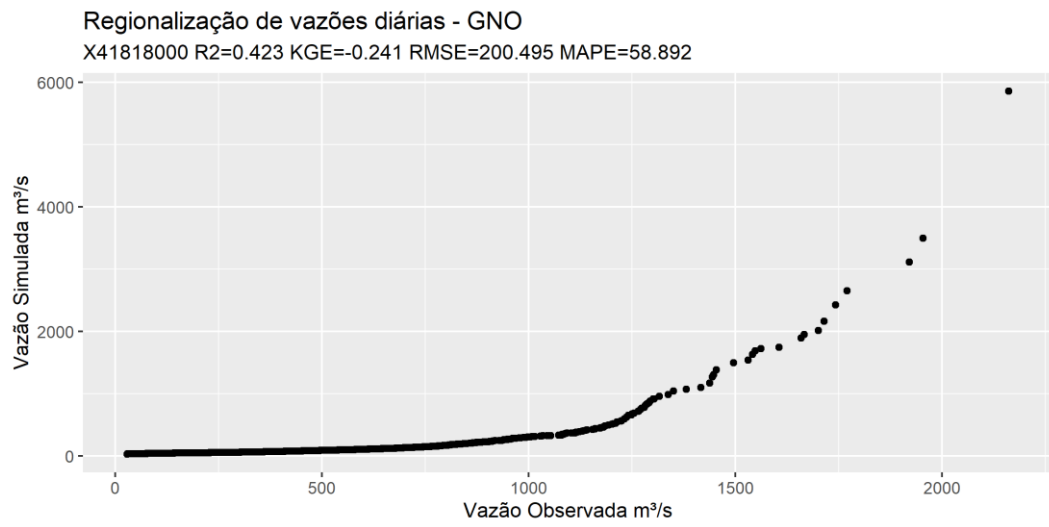


Figura APÊNDICE D 36 – Dados Simulados e Dados Observados – CP GNO – Estação 41818000

APÊNDICE E – Resultados de Preenchimento de Falhas

Mês	EF	ER (2012-2020)	Valores de R ² (2012-2020)		ER (2012-2016)	Valores de R ² (2012-2016)		ER (2017-2020)	Valores de R ² (2017-2020)	
			Série mensal completa	Série mensal filtrada		Série mensal completa	Série mensal filtrada		Série mensal completa	Série mensal filtrada
Janeiro	41180000	41151000	0,48	0,73	41151000	0,64	0,64	41151000	-	0,77
Fevereiro	41180000	41151000	0,48	0,36	41151000	0,44	0,44	41151000	-	0,41
Março	41180000	41151000	0,23	0,38	41151000	0,56	0,56	41151000	-	0,33
Maio	41180000	41151000	0,59	0,14	41151000	0,06	0,06	41151000	-	0,61
Junho	41180000	41151000	0,45	0,58	41151000	0,56	0,56	41151000	-	0,69
Julho	41180000	41151000	0,86	0,59	41151000	0,82	0,82	41151000	-	0,74
Janeiro	41260000	41250000	0,73	0,5	41340000	-	-	41250000	0,63	0,63
Fevereiro	41260000	41250000	0,36	0,69	41340000	-	-	41250000	0,78	0,78
Março	41260000	41250000	0,38	0,7	41340000	-	-	41250000	0,67	0,67
Abril	41260000	41250000	0,73	0,7	41340000	0,72	0,78	41250000	0,81	0,81
Maio	41260000	41250000	0,14	0,7	41340000	-	-	41250000	0,7	0,7
Junho	41260000	41250000	0,58	0,32	41340000	-	-	41250000	0,85	0,85
Julho	41260000	41250000	0,59	0,48	41340000	-	-	41250000	0,75	0,75
Agosto	41260000	41250000	0,81	0,65	41340000	-	-	41250000	0,72	0,72
Setembro	41260000	41250000	0,5	0,42	41340000	-	-	41250000	0,79	0,79
Dezembro	41260000	41250000	0,08	0,64	41340000	0,61	0,79	41250000	0,75	0,75
Janeiro	41340000	41250000	0,5	0,73	41260000	0,75	0,81	41250000	0,72	0,72
Fevereiro	41340000	41250000	0,69	0,68	41260000	0,56	0,86	41250000	0,83	0,83
Março	41340000	41250000	0,7	0,64	41260000	-	-	41250000	0,67	0,67
Abril	41340000	41250000	0,7	0,66	41260000	-	-	41250000	0,71	0,71
Maio	41340000	41250000	0,7	0,64	41260000	-	-	41250000	0,63	0,63
Junho	41340000	41250000	0,32	0,31	41260000	-	-	41250000	0,68	0,68
Julho	41340000	41250000	0,48	0,26	41260000	-	-	41250000	0,76	0,76
Agosto	41340000	41250000	0,65	0,57	41260000	-	-	41250000	0,63	0,63
Setembro	41340000	41250000	0,42	0,46	41260000	-	-	41250000	0,74	0,74
Outubro	41340000	41250000	0,53	0,57	41260000	-	-	41250000	0,78	0,78
Novembro	41340000	41250000	0,33	0,61	41260000	-	-	41250000	0,75	0,75
Dezembro	41340000	41250000	0,64	0,71	41260000	-	-	41250000	0,65	0,65
Janeiro	41380000	41250000	0,73	0,85	41250000	-	-	41250000	0,94	0,94
Março	41380000	41250000	0,64	0,21	41250000	0,35	0,35	41250000	0,18	0,18
Dezembro	41380000	41250000	0,71	0,43	41250000	-	-	41250000	0,2	0,2
Janeiro	41410000	41250000	0,85	0,62	41250000	-	-	41250000	0,3	0,3
Fevereiro	41410000	41250000	0,68	0,55	41250000	-	-	41250000	0,53	0,53
Março	41410000	41250000	0,21	0,44	41250000	-	-	41250000	0,44	0,44
Abril	41410000	41250000	0,66	0,6	41250000	0,63	0,63	41250000	0,74	0,74
Maio	41410000	41250000	0,64	0,54	41250000	0,64	0,64	41250000	0,45	0,45
Junho	41410000	41250000	0,31	0,39	41250000	0,47	0,47	41250000	0,29	0,29
Julho	41410000	41250000	0,26	0,36	41250000	0,4	0,4	41250000	0,89	0,89
Agosto	41410000	41250000	0,57	0,38	41250000	0,76	0,76	41250000	0,59	0,59
Setembro	41410000	41250000	0,46	0,27	41250000	0,21	0,21	41250000	0,41	0,41
Outubro	41410000	41250000	0,57	0,26	41250000	0,21	0,21	41250000	-	0,44
Janeiro	41440005	41250000	0,62	0,7	-	-	-	41300000	0,36	0,48
Fevereiro	41440005	41250000	0,55	0,57	-	-	-	41300000	0,58	0,59
Março	41440005	41250000	0,44	0,47	-	-	-	41300000	0,34	0,28
Abril	41440005	41250000	0,6	0,01	-	-	-	41300000	0,06	0,15
Maio	41440005	41250000	0,54	0	-	-	-	41300000	0,19	0,13
Junho	41440005	41250000	0,39	0	-	-	-	41300000	0,08	0,43
Julho	41440005	41250000	0,36	0	-	-	-	41300000	0,71	0,34
Agosto	41440005	41250000	0,38	0,09	-	-	-	41300000	0,26	0,25
Setembro	41440005	41250000	0,27	0,01	-	-	-	41300000	0,15	0,31
Janeiro	41600000	41650002	0,7	0,76	-	-	-	41650002	0,78	0,78
Agosto	41650002	41600000	0,09	0,88	41600000	-	-	41600000	0,91	0,91
Setembro	41650002	41600000	0,01	0,57	41600000	-	-	41600000	0,82	0,82
Outubro	41650002	41600000	0,26	0,58	41600000	-	-	41600000	0,57	0,57
Dezembro	41650002	41600000	0,43	0,79	41600000	0,83	0,83	41600000	-	0,64
Janeiro	41685000	41650002	0,76	0,22	-	-	-	41650002	0,112	0,07
Julho	41685000	41650002	0	0,82	-	-	-	41650002	0,94	0,94
Agosto	41685000	41650002	0,88	0,77	-	-	-	41650002	0,83	0,83
Setembro	41685000	41650002	0,57	0,33	-	-	-	41650002	0,59	0,59
Janeiro	41780002	41650002	0,22	0,74	41650002	0,93	0,93	41650002	-	0,65
Fevereiro	41780002	41650002	0,57	0,56	41650002	0,6	0,6	41650002	0,53	0,53
Março	41780002	41650002	0,47	0,74	41650002	0,22	0,22	41650002	-	0,73
Agosto	41780002	41650002	0,77	0,32	41650002	-	-	41650002	0,56	0,56
Dezembro	41780002	41650002	0,79	0,52	41650002	0,56	0,56	41650002	0,37	0,37
Janeiro	41890000	41818000	0,74	0,45	41818000	-	-	41818000	0,31	0,31
Fevereiro	41890000	41818000	0,56	0,58	41818000	0,49	0,49	41818000	0,61	-
Março	41890000	41818000	0,74	0,73	41818000	0,09	0,09	41818000	-	-
Maio	41890000	41818000	0	0,41	41818000	-	-	41818000	0,38	0,38
Junho	41890000	41818000	0	0,78	41818000	0,81	0,81	41818000	-	0,93
Julho	41890000	41818000	0,82	0,85	41818000	0,001	0,89	41818000	-	0,89
Agosto	41890000	41818000	0,32	0,73	41818000	0,77	0,77	41818000	-	0,75
Setembro	41890000	41818000	0,33	0,03	41818000	0,27	0,27	41818000	-	0,02
Outubro	41890000	41818000	0,58	0,02	41818000	0,26	0,26	41818000	0,01	0,01
Novembro	41890000	41818000	0,61	0,29	41818000	0,33	0,33	41818000	-	0,17
Dezembro	41890000	41818000	0,52	0,48	41818000	0,51	0,51	41818000	-	0,42
Janeiro	41940000	41818000	0,45	0,43	41818000	0,13	0,13	41818000	-	-
Julho	41940000	41818000	0,85	0,81	41818000	-	-	41818000	0,97	0,97
Agosto	41940000	41818000	0,73	0,5	41818000	-	-	41818000	0,64	0,64
Setembro	41940000	41818000	0,03	0,18	41818000	-	-	41818000	0,29	0,29
Outubro	41940000	41818000	0,02	0,33	41818000	-	-	41818000	0,65	0,65
Novembro	41940000	41818000	0,29	0,08	41818000	-	-	41818000	0,1	0,1

Mês	EF	ER (2012-2020)	Valores de R² (2012-2020)		ER (2012-2016)	Valores de R² (2012-2016)		ER (2017-2020)	Valores de R² (2017-2020)	
			Série mensal completa	Série mensal filtrada		Série mensal completa	Série mensal filtrada		Série mensal completa	Série mensal filtrada
Janeiro	41990000	41940000	0,43	0,48	41940000	-	-	41940000	0,74	0,74
Fevereiro	41990000	41940000	0,58	0,23	41940000	0,57	0,57	41940000	0,14	0,14
Março	41990000	41940000	-	0,53	41940000	0,22	0,22	41940000	0,61	0,61
Abril	41990000	41940000	0,01	0,59	41940000	0,66	0,66	41940000	-	0,58
Maio	41990000	41940000	0,41	0,45	41940000	0,27	0,27	41940000	-	0,51
Junho	41990000	41940000	0,78	0,86	41940000	0,79	0,79	41940000	-	0,97