



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISA EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

Dissertação de Mestrado

**REGIONALIZAÇÃO DA Q_{95} UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO, NA REGIÃO
HIDROGRÁFICA DO GUAÍBA, RS.**

Jordano Francisco Zagonel

Porto Alegre, 2021.

Zagonel, Jordano Francisco
REGIONALIZAÇÃO DA Q95 UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO,
NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO GUAÍBA, RS. / Jordano
Francisco Zagonel. -- 2021.
113 f.
Orientadora: Rita de Cássia Marques Alves.

Coorientador: Guilherme Garcia de Oliveira.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em
Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de
Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre,
BR-RS, 2021.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Geociências. 3.
Licenciamento Ambiental. 4. Hidrologia. 5. Vazão de
referência. I. Alves, Rita de Cássia Marques, orient.
II. Oliveira, Guilherme Garcia de, coorient. III.
Título.

JORDANO FRANCISCO ZAGONEL

**REGIONALIZAÇÃO DA Q₉₅ UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO, NA REGIÃO
HIDROGRÁFICA DO GUAÍBA, RS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto – PPGSR, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

Orientador: Prof^a Dr^a Rita de Cássia Marques Alves
Coorientador: Prof^o. Dr^o Guilherme Garcia de Oliveira

Porto Alegre, 2021.
JORDANO FRANCISCO ZAGONEL

**REGIONALIZAÇÃO DA Q₉₅ UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO, NA REGIÃO
HIDROGRÁFICA DO GUAÍBA, RS.**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Laurindo Antônio Guasselli - PPGSR/UFRGS

Dr. Leonardo Gruber - Divisão de Energia - DIGEN/FEPAM

Prof. Dr. Victor Fernandez Nascimento - PPGSR/UFRGS

Prof^a Dr^a Rita de Cássia Marques Alves (Orientadora) - PPGSR/UFRGS

Prof^o. Dr^o Guilherme Garcia de Oliveira (Coorientador) - PPGSR/UFRGS

Aprovado em 18 de fevereiro de 2021.

Agradecimentos

À minha família pelo apoio, carinho e incentivo nessa jornada.

Aos meus orientadores pela dedicação em tornar este trabalho fundamentado.

Aos estimados colegas e amigos do CEPSRM.

Ao PPGRS e à UFRGS.

E, aos colegas da Divisão de Energia (DIGEN) da FEPAM.

**MEDIO TUTISSIMUS IBIS.
*PAX ERIT VOBIS.***

Resumo

ZAGONEL, J. F. Regionalização da Q_{95} utilizando Geoprocessamento, na Região Hidrográfica do Guaíba, RS. 2021. 113f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

O licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia a partir de fonte hídrica é fundamental para propiciar a manutenção da qualidade dos recursos hídricos e ecossistemas aquáticos. O uso da Vazão de Referência que é superada em 95% do tempo (Q_{95}) é um critério para determinar o tipo de tramitação do licenciamento, o qual pode ser por intermédio de EIA-RIMA ou procedimento ordinário, alusivos à Licença Prévia (LP), Licença de Instalação (LI) e Licença de Operação (LO). A partir da regionalização de vazão é possível auferir os dados do comportamento Q_{95} em cursos d'água que não possuem estações fluviométricas. No presente trabalho o objetivo foi a regionalização da Q_{95} a partir da aplicação de técnicas de geoprocessamento e produtos de sensoriamento remoto na Região Hidrográfica do Guaíba, Rio Grande do Sul. Como conjunto amostral, foram utilizadas 21 séries históricas da Agência Nacional de Águas que abarcam o período entre 1931 e 2018 com dados fluviométricos da Região Hidrográfica do Guaíba, RS. Aplicou-se de dados de precipitação pluviométrica oriundos de sensoriamento remoto proveniente do TRMM, bem como a análise de variáveis físicas e ambientais extraídas por geoprocessamento. As variáveis físicas oriundas do SRTM e utilizadas para cada bacia hidrográfica foram: área; altitude média; variação altimétrica; declividade média; comprimento do rio principal; comprimento total dos rios principais; densidade de drenagem. Para as variáveis ambientais oriundas do MapBiomas, utilizou-se a percentagem do uso da terra para florestas, agricultura e campo, urbano, áreas úmidas, rios e lagos. A partir das variáveis estudadas individualmente e correlacionadas com a Q_{95} foram determinados oito critérios físicos e ambientais e a precipitação que influenciam na vazão. A equação de regionalização que considerou somente a área da bacia apresentou o erro padrão (EP) de $3,64 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) de $16,79 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. A equação que fez uso de oito variáveis independentes propiciou o EP de $1,08 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e RMSE de $4,84 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Nesse sentido, a equação com tendência potencial pode ser utilizada para regiões hidrologicamente homogêneas. A partir dos dados e da obtenção de variáveis independentes que influenciam na vazão, auferiu-se melhor resultado utilizando a equação por regressão linear múltipla aplicada a Região Hidrográfica do Guaíba.

Palavras-chaves: Vazão de referência; Recursos Hídricos; Licenciamento ambiental.

Abstract

ZAGONEL, J. F. Regionalization of Q_{95} using Geoprocessing, in the Hydrographic region of Guaíba, RS. 2021. 113f. Dissertation (Master's) - Graduate Program in Remote Sensing, State Research Center for Remote Sensing Meteorology, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

The environmental licensing of energy generation projects from water sources is essential to promote the maintenance of the quality of water resources and aquatic ecosystems. The use of the Reference Flow that is exceeded in 95% of the time (Q_{95}) is a criterion to determine the type of licensing procedure, which can be through environmental assessment and statement or ordinary procedure, alluding to the Prior License (LP), Installation License (LI) and Operation License (LO). From the regionalization of flow it is possible to obtain data on the Q_{95} behavior in water courses that do not have fluviometric stations. In the present work, the objective was the regionalization of Q_{95} based on the application of geoprocessing techniques and remote sensing products in the Guaíba Hydrographic Region, Rio Grande do Sul. As a sample set, 21 historical series from the National Water Agency that encompass the period between 1931 and 2018 with fluviometric data from the Guaíba Hydrographic Region, RS. It was applied data of pluviometric precipitation from remote sensing coming from the TRMM, as well as the analysis of physical and environmental variables extracted by geoprocessing. The physical variables from the SRTM and used for each hydrographic basin were: area; average altitude; altimetric variation; average slope; main river length; total length of the main rivers; drainage density. For the environmental variables from MapBiomas, the percentage of land use for forests, agriculture and countryside, urban, wetlands, rivers and lakes was used. From the variables studied individually and correlated with Q_{95} , eight physical and environmental criteria and rainfall that influence the flow were determined. The regionalization equation that considered only the basin area presented the standard error (EP) of $3.64 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and the Root Mean Square Error (RMSE) of $16.79 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. The equation that used eight independent variables provided the EP of $1.08 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and RMSE of $4.84 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. In this sense, the equation with potential trend can be used for hydrologically homogeneous regions. From the data and the obtaining of independent variables that influence the flow, the best result was obtained using the multiple linear regression equation applied to the Guaíba Hydrographic Region.

Keywords: Reference flow; Water resources; Environmental licensing.

Lista de Figuras

Figura 1. Distribuição espacial das hidrelétricas em operação no RS.....	19
Figura 2. Distribuição temporal do total de Licenças, por ano e tipo de licença para hidrelétricas, RS.	20
Figura 3. Número de Licenças para hidrelétricas, por tipologia e percentagem (1994-2018), RS.	21
Figura 4. Representação gráfica do fluxograma para o trabalho.....	46
Figura 5. Regiões e Bacias Hidrográficas do RS.....	47
Figura 6. Identificação e distribuição espacial das Bacias dentro da Região Hidrográfica do Guaíba.....	48
Figura 7. Representação da distribuição da vegetação na RHG.....	50
Figura 8. Representação da altimetria (classe de altitude em metros) na RHG.	50
Figura 9. Representação do comportamento da declividade na RHG.....	51
Figura 10. Representação de imagem do Uso da terra na RHG.....	52
Figura 11. Representação da precipitação média anual.....	53
Figura 12. Representação da imagem SRTM aplicada à RHG no RS.	54
Figura 13. Representação de imagem TRMM, precipitação de Junho (1998-2011).....	55
Figura 14. Estações fluviométricas na RHG, RS – total 21 pontos.....	56
Figura 15. Representação do Uso e cobertura da terra na RHG.....	60
Figura 16. Representação da Rede de drenagem – rios principais, 4 ordem, RHG, RS.....	61
Figura 17. Representação do MDE das bacias de estações fluviométricas, RHG, RS.....	62
Figura 18. Representação de imagem TRMM para a RHG, com dados da Precipitação Acumulada Média Anual (mm) oriunda dos dados da série histórica de 2000 a 2018.	63
Figura 19. Representação do comportamento da Q_{95} obs. – série diária em cada Estação, RHG, RS.....	68
Figura 20. Representação do comportamento da Q_{95} obs. – série diária em cada Estação, RHG, RS.....	69
Figura 21. Representação do comportamento da Q_{95} obs. – série diária em cada Estação, RHG, RS.....	70
Figura 22. Representação gráfica da Q_{95} obs. <i>Completa - série diária</i> , RHG, RS.	71
Figura 23. Representação gráfica do comportamento da Q_{95} obs. – série mensal em cada Estação, RHG, RS.	73
Figura 24. Representação gráfica do comportamento da Q_{95} obs. – série mensal em cada Estação, RHG, RS.	74
Figura 25. Representação gráfica do comportamento da Q_{95} obs. – série mensal em cada Estação, RHG, RS.	75
Figura 26. Representação gráfica da Q_{95} obs. série mensal, RHG, RS.	76
Figura 27. Precipitação Acumulada Média (mm) para JANEIRO, RHG, RS.	84
Figura 28. Precipitação Acumulada Média (mm) para FEVEREIRO, RHG, RS.	84
Figura 29. Precipitação Acumulada Média (mm) para MARÇO, RHG, RS.....	85
Figura 30. Precipitação Acumulada Média (mm) para ABRIL, RHG, RS.	85
Figura 31. Precipitação Acumulada Média (mm) para MAIO, RHG, RS.....	86
Figura 32. Precipitação Acumulada Média (mm) para JUNHO, RHG, RS.....	86
Figura 33. Precipitação Acumulada Média (mm) para JULHO, RHG, RS.....	87
Figura 34. Precipitação Acumulada Média (mm) para AGOSTO, RHG, RS.....	87
Figura 35. Precipitação Acumulada Média (mm) para SETEMBRO, RHG, RS.....	88
Figura 36. Precipitação Acumulada Média (mm) para OUTUBRO, RHG, RS.....	88
Figura 37. Precipitação Acumulada Média (mm) para NOVEMBRO, RHG, RS.	89

Figura 38. Precipitação Acumulada Média (mm) para DEZEMBRO, RHG, RS.	89
Figura 39. Representação gráfica da Equação da Vazão observada em função da área da bacia.....	95
Figura 40. Representação gráfica da Dispersão da Q_{95} em função das 8 (oito) variáveis independentes.	97
Figura 41. Representação gráfica do comportamento da Q_{95} conforme a equação Eq1 e Eq2.....	98
Figura 42. Mapa de regionalização da vazão pela Eq1, RHG, RS.....	102
Figura 43. Mapa de regionalização da vazão pela Eq2.	103

Lista de Tabelas

Tabela 1. Exemplos de variáveis na regionalização.	35
Tabela 2. Estações fluviométricas da Região Hidrográfica do Guaíba, RS.	56
Tabela 3. Estações fluviométricas da RHG, RS (série de dados: 1931-2018).	57
Tabela 4. Vazão Q_{95} observada com base na série diária das Estações fluviométricas, RHG, RS.	66
Tabela 5. Vazão Q_{95} observada com base na série mensal das Estações fluviométricas, RHG, RS.	72
Tabela 6. Vazão específica com base na série diária, RHG, RS.	76
Tabela 7. Vazão específica com base na série mensal, RHG, RS.	78
Tabela 8. Atributos físicos das bacias referentes às 21 Estações fluviométricas, RHG, RS.	80
Tabela 9. Atributos ambientais das bacias referentes às 21 Estações fluviométricas, RHG, RS.	82
Tabela 10. Precipitação acumulada referentes às 21 Estações fluviométricas, RHG, RS... ..	90
Tabela 11. Cálculo da correlação da Q_{95} entre as variáveis estudadas, RHG, RS.	92
Tabela 12. Cálculo da correlação da Q_{95} entre a Precipitação acumulada mensal, RHG, RS.	94
Tabela 13. Coeficientes da regressão.	97
Tabela 14. Métricas de desvio e erro.	98
Tabela 15. Comportamento dos erros das equações em cada Estação fluviométrica, RHG, RS.	99

Lista de Equações

$Q = a.A^b$	(Equação 1).....	35
$y = ax + b + E$	(Equação 2)	35
$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots a_nx_n + b$	(Equação 3).....	36
$Q = f(Ad, P, S, L, DD)$	(Equação 4)	36
$L = a.A^b$	(Equação 5).....	37
$q = Qm.A^{-1}$	(Equação 6)	64
$R^2 = b^2.Sx^2/Sy^2$	(Equação 7)	64
$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2}$	(Equação 8).....	64
$Dp = \frac{1}{N} \sum (x_i - \bar{x})^2$	(Equação 9)	64
$ep = DpN$	(Equação 10)	65
$Q = a.A^b$	(Equação 11).....	65
$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots a_nx_n + b$	(Equação 12).....	65
$Q_{95} = 0,0004.A^{1,2206}$	(Equação 13)	95
$Q = a_1.A + a_2.Hr + a_3.L + a_4.LE + a_5.P + a_6.F + a_7.AC + a_8.RL$	(Equação 14)	97
$Q_{95} = 0,01027348*A + 0,04865793*Hr + (-0,30564237*L) + (-0,00001925*LE) +$ $0,04323868*P + (-1,54390178*F) + (-1,24677646*AC) + 2,21397299*RL$	(Equação 15)	98

Lista de Abreviaturas

ANA: Agência Nacional de Águas
ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica
CEG: Código Único de Empreendimentos de Geração
CGH: Central Geradora Hidrelétrica
CPRM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CRH: Conselho de Recursos Hídricos
CPTEC: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CONSEMA: Conselho Estadual de Recursos Hídricos
DIGEN: Divisão de Energia
DRDH: Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica
DRH: Departamento de Recursos Hídricos
EIA: Estudo de Impacto Ambiental
ep: Erro Padrão
FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental
IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET: Instituto Nacional de Meteorologia
kW: kilowatt
LABGEO - Laboratório de Geoprocessamento
LI: Licença de Instalação
LP: Licença Prévia
LPI: Licença Prévia e de Instalação Unificadas
LO: Licença de Operação
MDE: Modelo Digital de Elevação
MW: megawatt
NASA: *National Aeronautics and Space Administration*
NSE: *The Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient*
PCH: Pequena Central Hidrelétrica
PERH: Plano Estadual de Recursos Hídricos
RAS: Relatório Ambiental Simplificado
RHG: Região Hidrográfica do Guaíba
RIMA: Relatório de Impacto Ambiental
RMSE: *Root-Mean-Square Error* (Raiz do Erro Quadrático Médio)
RS: Rio Grande do Sul
SEMA: Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Infraestrutura
SERH: Sistema Estadual de Recursos Hídricos
SIG: Sistema de Informações Geográficas
SNIRH: Sistema de Informações Hidrológicas
SRTM: *Shuttle Radar Topography Mission*
TRMM: *Tropical Rainfall Measuring Mission*
UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UHE: Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Problema de pesquisa.....	14
1.2 Justificativa	17
1.3 Objetivos.....	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Licenciamento ambiental de hidrelétricas no Rio Grande do Sul	18
2.2 Hidrelétricas e aspectos ambientais	25
2.3 Vazão de referência.....	27
2.4 Regionalização de vazão.....	29
2.5 Métodos para regionalização de vazões.....	39
2.6 Aplicações do Sensoriamento Remoto	41
3. METODOLOGIA	45
3.1 Descrição da área de estudo.....	46
3.2 Materiais	53
3.3 Métodos	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.1 Q_{95} obs. com base na série diária e mensal	66
4.2 Vazão específica	76
4.3 Atributos físicos de influência	80
4.4 Atributos ambientais de influência	81
4.5 Precipitação pluviométrica estimada por satélite.....	83
4.6 Análise de correlação entre as variáveis	92
4.7 Equações de regionalização para a RHG	95
4.8 Mapas de regionalização para a RHG.....	101
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÃO	104
6. REFERÊNCIAS	105

1. INTRODUÇÃO

1.1 Problema de pesquisa

Em face do licenciamento ambiental no Rio Grande do Sul e diante da implantação de muitos projetos de geração de energia de fonte hídrica, as informações sobre as vazões são fundamentais para compreender a dinâmica do comportamento hídrico regional.

O aproveitamento da água é o fator preponderante para viabilizar a construção de barramentos para a geração de energia elétrica, nesse contexto, a disponibilidade hídrica é de suma importância para viabilidade econômica e ambiental do empreendimento hidroelétrico.

Entretanto, o uso da água depende da outorga do poder público, de responsabilidade do Departamento de Recursos Hídricos (DRH-RS). Nesse interim, a Política Nacional de Recursos Hídricos expressa que o regime de outorga de direitos de uso de recursos hídricos tem como objetivos assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água (BRASIL, 1997).

Wolff (2014) menciona que é de suma importância quantificar as vazões que servem de referência para a outorga de direitos de uso de recursos hídricos; isto é possível com a coleta de dados das estações fluviométricas, embora as mesmas se localizem em seções específicas da hidrografia.

Destaca-se que diante das questões ambientais é imprescindível o conhecimento da vazão na área de interesse de implantação de uma hidrelétrica, pois afere a capacidade de energia que se pode gerar no local, condiciona o tipo de rito processual no licenciamento, possibilita prover as garantias mínimas de manutenção da biota aquática, qualidade da água e dos demais usos da água.

Melati (2016) relata que as medições de vazões nos rios devem ser realizadas de forma contínua, para que sua variação temporal possa ser verificada. Tais procedimentos são bastante custosos para as entidades que desenvolvem essas atividades, portanto, em países como o Brasil, de dimensões continentais, muitas vezes o monitoramento é deficitário, sendo assim muitas regiões acabam não possuindo monitoramento em seus rios.

No Rio Grande do Sul, a atual distribuição espacial da rede hidrometeorológica, a disponibilidade limitada de séries de dados consistentes, bem como a grande variabilidade das características físicas e hidrológicas das bacias hidrográficas, constituem um grande

desafio na estimativa das vazões de referência, para os diferentes corpos hídricos, de forma a subsidiar à gestão dos recursos hídricos (BORK, 2018).

Pereira (2012) salienta que a escassez de informações fluviométricas, associada à inconsistência temporal e espacial das séries históricas disponíveis, tem resultado em grande limitação para se representar o comportamento hídrico.

Para fins de controle e licenciamento ambiental, abarcando-se a gestão dos recursos hídricos, é primordial a compreensão do comportamento hidrológico regional. Ao passo em que o monitoramento por meio de estações fluviométricas se torna efetivo e que forneça dados confiáveis e fundamentais para a robustez estatística da série hidrológica.

Entretanto, estudos que abordam essa questão destacam que na falta de uma rede completa de unidades de estações, resultando em bacias sem mensuração de vazões, é plausível a aplicação de processo de regionalização de vazão.

Conforme Gasques (2018) frente ao objetivo de ter acesso a informações hidrológicas de locais com dados insuficientes ou inexistentes, tem-se destacado estudos envolvendo regionalização de vazões. E, para Chaves (2002) a estimativa da oferta de água superficial deve ser feita em toda a rede de drenagem da bacia, entretanto, como as vazões são geralmente medidas apenas em alguns pontos específicos (estação fluviométrica), um dos desafios em hidrologia é espacializar (regionalizar) esta informação para toda a área de interesse.

Nesse contexto, diante da experiência da análise de processos de licenciamento ambiental, pode-se afirmar que existe a dificuldade de obter dados de vazão sobre todos os cursos d'água com potencial para geração de energia. Um fator é a pequena distribuição espacial das estações fluviométricas, a qual representa uma ampla área de rede hidrográfica com locais não monitorados, outro fator pela ausência de dados precisos nos locais monitorados diante da falta de mediação ou eventuais equívocos no procedimento de mensuração.

Segundo Tucci (2002) o termo regionalização tem sido utilizado em hidrologia para denominar a transferência de informações de um local para outro dentro de uma área com comportamento hidrológico semelhante. Nesse sentido, a regionalização é empregada para obtenção de informações hidrológicas de locais sem monitoramento ou com poucos dados, bem como para séries históricas com pouca expressividade.

Aliás, Tucci (2002) comenta que a vazão de uma bacia é um valor integrador de toda a sua área de drenagem, representando um comportamento combinado de todos os efeitos internos em razão das suas características de solo, superfície, geomorfologia, geologia e

clima. E, segundo o mesmo autor, existe uma tendência geral da vazão específica reduzir com o aumento do tamanho da bacia ou do comprimento do rio, para uma pequena variação de precipitação.

Atualmente, a vazão em curso d'água que é superada em 95% do tempo com base na série histórica, admitido o risco de 5%, é denominada de Q_{95} . A Q_{95} é utilizada como parâmetro a ser observado no critério de tramitação do licenciamento ambiental da atividade de geração de energia de fonte hídrica no Rio Grande do Sul, ou seja, é fator condicionante que rege o rito administrativo do licenciamento. Os outros critérios abarcam a supressão de vegetação nativa e o eventual deslocamento de comunidades ou populares. Por conseguinte, torna-se fundamental o conhecimento da vazão de referência na área de influência de empreendimentos em face da análise técnica e dos potenciais impactos ambientais oriundos da sua instalação e operação.

Os principais dados necessários para regionalização de vazões são os dados morfométricos, que representam as características físicas da bacia, obtidos a partir da análise de mapas analógicos, ou de dados de sensoriamento remoto. Para a estimativa das vazões, são necessários dados hidrológicos, além de dados que incluam características físicas e climáticas de uma determinada região que interferem na distribuição espacial e temporal das vazões em bacias hidrográficas (GASQUES, 2018).

A utilização de sensoriamento remoto via satélite no monitoramento hidrológico e climático, pode suprir as informações importantes para a avaliação de disponibilidade hídrica, para a previsão de eventos críticos de cheias e vazantes e ainda dos efeitos das mudanças climáticas sobre a hidrologia. Além disso, a evolução na aplicação de dados de sensoriamento remoto nos modelos conceituais determinísticos indica que os modelos do tipo chuva-vazão passam, cada vez mais, a não apenas trabalhar com a variável temporal, mas também explicitar e modelar a variabilidade de informações espaciais. Dessa forma, pode-se adotar o sensoriamento remoto como tecnologia para viabilizar respostas aceitáveis para tal desafio (VIANA, 2012).

Destarte, um dos métodos na obtenção de dados de vazão para locais não monitorados no corpo hídrico se refere à regionalização, a qual se caracteriza pelo uso de dados hidrológicos conhecidos – séries históricas – e sua aplicação – estimativas – para pontos na região de interesse que denotam características hidrológicas similares.

Isto posto, almeja-se com o presente trabalho buscar a resposta para a seguinte questão: **quais variáveis físicas e ambientais e quais equações de regionalização podem otimizar o processo de estimativa da Q_{95} na Região Hidrográfica do Guaíba?**

1.2 Justificativa

Obter dados atualizados aplicáveis na regionalização e espacializar a vazão de referência para bacias hidrográficas é de suma importância para a viabilidade de aproveitamentos hidrelétricos, que contribui na gestão do potencial hídrico e na efetividade de aplicação dos programas ambientais determinados ao empreendimento licenciado ambientalmente. Nessa seara, o conhecimento da vazão de referência é um fator preponderante para o uso múltiplo das águas, e para a garantia mínima de manutenção do ecossistema aquático e da qualidade da água frente à manutenção de uma vazão ecológica, a qual aduz a vazão de manutenção dos ecossistemas aquáticos.

Dito isso, considerando o fato da inexistência de estações fluviométricas em todos os rios, na quantidade desejada, e a indisponibilidade de séries robustas que possam expressar o comportamento hidrológico se faz necessário o uso de ferramentas de sensoriamento remoto.

Portanto, o trabalho busca contribuir tecnicamente para o uso de dados regionalizados da Q_{95} , como uma ferramenta na análise do licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia no órgão ambiental estadual do Rio Grande do Sul.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral a regionalização da Q_{95} na Região Hidrográfica do Guaíba (RHG) no Rio Grande do Sul, utilizando dados obtidos por sensoriamento remoto e geoprocessamento.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) definir as vazões de referências a partir de séries históricas em estações de monitoramento fluviométrico;
- b) determinar os atributos físicos e ambientais que influenciam na Q_{95} na RHG;
- c) aplicar dados de precipitação pluviométrica estimada por satélite no processo de regionalização;

- d) definir equações de regionalização, visando espacializar as vazões de referência (Q₉₅) na Região Hidrográfica do Guaíba.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Licenciamento ambiental de hidrelétricas no Rio Grande do Sul

A Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM) atua no licenciamento, controle e fiscalização ambiental da atividade de geração de energia no Rio Grande do Sul.

A Agência Nacional de Águas (2019) destaca que os usos consuntivos são aqueles que retiram água do manancial para sua destinação, como a irrigação, a utilização na indústria e no abastecimento humano. Os usos não consuntivos não envolvem o consumo direto da água, como a geração de energia hidrelétrica, o lazer, a pesca e a navegação, pois aproveitam o curso da água sem consumi-la.

No Brasil, diante da Lei Federal nº 13.360/2016, da Lei Federal nº 13.097/2015 e considerando o atual entendimento e aplicabilidade de gestão da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2015), os empreendimentos no setor são classificados em três tipos, observando-se a capacidade de geração:

- a) Central Geradora Hidrelétrica (CGH), atualmente até 5 MW.
- b) Pequena Central Hidrelétrica (PCH), atualmente até 50 MW.
- c) Usina Hidrelétrica (UHE), com capacidade de geração superior a 50 MW.

Os empreendimentos são classificados conforme o Código Único de Empreendimentos de Geração – CEG, em linha com a origem, fonte e tipos de geração e combustível. No entanto, a potência instalada em kW (quilowatt) determina o porte da central geradora para fins de outorga, regulação e fiscalização, definida pelo somatório das potências elétricas ativas nominais das unidades geradoras principais da central. A potência outorgada é a que foi considerada no Ato de Outorga e a Fiscalizada equivale à considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora (ANEEL, 2017).

Em face da análise das licenças de operação (LO) emitidas no âmbito da FEPAM, com dados de acesso público, foi elaborado um mapa da distribuição espacial das

hidrelétricas que atualmente estão em operação – gerando energia – no Rio Grande do Sul. Ademais, é possível visualizar a significativa ocorrência de hidrelétricas na Região Hidrográfica do Guaíba, Figura 1.

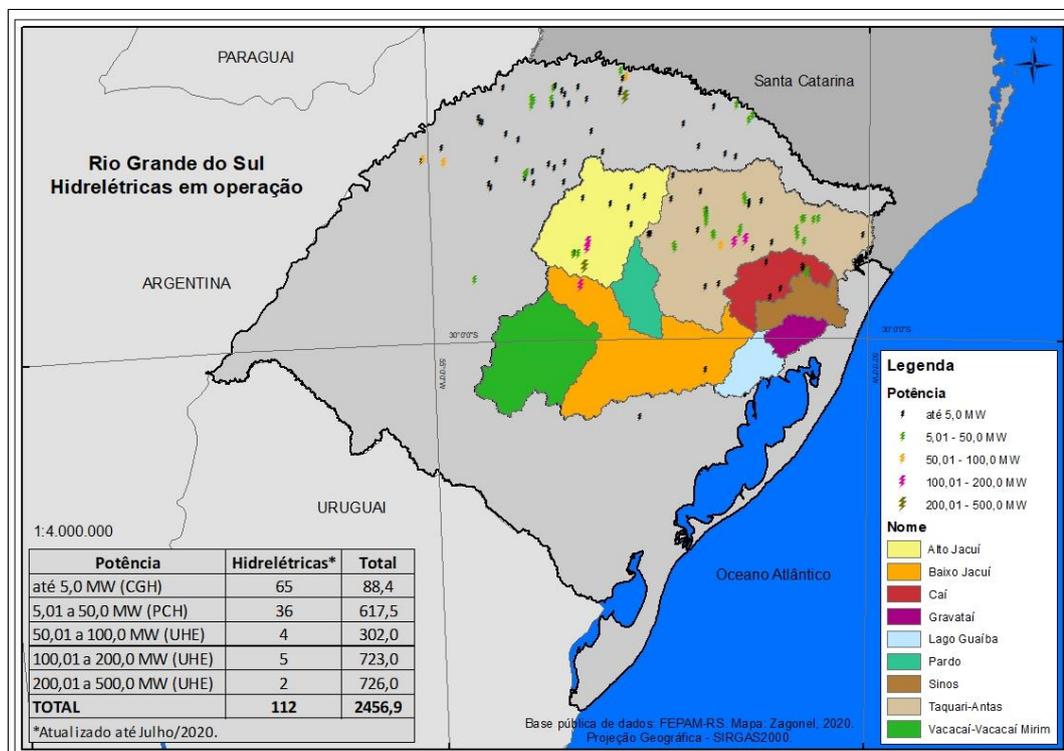


Figura 1. Distribuição espacial das hidrelétricas em operação no RS.

Atualmente no Rio Grande do Sul existem 112 hidrelétricas em operação, considerando os dados públicos das licenças de operação de cada geração de energia de fonte hídrica até o mês de julho de 2020. Esses empreendimentos têm o potencial de geração de 2.456,9 Megawatt (MW).

Considerando a atual capacidade de geração de energia, existem 65 CGHs (até 5,0 MW) que podem produzir 88,4 MW (3,6% do total), que representam 58,04% das hidrelétricas em operação. Existem 36 PCHs (5,01 a 50,0 MW) com geração total de 617,5 MW (25,13% do total), que representam 32,14% das hidrelétricas. Há 11 Usinas Hidrelétricas (UHE) com capacidade acima de 50,01 MW, que são responsáveis por 71,27% do total de produção de energia, ou seja, 1.751,0 MW e que configuram 9,82% das hidrelétricas.

Estudo elaborado por Zagonel (2019), na Divisão de Energia – DIGEN/Fepam, se concentrou na análise de emissões de licenças no período de 1994 a 2018 no âmbito da

FEPAM, no qual foi possível diagnosticar a situação histórica do licenciamento ambiental, Figura 2.

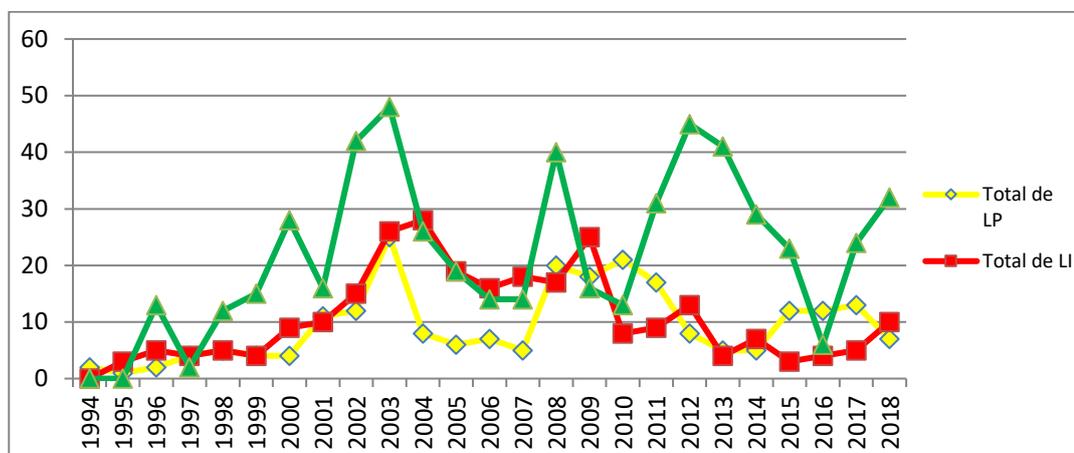


Figura 2. Distribuição temporal do total de Licenças, por ano e tipo de licença para hidrelétricas, RS. Fonte: Zagonel, 2019.

Zagonel (2019) destaca que em 2003 houve o maior número de emissão para Licença Prévia (LP), com 10,7% do total no período analisado, seguido de 9% no ano de 2010. Para Licença de Instalação (LI), o ano de 2004 perfaz 10,5% e de 2003 cerca de 9,7%, e diante da emissão da Licença de Operação (LO) em 2003 resultou 8,7% e 2012 perfaz 8,2%.

Para LP houve decréscimo entre 2003 e 2007, e entre 2010 e 2014. Entretanto, a partir de 2015 houve a retomada de solicitações de licenciamento e emissões de documentos licenciatórios, ao que parece, devido a ampliação de investimentos para geração de energia de fonte hídrica.

Outro fator se refere à similaridade de emissões de licenças entre 1997 e 2007, isto é, para as três tipologias houve acréscimos e decréscimos de forma regular. Porém, a partir de 2008 somente para LI e LO há consonâncias de comportamento.

Nessa seara, diante do diagnóstico de licenças emitidas no período estudado, os dados inferem que houve um decréscimo para Licença de Operação a partir de 2012, diante do período de vigência das licenças (4 anos na época), retomando-se o incremento a partir de 2016. Igualmente, é possível verificar o padrão histórico diante de renovações de LO.

O número total de licenças perfaz 1.050 para as tipologias de LP, LI e LO no período, sendo: 234 LP (22% do total); 267 LI (26%) e 549 LO (52%), Figura 3.

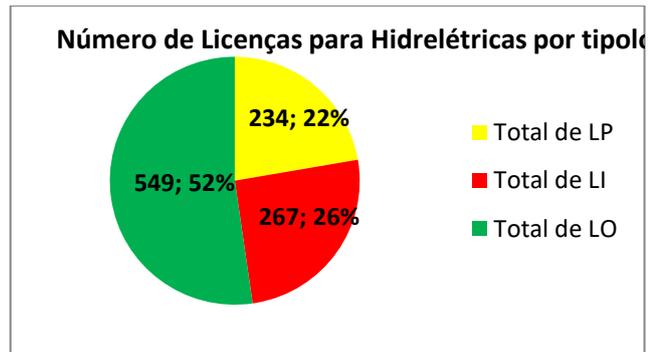


Figura 3. Número de Licenças para hidrelétricas, por tipologia e percentagem (1994-2018), RS.
Fonte: Zagonel, 2019.

Salienta-se que esses números compõem as emissões de licenças no período de 1994 e 2018, bem como renovações e eventualmente revisão de restrições ou condicionantes do documento licenciatório, no qual é emitida uma nova licença para o empreendimento.

Ao passo em que tornou necessário regulamentar, criar critérios e diretrizes, definir estudos e procedimentos a serem seguidos no âmbito do licenciamento ambiental. O Conselho Estadual do Meio Ambiente elaborou a Resolução CONSEMA n° 388/2018, com origem na evolução da Portaria FEPAM n° 39/2017.

A Resolução do CONSEMA n° 388/2018 define o conceito para:

- I. Pequena Central Hidrelétrica (PCH): empreendimento hidrelétrico destinado à geração de energia elétrica cuja potência e área máxima de reservatório são definidas pela Resolução Normativa ANEEL n° 673/2015, ou outra que venha a substituí-la;
- II. Central Geradora Hidrelétrica (CGH): empreendimento hidrelétrico destinado à geração de energia elétrica, cuja potência é determinada pela Resolução Normativa n° 673, de 4 de agosto de 2015, da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, ou outra que venha a substituí-la.

Ademais, os empreendimentos de geração de energia hidrelétrica devem ser licenciados por meio de Licença Prévia (LP), Licença Prévia e de Instalação (LPI), Licença de Instalação (LI), e Licença de Operação (LO), observado o “*Mapa de Diretrizes para o Licenciamento Ambiental de PCHs e CGHs no Estado do Rio Grande do Sul*”, que constitui o anexo único da Resolução CONSEMA n° 388/2018, definindo, através de critérios ambientais multitemáticos, a aptidão de rios para barramento e seu uso para geração de energia hidráulica.

A legislação estadual apresenta uma especificidade singular: *no caso de barramento em curso d'água considerado apto poderá ser admitida influência sobre os cursos d'água considerados inaptos, mediante licenciamento ambiental* (Resolução do CONSEMA n° 388/2018). Isto é, a estrutura da barragem deverá estar localizada em curso d'água passível de barramento, sem detrimento de eventual interferência em curso d'água não apto. *Pari passu*, não apto denota aos rios com veto para construção de barragem, ou seja, sem autorização para implantação de hidrelétricas, bem como à solicitação de licenciamento.

O licenciamento ambiental de CGH, considerada de porte mínimo, segundo resolução do CONSEMA (atualmente capacidade de geração de energia elétrica até 5 MW), poderá ser dar por meio de duas fases com a emissão da Licença Prévia e de Instalação Unificadas (LPI), observados os requisitos previstos nas Seções II e III da Resolução, e posteriormente emissão da LO.

Diante do licenciamento ambiental de PCHs e CGHs são exigidos o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) com o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para os seguintes casos:

- a) situadas dentro dos limites do bioma Mata Atlântica estabelecidos pelo Mapa da Área de Aplicação da Lei n° 11.428, de 2006, cuja implantação implique a supressão de vegetação primária ou secundária em estágio avançado de regeneração;
- b) cuja vazão ecológica proposta, em trecho de vazão reduzida, é inferior à vazão de 95% de permanência.

Entretanto, salienta-se que o trâmite licenciatório poderá ser por intermédio do Relatório Ambiental Simplificado (RAS) para demais casos, considerando que possam ser casos de menor complexidade. Igualmente, está consolidado que a intervenção ou supressão em vegetação nativa em estágio médio de regeneração da Mata Atlântica poderá ser autorizada, mediante Parecer Técnico, quando necessária a execução de obras, planos, atividades ou projetos de utilidade pública ou interesse social, através de RAS.

A Portaria FEPAM n° 43/2019 disciplina os procedimentos e critérios gerais para aplicação da Licença Prévia e de Instalação Unificadas – LPI. Sendo possível o licenciamento por intermédio de LPI para a Geração de energia hidrelétrica, considerada de porte mínimo, e para Barramentos com reservatórios consolidados, para geração de energia a partir de fonte hídrica, desde que não altere o regime hídrico existente.

A Resolução CONSEMA n° 389/2019 altera a Resolução CONSEMA n° 372/2018 que dispõe sobre os empreendimentos e atividades utilizadores de recursos ambientais, efetiva ou potencialmente poluidores ou capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental, passíveis de licenciamento ambiental no Estado do Rio Grande do Sul. Com isso, tornou-se desnecessário o licenciamento da atividade de Microgeração de energia a partir de fonte hídrica (com potência de até 0,5 MW).

A Resolução CONSEMA n° 388/2018 expressa que a intervenção e supressão de vegetação em área de preservação permanente (APP) poderá ser autorizada, mediante Parecer Técnico, quando necessária a execução de obras, planos, atividades ou projetos de utilidade pública ou interesse social, através de RAS.

A Lei Estadual n° 10350/1994 institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos (SERH), e regulamenta o artigo 171 da Constituição do Estado do Rio Grande do Sul. A qual expressa que a água é um recurso natural de disponibilidade limitada e dotado de valor econômico que, enquanto bem público de domínio do Estado, terá sua gestão definida através de uma Política de Recursos Hídricos (RS, 1994).

Nessa seara, no Rio Grande do Sul a FEPAM atua no licenciamento ambiental e o Departamento de Recursos Hídricos (DRH) da Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura (SEMA) na gestão dos recursos hídricos. Porquanto, compete ao DRH:

- Elaborar o anteprojeto de lei do Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) através da compatibilização das propostas encaminhadas pelos Comitês de Gerenciamento de Bacia Hidrográfica com os planos e diretrizes setoriais do Estado, relativos às atividades que interferem nos recursos hídricos;
- Coordenar e acompanhar a execução do Plano Estadual de Recursos Hídricos, cabendo-lhe, em especial:
 - a) propor ao Conselho de Recursos Hídricos critérios para a outorga do uso da água dos corpos de água sob domínio estadual e expedir as respectivas autorizações de uso;
 - b) regulamentar a operação e uso dos equipamentos e mecanismos de gestão dos recursos hídricos, tais como redes hidrometeorológicas, banco de dados hidrometeorológicos, cadastros de usuários das águas;

c) elaborar o relatório anual sobre a situação dos recursos hídricos no Estado para apreciação pelos Comitês, na forma do Artigo 19, IV, com vista à sua divulgação pública.

- Assistir tecnicamente o Conselho de Recursos Hídricos (CRH).

Conforme exposto por SEMA (2019), a partir da regulamentação do Artigo 171 da Constituição Estadual de 1989, modernos princípios foram incorporados para a gestão das águas no Rio Grande do Sul. Entre estes se destacam:

- A adoção da bacia hidrográfica como unidade de gestão;
- A outorga e a tarifação pelo uso das águas; e,
- A reversão dos recursos arrecadados em benefício da própria bacia.

Considerando a necessidade de se estabelecer vazão mínima a ser mantida a jusante de barramentos de água dos empreendimentos de Geração de Energia, no âmbito do processo de outorga dos recursos hídricos, com o objetivo de preservação de Recursos Hídricos. O Conselho de Recursos Hídricos elaborou a Resolução CRH n° 306/2018, a qual dispõe sobre os critérios e diretrizes da vazão remanescente em Empreendimentos de Geração Hidroenergética, vinculados à outorga de uso da água em cursos hídricos de domínio estadual no Rio Grande do Sul (CRH, 2018).

A Resolução CRH n° 306/2018 estabelece como vazão remanescente de Empreendimentos de Geração Hidroenergética a vazão mínima a ser liberada nos barramentos, sendo esta composta pela vazão de garantia dos demais usos somada à vazão não outorgável ou à vazão ecológica, o que for maior. Em situações em que a vazão afluyente à montante do barramento for inferior a vazão remanescente, esta deverá ser igual à vazão afluyente. A vazão remanescente poderá ser alterada por ocasião da renovação da outorga ou da licença ambiental se houver alterações ambientais negativas constatadas no monitoramento ou novos estudos ou por eventuais conflitos de uso da água dirimidos no âmbito do Comitê de Bacia Hidrográfica, em primeira instância, ou do Conselho Estadual de Recursos Hídricos, em segunda instância (CRH, 2018).

2.2 Hidrelétricas e aspectos ambientais

A energia hidráulica é produzida através da força do movimento das águas. Para que isso seja possível, há alguns fatores que influenciam na geração de energia elétrica, sendo eles: a vazão do rio, a quantidade disponível de água em diversos períodos do ano, a topografia, as alterações antrópicas, ou naturais, como as quedas de água naturais ou criadas artificialmente (ANEEL, 2008 *apud* QUEIROZ, 2013).

De acordo com Carneiro (2017), em comparação com as usinas hidrelétricas (UHE) o desenvolvimento e implementação de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), igualmente o mesmo entendimento é aplicado para a Central Geradora de Hidrelétrica (CGH), apresentam algumas vantagens:

- a) Baixo impacto ambiental, em função das dimensões do projeto;
- b) Localização mais próxima da demanda consumidora, com menor custo de conexão e transmissão de energia elétrica;
- c) Obras civis de pequeno porte, com menor tempo de desenvolvimento e construção; e,
- d) Baixo investimento inicial.

Sammartano (2019) cita que a energia hidrelétrica é atualmente uma das tecnologias de energia mais econômicas e é a mais amplamente usada energia renovável no mundo. Ao mesmo tempo, destaca a necessidade de estudos preliminares para a avaliação técnica e viabilidade econômica frente a instalação de hidrelétricas.

As pequenas centrais hidrelétricas representam um fornecimento confiável de eletricidade com boa relação custo-benefício, que se baseia em um recurso renovável e sustentável. Porém destaca que a instalação de várias pequenas centrais ao longo do mesmo canal do rio requer um planejamento adequado, a fim de limitar as implicações da captação de água nas características hidrológicas e ecológicas. Pois o desvio de água pode afetar o rio regime e tem consequências nas condições de habitat a jusante para a biodiversidade (SAMMARTANO, 2019).

Para Tomazoni (2019), independentemente do empreendimento, ao produzir energia, geram-se impactos ambientais dos mais variados níveis de degradação, e por isso é de suma importância que ao planejar a geração de energia elétrica, sejam levados em consideração não somente seus benefícios econômicos, mas também o que esta geração trará de consequências para o meio ambiente.

A estrutura de uma usina hidrelétrica funciona de maneira integrada e em conjunto, e é formada principalmente, pelo sistema de captação e adução de água, pela barragem e pela casa de força e vertedouro. A função da barragem é interromper o curso normal da água, criando um reservatório, onde será armazenada a água. Além de armazenar água, este reservatório também permite que a vazão dos rios seja adequada, tanto em períodos chuvosos, quanto de estiagem, a captação da chuva em volume adequado e uma diferença de altura que é necessária para a geração da energia hidráulica (ANEEL, 2005 *apud* QUEIROZ, 2013).

Queiroz (2013) cita alguns impactos ambientais que podem ocorrer na atividade hidrelétrica, sendo eles: aumento inesperado da população local diante da contratação de trabalhadores externos a região; circulação intensa de veículos pesados em vias públicas; alteração da vazão do curso d'água pela construção do barramento; assoreamento do reservatório; perda da biodiversidade da fauna e flora diante da supressão da vegetação; perda de materiais arqueológicos na área de alaguel; realocação de famílias na área diretamente afetada; dentre outros.

Entretanto, os impactos causados pelas centrais hidrelétricas tornam-se toleráveis quando levado em conta a importância da energia hidráulica para a matriz energética. Tendo em vista que a maioria dos impactos causados é local, é possível realizar ações mitigadoras para reduzir estes impactos. A energia hidráulica permanece como uma fonte de energia renovável, pois não modifica as propriedades físico-químicas das águas, e permitem o retorno da água ao leito original do curso d'água alguns poucos quilômetros abaixo da barragem (QUEIROZ, 2013).

Para Perazzoli (2013), o tipo de uso, ocupação e cobertura do solo, interfere nos processos hidrológicos, consequentemente no regime de vazões e na produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica. Em curto prazo, grandes alterações no uso e ocupação do solo acarretaram maiores impactos no regime e na disponibilidade hídrica da bacia. O cenário pastagem apresentou a maior vazão média diária e o cenário mata nativa apresentou a menor. O cenário agricultura produziu a maior taxa de produção de sedimentos e o cenário mata nativa apresentou o menor valor médio.

Tomazoni (2019) encontrou alguns impactos negativos da implantação de aproveitamento hidrelétrico, sendo eles: a alteração da descarga a jusante em função do período de enchimento do reservatório e/ou do desvio permanente do rio; o assoreamento do reservatório; os processos erosivos; a degradação das áreas utilizadas pela exploração de material de construção e pelas obras temporárias de construção civil (corte e movimentação

de solo e rocha); a inundação da vegetação com perda de patrimônio vegetal e desmatamento nos locais das obras. Obteve como impactos positivos: a rede viária e suas benfeitorias; oportunidade de emprego; novas oportunidades para a economia; o aumento de arrecadação tributária para o município; e as indenizações e regularizações fundiárias. Além da maior oferta de energia e conseqüentemente contribuição para a redução de custos relacionados a outras fontes de energia, mas caras e não renováveis.

2.3 Vazão de referência

A hidrologia evoluiu de uma ciência descritiva e qualitativa, para uma área do conhecimento cujos métodos quantitativos têm sido explorados através de metodologias matemáticas e estatísticas com intuito de obter dados confiáveis e explorando-se melhor as informações existentes. Nos aproveitamentos dos recursos hídricos os aspectos ambientais não eram sequer questionados, sendo que a visão econômica dos benefícios estava voltada para o crescimento econômico (TUCCI, 1998). Porém, do ponto de vista da prospecção e inventário hidrelétrico as questões ambientais ainda carecem de empenho significativo.

De modo geral, a Agência Nacional de Águas (ANA, 2013), em seu *Manual de Procedimentos Técnicos e Administrativos de Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos*, cita duas abordagens que têm sido usadas nacionalmente como critério para definição de vazões mínimas de referência: vazões mínimas com determinado tempo de recorrência e vazões de curva de permanência. A declaração de reserva de disponibilidade hídrica, ao definir os consumos de água máximos na bacia, nos trechos a montante de determinado empreendimento, termina por estabelecer um critério de referência de outorga para outros usos. E, ao se definir as regras de operação do reservatório, são estabelecidas as vazões de referência à jusante do empreendimento, a serem observadas nas outorgas de outros usos.

A ANA adota como Vazão de Referência a vazão que é superada em 95% do tempo (Q_{95}) uma vez que o risco de 5% é um valor médio entre os riscos que se consideram toleráveis pelos diversos setores usuários. A Agência expressa em seu *Manual* que a disponibilidade hídrica é estabelecida a partir de estatísticas do passado observadas em estações de monitoramento. Para o gerenciamento de recursos hídricos, é necessário adotar

a hipótese de estacionariedade, ou seja, supor que as estatísticas da hidrologia observadas no passado irão se repetir no futuro.

O Conselho de Recursos Hídricos (CRH) em sua Resolução n° 306/2018 expressa define a Vazão de referência (Q_{ref}) como a vazão do curso hídrico utilizada como base para o processo de gestão, tendo em vista o uso múltiplo das águas e a necessária articulação das instâncias do Sistema Nacional de Meio Ambiente - SISNAMA e do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGRH. Define a Vazão ecológica (Q_{eco}) como a vazão de manutenção dos ecossistemas aquáticos definida pelo órgão ambiental competente, expressa no documento de licença ambiental. Além disso, expressa a Vazão remanescente (Q_{rem}) como a vazão mínima a ser liberada após intervenção para Empreendimentos de Geração Hidroenergética (CRH, 2018).

No Rio Grande do Sul, conforme a Resolução CONSEMA n° 388/2018, a vazão de referência condiciona a tramitação do licenciamento ambiental por intermédio do EIA-RIMA de empreendimentos de geração de energia elétrica de fonte hídrica é a Q_{95} , ou seja, cuja vazão ecológica proposta em trecho de vazão reduzida seja inferior à vazão de 95% de permanência. Enfatiza-se que a Q_{95} se refere à curva de permanência em 95% do tempo, pois nesse caso existe a relação entre a vazão no curso d'água em determinado ponto com a percentagem do tempo em que ela é igualada ou superada naquele local monitorado.

A adoção de vazões sazonais é importante, pois está ligada ao tempo de desatendimento a que o usuário pode estar submetido, nesse aspecto, pela própria definição da curva de permanência, a garantia de 95% representa um risco de 5% do tempo. Em média, isto significa que em 18 dias por ano a vazão natural é inferior à Q_{95} . No entanto, ao comparar-se a Q_{95} anual com as séries históricas, observa-se que, em geral, esta vazão pode não ocorrer durante dois ou três anos seguidos, porém a cada três ou quatro anos, o rio passa até dois meses com vazões abaixo da Q_{95} anual (ANA, 2013).

Em reservatórios de Usinas Hidrelétricas (UHEs) já outorgadas pela ANA (2013), a partir da normatização do instrumento da Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica (DRDH), a vazão que pode ser outorgada fica vinculada ao limite de usos consuntivos a montante do empreendimento, previstos para ocorrer ao longo do prazo de outorga. Esses limites de consumo são definidos na DRDH, e, juntamente com a série histórica de vazões naturais afluentes e eventuais restrições operativas, define a disponibilidade hídrica dos empreendimentos hidrelétricos.

Considerando o aspecto acima aludido, Collischonn (2006) cita que a vazão mínima residual, ou vazão ecológica, é um valor de referência que deve ser mantido no trecho de rio

a jusante de um barramento ou de uma retirada de água. O conceito de vazão ecológica surgiu ao longo da segunda metade do século XX, quando os problemas associados ao manejo da água começaram a ser percebidos no meio ambiente.

Nesse contexto, o conhecimento da curva de permanência das vazões em uma dada seção do curso d'água é importante por expor a amplitude de variação das vazões e, também, por fornecer a frequência com a qual cada valor de vazão ocorre no corpo hídrico. A curva de permanência indica a porcentagem de tempo em que um determinado valor de vazão foi igualado ou superado durante um período de observações. Ela permite visualizar de forma rápida a potencialidade natural do curso d'água, informando o grau de permanência para qualquer valor de vazão. Esta curva pode ser estabelecida com base em valores diários, semanais ou mensais, sendo esta função hidrológica utilizada nos estudos hidrelétricos, de navegação, de qualidade da água, entre outros. (BARBOSA, 2004).

As atividades humanas como a irrigação, o abastecimento público e industrial de água e a geração de energia elétrica têm causado profundas alterações nos regimes naturais de vazão dos rios. A noção de uso sustentado dos recursos hídricos começou a surgir quando as consequências da sua utilização irresponsável começaram a ficar claras. Isto ocorreu primeiro com a questão da qualidade da água para abastecimento urbano, à medida que começou a ficar evidente a ligação entre a saúde pública e a qualidade da água (COLLISCHONN, 2006). O mesmo autor enfatiza que no caso da construção de barragens, inicialmente, os impactos ambientais que causavam maior preocupação eram os impactos da inundação de uma grande área de floresta e a transformação do ambiente típico de rio (lótico), em um ambiente típico de lago (lêntico), e as alterações de qualidade de água associadas a esta transformação.

Entretanto, nessa seara, às questões que englobam a garantia de manutenção do ecossistema aquático torna-se fundamental no decurso da análise da viabilidade ambiental de empreendimentos de geração de energia de fonte hídrica.

2.4 Regionalização de vazão

A regionalização consiste num conjunto de ferramentas que exploram ao máximo as informações existentes, visando à estimativa das variáveis hidrológicas em locais sem dados ou com informações insuficientes (SILVA, 2006).

O trabalho desenvolvido por Gasques (2018) cita inúmeros métodos de regionalização para analisar as relações entre parâmetros de modelos hidrológicos, observando as características físicas da bacia e condições climáticas, tais como:

- a) método de regionalização dos parâmetros da distribuição de probabilidades;
- b) método de regionalização do evento com um determinado risco; e,
- c) método de regionalização da curva adimensional de frequências.

Entretanto, normalmente, relacionam os parâmetros do modelo e as características da bacia a partir de cálculos estatísticos. Têm-se quatro situações: 1) variáveis: determina-se a variável de uma região com base em relações nos dados pontuais existentes; 2) funções: através de curvas de intensidade versus curva de frequência ou curva de duração, determina-se a função hidrológica em determinada região; 3) parâmetros: os parâmetros de uma função ou modelo matemático podem ser determinados pela sua relação com as características físicas da bacia através do ajuste do modelo; 4) indicadores regionais: valores médios de variáveis ou proporções que permitam uma rápida estimativa de uma variável ou entendimento do seu comportamento (TUCCI, 2002 *apud* GASQUES, 2018).

Conforme Gasques (2018), podem-se citar as principais metodologias propostas de regionalização de vazões: a metodologia tradicional descrita por ELETROBRÁS em 1985, a metodologia de interpolação linear, e a metodologia de Chaves *et al.* (2002).

Os dados hidrológicos são mensurados em locais consolidados, seja um pluviômetro em uma bacia ou uma estação fluviométrica em uma seção de um curso d'água. O primeiro mede a ocorrência da precipitação, caracterizando uma amostra pontual com dados de entrada de água do sistema, e o segundo objetiva a obtenção de atributos da integração espacial de saída, representada pelo escoamento na bacia hidrográfica (TUCCI, 2002).

Destarte, é enfatizado que as características fisiográficas e climáticas são consideradas uniformes dentro de uma bacia, o que possibilita aplicação da regionalização. Outra vantagem da regionalização refere-se à contenção de custos para eventual implantação de rede hidrométrica em que se pode obter dados especializados para a área de interesse. Porquanto, não é consenso da obrigação do poder público para a instalação de estação de medição e disponibilização de dados do monitoramento.

As características fisiográficas quantificáveis, tais como a área de drenagem, comprimento do rio principal, densidade de drenagem, declividade, etc., e a precipitação total anual média são grandezas que podem ser utilizadas como variáveis independentes ou

explicativas na análise de regressão da variável dependente, e em muitos casos são função da escala do mapa utilizado (CPRM, 2014).

Vendrusculo (2005) cita que, comumente a manutenção dos recursos hídricos, quanto ao regime de vazão dos cursos d'água e da qualidade da água, decorre de mecanismos naturais de controle desenvolvidos ao longo de processos evolutivos da paisagem.

Conforme Gasques (2018), a fim de tornar possível um melhor conhecimento acerca destes dados, técnicas de regionalização de vazões são utilizadas. Para tal, pressupõe-se que a similaridade espacial de determinadas regiões resulta em similaridade de dados hidrológicos, podendo, então, usar de estimativas para defini-los. Ademais, a regionalização de uma função ou variável é estabelecida através de um dos seguintes critérios:

- a) estabelecimento da relação empírica entre valores da função e características conhecidas, espacialmente, do sistema hidrológico; e,
- b) estabelecimento da função com base nos valores do item anterior ou de relações adimensionais.

Com isso, algumas das principais funções hidrológicas utilizadas em recursos hídricos são: curva de probabilidade de vazões máximas e mínimas, curva de permanência e curva de regularização (GASQUES, 2018).

Barbosa (2004) expressa que se entende por regionalização de vazões, ou regionalização hidrológica, o conjunto de procedimentos e métodos estatísticos que visam explorar ao máximo os dados existentes numa região hidrológica, buscando-se permitir a estimativa da vazão desejada num local com ausência de dados, ou com dados muito escassos. A estimativa é realizada com base em modelos de cálculo das vazões estatisticamente ajustados, que se demonstram aplicáveis a qualquer seção fluvial da bacia considerada. Em condições de ocorrência do relevo acidentado, os cursos d'água apresentam trechos encachoeirados, com grandes desníveis, o que, a despeito das pequenas vazões, favorecem a implantação de pequenas usinas geradoras de hidroeletricidade.

Os processos que caracterizam a variabilidade da vazão ou suas estatísticas no espaço dependem de vários fatores como: condições climáticas que caracterizam o balanço do escoamento médio; as condições de relevo, solo e cobertura que definem o escoamento superficial e os volumes infiltrados; a geologia que define as condições do escoamento subterrâneo e as vazões de estiagem. Na regionalização, são escolhidas variáveis utilizadas no planejamento dos recursos hídricos como a vazão média, a vazão máxima de inundação,

a curva de duração e a vazão mínima com uma determinada duração e tempo de retorno (SILVA JÚNIOR, 2003).

Silva Júnior (2003) conclui que a regionalização tem sido utilizada como uma solução para suprir a demanda de falta de dados, no qual essa prática é importante para interpolar resultados em determinado espaço. Ao mesmo tempo, é fundamental que nenhum tipo de dado seja inventado para o método de regionalização, e que cabe buscar a melhor forma para obter o máximo de informações dos dados existentes. As análises do comportamento das vazões ao longo do tempo inferem no conhecimento sobre modelagem hidrológica e suas implicações na regionalização e espacialização dos dados.

Para Viana (2012) os modelos hidrológicos podem ser usados no manejo de bacias hidrográficas tanto para seu planejamento como para avaliar os impactos de uma mudança na cobertura e uso do solo. Os modelos estocásticos se utilizam de dados do passado, como séries de chuva e vazão ocorridas, para prever séries futuras. Estes modelos não levam em consideração os fenômenos hidrológicos embutidos nos dados. Apenas assumem que o comportamento das séries numéricas de dados hidrológicos se repete.

Os modelos determinísticos baseiam-se nos fenômenos e conceitos envolvidos no ciclo hidrológico, relacionando causa e efeito. Uma rede hidrométrica, composta de estações pluviométricas e fluviométricas, dificilmente abrange todos os locais de interesse necessários ao gerenciamento dos recursos hídricos de uma região. Sempre existirão lacunas temporais e espaciais a serem preenchidas com base em metodologias apropriadas (VIANA, 2012).

Tucci (2002) cita que a variabilidade das condições hidrológicas é um processo estocástico no tempo e no espaço. Essa variação decorre da combinação de vários fatores, tais como: condições climáticas de precipitação, evaporação, radiação solar, relevo, geologia, geomorfologia, solos, cobertura vegetal e ações antrópicas sobre o sistema fluvial. Outrossim, expressa que as estações de monitoramento devem ser classificados de acordo com a qualidade das informações que dispõe, permitindo ao usuário a melhor definição da análise regional, com base nas tendências das séries confiáveis.

Viana (2012) cita que uma metodologia bastante utilizada para a determinação da vazão em um local sem dados supõe que a proporcionalidade linear entre as áreas é obedecida pela vazão, ou seja, toma-se a vazão específica de um local mais próximo com dados e multiplica-se essa vazão específica pela área do local sem dados. Essa metodologia pode ser razoável se as bacias tiverem características muito parecidas.

Igualmente, o autor destaca que a metodologia simples de regionalização dos parâmetros de um modelo hidrológico é a reprodução de todos os parâmetros obtidos na calibração de uma bacia com dados de vazão e precipitação na simulação hidrológica da bacia sem dados de vazão, modificando apenas a área de drenagem e, quando houver dados, as séries de precipitação e evapotranspiração.

Os satélites de sensoriamento remoto têm favorecido levantamentos à distância de variações físicas e químicas da superfície terrestre em áreas extensas e de difícil acesso. A composição espectral da energia emitida e a refletida pelos alvos produz informações sobre os mesmos. No caso do sensoriamento da superfície terrestre, a energia refletida proporciona o entendimento das características físicas, químicas ou biológicas de elementos como corpos de água, solo e vegetação (VIANA, 2012).

O autor cita que a despeito da relevância da dinâmica da vegetação, medições de parâmetros que a caracterizem não são comuns. Por essa razão, os índices de vegetação, tais como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), tornaram-se uma importante fonte de dados, sendo utilizados na classificação e no monitoramento da vegetação, bem como no estabelecimento de relações com a evapotranspiração, com a precipitação, com a umidade do solo e com fenômenos climáticos de escala global (VIANA, 2012).

Diante do tema, Peralta (2003) desenvolveu um estudo para análise da metodologia aplicada para a regionalização de vazões máximas em pequenas bacias hidrográficas. No qual destaca que uma das fases da regionalização é a determinação das curvas individuais adimensionais de probabilidade das estações fluviométricas. Para isso, os valores de vazões médias diárias máximas anuais e vazões instantâneas máximas anuais devem ser adimensionalizados utilizando dois tipos de fator, obtidos através da média das vazões máximas diárias anuais e da vazão média de longo período, ou seja, a média das vazões médias diárias. No qual conclui que os resultados da regionalização são importantes para projetos tais como: dimensionamento de obras hidráulicas, dimensionamento do volume de reservatórios, planejamento dos recursos hídricos, estimativas de vazões de cheias, entre outros.

Além disso, os modelos hidrológicos são utilizados para representar os processos hidrológicos, buscando prognosticar as condições em que o meio estará sujeito para que seja possível mitigar seus impactos. Logo, essas ferramentas são essenciais para o planejamento e tomada de decisões dentro do complexo processo de condições naturais e para a interferência do homem (VENDRUSCULO, 2005).

Na ausência de série histórica significativa próxima ao local de interesse, a ANA (2013) tem usado as seguintes técnicas para extrapolação de vazões de referência:

- *Regionalização de vazões*: trata-se de uma técnica que permite explorar as informações existentes e gerar vazões de referência em locais sem dados, com base em variáveis explicativas tais como a área de drenagem e a precipitação média;
- *Vazão específica*: trata-se de um caso particular de regionalização, em que se considera que toda a bacia contribui de forma homogênea, ou seja, cada quilômetro quadrado em média gera a mesma vazão de referência;
- *Simulação chuva-vazão*: se baseia no fato de que séries de precipitação em geral têm maior disponibilidade espacial e temporal do que séries de vazão.

Conforme Farias Junior (2006), a primeira evolução conceitual de vazão ecológica deu-se com a determinação de vazões variáveis ao longo do ano, tendo por base apenas as vazões mínimas. Esse conceito ainda é um dos mais utilizados no mundo, com destaque para os seguintes métodos: Texas, Nova Inglaterra ou ABF (*Aquatic Base Flow*), *Tennant* ou *Montana* e os baseados na curva de permanência, como a Q_{90} . O qual pondera que a utilização de vazões variáveis com os meses é de suma importância para a coerência do método, principalmente para cursos hídricos naturais e onde a precipitação tem forte interferência na vazão.

Oliveira (2013) destaca que as vazões Q_{90} e Q_{95} representam as vazões em que 90% ou 95% do tempo se têm valores iguais ou superiores a elas, representa uma “garantia” de que um determinado valor de vazão esteja presente em 90% ou 95% do tempo em uma determinada seção do curso d’água. Além disso, esses índices têm sido utilizados em estudos de avaliação de impactos ambientais e na concessão de Outorga do Uso da Água.

Cabe enfatizar que o método de regionalização propicia a obtenção de índices hidrológicos, tais como a $Q_{7,10}$ (se refere a vazão mínima de 7 dias em um período de 10 anos de tempo de retorno) e a Q_{95} (vazão de 95% da curva de permanência), os quais são importantes valores de vazão de referência que podem garantir a qualidade de ecossistemas aquáticos diante do licenciamento ambiental de hidrelétricas. Nesse âmbito, Tucci (2002) cita que a vazão Q_{95} é um valor característico do comportamento em estiagem de uma bacia e a vazão média é a síntese de todas as vazões ao longo do tempo.

Além disso, Tucci (2002) destaca que a regionalização hidrológica pode ser realizada para variáveis ou para funções, no primeiro caso a variável pode ser determinada numa região com base em relações estabelecidas através dos dados pontuais existentes, Tabela 1, para o segundo quando uma função hidrológica pode ser empregada numa região com base em dados hidrológicos existentes.

Tabela 1. Exemplos de variáveis na regionalização.

Variável regionalizada	Variáveis explicativas
Vazão média	Área da bacia, precipitação.
Vazão média de cheia	Área da bacia, precipitação, declividade e comprimento do rio.
Vazão mínima	Área da bacia e densidade de drenagem.
Tempo de concentração	Comprimento, declividade e área da bacia.

Fonte: Tucci, 2002.

Nesse aspecto, o método matemático empregado se refere à análise de regressão, a qual procura inferir a relação matemática entre uma variável dependente y e uma ou mais variáveis independentes x_1, x_2, \dots, x_n . Uma série de avaliações objetivas pode ser realizada para se verificar a adequação do ajuste da função matemática aos dados, como o Coeficiente linear de correlação e do desvio padrão dos erros de ajustamento, também chamado de Erro padrão da estimativa. O grau de associação dos pontos ao longo da função representa a correlação, e a equação de associação das variáveis é a regressão. Nesse sentido, quando duas variáveis são relacionadas a relação é bivariada ou simples, mas quando a regressão é realizada entre várias variáveis o problema é caracterizado como regressão múltipla (TUCCI, 2002).

A equação comumente utilizada no processo de regionalização de vazão é a que se desenvolve pela regressão com variável a área da bacia, Equação 1:

$$Q = a.A^b \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: a e b são os coeficientes determinados geralmente por mínimos quadrados.

Tucci (2002) destaca que a regressão linear simples consiste no ajuste de uma reta aos pares de valores de y e x , Equação 2:

$$y = ax + b + E \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: a e b são parâmetros e E é o erro.

E, para a regressão linear múltipla, onde há várias variáveis independentes com diferentes pesos podem explicar a variação de y , como a Vazão por regressão linear múltipla Equação 3 e Vazão em função de variáveis explicativas Equação 4:

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + b \quad (\text{Equação 3})$$

$$Q = f(\text{Ad}, P, S, L, DD) \quad (\text{Equação 4})$$

Em que: Ad representa a Área de drenagem; P a precipitação média anual; S a declividade média do rio principal; L o comprimento do rio principal; e DD a densidade de drenagem.

Para a estimativa de vazões as variáveis climáticas precipitação e evaporação desempenham importante papel. A precipitação influencia diretamente o regime de escoamento de um curso d'água, e por isso é comumente utilizada como variável explicativa em trabalhos de regionalização, enquanto a evaporação atua de forma indireta, pois represente a perda no sistema (OLIVEIRA, 2013).

Tucci (2002) destaca que as principais variáveis explicativas das características físicas na regionalização são:

- *área de drenagem*, se refere a área da bacia delimitada pelo divisor de águas;
- *comprimento do rio principal*, se refere ao principal curso d'água que drena a maior área no interior da bacia;
- *declividade média do rio principal*, se refere a percentagem de declividade ocorrente no curso d'água principal da bacia;
- *densidade de drenagem*, representa a relação entre o comprimento total de toda a rede de drenagem da bacia dividida por sua área total;
- *desnível*, se refere à diferença de cota entre o ponto mais alto da bacia em comparação com a seção de saída.

Considerando os parâmetros físicos, Tucci (2002) enfatiza que existe correlação entre as variáveis explicativas utilizadas na regressão como Área, Comprimento de rio e Declividade, sendo que geralmente, a área e o comprimento podem se correlacionar através

de uma equação de regressão do tipo de potência, Comprimento em relação a área da bacia
Equação 5:

$$L = a \cdot A^b \quad (\text{Equação 5})$$

Em que: L representa o comprimento do rio principal; A a área da bacia; e a e b são os coeficientes determinados geralmente por mínimos quadrados.

Segundo Oliveira (2013) diversos métodos têm sido implementados para a regionalização de vazões, destacando-se a metodologia tradicional proposta pela Eletrobrás em 1985. Essa metodologia tem como característica principal a utilização de equações de regressão regionais aplicadas às regiões hidrologicamente homogêneas – delimitadas a partir de parâmetros físicos e climáticos, com intuito de obter a vazão em qualquer posição da rede de drenagem na bacia em estudo.

Euclides (2001) para a regionalização hidrológica selecionou dados de vazão oriundas de séries históricas em um período comum de observações, denominado período-base, abrangendo os anos de 1964 a 1992, ou seja 29 anos. Além disso, selecionou 33 estações fluviométricas e 46 estações pluviométricas. Ao mesmo tempo, utilizou na análise as variáveis físicas: área de drenagem; comprimento do curso d'água principal; densidade de drenagem; e declividade do curso d'água principal.

Conforme CPRM (2014), o conhecimento da Q_{95} é uma informação que incentiva o uso sustentável e racional da água, na avaliação para outorga, bem como atinge o objetivo de possuir praticidade na sua aplicação. No processo de determinação das regiões homogêneas algumas extrapolações se fazem necessárias, uma vez que a densidade dos locais de monitoramento das vazões é baixa, e há escassez na quantidade de estações pluviométricas com série de dados representativos para a região. Juntando-se a esta situação, ocorre à interferência humana, principalmente com barramentos dos rios, e a dificuldade em se obter informações cadastrais destes, tais como coordenadas, regime de operação e finalidade destes perante os seus usos, levando desta maneira a aumentar as incertezas dos resultados obtidos na pesquisa (CPRM, 2014).

Barbosa (2005) indica que por meio da regionalização, visa-se permitir a obtenção indireta das vazões em seções em que faltem dados ou onde, por fatores de ordem física ou econômica, não seja possível a instalação de estações hidrométricas. A estimativa é realizada com base em modelos de cálculo das vazões, que se demonstram estatisticamente aplicáveis

a qualquer seção fluvial da bacia considerada. Em geral, o modelo de regionalização considera as características físicas e/ou climáticas da bacia que exercem maior importância em seu comportamento hidrológico, características essas que são levadas em conta com diferentes pesos na regressão. Enquanto a precipitação média, o total anual ou o total do semestre mais chuvoso são normalmente empregados como variável independente para representar o efeito do clima, as características físicas que entram como variáveis independentes são a área de drenagem, o comprimento e a declividade do curso d'água principal e a densidade de drenagem (BARBOSA, 2005).

Pereira (2012) sobre Regionalização de Vazões de permanência aplicada na Região Hidrográfica do Uruguai, baseado nas análises estatísticas define cinco regiões com comportamento hidrológico homogêneo. A área de drenagem foi a variável mais expressiva na representação das vazões associadas aos níveis de 90% de permanência na regionalização pelo método tradicional, sendo que o acréscimo da variável L – comprimento do rio principal - nas equações não representou uma redução significativa dos erros, tampouco um aumento representativo nos ajustes do coeficiente de determinação. Com isso, a área de drenagem pode ser uma variável mais atrativa de utilização, devido à praticidade de sua obtenção.

Além disso, diante da análise dos valores de vazões Q_{90} observados e estimados com o uso das equações regionais, que os maiores erros percentuais foram obtidos nas estações de menor área de drenagem, e os menores erros percentuais com estações de maior área de drenagem, em decorrência, provavelmente, da menor variação dos valores de vazões observadas. As regiões hidrográficas homogêneas apresentam aparente dependência da amplitude das séries históricas utilizadas e da conformação geológica, geomorfológica, pedológica de cada região e a cobertura do uso do solo (PEREIRA, 2012).

Wolff (2017), na Regionalização hidrológica do Estado de Santa Catarina, mediante uma abordagem geoestatística baseada em modelos e na sazonalidade, concluiu que a representação completa e sazonal das curvas de permanência de vazões permitiu um melhor conhecimento da dinâmica sazonal das vazões importantes para a outorga de recursos hídricos superficiais, como, por exemplo, a vazão específica com 98% de permanência no tempo (Q_{98esp}). Os resultados mostraram um melhor desempenho para os modelos geoestatísticos com a estrutura de dependência espacial, para todas as variáveis. As previsões sazonais servem de base para uma gestão e utilização sustentável dos recursos hídricos.

Conforme Bazzo (2017) para as regiões homogêneas, o modelo de regressão que melhor representou a vazão Q_{95} estimada foi o potencial. Melati (2016, *apud* Bazzo, 2017) avaliou diferentes simulações de regressões para a obtenção de equações de regionalização

da Q_{95} para a bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas. Em um dos seus resultados foi identificada uma região hidrologicamente homogênea a partir de nove estações fluviométricas e a área de drenagem como variável independente.

Lisboa *et al.* (2008, *apud* Bazzo, 2017) no estudo de regionalização da Q_{95} pelo método Tradicional para a bacia hidrográfica do Rio Paracatu, encontraram variações de 0,98 a 0,99, para os coeficientes de determinação. Moreira e Silva (2014, *apud* Bazzo, 2017) obtiveram R^2 entre 0,82 a 0,99, indicando que os modelos obtidos no presente estudo são adequados para modelar as vazões mínimas nos referentes rios da bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas. Os valores encontrados da Raiz do Erro Médio Quadrático para os métodos Tradicional e Conservação de Massas foram iguais a $4,69 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $4,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente (BAZZO, 2017).

Pereira (2012) encontrou cinco regiões homogêneas para a Região Hidrográfica do Rio Uruguai, no qual o R^2 se comportou entre 0,94 e 0,97 nas equações de regionalização em modelo potencial que consideram somente a variável Área da bacia. O autor destaca que a área de drenagem foi a variável mais expressiva na representação das vazões associadas aos níveis de 90% de permanência na regionalização pelo método tradicional.

Assim sendo, em referência a vazão ecológica salienta-se da aplicabilidade da Q_{95} , uma vez que é uma vazão que teoricamente e diante de estudos técnicos garante a manutenção e sobrevivência de ecossistemas aquáticos. Além disso, o órgão ambiental estadual (FEPAM) utiliza a Q_{95} como vazão ecológica como critério na definição da tramitação do licenciamento ambiental por intermédio de EIA/RIMA, em conformidade com a Resolução CONSEMA n° 388/2018.

2.5 Métodos para regionalização de vazões

2.5.1 Método tradicional

Um dos métodos mais difundidos para a regionalização de vazões é o método tradicional. De acordo com a ELETROBRÁS (1985a) consiste nas seguintes etapas: identificação de regiões hidrologicamente homogêneas; e ajuste de equações de regressão entre as diferentes variáveis a serem regionalizadas e as características físicas e climáticas das bacias de drenagem para cada região homogênea (AMORIM, 2005).

Oliveira (2013) cita que, normalmente são adotados dois critérios para a identificação de regiões hidrologicamente homogêneas, sendo eles:

- a) critério baseado na análise de distribuição de frequências das vazões adimensionadas de cada estação;
- b) critério baseado na análise do ajuste do modelo de regressão múltipla.

O mesmo autor esclarece que após a obtenção de informações físicas e climáticas da região de estudo e da delimitação das regiões homogêneas, parte-se para obtenção das equações regionais, quando se escolhe o modelo (potencial, exponencial, logarítmico, linear) em que variáveis explicativas representem melhor o comportamento da variável dependente.

2.5.2 Método Chaves *et al.* (2002)

Oliveira (2013) destaca a metodologia proposta por Chaves *et al.* (2002) que utiliza técnicas de interpolação e extrapolação de vazões, os quais dependem da posição relativa do ponto de interesse em relação aos pontos pluviométricos mais próximos. E, por se tratar de um método interpolativo, dispensa a definição de regiões hidrologicamente homogêneas.

2.5.3 Método baseado na interpolação linear

O método baseado na interpolação linear é descrito pela ELETROBRÁS (1985b), a qual obtém as vazões relativas à seção de interesse utilizando as vazões correspondentes às seções fluviométricas mais próximas. Assim, quando a seção de interesse se encontra entre duas estações fluviométricas a vazão na seção de interesse é igual à vazão na seção de montante mais um incremento da vazão proporcional ao aumento da área de drenagem entre a estação de montante e a de jusante (AMORIM, 2005).

2.5.4 Método da interpolação linear modificado

Segundo Amorim (2005) o método baseado na interpolação linear considera que a vazão na seção de interesse é uma proporcionalidade entre as áreas de drenagem da seção de interesse e as estações fluviométricas mais próximas. Considerando que pelo processo físico de formação das vazões estas são mais dependentes dos volumes precipitados do que das

áreas de drenagem, propôs a modificação desta metodologia. Tal modificação consiste em inserir a variável *precipitação média* no método proposto, considerando assim, que a vazão na seção de interesse é também proporcional à relação entre os volumes precipitados.

2.5.5 Método Chaves *et al.* (2002) modificado

Tal método é baseado no mesmo princípio utilizado pela proposição do método da interpolação linear modificado, ou seja, considerando que no processo físico de formação das vazões estas são mais dependentes dos volumes precipitados do que das áreas de drenagem. Assim, o método Chaves modificado consiste em inserir a variável precipitação média no método proposto por Chaves *et al.* (2002), sendo a vazão obtida na seção de interesse proporcional ao volume precipitado nas áreas analisadas (AMORIM, 2005).

2.5.6 Método *Index Flood*

O método *Index Flood*, ou método da vazão específica, parte do princípio de que a vazão na seção de interesse é obtida por uma relação de proporcionalidade entre as vazões e as áreas de drenagem dos pontos fluviométricos mais próximos, conforme exposto por Oliveira (2013).

Tucci (2002) classifica os métodos de regionalização em três classes:

- métodos que regionalizam parâmetros de uma distribuição estatística;
- métodos que regionalizam um evento de vazão com um determinado risco; e,
- os métodos de regionalização da curva adimensional de frequências, denominados métodos de regionalização *Index Flood*.

2.6 Aplicações do Sensoriamento Remoto

O uso de técnicas de sensoriamento remoto é essencial para a obtenção de dados e aperfeiçoar a análise de informações sobre o comportamento hídrico. Nesse aspecto, Viana (2012) cita que devido à escassez de informações meteorológicas de algumas regiões e a dificuldade de se obter, de forma representativa, em escala regional, alguns parâmetros de

superfície, as técnicas de sensoriamento remoto têm sido fundamentais na obtenção de informações de forma rápida e efetiva com características intrinsecamente regionais no espaço e no tempo.

O sensoriamento remoto pode ser entendido como um conjunto de atividades que permite a obtenção de informações dos objetos que compõem a superfície terrestre sem a necessidade da proximidade física entre essa superfície e o sensor. Essas atividades envolvem a detecção, aquisição e análise da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores remotos. Nesse contexto, cada objeto reflete a radiação incidente de uma forma diferente, tendo assim um comportamento peculiar, que se deve às suas características físicas, químicas ou biológicas. Esse comportamento é chamado de assinatura espectral, ou seja, variação da quantidade de energia refletida pelo alvo para cada comprimento de onda do espectro eletromagnético (VIANA, 2012).

Ruhoff (2011) destaca que a disponibilidade de dados de sensoriamento remoto em diferentes resoluções temporais, espaciais e espectrais permite propor o desenvolvimento de novas metodologias para monitorar e compreender as características dos complexos sistemas ambientais. Além disso, a obtenção de dados de precipitação atmosférica por meio de uso de imagens de satélite se torna uma ferramenta interessante para estudos de regionalização de vazão.

De acordo com Warren (2014) as estimativas instantâneas de evapotranspiração têm sido obtidas por técnicas de sensoriamento remoto com erros na faixa de 15%, diminuindo este erro à medida que os dados são integrados na escala mensal.

Brubacher (2012) diante da avaliação de bases do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) para extração de variáveis morfométricas e de drenagem destaca que as maiores discrepâncias na extensão dos rios ocorreram nas sub-bacias mais planas com rios sinuosos, onde foram subtraídos alguns meandros existentes na hidrografia das cartas (1:50.000) da Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) do Exército Brasileiro. Além disso, há uma tendência de aumento no deslocamento das drenagens extraídas à medida que diminui a declividade e aumenta a sinuosidade dos rios. Conforme o autor a drenagem extraída do SRTM apresentou a maior precisão.

Sobrinho (2010) conclui que a delimitação automática da rede de drenagem obtida a partir de dados do SRTM apresenta precisão compatível àquela baseada em cartas topográficas. Além do mais, fatores como gratuidade, precisão e acurácia destes dados proporcionam economia de tempo e de recursos para a realização de pesquisas e diagnósticos

ambientais, especialmente em regiões que não possuem registros cartográficos altimétricos. A delimitação automática de bacias apresenta-se vantajosa em relação ao custo e benefício proporcionado, além de estabelecer a padronização do traçado e posterior minimização de conflitos quanto à fixação da unidade elementar de gestão dos recursos hídricos.

Para Baena (2004) o Modelo Digital de Elevação (MDE) se mostrou hidrologicamente consistente, possibilitando a determinação automática das características físicas da bacia. A área de drenagem e o comprimento do curso d'água principal caracterizaram-se como as variáveis mais expressivas para a representação das diversas variáveis e funções regionalizadas, à exceção da regionalização da curva de permanência, na qual a densidade de drenagem substituiu o comprimento do rio principal.

Tomazoni (2011) avaliou o potencial de uso dos MDEs dos produtos SRTM e ASTER *Global Digital Elevation Map* (GDEM), para caracterização da rede de drenagem, e constatou uma aproximação insatisfatória, em relação aos rios traçados a partir da carta topográfica/Imagem *Satellite Pour l'Observation de la Terre 5* do satélite de domínio Francês SPOT5.

Brubacher (2012) realizou comparações entre as bases SRTM da NASA, EMBRAPA e TOPODATA, em relação à altimetria, delimitação de bacias e extensão dos rios, e avaliou os deslocamentos entre as drenagens extraídas dos dados SRTM e da base cartográfica da DSG. Conforme o autor, as maiores diferenças altimétricas absolutas entre os três modelos de elevação SRTM ocorreram em áreas escarpadas da bacia do rio dos Sinos. No entanto, ao analisar a proporção das diferenças altimétricas, considerou que essas são mais relevantes nas áreas baixas das planícies fluviais, locais com a ocorrência de áreas de inundação.

A EMBRAPA (2019) cita que as imagens do relevo terrestre podem ser empregadas para: Cartografia de precisão; Elaboração de Modelos Digitais de Superfície; Planejamento urbano e regional; Monitoramento de desastres naturais; Levantamento de recursos naturais; Mapeamento de uso e cobertura das terras; Estimativa de biomassa; e Extração de dados topográficos por interferometria.

Em face da necessidade de obtenção de dados de precipitação oriunda de sensor orbital (satélite), destaca-se o trabalho de Pereira (2013), o qual utilizou dados do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) com o objetivo de coletar dados mais refinados sobre a estrutura da precipitação, denominado. De uma maneira geral pôde-se verificar que os dados de precipitação mensal estimados pelo TRMM e por 183 estações espalhadas por todo o Brasil apresentam uma concordância de aproximadamente 97%. Entretanto, encontraram-se valores 9%, 8%, 6%, 13% e 9% maiores que os observados pelas

redes de estações meteorológicas do INMET/CPTEC para a região Centro-Oeste, Sul, Norte, Sudeste e Nordeste, respectivamente. Nesse sentido, percebe-se uma boa concordância entre os padrões espaciais da precipitação anual.

O TRMM carrega sensores que monitoram as nuvens e a precipitação, e a evolução temporal das nuvens e dos sistemas de precipitação. Os sensores do TRMM são: radiômetro passivo de microondas (TMI), o Radar de Precipitação (PR), o Sondador de Visível/Infravermelho (VIRS), o sensor *Clouds and Earth's Radiant Energy System* (CERES) que opera nos canais visível e infravermelho, e o sensor *Lightning Imaging System* (LIS), que permite investigar a distribuição e variabilidade de descargas elétricas dentro das nuvens, como também das nuvens para o solo e vice-versa (KUMMEROW e BARNERS, 1998 *apud* GOBO, 2010).

Gobo (2010) expressa que os instrumentos a bordo do satélite TRMM são utilizados nos produtos de estimativa de chuva por satélite, com destaque ao Radar de Precipitação (PR) em que as principais informações obtidas por este sensor são a intensidade e distribuição da chuva, o tipo de chuva (convectiva ou estratiforme) e a altura pluviométrica. Sua resolução horizontal na superfície é da ordem de 4 km, com largura de varredura de 220 km. Uma das características mais importantes do PR é a sua eficiência na determinação de perfis verticais da chuva e neve acima da superfície, em uma altura média de 20 km.

Aires (2016) avaliou a acurácia dos dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM através da comparação com dados de superfície medidos por estações meteorológicas convencionais e qual método de interpolação melhor ajustou-se aos dados estimados para a bacia de estudo. Concluiu que os dados de precipitação acumulada mensal estimados pelo TRMM apresentaram boa correlação com dados observados nas estações meteorológicas de superfície. Inferiu que o índice de *Wilmott* – concordância - apresentou valores próximos a 1, o que indica que existe uma boa concordância entre os dados estimados e os observados. Igualmente, salientou que o coeficiente de eficiência de *Nash – Sutcliffe* (NSE) demonstrou que os dados foram bem ajustados, com valores variando entre 0,87 a 0,91, ou seja, próximo a 1. Sugeriu que é possível a utilização das estimativas de precipitação derivadas do sensor TRMM em bacias que não possuem redes de monitoramento de precipitação.

Costa (2017) utilizou dados do TRMM para avaliar os índices pluviométricos na bacia dos Sinos, inferido que a falta de chuva por longos períodos influencia diretamente no comportamento da vegetação. Ao mesmo tempo elaborou um mapa altimétrico da bacia a partir da base digital SRTM.

Moreira *et al* (2017), avaliou os dados meteorológicos estimados em condições de clima subtropical e a relação com índices de vegetação e concluiu que os valores encontrados são aceitáveis e consistentes e que a série de dados analisada para o Rio Grande do Sul indica a possibilidade do uso dos dados estimados pelo satélite TRMM e dados de reanálise do ERA Interim como alternativa para minimizar a ausência de informações sobre precipitação pluvial e temperatura do ar obtidas em rede de estações de superfície.

3. METODOLOGIA

Em face do desenvolvimento do presente trabalho, definiu-se a vazão de referência a partir de séries históricas de registros fluviométricos e de dados do relevo, uso e cobertura do solo oriundos de sensor remoto através de técnicas de geoprocessamento. Além disso, determinou-se quais atributos físicos e ambientais exercem papel relevante para estimar a Q_{95} na RHG. Ao mesmo tempo aplicou-se os dados de precipitação pluviométrica estimada por satélite no processo de regionalização. Por fim, houve a definição de equações de regionalização, bem como buscou-se espacializar as vazões de referência na Região Hidrográfica do Guaíba (RHG).

A metodologia aplicada foi dividida em etapas apresentadas no fluxograma conforme Figura 4. As informações sobre os materiais e os métodos utilizados estão descritas nos itens 3.2 e 3.3, respectivamente.

A primeira etapa contemplou a aquisição e organização de dados hidrológicos (séries históricas de vazão de estações fluviométricas) e de dados oriundos do Sensoriamento Remoto (MDE, precipitação, uso e cobertura da terra). A segunda etapa abarcou a organização das informações para possibilitar a determinação da vazão de referência para as unidades amostrais e o processamento das informações oriundas de SR em ambiente do SIG.

A terceira etapa contemplou a definição da vazão de referência e da vazão específica, a extração dos atributos físicos e ambientais, bem como a aplicação da precipitação por satélite no processo de regionalização.

A quarta etapa envolveu o exame das vazões de referência. A relação entre os atributos físicos e ambientais e da precipitação como variáveis independentes no processo de regionalização.

A quinta etapa compõe a análise estatística e modelagem da Q_{95} para a área de estudo. Por fim, a última etapa abrangeu a determinação de equações de regressão e a elaboração e dois mapas com a espacialização da Q_{95} na Região Hidrográfica do Guaíba.

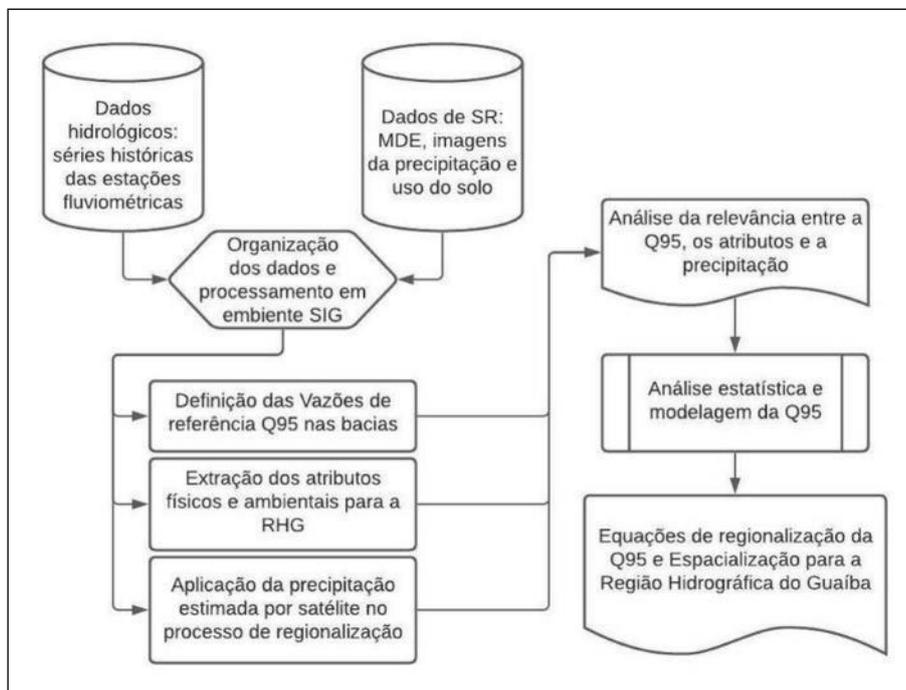


Figura 4. Representação gráfica do fluxograma para o trabalho.

3.1 Descrição da área de estudo

O Estado do Rio Grande do Sul é dividido em três regiões hidrográficas: Região Hidrográfica do Guaíba; a Região Hidrográfica das Bacias Litorâneas; e Região Hidrográfica do Uruguai, Figura 5.

A região do rio Uruguai coincide com a bacia nacional do Uruguai, a região do Guaíba e a região do Litoral coincidem com a bacia nacional do Atlântico Sudeste. Além disso, o Decreto nº 53.885, de 18 de janeiro de 2017, instituiu subdivisão das Regiões Hidrográficas do Estado do Rio Grande do Sul em 25 Bacias Hidrográficas (SEMA, 2019).



Figura 5. Regiões e Bacias Hidrográficas do RS.
 Fonte: SEMA, 2019.

A área de estudo compreende a Região Hidrográfica do Guaíba (RHG) e se situa na região centro-nordeste do Rio Grande do Sul, abrangendo uma área de aproximadamente 84.763,54 km² correspondente a 30% da área total do Estado, onde estão localizados 251 municípios (FEPAM, 2019).

Conforme Fepam (2019) a Região Hidrográfica do Guaíba é formada por 9 (nove) bacias: Gravataí (G10); Sinos (G20); Caí (G30); Taquari-Antas (G40); Alto Jacuí (G50); Vacacaí e Vacacaí-Mirim (G60); Baixo Jacuí (G70); Lago Guaíba (G80); e Pardo (G90); Figura 6.

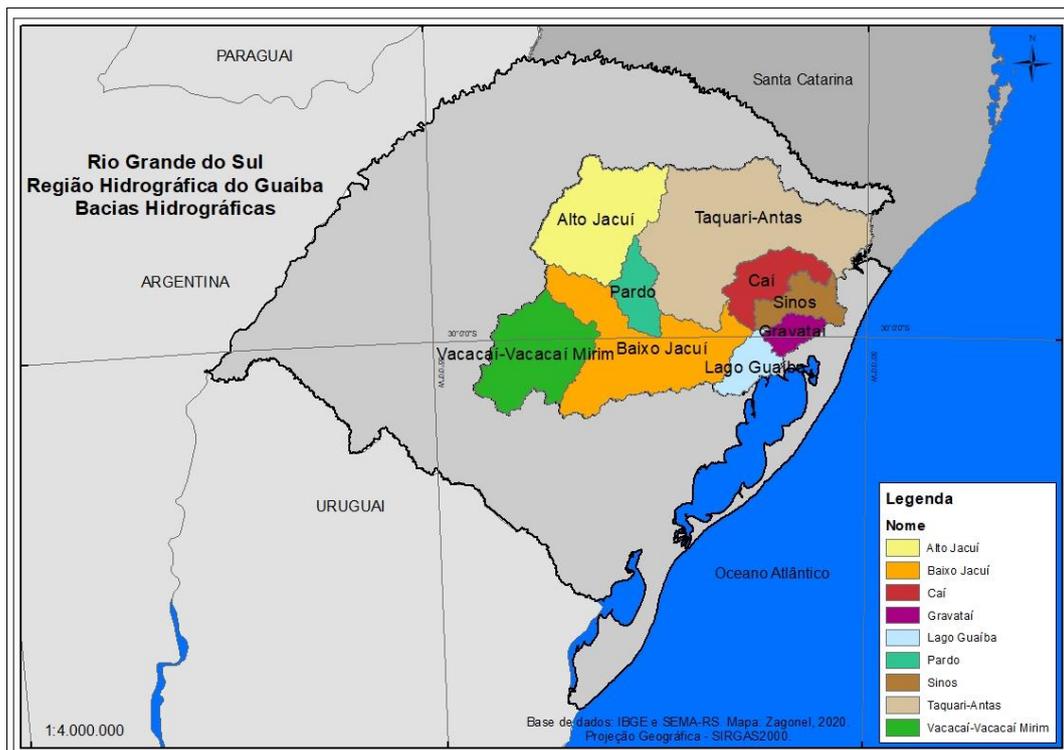


Figura 6. Identificação e distribuição espacial das Bacias dentro da Região Hidrográfica do Guaíba.

A FEPAM (2019), destaca as principais características ambientais das nove bacias que constituem a Região Hidrográfica do Guaíba:

- i. **Alto Jacuí:** O Jacuí contribui com 85 % das águas formadoras do Lago Guaíba e é represado pelas barragens de Passo Real, Ernestina e Itaúba. No verão ocorrem problemas de navegação e abastecimento, pois alguns trechos têm vazão regulada pelas turbinas das hidrelétricas;
- ii. **Pardo:** As lavouras de arroz irrigado constituem a principal demanda de água nesta bacia, atingindo 90 % do total dos recursos hídricos entre dezembro e fevereiro, período de baixa vazão do rio;
- iii. **Vacacaí:** O rio nasce em São Gabriel, passa por Santa Maria e deságua no Rio Jacuí. O solo é ocupado por latifúndios, caracterizando-se pela pecuária extensiva e agricultura;
- iv. **Baixo Jacuí:** A extração do carvão na Bacia é intensa, causando significativo impacto ambiental, principalmente em Charqueadas e São Jerônimo. Outra característica é o uso intensivo do solo para pecuária e agricultura;

- v. **Taquari-Antas:** O Rio das Antas nasce no Planalto, passando a chamar-se Taquari na confluência com o rio Guaporé, na altura do município de Muçum. Observa-se dificuldade na acumulação natural da água na bacia;
- vi. **Caí:** O grande volume de esgotos domésticos da região de Caxias do Sul é o responsável pelo maior impacto ambiental na Bacia. O depósito de água da chuva fica prejudicado pelo relevo acidentado da região, impedindo a diluição dos resíduos e diminuindo a disponibilidade de água para as atividades agrícolas;
- vii. **Sinos:** O Rio dos Sinos é considerado o mais poluído da região, possuindo importante parque industrial, onde se destacam os ramos coureiro-calçadista, petroquímico e metalúrgico;
- viii. **Gravataí:** O Rio Gravataí, incapaz de realizar a regulação natural de sua vazão, é considerado o mais sensível da região. O Banhado Grande, que funciona como uma esponja regulando as vazões a montante foi bastante impactado pelas lavouras de arroz irrigado, reduzindo a capacidade de acumulação de água;
- ix. **Lago Guaíba:** As águas dos Rios Gravataí, Sinos, Caí e Jacuí desembocam no Delta do Jacuí, formando o Lago Guaíba que banha os municípios de Porto Alegre, Eldorado do Sul, Guaíba, Barra do Ribeiro e Viamão.

Do ponto de vista da caracterização da cobertura vegetal, a Região Hidrográfica do Guaíba localiza-se em sua maior parte no Bioma Mata Atlântica, com ocorrência de Floresta Ombrófila Mista (altomontana), Floresta Estacional Decidual e Semidecidual (submontana), Campos gramíneos-lenhosa com floresta de galeria. Entretanto, a porção Sul da Região localiza-se o Bioma Pampa com ecótonos de transição de vegetação (Contato Savana - Estepe arborizada com floresta de galeria), conforme Figura 7.

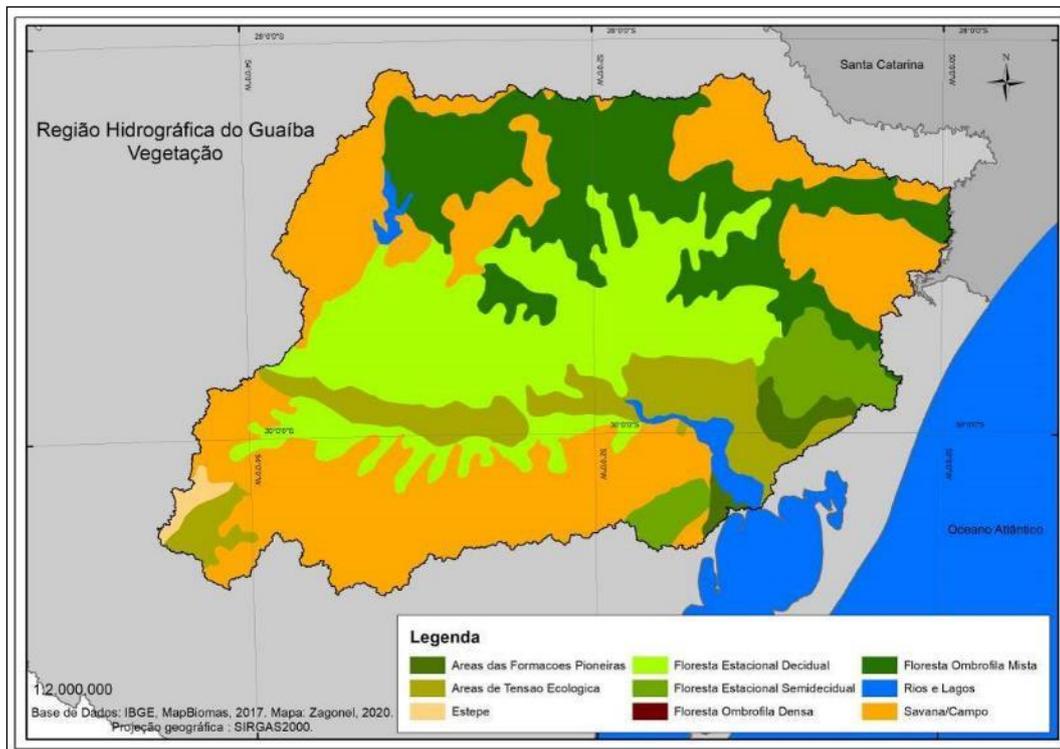


Figura 7. Representação da distribuição da vegetação na RHG.
Fonte: IBGE.

A representação da variação altimétrica mostra que a porção Norte-Nordeste denota a maior altitude, e a porção Sul as zonas de menor altitude, Figura 8.

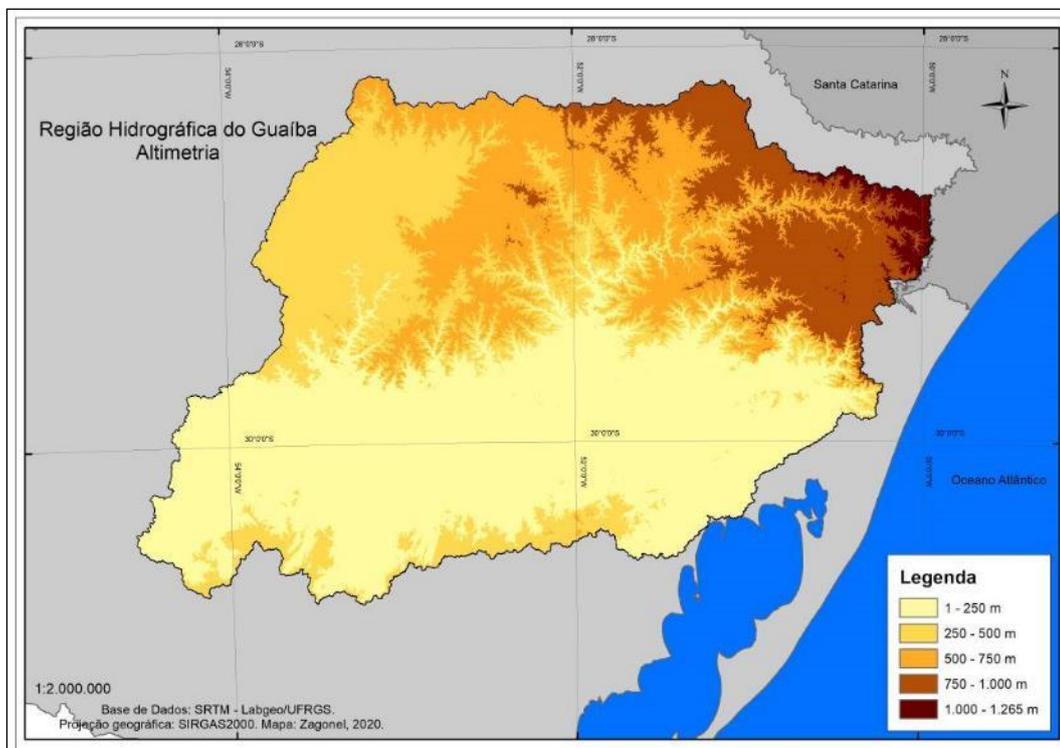


Figura 8. Representação da altimetria (classe de altitude em metros) na RHG.
Fonte: SRTM - LabGeo/UFRGS.

A declividade evidencia o comportamento do relevo Forte ondulado e Montanhoso na face Norte-Nordeste e do Plano Ondulado na porção Sul da RHG, Figura 9.

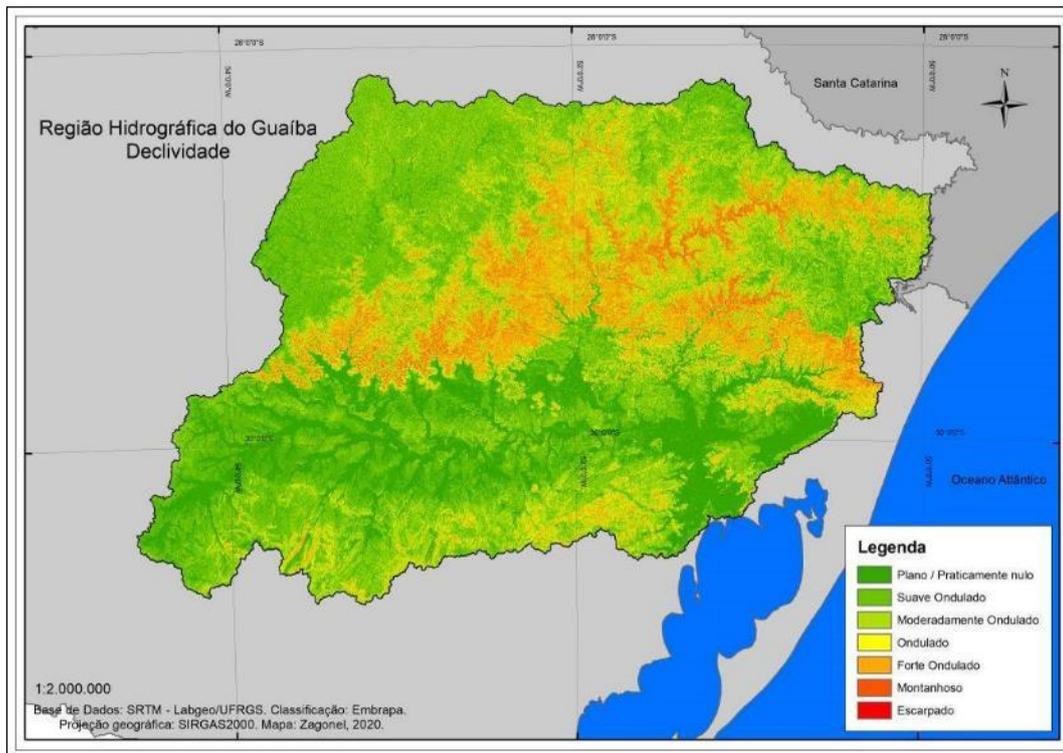


Figura 9. Representação do comportamento da declividade na RHG.
Fonte: SRTM.

Considerando os dados do uso e cobertura da terra do *Projeto MapBiomias* (MAPBIOMAS, 2019), na RHG predominam a ocorrência de formações florestais na porção central, Oeste e Leste, no rebordo da Serra Geral com as características da Mata Atlântica. Na porção Noroeste e Sul há o predomínio das áreas com o uso para a agricultura, e a infraestrutura urbana se manifesta de forma expressiva na região metropolitana de Porto Alegre. Para a distribuição dos corpos d'água destacam-se os grandes reservatórios das usinas hidrelétricas (UHE), a drenagem do Rio Jacuí e o Lago Guaíba, Figura 10.

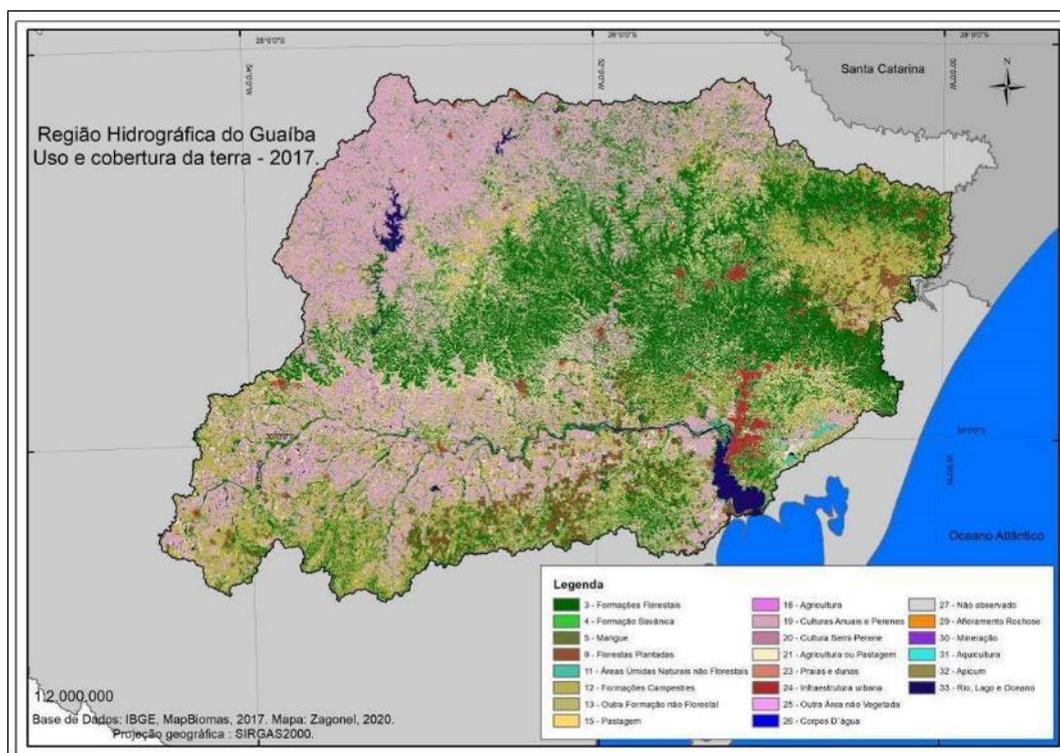


Figura 10. Representação de imagem do Uso da terra na RHG.
Fonte: MapBiomias, 2020.

O clima do Rio Grande do Sul é Temperado do tipo Subtropical, classificado como Mesotérmico Úmido (classificação de Köppen). Devido à sua posição geográfica, entre os paralelos 27°03"42"" e 33°45"09"" de latitude Sul, e 49°42"41"" e 57°40"57"" de longitude Oeste, apresenta grandes diferenças em relação ao Brasil. A latitude reforça as influências das massas de ar oriundas da região polar e da área tropical continental e Atlântica (RS, 2020).

O volume de chuvas, no entanto, é diferenciado. Ao Sul a precipitação média situa-se entre 1.299 e 1.500 mm e, ao norte a média está entre 1.500 e 1.800 mm, com intensidade maior de chuvas à nordeste do Estado, especialmente na encosta do Planalto, local com maior precipitação no Estado (RS, 2020). Na figura 11 tem-se a representação do comportamento espacial da precipitação média anual conforme o estudo elaborado para o Atlas Eólico do RS em 2002.

Salienta-se que para a Região Hidrográfica do Guaíba os dados de precipitação média anual proveniente do satélite TRMM apresentaram os valores mínimos de 1578 mm e máximo de 2197 mm, considerando a série histórica de 2000 a 2018, Figura 18. Nesse sentido, pode-se inferir que os valores se encontram próximos da normalidade esperada.

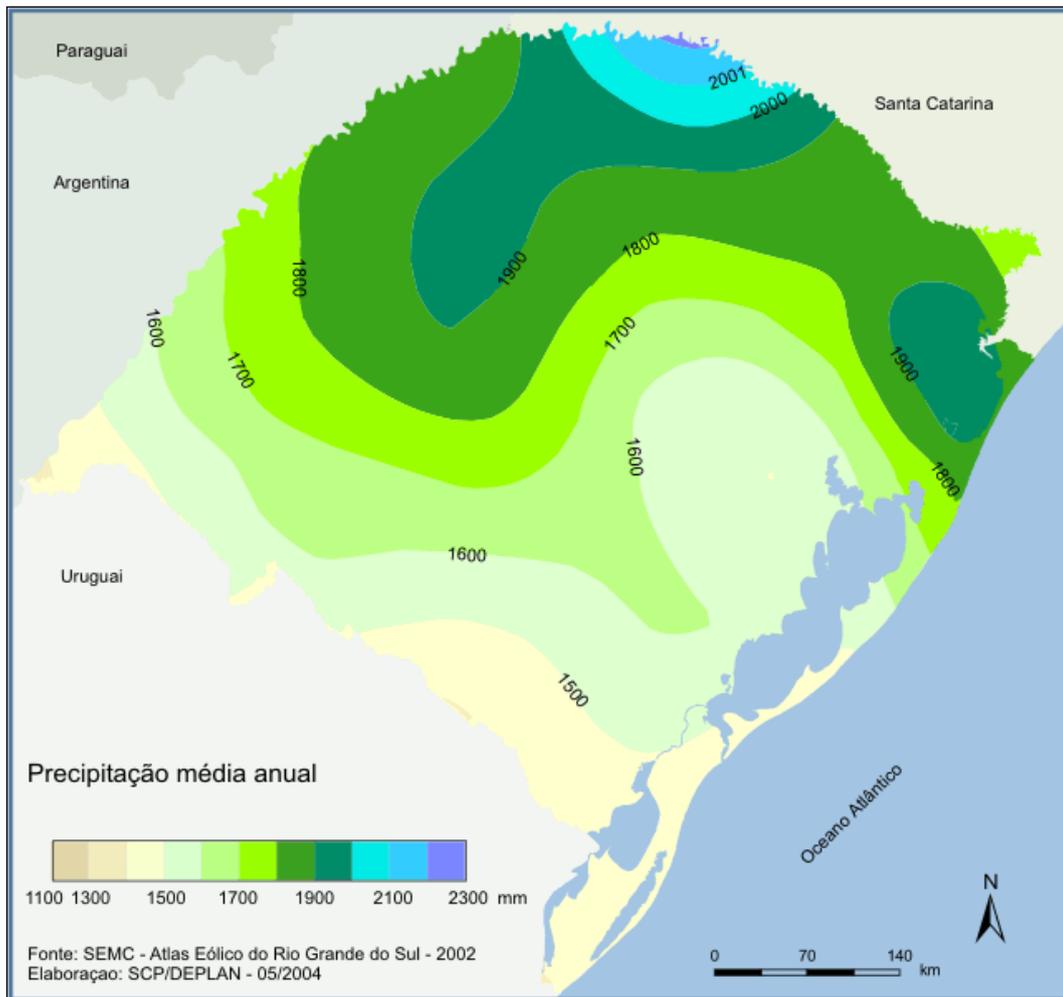


Figura 11. Representação da precipitação média anual.
Fonte: SCP/DEPLAN, RS (2020).

3.2 Materiais

O Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado foi oriundo do SRTM que representa os dados altimétricos da superfície terrestre obtidos no período de 11 a 22 de fevereiro de 2000 pela NASA. A elaboração do MDE a partir de imagem SRTM, Figura 12, disponibilizado gratuitamente pelo Laboratório de Geoprocessamento - LABGEO/UFRGS (WEBER *et al*, 2004) é proporcionada pela execução de rotinas em ambiente georreferenciado (SIG). Como atributos físicos utilizou-se: área da bacia da estação fluviométrica (A); altitude média (H); desnível altimétrico (Hr); declividade média (S); comprimento do rio principal (L); comprimento total dos rios principais (LE); e densidade da drenagem (D).

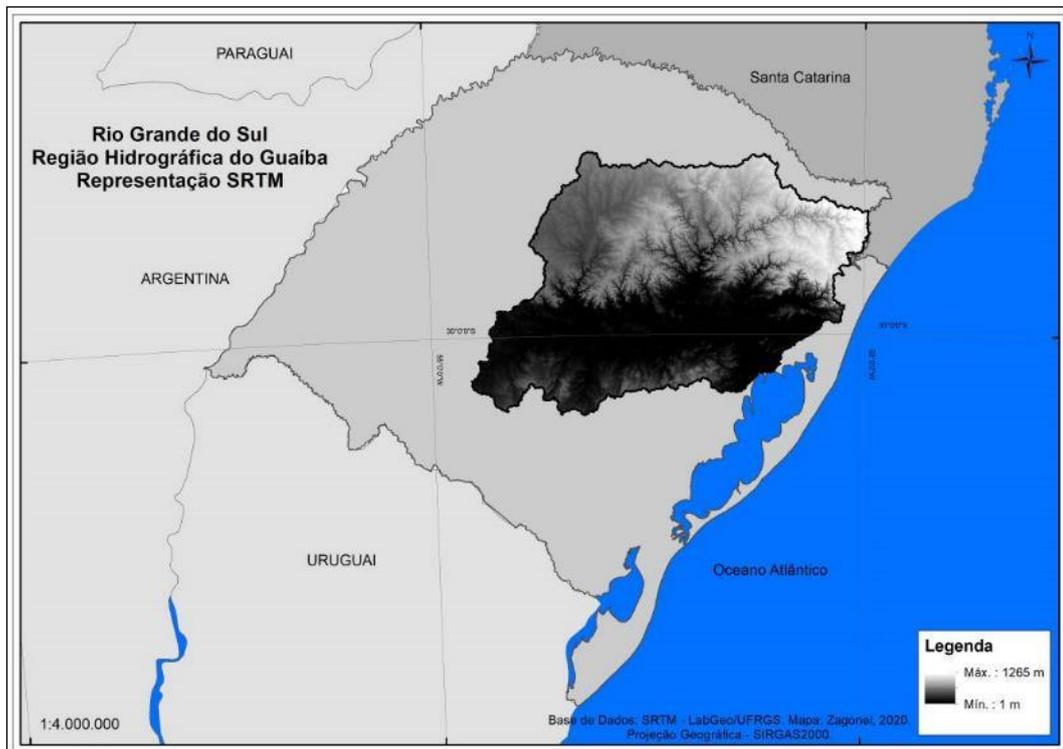


Figura 12. Representação da imagem SRTM aplicada à RHG no RS.

Como atributos ambientais utilizou-se dados provenientes do *MapBiomias*, um projeto de mapeamento anual da cobertura e uso do solo do Brasil (MAPBIOMAS, 2019). Fez-se uso dos atributos agrupados em 5 (cinco) temas de uso: cobertura florestal, agricultura/campo, urbano, áreas úmidas, rios e lagos.

O Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil (MapBiomias) é uma iniciativa que envolve uma rede colaborativa com especialistas nos biomas, usos da terra, sensoriamento remoto, SIG 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, 2020).

Os dados fluviométricos são oriundos das estações de monitoramento da Agência Nacional de Águas (ANA, 2019), disponibilizados por intermédio do sítio do Sistema de Informações Hidrológicas - SNIRH (Portal *HidroWeb*).

Para a Precipitação utilizou-se o *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) para obtenção de dados de precipitação por satélite, com o conjunto de dados mensais de estimativa de chuva por satélite no período entre 2000 a 2018, Figura 13.

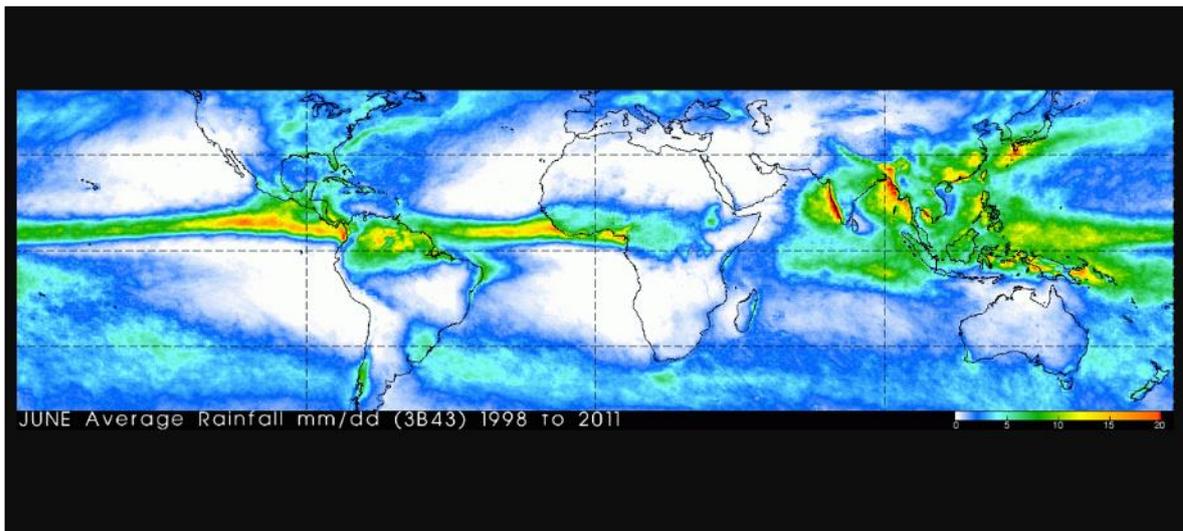


Figura 13. Representação de imagem TRMM, precipitação de Junho (1998-2011).
Fonte: NASA, 2020.

A análise contemplou a relação entre as vazões de referência observadas e da vazão específica, dos atributos físicos e ambientais da área de estudo, e da aplicação de dados de precipitação por satélite no processo de regionalização. Bem como a modelagem estatística, equacionamento e espacialização das vazões de referência para a RHG.

Em referência aos aplicativos computacionais utilizados, destacam-se: Hidro 1.4 (Agência Nacional de Águas - ANA); ArcGIS (ESRI); MapBiomas v.4.0; e, o Pacote do *Office da Microsoft (Excel, Word e PowerPoint)*.

3.3 Métodos

Para atingir os objetivos propostos, a seguir estão descritas com maior detalhamento todos os passos demonstrados nas etapas do fluxograma, sendo elas: (a) Definição das vazões de referência a partir de séries históricas; (b) Atributos físicos e ambientais por sensoriamento remoto e geoprocessamento; (c) Aplicação da precipitação pluviométrica estimada por satélite; (d) Vazão específica; (e) Correlação entre as variáveis estudadas; (f) Métricas estatísticas; (g) Equações de regionalização; e (h) Mapas de regionalização.

a) Definição das vazões de referência a partir de séries históricas

Nesta etapa, providenciou-se a análise da distribuição espacial das Estações fluviométricas da ANA na região de estudo, com intuito de obter dados de estações distribuídas em todas as bacias que compõe a RHG.

Após a verificação de disponibilidade de dados das séries históricas de 1931 a 2018, fez-se de uso de informações de 21 (vinte e uma) estações na área de interesse, Figura 14.

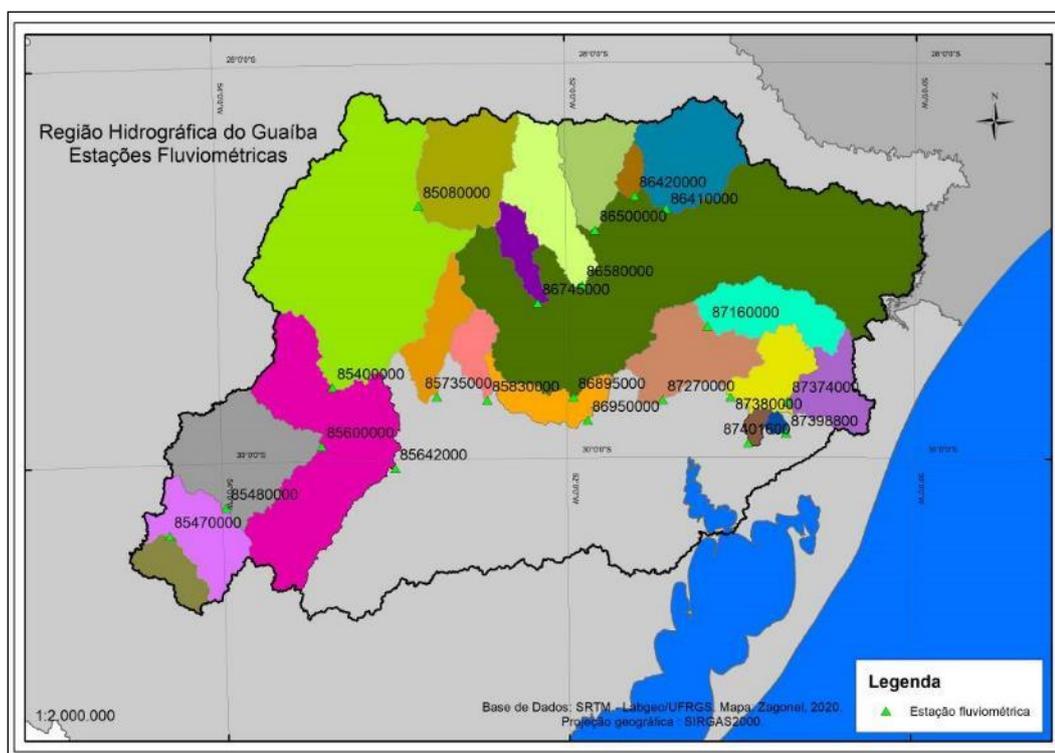


Figura 14. Estações fluviométricas na RHG, RS – total 21 pontos.

Os arquivos de dados foram obtidos no portal da Agência Nacional de Águas (ANA), posteriormente organizados na Tabela 2 constam o código e o nome da estação, a área de drenagem, os pontos de localização geográfica, o nome do curso d’água e o município.

Tabela 2. Estações fluviométricas da Região Hidrográfica do Guaíba, RS.

Código da Estação	Nome da Estação	Área de drenagem (km²)	Latitude	Longitude	Curso de água	Município
87401600	CERÂMICA CHERUBINI	199	-29,923611	-50,954722	Arroio Demétrio	Gravataí
87398800	PASSO GRANDE	120	-29,872800	-50,736900	Arroio Passo Grande	Glorinha
87380000	CAMPO BOM	2900	-29,691700	-51,046100	Rio dos Sinos	Campo Bom
87374000	TAQUARA MONTANTE	1460	-29,720000	-50,734200	Rio dos Sinos	Taquara
87270000	PASSO MONTENEGRO	4360	-29,701100	-51,441100	Rio Caí	Montenegro
87160000	NOVA PALMIRA	2030	-29,335600	-51,188900	Rio Caí	Caxias do Sul
86950000	TAQUARI	25900	-29,806944	-51,875833	Rio Taquari	Taquari
86895000	PORTO MARIANTE	24600	-29,692222	-51,970000	Rio Taquari	Venâncio Aires
86580000	SANTA LÚCIA	2470	-29,119722	-51,911944	Rio Guaporé	Doutor Ricardo
86745000	PASSO DO COIMBRA	791	-29,216111	-52,162222	Rio Forqueta	Pouso Novo

86500000	PASSO CARREIRO	1820	-28,848889	-51,832500	Rio Carreiro	Guaporé
86410000	PASSO BARRA DO GUAIAVEIRA	2820	-28,739167	-51,425000	Rio Turvo	Protásio Alves
86420000	PONTE DO PRATA	317	-28,677500	-51,608056	Rio Prata	Nova Prata
85080000	ESPUMOSO	2990	-28,720833	-52,840000	Rio Jacuí	Espumoso
85600000	PASSO DAS TUNAS	6780	-29,925833	-53,416667	Rio Vacacaí	Formigueiro
85480000	PASSO DO ROCHA	2790	-30,231389	-53,985278	Rio Vacacaí	São Gabriel
85470000	PONTE SÃO GABRIEL	965	-30,359722	-54,313333	Rio Vacacaí	São Gabriel
85642000	PASSO SÃO LOURENÇO	27300	-30,007800	-53,015600	Rio Jacuí	Cachoeira do Sul
85400000	DONA FRANCISCA	14000	-29,626900	-53,352800	Rio Jacuí	Dona Francisca
85735000	CANDELÁRIA MONTANTE	1340	-29,657778	-52,786667	Rio Pardo	Candelária
85830000	SANTA CRUZ - MONTANTE	805	-29,706111	-52,468056	Rio Pardinho	Santa Cruz do Sul

Fonte: ANA (2019).

Na Tabela 3 constam o Código da Estação, o Nome do Curso d'água, o Município, o Responsável pela coleta dos dados, o Nome da Bacia, o Código da Bacia e o Registro da série histórica (ANA, 2019).

Os arquivos contendo os dados históricos em formato HIDRO.MDB foram submetidos ao aplicativo computacional Hidro 1.4 disponibilizado pela ANA. A partir da inserção no banco de dados, fez-se uso da rotina Função + Curva de Permanência + Vazões médias, o qual habilita a tela Curva de Permanência de Vazões Médias. No Hidro 1.4, é possível auferir o Tipo de cálculo diário ou mensal. Na ocasião, anotou-se os respectivos valores da Q₉₅, diária e mensal, para todas as 21 Estações objeto de análise, as quais abarcam a série histórica de dados entre 1931 e 2018. Igualmente, essa rotina possibilita a representação da Curva de Permanência e do Resumo em tabela de valores.

Tabela 3. Estações fluviométricas da RHG, RS (série de dados: 1931-2018).

<i>Código da Estação</i>	<i>Curso de água</i>	<i>Município</i>	<i>Responsável</i>	<i>Nome_BH</i>	<i>Código_BH</i>	<i>Registro da Série histórica</i>
87401600	Arroio Demetrio	Gravataí	ANA	Gravataí	G10	1991-2014
87398800	Arroio Passo Grande	Glorinha	ANA	Gravataí	G10	1991-2018
87380000	Rio dos Sinos	Campo Bom	ANA	Sinos	G20	1940-2018
87374000	Rio dos Sinos	Taquara	ANA	Sinos	G20	1996-2018
87270000	Rio Caí	Montenegro	ANA	Caí	G30	1940-2014
87160000	Rio Caí	Caxias do Sul	ANA	Caí	G30	1943-2018
86950000	Rio Taquari	Taquari	ANA	Taquari-Antas	G40	1931-2014
86895000	Rio Taquari	Venâncio Aires	ANA	Taquari-Antas	G40	1959-2014
86580000	Rio Guaporé	Doutor Ricardo	ANA	Taquari-Antas	G40	1940-2018
86745000	Rio Forqueta	Pouso Novo	ANA	Taquari-Antas	G40	1957-2018
86500000	Rio Carreiro	Guaporé	ANA	Taquari-Antas	G40	1939-2018
86410000	Rio Turvo	Protásio Alves	ANA	Taquari-Antas	G40	1956-2018
86420000	Rio Prata	Nova Prata	ANA	Taquari-Antas	G40	1959-2018
85080000	Rio Jacuí	Espumoso	DEPRC	Alto-Jacuí	G50	1941-1970
85600000	Rio Vacacaí	Formigueiro	ANA	Vacacaí-Mirim	G60	1940-2018
85480000	Rio Vacacaí	São Gabriel	ANA	Vacacaí-Mirim	G60	1969-2018
85470000	Rio Vacacaí	São Gabriel	ANA	Vacacaí-Mirim	G60	1967-2018
85642000	Rio Jacuí	Cachoeira do Sul	ANA	Baixo-Jacuí	G70	1981-2018
85400000	Rio Jacuí	Dona Francisca	ANA	Baixo-Jacuí	G70	1940-2018
85735000	Rio Pardo	Candelária	ANA	Pardo	G90	2002-2018
85830000	Rio Pardinho	Santa Cruz do Sul	ANA	Pardo	G90	1979-2018

Fonte: ANA.

b) Atributos físicos e ambientais por sensoriamento remoto e geoprocessamento

Diante dos protocolos executados em ambiente de SIG, a partir da SRTM formato GEOTIFF foi possível extrair a imagem aplicada somente à área de interesse, na qual se tornou a base para as análises posteriores. A extração do limite da RHG foi executada em ambiente SIG. Optou-se em desenvolver as atividades a partir da imagem SRTM que abarcasse somente a região de estudo, com o intuito de otimizar o processamento e análise espacial. Salienta-se que cada bacia é objeto de um arquivo *raster*, o qual permite o gerenciamento individual, bem como a fusão das bacias sem o detrimento das características individuais da área.

Aplicou-se algumas rotinas e ferramentas, as quais desempenham funções específicas no processamento, sendo elas:

Fill - preenche pequenas imperfeições de dados no arquivo *raster*, ou seja, preenche os afundamentos em uma imagem de superfície para remover as pequenas imperfeições nos dados, nesse sentido, no Raster de Superfície de Entrada ingressou-se com o arquivo da imagem SRTM.

FlowDirection - cria um arquivo de imagem da direção de fluxo de cada célula, cujos valores variam de 1 a 255, e cada pixel é potencialmente cercado por oito pixels vizinhos, bem como, a inclinação de cada uma destas oito direções pode ser calculada tomando-se a diferença em elevação indicada pelo valor de DEM para cada uma destas oito localidades vizinhas e do valor no pixel a ser examinado, com isso no Raster de Superfície de Entrada utilizou-se o produto gerado na rotina anterior.

FlowAccumulation - acumulação de fluxo a partir da imagem de direção de fluxo que caracterizam as áreas de drenagem acumuladas, ou seja, cria um arquivo *raster* do fluxo acumulado em cada célula, opcionalmente um fator de peso pode ser atribuído, com isso no Raster de Direção de Fluxo de Entrada utilizou-se o produto gerado na rotina anterior.

Conditional - aplica uma condição para a representação da drenagem, isto é, a ferramenta *Con* permite controlar o valor de saída para cada célula com base em se o valor da célula é avaliado como verdadeiro ou falso em uma instrução condicional especificada, com isso no Raster Condicional de Entrada utilizou-se o produto da Ordem de Fluxo, e em na aba Expressão, em Construtor de Consulta determinou-se para a análise o valor > 4 para estabelecer um limiar para a representação dos pixels significativos para os dados da drenagem.

StreamOrder - define uma ordem de fluxo, ou seja, atribui uma ordem numérica a segmentos em formato *raster* que representa ramificações de uma rede linear, com isso no Raster do Fluxo de Entrada utilizou-se o produto do Preencher, e no Raster de Direção de Fluxo de Entrada usa-se o produto Direção de Fluxo.

Stream to feature - converte o arquivo imagem da drenagem para vetor, ou seja, converte os dados *raster* que representa uma rede linear em recursos que representam a rede linear., com isso no Raster do Fluxo de Entrada utilizou-se o produto da Condicional, e no Raster de Direção de Fluxo de Entrada usa-se o produto Direção de Fluxo.

FlowLenght Upstream - comprimento do fluxo, para a nascente, ou seja, calcula a distância à montante ao longo do caminho do fluxo para cada célula, com isso no Raster de Direção de Fluxo de Entrada utilizou-se o produto da Direção de Fluxo; Um uso primário da ferramenta *Flow Length* é calcular o comprimento do caminho de fluxo mais longo em uma determinada bacia. Essa medida é frequentemente usada para calcular o tempo de concentração de uma bacia, usando a opção UPSTREAM.

Slope – possibilita obter a declividade, ou seja, identifica a inclinação (gradiente ou taxa de alteração máxima no valor-z) de cada célula de uma superfície *raster* para obter as variáveis de interesse, a partir do SRTM.

Para obter os dados de interesse, fez a junção (*merge*) das 21 bacias dos pontos fluviométricos, inseriu-se o campo “estação”, com intuito de possibilitar o processamento da rotina de estatística por zona.

Os atributos físicos (área, altitude, declividade do rio principal, comprimento do rio principal, comprimento total dos rios principais, densidade de drenagem) são oriundos de atividades em ambiente SIG, a partir do MDE elaborado, destacando-se:

- *área* de cada ponto – estação fluviométrica - a partir da extração do polígono no MDE, obtendo-se a área total (km²);
- *altitude* a partir do MDE, obtendo-se o *desnível altimétrico* (valor entre a altitude máxima e mínima em metros dentro da bacia);
- *declividade* a partir do MDE, com elaboração do mapa em classes e análise estatística por zona para obtenção da média;
- *comprimento do rio principal*, em quilômetros, a partir do MDE, a partir do *raster* do comprimento do fluxo e análise pela estatística por zona;
- *comprimento total dos rios principais*, em quilômetros, a partir do MDE, a partir do *raster* do comprimento do fluxo e análise pela estatística por zona;

- *densidade de drenagem* a partir do MDE, sendo um produto do comprimento total dos rios principais dividido pela área da bacia. Destaca-se que foi utilizado para o cálculo da densidade o comprimento total dos rios principais devido ao fato do presente trabalho buscar elementos para o aproveitamento hidrelétrico nos cursos d'água com maior expressividade.

Fez-se uso da base de dados de 2017 do *MapBiomias*, no qual há a classificação do uso da terra em diferentes temas. Houve a conversão para um arquivo vetorial (shapefile) com intuito de agrupar as classes de interesse, totalizando 5 (cinco) temas de uso, sendo eles: % *cobertura florestal (F)*, % *agricultura/campo (AC)*, % *urbano (U)*, % *áreas úmidas (AU)*, % *rios e lagos (RL)*, Figura 15. Esse desenvolvimento teve por intuito mensurar a percentagem de cada um dos usos em cada área de bacia de cada estação fluviométrica.

Salienta-se que a definição dos temas do agrupamento embasou-se nas características similares que possuem, e vislumbrando verificar se de alguma forma podem influenciar no comportamento da vazão.

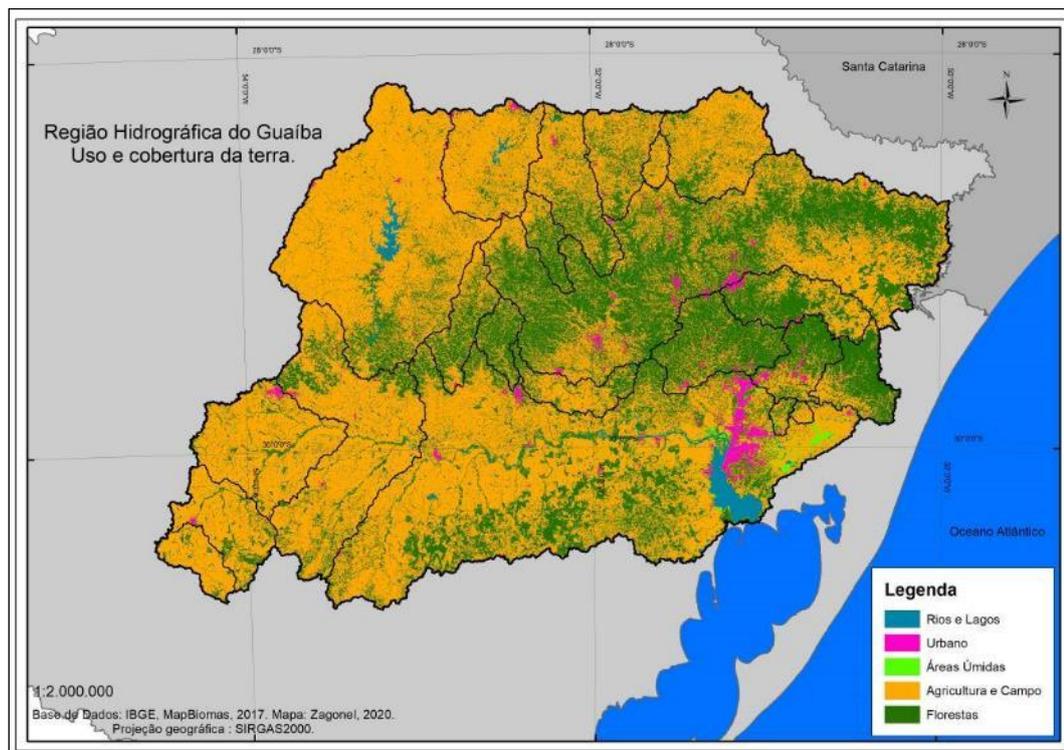


Figura 15. Representação do Uso e cobertura da terra na RHG.
Fonte: IBGE, MapBiomias, 2017.

A partir da identificação e localização geográfica das Estações Fluviométricas – pontos de monitoramento das vazões em cursos d'água, e por intermédio da aplicação de

rotinas em ambiente SIG em imagem SRTM foi possível a identificação da Rede de drenagem, Figura 16.

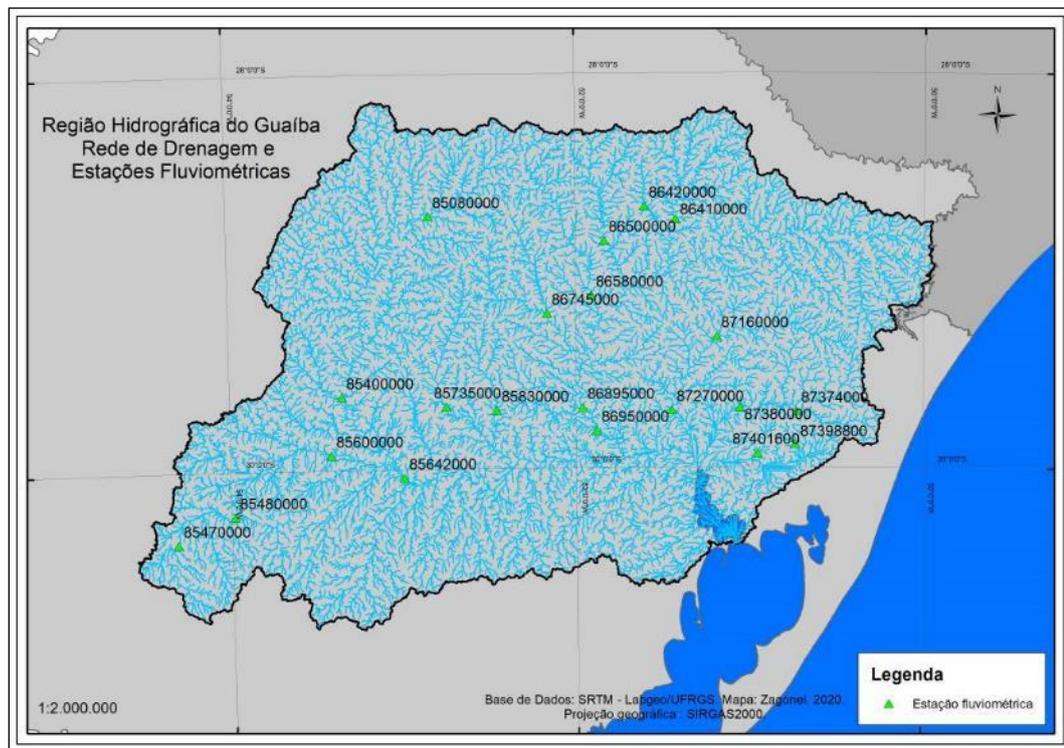


Figura 16. Representação da Rede de drenagem – rios principais, 4 ordem, RHG, RS.

Com o intuito de apresentar a delimitação dos polígonos das 21 (vinte e uma) estações fluviométricas, executou-se a extração de cada bacia utilizando os dados do SRTM para a RHG, Figura 17. Além disso, objetivando o agrupamento das 21 bacias para fins de processamento de dados em estatística por zonas, fez-se uma “junção das 21 imagens” (*merge*) com a representação de sobreposição vetorial de cada bacia de cada estação fluviométrica.

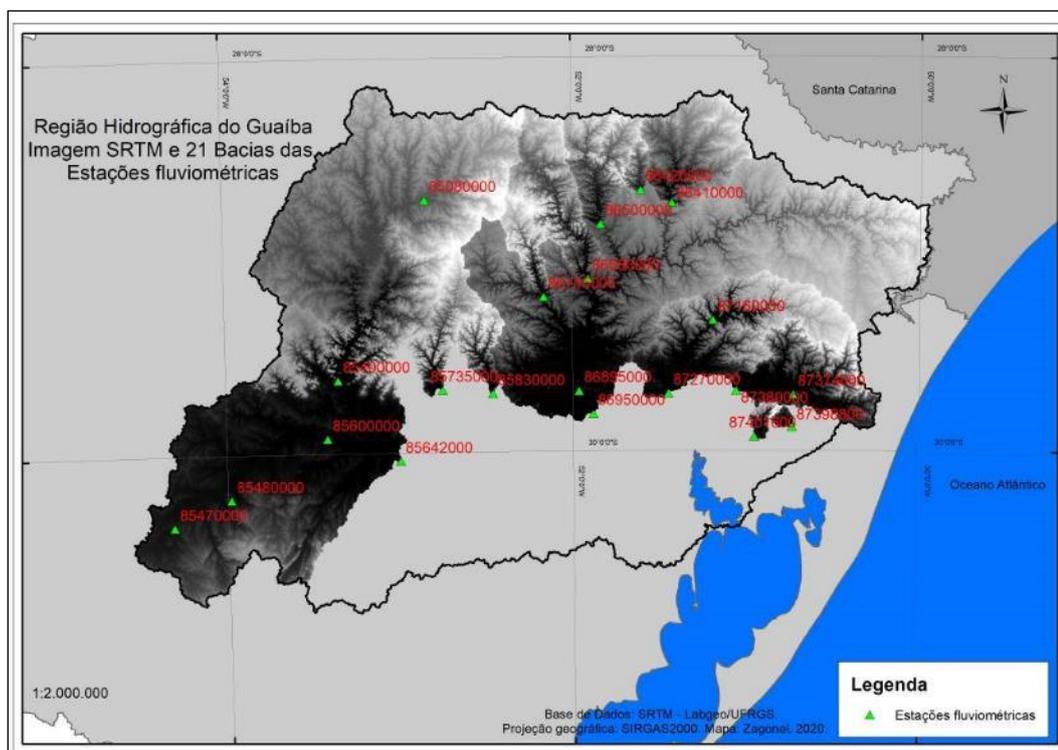


Figura 17. Representação do MDE das bacias de estações fluviométricas, RHG, RS.

c) Aplicação da precipitação pluviométrica estimada por satélite

Utilizou-se os dados do TRMM disponibilizados pela NASA em < <https://gpm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm> >, no formato NetCDF (*Network Common Data Form*), os quais foram convertidos no SIG pela rotina Make NetCDF Raster Layer + Extract Subdataset, resultando em um conjunto de dados de imagem (.TIFF).

O conjunto de dados utilizado foi o TRMM 3B43, com a série histórica de dados mensais no período de 2000 a 2018, este produto foi criado usando estimativas de taxa de precipitação por infravermelho por microondas combinada ajustada pela missão TRMM (em mm/h), com resolução temporal de um mês e resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$.

Nas rotinas em ambiente SIG, utilizaram-se 228 imagens (.tiff), as quais representam cada mês – total 12 – em cada ano – perfazendo a série histórica de 19 anos. Além disso, devido a necessidade de dispor de ao menos um pixel com dado de precipitação dentro da bacia – da estação fluviométrica – houve necessidade de alterar a resolução espacial para $0,15^\circ \times 0,15^\circ$, proporcionando o incremento na escala.

Em posse dos dados, para o processamento e obtenção da Precipitação Acumulada Média Anual, utilizou-se a calculadora *raster*, fazendo-se a soma das médias mensais

respectivas para cada ano, multiplicado pelo número de horas (24) e pelo período (365 dias). Ao fim, fez-se a análise de estatística por pixel para obter ao período da série histórica (19 anos), Figura 18.

No processamento e obtenção da Precipitação Acumulada Média Mensal, utilizou-se a calculadora *raster*, fazendo-se a soma das médias mensais respectivas para cada ano, multiplicado pelo número de horas (24) e pelo período (30 dias). Utilizou-se o método de estatística por zona (*Zonal Statistics*), o qual permite obter uma determinada variável de interesse – média – para cada bacia em estudo – estação fluviométrica. Sendo aplicada para a imagem da precipitação que contempla a série histórica (19 anos) diante da precipitação anual e para a série mensal.

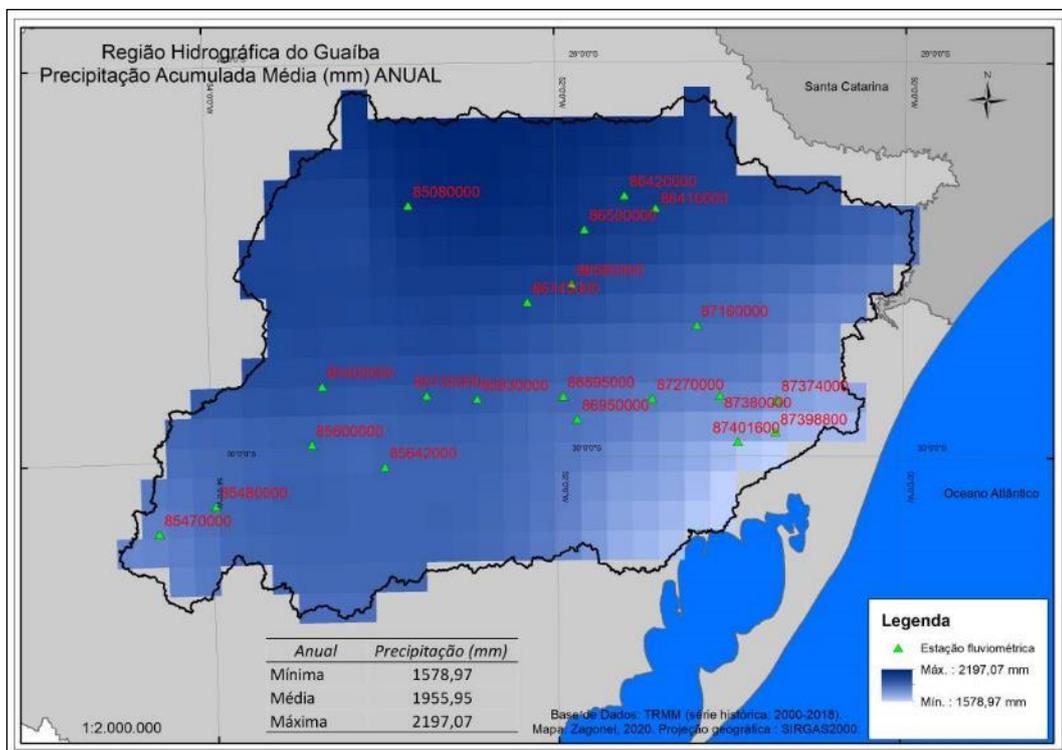


Figura 18. Representação de imagem TRMM para a RHG, com dados da Precipitação Acumulada Média Anual (mm) oriunda dos dados da série histórica de 2000 a 2018.

Fonte: NASA, 2020.

d) Vazão específica

Fez-se uso da Q_{95} observada por intermédio do programa Hidro 1.4 a partir dos dados de vazão de cada Estação fluviométrica, considerando a série diária e da série mensal disponível de cada ponto de monitoramento, e com uso dos dados de área da ANA, com isso,

procedeu-se o cálculo da vazão específica – a qual se refere à um determinado valor de vazão por unidade de área, Equação 6 da Vazão específica:

$$q = Qm.A^{-1} \quad \text{(Equação 6)}$$

Em que; q representa a vazão específica em $L.s^{-1}.km^{-2}$; Qm é a vazão média do período em $m^3.s^{-1}$; e A se refere a área da baía em km^2 .

e) Correlação entre as variáveis estudadas

Utilizou-se a análise de correlação com o intuito de avaliar a existência e intensidade do relacionamento entre a Q_{95} e as variáveis estudadas, procedeu-se a análise de correlação linear ou *r de Pearson*, na qual exhibe o grau de relação entre duas variáveis quantitativas e exprime a associação entre elas e também da proximidade dos dados a uma reta, através de valores situados entre -1 e 1.

f) Métricas estatísticas

No presente trabalho definiu-se para a análise estatística o Coeficiente de Determinação (R^2) na Equação 7, *Root-Mean-Square Error* (RMSE) – em português significa a Raiz do Erro Quadrático Médio, Equação 8, o Desvio Padrão (Dp), Equação 9, e o Erro Padrão (ep), Equação 10.

$$R^2 = b^2 \cdot \frac{S_x^2}{S_y^2} \quad \text{(Equação 7)}$$

Em que: b é o coeficiente angular da reta de regressão; S_x^2 é a variância amostral de x ; e S_y^2 é a variância amostral de y .

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad \text{(Equação 8)}$$

Em que: n é o número de estações fluviométricas; \hat{y}_i é a Q_{95} estimada; e y_i é a Q_{95} observada.

$$Dp = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - u)^2}{N}} \quad \text{(Equação 9)}$$

Em que: Dp é o desvio padrão populacional; u é a média populacional; x_i corresponde aos valores da amostra; e N é o número de elementos da população.

$$ep = \frac{Dp}{\sqrt{N}} \quad (\text{Equação 10})$$

Em que: ep é o Erro padrão; Dp é o Desvio padrão; e N é o número de elementos da população.

g) Equações de regionalização

Com o propósito de avaliar o desempenho das variáveis estudadas e diante da base de dados, optou-se por usar uma equação de regressão com tendência potencial que considera somente a influência da Área da Bacia, Equação 11 da Vazão em função da área da bacia.

$$Q = a.A^b \quad (\text{Equação 11})$$

E, a partir da aplicação da Análise de Variância – ANOVA ao conjunto de dados elaborou-se outra equação, com base na regressão linear múltipla, a qual considerada o conjunto de dados das variáveis definidas como essenciais para o caso, Equação 12 da Vazão por regressão linear múltipla.

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots a_nx_n + b \quad (\text{Equação 12})$$

h) Mapas de regionalização

Considerando a necessidade de representar o comportamento da Q_{95} diante da aplicação de cada equação de regionalização, foram elaborados dois mapas temáticos em ambiente do Sistema de Informações Geográficas (SIG).

O primeiro mapa se refere à espacialização da vazão pela equação de regressão linear com tendência potencial que tem como variável explicativa somente a Área de Drenagem. O segundo mapa embasa-se no emprego da equação de regressão múltipla, com o emprego de oito variáveis independentes, físicas, ambientais e a precipitação pluviométrica, para explicar o desempenho da Q_{95} na Região Hidrográfica do Guaíba.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da aplicação dos métodos obteve-se os resultados para o comportamento da Q_{95} na Região Hidrográfica do Guaíba considerando as séries históricas avaliadas para as unidades amostrais. Além disso, foi possível determinar a vazão específica, a delimitação das bacias para cada unidade amostral, os atributos ambientais de influência na Q_{95} , e a precipitação pluviométrica estimada por satélite.

A análise estatística contemplou a correlação entre as variáveis físicas e ambientais estudadas. A partir dessas informações procedeu-se a definição de equações de regionalização, e a elaboração dos mapas da distribuição espacial da Q_{95} na RHG.

4.1 Q_{95} obs. com base na série diária e mensal

Em face da análise dos dados de vazão para cada Estação, fazendo uso do *software* Hidro 1.4 foi calculada a Vazão Q_{95} mensal e anual considerando a série Diária de dados para cada ponto, conforme a Tabela 4.

Destaca-se que a série histórica de dados utilizados contemplam o período entre 1931 e 2018, observando-se o respectivo período de dados disponíveis para cada Estação fluviométrica.

Tabela 4. Vazão Q_{95} observada com base na série diária das Estações fluviométricas, RHG, RS.

Código da Estação	Q_{95} obs. com Série diária ($m^3.s^{-1}$)												
	Anual	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Set.	Out.	Nov.	Dez.
85080000	11,30	7,38	8,20	6,56	6,56	9,23	11,30	14,40	19,60	19,60	19,60	16,80	12,30
85400000	62,20	56,30	53,70	51,30	44,10	43,80	63,50	107,00	111,00	126,00	125,00	93,10	59,90
85470000	0,95	0,52	0,58	0,71	0,90	1,00	1,44	2,13	2,31	2,73	2,67	1,64	0,71
85480000	5,30	1,38	1,45	1,82	2,38	2,46	3,04	4,51	6,82	8,25	7,74	4,58	1,66
85600000	6,78	4,58	4,64	5,77	6,66	7,14	9,90	11,90	13,30	15,40	16,50	9,63	5,35
85642000	177,00	128,00	172,00	170,00	209,00	133,00	183,00	240,00	212,00	198,00	182,00	184,00	152,00
85735000	1,44	1,20	0,93	0,62	1,04	0,69	2,65	6,59	6,65	7,26	6,08	3,24	1,58
85830000	0,50	0,15	0,26	0,30	0,27	0,27	0,81	2,43	1,07	2,99	2,48	0,79	0,50
86410000	5,49	4,99	3,82	2,91	3,47	3,83	5,94	12,90	16,00	18,90	16,00	11,30	6,36
86420000	0,89	0,85	0,63	0,63	0,56	0,56	0,85	1,74	1,96	2,14	2,10	1,67	1,19
86500000	2,96	2,43	2,23	1,86	1,87	1,97	3,80	5,87	6,20	8,46	8,12	4,51	2,63
86580000	6,12	5,30	4,85	4,69	4,18	4,45	6,97	11,90	11,50	13,40	12,90	9,43	6,12
86745000	1,15	0,95	0,60	0,63	0,55	0,63	1,49	4,07	3,39	4,05	3,71	1,93	0,94
86895000	85,40	63,90	59,60	65,40	77,40	83,40	100,00	153,00	145,00	158,00	145,00	105,00	65,30
86950000	111,00	97,50	110,00	106,00	103,00	137,00	194,00	178,00	233,00	167,00	130,00	70,90	83,10
87160000	3,35	2,34	2,88	2,45	2,65	2,50	3,65	6,23	6,90	8,47	7,76	4,77	2,82
87270000	13,20	9,38	10,60	9,65	14,20	15,40	19,10	23,40	17,30	21,30	20,40	13,90	10,20
87374000	3,24	1,67	2,81	2,44	3,19	2,55	4,31	7,42	6,88	8,43	7,42	4,16	2,21
87380000	8,56	5,20	6,53	6,25	6,92	8,27	13,10	17,30	16,60	18,10	17,70	10,20	6,23
87398800	0,18	0,13	0,15	0,15	0,14	0,19	0,19	0,56	0,39	0,28	0,24	0,22	0,15
87401600	0,42	0,35	0,33	0,27	0,29	0,45	0,57	1,31	1,24	0,29	0,87	0,41	0,37

Fonte: ANA (2019).

A partir das informações da Tabela 4, a Estação 85642000 (Passo São Lourenço) que apresentou o maior valor para a Q_{95} anual corresponde a $177,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Essa vazão é atribuída as usinas hidrelétricas (UHE) a montante, e pela significativa área de drenagem, com cerca de 27.300 km^2 , e significativa rede de drenagem que converge para o ponto de medição localizado no Rio Jacuí no município de Cachoeira do Sul.

Além disso, existe a possibilidade de influência de fatores hidrogeológicos no comportamento da vazão. Para Collischonn (2015), o escoamento superficial da água da chuva é a principal fonte de recarga imediata do fluxo de água em um rio, pois o excedente de chuva que não infiltrou no solo fica condicionado à formação de lâmina de água sobre a superfície em sentido ao corpo hídrico. E, a água da chuva que infiltra no solo e percola para camadas profundas condiciona a formação de manancial subterrâneo, o qual propicia o armazenamento de água que é descarregado para as nascentes dos rios. Com isso, em períodos sem chuva o fluxo de água natural de um rio é caracterizado como escoamento de base, pois apresenta uma variação muito menor do que a variação observada durante períodos com alta precipitação.

Para a Estação 86950000 (Taquari), com área de 25.900 km^2 , a Q_{95} anual representou $111,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Da mesma forma esse valor embasa-se no polígono da bacia que contempla inúmeros cursos d'água contribuintes, isto é, uma grande área de drenagem, principalmente o Rio das Antas. Além disso, esse desempenho da vazão se deve em virtude da reservação de água na Eclusa de Bom Retiro e a presença de barramentos hidrelétricos a montante, abarcando a bacia do rio Taquari-Antas.

Em contraponto, obteve-se a menor Q_{95} anual foi a Estação 87398800 (Passo Grande), com área de 120 km^2 e na Estação 87401600 (Cerâmica Cherubini), com área de 199 km^2 . O fato é que esse resultado já era esperado, pois são bacias com pequena área de influência e rede de drenagem, ou seja, escassa malha de cursos d'água contribuintes até o ponto de monitoramento.

Considerando os dados expostos pode-se inferir que a maior Q_{95} mensal ocorre entre os meses de Julho à Outubro, no mesmo período de maior precipitação na região, bem como naquelas bacias com maior área de drenagem. Ademais, observou-se que os períodos com o menor valor para a Q_{95} mensal ocorrem entre Janeiro e Abril, com menor precipitação.

Entretanto, nota-se pouca variação da Q_{95} mensal para as Estações 85642000 e 86950000 durante os meses do ano. Isso ocorre devido aos barramentos hidrelétricos a montante e reservatórios de acumulação d'água, os quais regulam a vazão turbinada

conforme a demanda e disponibilidade hídrica, porém, mantendo-se uma regular vazão ecológica objetivando manter as condições dos ecossistemas aquáticos.

A partir da tabulação dos dados, elaborou-se a representação gráfica do comportamento da Q₉₅ observada anual e mensal para cada Estação com base na série Diária, conforme Figuras 19, 20 e 21.

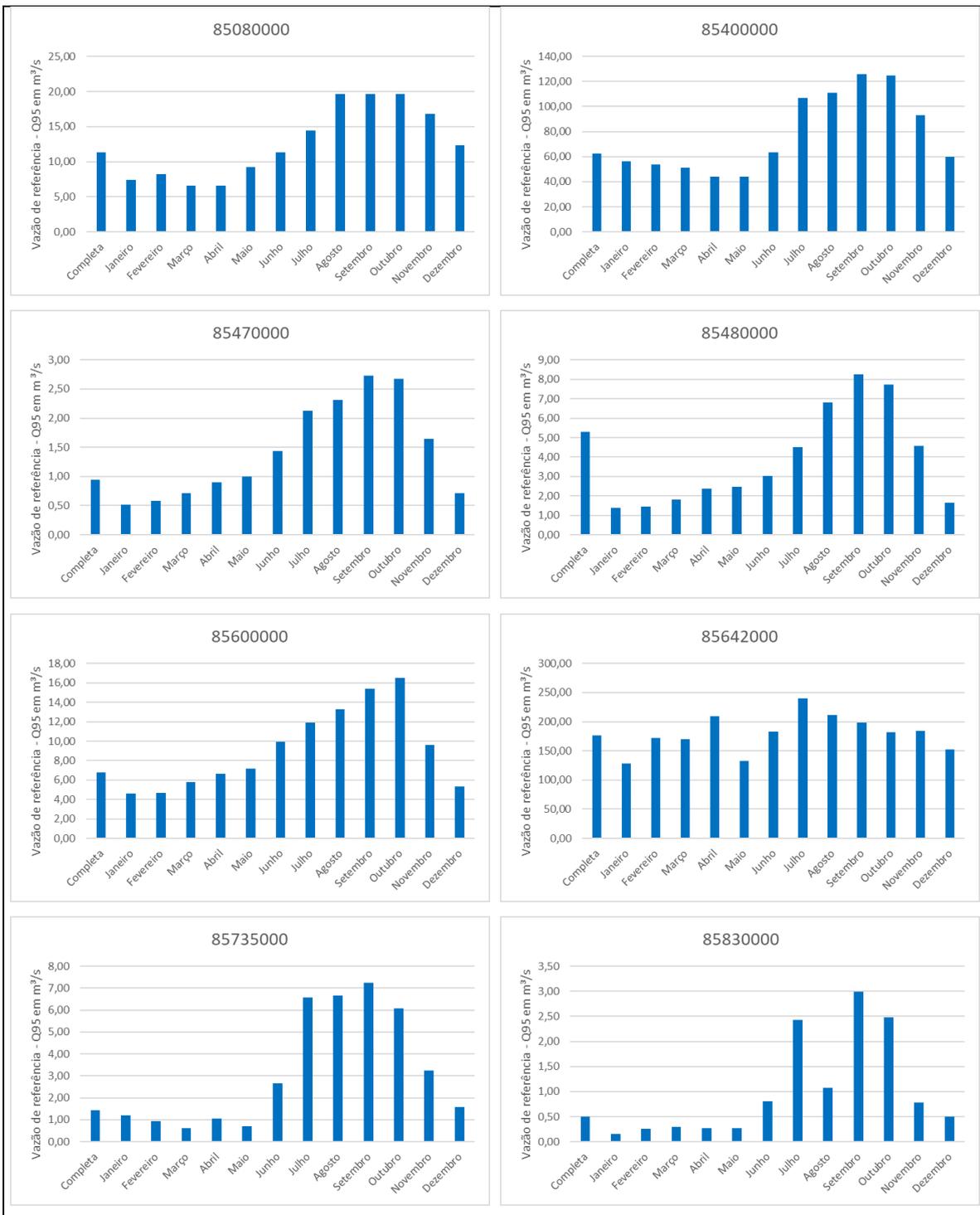


Figura 19. Representação do comportamento da Q₉₅ obs. – série diária em cada Estação, RHG, RS.

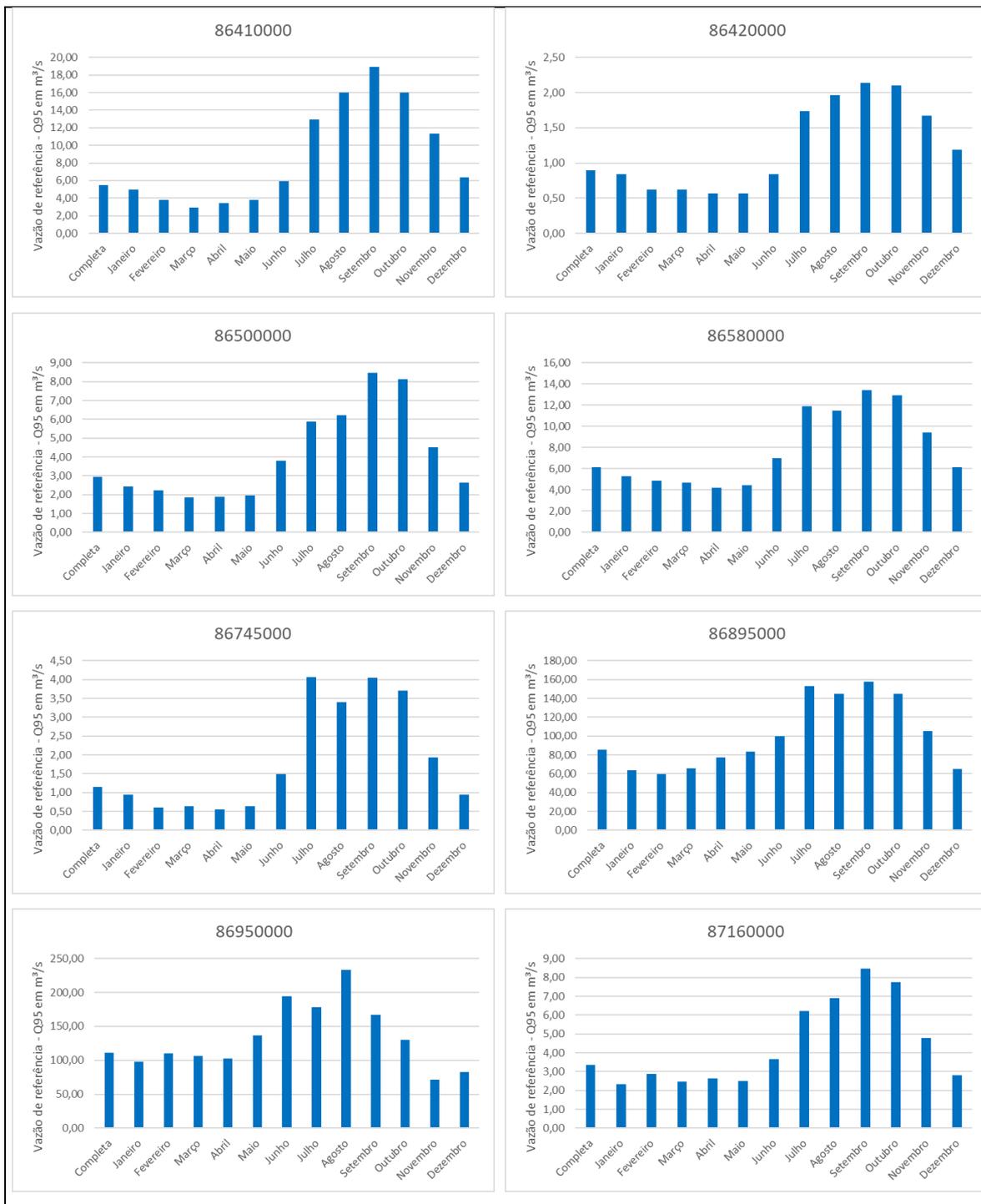


Figura 20. Representação do comportamento da Q₉₅ obs. – série diária em cada Estação, RHG, RS.

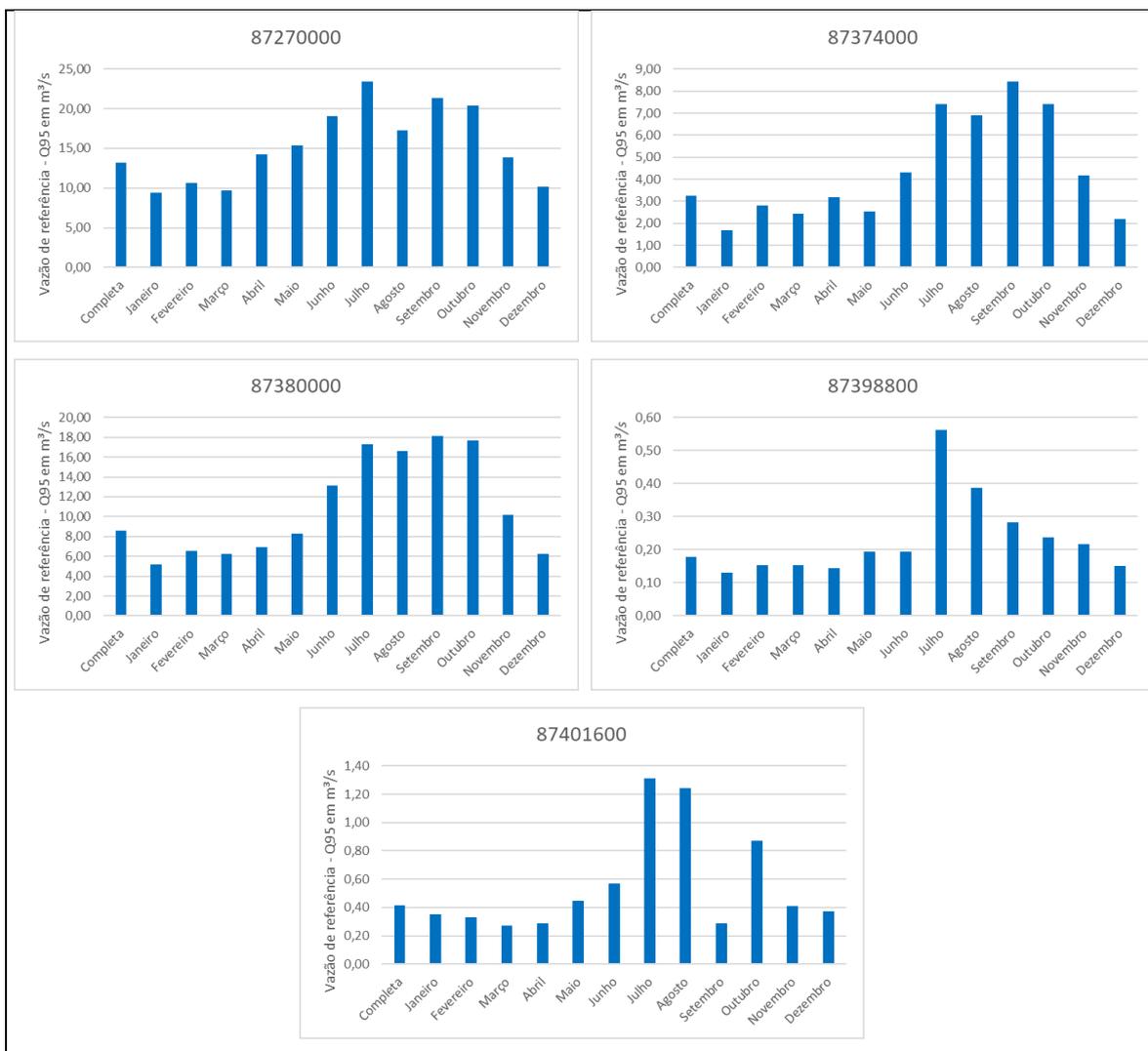


Figura 21. Representação do comportamento da Q₉₅ obs. – série diária em cada Estação, RHG, RS.

Ao mesmo tempo, em face dos gráficos das Figuras 19, 20 e 21, é possível inferir que nos meses que compreendem o período do Inverno e da Primavera ocorre um comportamento diferenciado da vazão. Isto é, existe um aumento da vazão, com valores superiores ao comparado com os meses de Verão e Outono em que os valores tendem a reduzir, caracterizando a sazonalidade no regime fluviométrico.

Salienta-se que esse desempenho da variabilidade da vazão – aumento/redução desenvolve-se em grande maioria das estações fluviométricas estudadas, entretanto, não se constatou esse fenômeno na Estação 85642000 (Passo São Lourenço). Dito isso, deduz-se que há influência do gerenciamento hídrico das 4 (quatro) grandes usinas hidrelétricas no Rio Jacuí a montante da estação de observação, sendo elas: UHE Dona Francisca, UHE Itaúba, UHE Leonel de Moura Brizola e UHE Passo Real. Nessa seara, a gestão operacional dos empreendimentos hidrelétricos tem por atribuição garantir a vazão remanescente e

disponibilidade de água para usos múltiplos a jusante, fato que caracteriza a ausência expressiva de variação entre o Inverno/Primavera e Verão/Outono da Q_{95} na estação de monitoramento 85642000.

Essa influência é caracterizada pela regulação da vazão remanescente na hidrelétrica, a qual ocasiona e mantém um determinado padrão ao longo do ano. Diante da manutenção do reservatório, da demanda da vazão turbinada, bem como, torna explícito que existe a sazonalidade entre o período seco e chuvoso na Região Hidrográfica do Guaíba.

Em relação ao comportamento da vazão de referência anual – com base de dados na série diária - é possível afirmar que existe influência no comportamento da vazão ao longo do ano diante da existência de barramentos hidrelétricos a montante das Estações 85400000 (Dona Francisca), 85642000 (Passo São Lourenço), 86895000 (Porto Mariante) e 86950000 (Taquari), as quais representaram o maior valor da Q_{95} em $m^3.s^{-1}$, Figura 22.

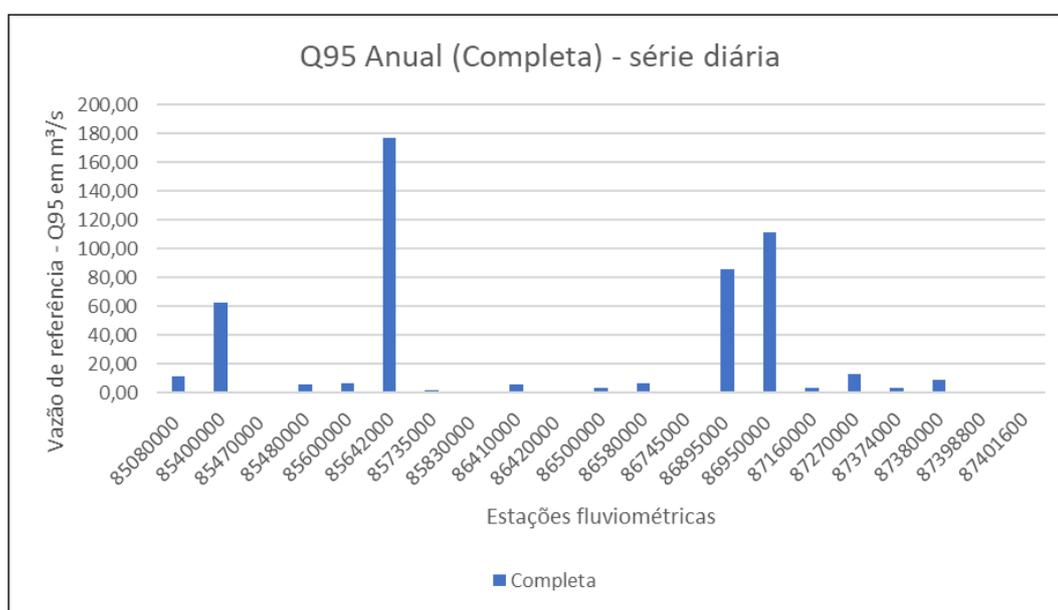


Figura 22. Representação gráfica da $Q_{95\text{ obs. Completa}}$ - série diária, RHG, RS.

Os resultados obtidos estão em consonância com Bazzo (2017), que em análise dos dados de 18 estações fluviométricas na bacia do rio Taquari-Antas obteve a $Q_{95\text{ obs.}}$ na Estação 86410000 de $5,94\ m^3.s^{-1}$ ($5,49\ m^3.s^{-1}$ hoje), na Estação 86420000 $0,87\ m^3.s^{-1}$ ($0,89\ m^3.s^{-1}$), na Estação 86500000 $2,67\ m^3.s^{-1}$ ($2,96\ m^3.s^{-1}$), e na Estação 86580000 $6,79\ m^3.s^{-1}$ ($6,12\ m^3.s^{-1}$).

Além disso, foi mensurado o comportamento da Q_{95} observada (anual e mensal) com base na série Mensal, expresso na Tabela 5. E, a partir da tabulação dos dados, elaborou-se

a representação gráfica do comportamento da Q_{95} observada para cada Estação conforme a série Mensal, Figuras 23, 24 e 25.

Tabela 5. Vazão Q_{95} observada com base na série mensal das Estações fluviométricas, RHG, RS.

Código da Estação	Q_{95} obs. com Série mensal ($m^3.s^{-1}$)												
	Anual	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Set.	Out.	Nov.	Dez.
85080000	14,90	11,20	8,04	10,10	13,70	7,77	13,80	18,00	16,00	15,70	24,10	14,80	11,10
85400000	77,10	68,40	65,80	56,50	53,60	56,80	82,40	147,00	126,00	153,00	148,00	95,20	72,40
85470000	1,36	0,74	0,87	0,97	1,05	1,22	1,67	2,82	2,78	3,78	3,87	2,28	1,13
85480000	3,27	1,87	1,42	2,51	2,47	3,38	3,90	5,85	8,75	11,50	11,30	5,37	1,98
85600000	9,19	5,49	7,47	7,23	8,80	8,52	11,00	17,10	21,80	27,30	26,30	11,40	6,24
85642000	245,00	148,00	213,00	255,00	242,00	177,00	181,00	264,00	216,00	262,00	296,00	229,00	214,00
85735000	2,02	2,44	1,11	1,21	1,79	2,31	2,89	18,40	10,50	12,10	9,49	4,63	1,56
85830000	1,07	0,34	0,32	0,70	0,71	0,73	1,91	6,64	1,35	7,68	5,33	1,09	0,62
86410000	7,34	6,13	4,74	4,31	4,53	5,97	8,68	23,90	17,90	33,00	19,60	14,40	6,37
86420000	1,13	1,05	0,88	0,71	0,62	0,62	1,35	2,46	2,25	3,30	2,48	2,01	1,13
86500000	4,45	3,94	3,20	2,45	2,41	3,12	6,54	12,60	7,68	14,20	9,34	6,72	3,77
86580000	8,03	6,73	5,43	5,84	4,89	4,65	11,10	20,60	14,70	20,90	13,90	10,70	8,23
86745000	1,75	1,50	0,88	0,94	0,92	1,27	2,32	7,57	4,38	7,07	4,84	2,99	1,15
86895000	110,00	84,00	77,30	92,70	105,00	106,00	141,00	240,00	155,00	238,00	189,00	109,00	77,40
86950000	94,50	92,70	43,30	80,90	157,00	31,60	3,59	285,00	222,00	110,00	184,00	92,30	97,70
87160000	4,45	3,25	3,78	2,71	3,26	3,34	6,54	9,20	8,64	13,40	11,00	5,94	3,37
87270000	16,40	12,40	12,60	13,00	15,30	17,60	24,80	32,40	17,00	30,20	28,30	15,90	13,60
87374000	4,32	1,89	2,75	3,82	3,71	2,50	6,15	12,60	11,10	16,50	6,78	4,21	3,12
87380000	10,60	6,39	6,90	6,78	7,87	8,48	20,80	25,40	23,30	30,80	23,70	13,10	7,03
87398800	0,20	0,14	0,06	0,18	0,02	0,20	0,34	1,09	1,07	0,66	0,51	0,31	0,18
87401600	0,70	0,15	0,24	0,56	0,22	0,37	2,01	1,00	2,54	1,45	1,65	1,05	0,46

Fonte: ANA.

Diante da análise da Tabela 5, e considerando a série mensal de dados, destaca-se a Estação 85642000 (Passo São Lourenço) que apresentou o maior resultado de Q_{95} anual, perfazendo $245,0 m^3.s^{-1}$. A Estação 86895000 (Porto Mariante) alcançou $110,0 m^3.s^{-1}$, seguida da Estação 86950000 (Taquari) com $94,50 m^3.s^{-1}$, e pela Estação 85400000 (Dona Francisca) com $77,10 m^3.s^{-1}$.

Em análise dessas tabelas, é possível inferir que a Área da Bacia representou uma importante variável no comportamento da Q_{95} (diária e mensal), sobretudo, diante da localização dessas Estações Fluviométricas. Ou seja, em cursos d'água de grande extensão, Rio Jacuí e Rio Taquari, este último que abarca toda a rede de drenagem do Rio das Antas.

Porém, ratifica-se que à montante dos pontos de monitoramento (Estação 85400000, 85642000, 86895000, 86950000) onde há empreendimentos hidrelétricos ocorre a tendência de pouca variação da Q_{95} mensal. Os reservatórios de água tendem a atenuar grandes variações na vazão ao longo do tempo, pois regulam a vazão turbinada conforme a disponibilidade hídrica, mantendo-se uma regular vazão remanescente a fim de propiciar a manutenção dos ecossistemas aquáticos conforme a legislação ambiental preconiza.

Nessa seara, considerando os dados da Q_{95} diante da série mensal avaliada, conclui-se que existe uma tendência de que a maior vazão ocorra nos meses chuvosos, contemplando o período de Julho à Outubro e períodos críticos de Janeiro à Abril.

Isto posto, os dados das tabelas com os Cálculos de Q_{95} observada denotam que elas são variáveis aleatórias no tempo, se caracterizam pela sazonalidade no Rio Grande do Sul (período chuvoso e período seco) e pela influência da área de drenagem da bacia.

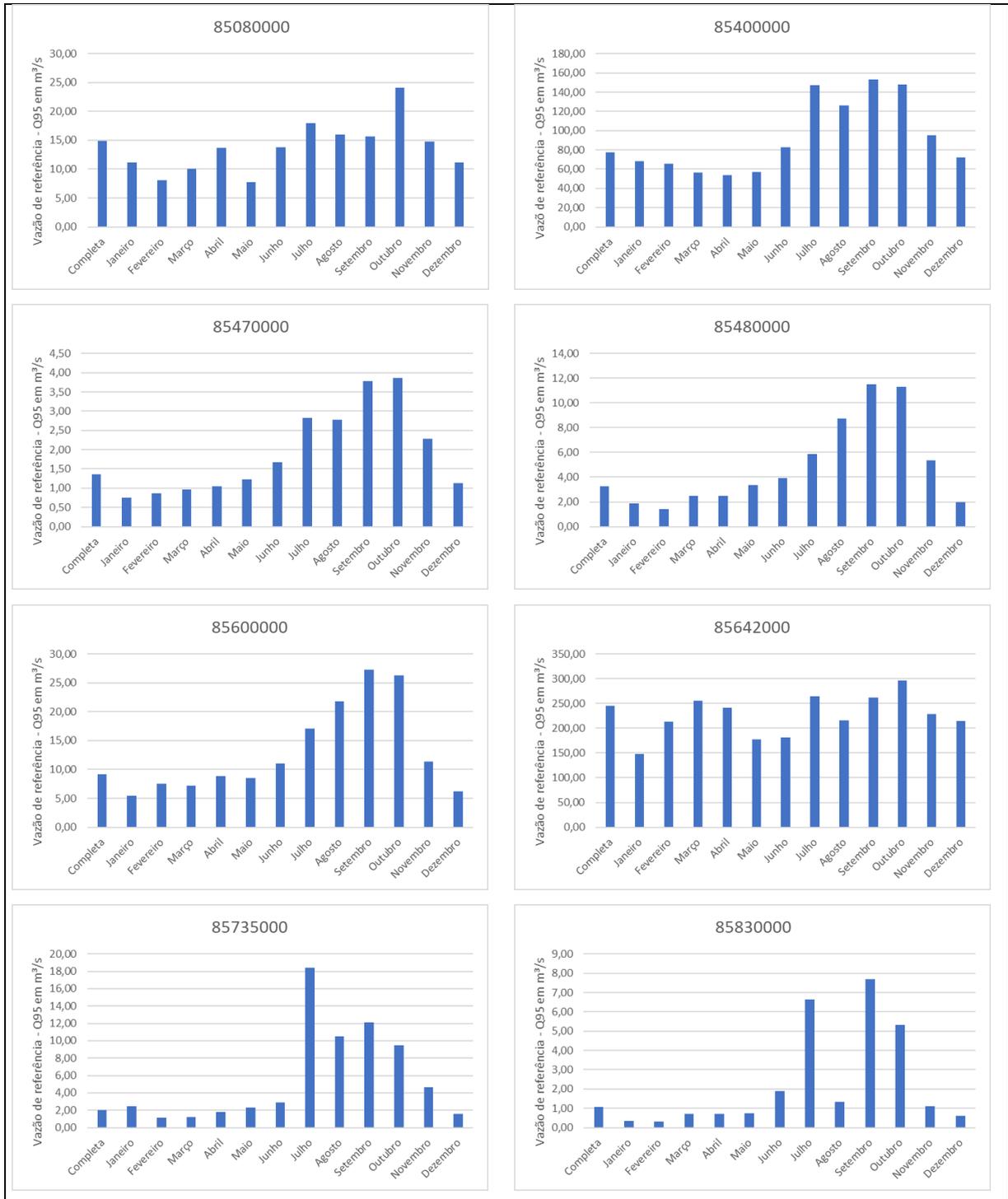


Figura 23. Representação gráfica do comportamento da Q_{95} obs. – série mensal em cada Estação, RGH, RS.

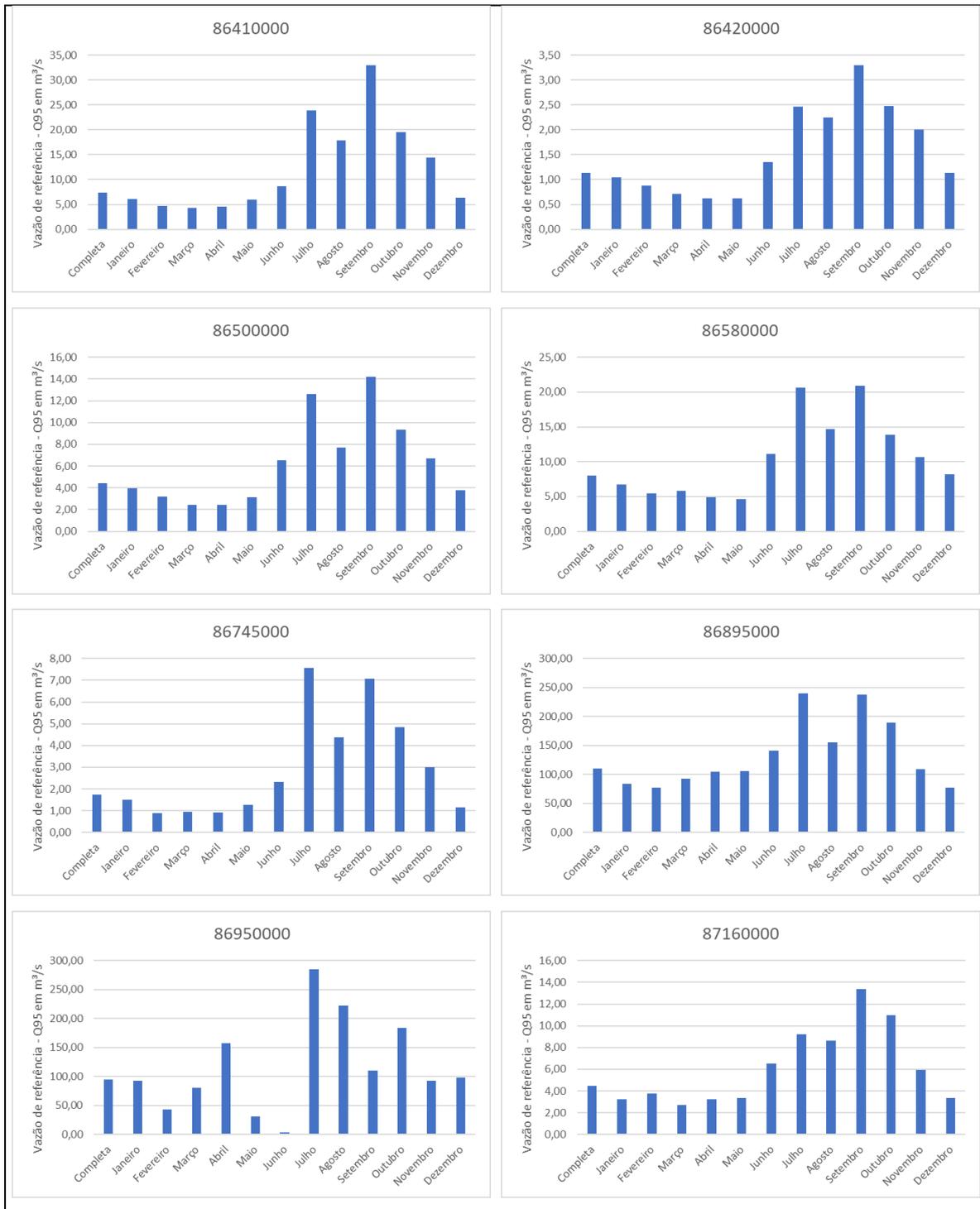


Figura 24. Representação gráfica do comportamento da Q₉₅ obs. – série mensal em cada Estação, RHG, RS.

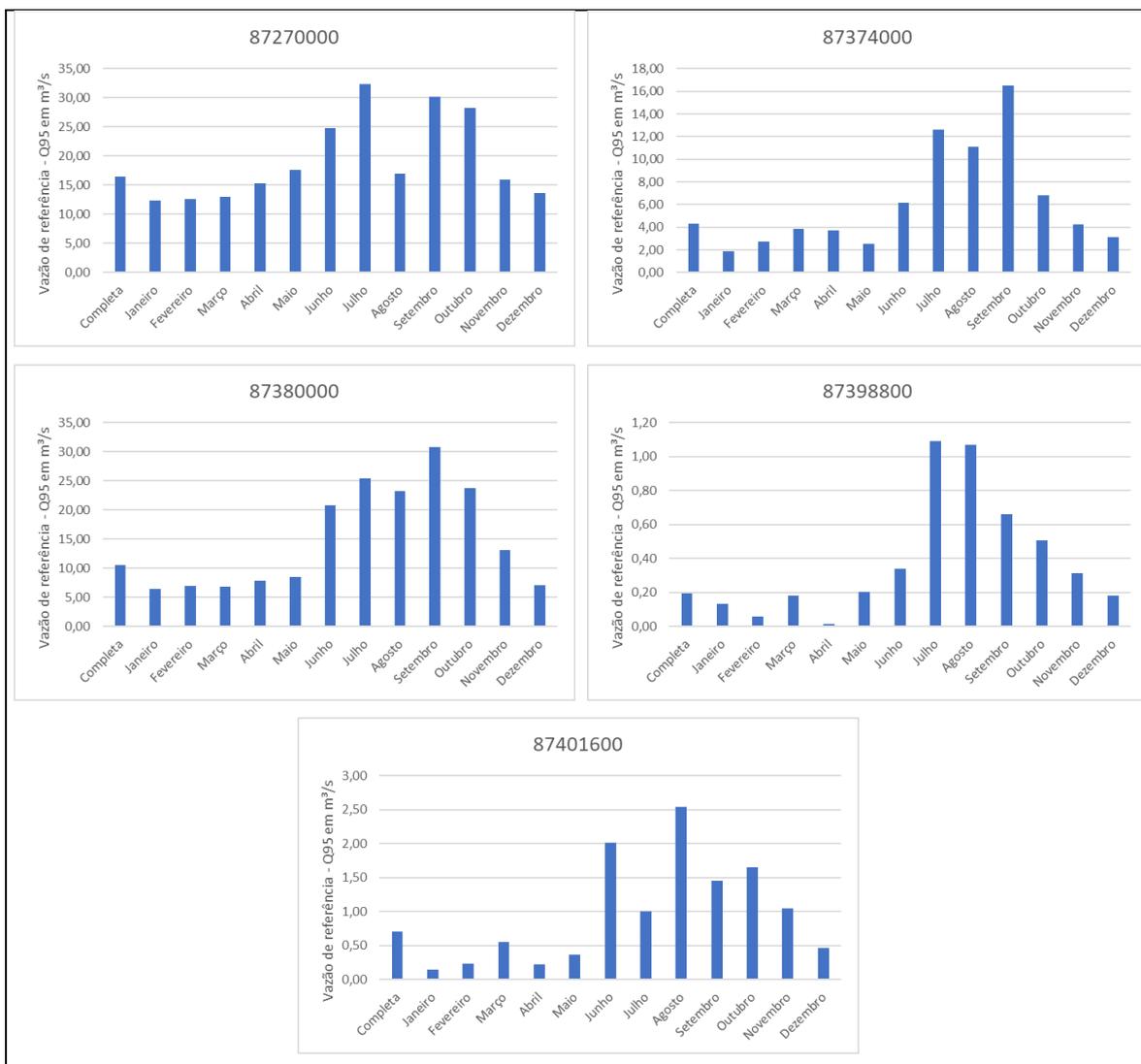


Figura 25. Representação gráfica do comportamento da Q₉₅ obs. – série mensal em cada Estação, RHG, RS.

Novamente, ratifica-se influência no comportamento da vazão de referência ao longo do ano, evidenciando-se a ocorrência de certa variação entre o período chuvoso e período seco. Outrossim, nos meses do Inverno e Primavera a vazão tende a apresentar um valor elevado em comparação com os meses de Verão e Outono, destaca-se outra vez que essa variabilidade da vazão – aumento/redução ocorre em grande maioria das estações fluviométricas estudadas.

Porém, com base na série mensal não se constatou esse fenômeno na Estação 85642000 (Passo São Lourenço). Dito isso, infere-se que existe a influência do gerenciamento hídrico das usinas hidrelétricas no Rio Jacuí a montante da estação de observação, diante da capacidade de regulação e do grande volume de água dos reservatórios.

Considerando a Q_{95} observada anual (completa) obteve-se o elevado valor da vazão de referência para as Estações 85400000 (Dona Francisca), 85642000 (Passo São Lourenço), 86895000 (Porto Mariante) e 86950000 (Taquari), Figura 26.

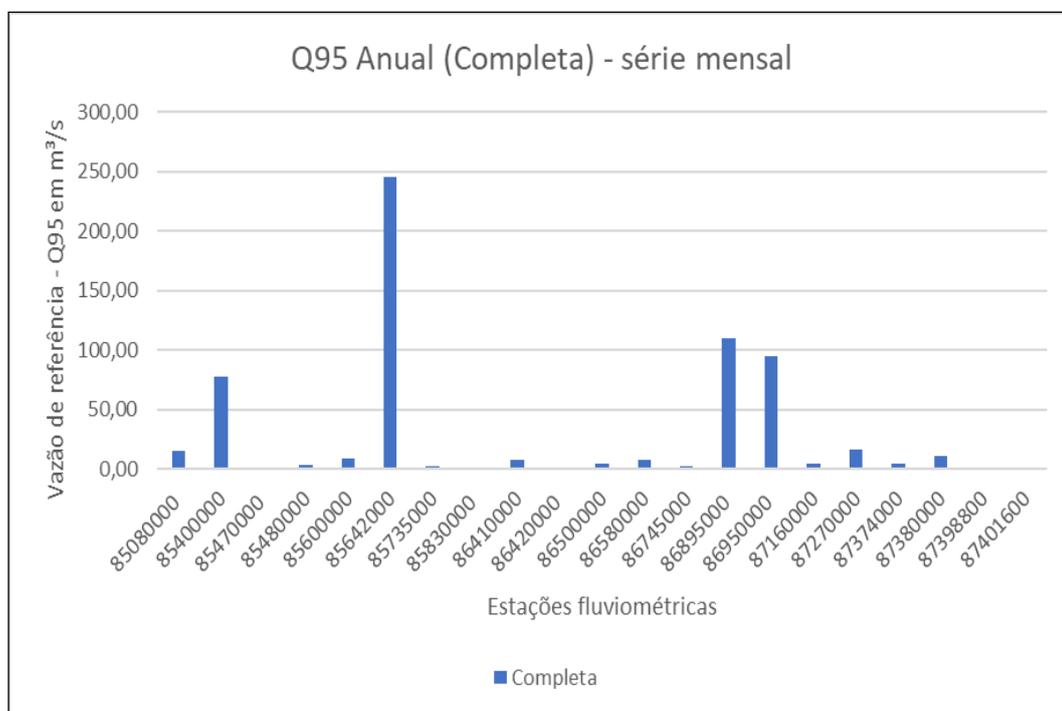


Figura 26. Representação gráfica da Q_{95} obs. série mensal, RHG, RS.

4.2 Vazão específica

Em face da análise dos dados de vazão para cada Estação, houve a possibilidade de calcular a Vazão específica (Q_{95} específica), a qual considerada a Área da Bacia de drenagem referente a cada ponto geográfico da Estação, conforme Tabelas 6 e 7. A preferência e manutenção das 21 Estações embasaram-se na análise de correlação entre as vazões em relação à média.

Tabela 6. Vazão específica com base na série diária, RHG, RS.

Código da Estação	Completa	Q ₉₅ - Cálculo da Vazão Específica - Série diária por ÁREA (Q/A= L.s ⁻¹ .km ²)											
		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Set.	Out.	Nov.	Dez.
85080000	3,78	2,47	2,74	2,19	2,19	3,09	3,78	4,82	6,56	6,56	6,56	5,62	4,11
85400000	4,44	4,02	3,84	3,66	3,15	3,13	4,54	7,64	7,93	9,00	8,93	6,65	4,28
85470000	0,98	0,54	0,60	0,74	0,93	1,04	1,49	2,21	2,39	2,83	2,77	1,70	0,74
85480000	1,90	0,49	0,52	0,65	0,85	0,88	1,09	1,62	2,44	2,96	2,77	1,64	0,59
85600000	1,00	0,68	0,68	0,85	0,98	1,05	1,46	1,76	1,96	2,27	2,43	1,42	0,79
85642000	6,48	4,69	6,30	6,23	7,66	4,87	6,70	8,79	7,77	7,25	6,67	6,74	5,57

85735000	1,07	0,90	0,69	0,46	0,78	0,52	1,98	4,92	4,96	5,42	4,54	2,42	1,18
85830000	0,63	0,19	0,32	0,37	0,34	0,33	1,00	3,02	1,33	3,71	3,08	0,98	0,63
86410000	1,95	1,77	1,35	1,03	1,23	1,36	2,11	4,57	5,67	6,70	5,67	4,01	2,26
86420000	2,81	2,67	1,97	1,97	1,78	1,78	2,67	5,49	6,18	6,75	6,62	5,27	3,75
86500000	1,63	1,34	1,23	1,02	1,03	1,08	2,09	3,23	3,41	4,65	4,46	2,48	1,45
86580000	2,48	2,15	1,96	1,90	1,69	1,80	2,82	4,82	4,66	5,43	5,22	3,82	2,48
86745000	1,45	1,20	0,75	0,80	0,70	0,80	1,88	5,15	4,29	5,12	4,69	2,44	1,19
86895000	3,47	2,60	2,42	2,66	3,15	3,39	4,07	6,22	5,89	6,42	5,89	4,27	2,65
86950000	4,29	3,76	4,25	4,09	3,98	5,29	7,49	6,87	9,00	6,45	5,02	2,74	3,21
87160000	1,65	1,15	1,42	1,21	1,31	1,23	1,80	3,07	3,40	4,17	3,82	2,35	1,39
87270000	3,03	2,15	2,43	2,21	3,26	3,53	4,38	5,37	3,97	4,89	4,68	3,19	2,34
87374000	2,22	1,14	1,92	1,67	2,18	1,75	2,95	5,08	4,71	5,77	5,08	2,85	1,51
87380000	2,95	1,79	2,25	2,16	2,39	2,85	4,52	5,97	5,72	6,24	6,10	3,52	2,15
87398800	1,48	1,09	1,28	1,28	1,19	1,62	1,62	4,69	3,23	2,36	1,98	1,81	1,25
87401600	2,10	1,78	1,65	1,36	1,44	2,26	2,87	6,58	6,23	1,46	4,37	2,07	1,87

Em análise da Tabela 6, observa-se a ocorrência da maior Q_{95} específica com base na série diária nas Estações 85642000 (Passo São Lourenço), 85400000 (Dona Francisca), 86950000 (Taquari), 85080000 (Espumoso) e 86895000 (Posto Mariante). Esse comportamento se deve as características gerais dessas bacias: localizam-se em rios constituídos historicamente pelo grande volume de água em seu fluxo, Rio Jacuí e Rio Taquari; possuem a maior extensão do curso d'água principal; contemplam o maior comprimento total dos rios principais; e possuem barramento hidrelétricos com reservatório d'água à montante do ponto de monitoramento fluviométrico (Estação).

Com base na série histórica de dados, cabe citar que a Estação 85642000 (no Rio Jacuí) possui série histórica de 1981-2018, a Estação 85400000 (no Rio Jacuí) de 1940-2018, a Estação 86950000 (no Rio Taquari) de 1931-2014, 85080000 (no Rio Jacuí) de 1941-1970, e a Estação 86895000 (no Rio Taquari) de 1959-2014. Nesse sentido, quatro das cinco Estações supracitadas contemplam um mesmo período da série e a mensuração é realizada a mais de 30 anos proporcionando uma consolidada base de dados.

Considerando a eventual influência da precipitação acumulada anual diante da maior Q_{95} específica, pode-se citar que não houve uma relação direta para as Estações 64200000 (Passo São Lourenço), 85400000 (Dona Francisca), 86950000 (Taquari) e 86895000 (Posto Mariante), porém a Estação 85080000 (Espumoso) apresentou a maior precipitação acumulada anual (2.173 mm) dentre as 21 Estações estudadas.

As Estações 85830000 (Santa Cruz - montante) no rio Pardinho, 85470000 (Ponte São Gabriel) no rio Vacacaí, 85600000 (Passo das Tunas) no rio Vacacaí e 85735000 (Candelária - montante) no rio Pardo apresentaram os menores valores da Q_{95} específica, esse comportamento pode ser explicado individualmente pelos seguintes aspectos: menor comprimento do curso d'água principal e menor comprimento total dos rios principais;

menor declividade média da bacia; maior uso de áreas úmidas e rios/lagos; ausência de barramentos hidrelétricos à montante.

Considerando a série histórica de dados, cabe citar que a Estação 85830000 possui série histórica entre 1979-2018, a Estação 85470000 entre 1967-2018, a Estação 85600000 entre 1940-2018. A mensuração é realizada a mais de 40 anos proporcionando uma consolidada e consistente base de dados. Porém, para a Estação 85735000 a série histórica contempla dados entre 2002-2018.

A Estação 85830000 apresentou um dos maiores índices de cobertura florestal (69,3%), fator que atua inversamente a vazão, diante da maior capacidade de infiltração de água na floresta e menor escoamento superficial. Em contraponto, a Estação 85080000 apresentou um dos menores índices de florestas (13,2%) e dentre os maiores índices de agricultura/campo (83,8%), estando contemplada entre as maiores vazões específicas.

As Estações 85400000 (Dona Francisca), 85642000 (Passo São Lourenço), 85600000 (Passo das Tunas) e 85080000 (Espumoso) representam os maiores índices do uso do solo com massa d'água (rios e lagos). Três delas estão abarcadas pela maior Q_{95} específica, tal fato se deve a existência de barramentos hidrelétricos à montante. Entretanto, para a 85600000 se refere às barragens de irrigação existentes na região.

Nos meses de Julho a Outubro verificou-se os maiores valores da Q_{95} específica conforme os dados obtidos para as Estações Fluviométricas, em virtude das características do clima e sazonalidade pluviométrica no Rio Grande do Sul. Entretanto, há situações especiais no comportamento da vazão em Estações que possuem barramentos hidrelétricos ou barragens para irrigação à montante, fato que condicionada uma regulação do volume d'água ao longo do tempo.

Tabela 7. Vazão específica com base na série mensal, RHG, RS.

Código da Estação	Q_{95} - Cálculo da Vazão Específica - Série mensal por ÁREA ($Q/A = L \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$)												
	Completa	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Set.	Out.	Nov.	Dez.
85080000	4,98	3,75	2,69	3,38	4,58	2,60	4,62	6,02 10,5	5,35	5,25	8,06	4,95	3,71
85400000	5,51	4,89	4,70	4,04	3,83	4,06	5,89	0	9,00	10,93	10,57	6,80	5,17
85470000	1,41	0,77	0,90	1,00	1,09	1,26	1,73	2,92	2,88	3,92	4,01	2,36	1,17
85480000	1,17	0,67	0,51	0,90	0,89	1,21	1,40	2,10	3,14	4,12	4,05	1,92	0,71
85600000	1,36	0,81	1,10	1,07	1,30	1,26	1,62	2,52	3,22	4,03	3,88	1,68	0,92
85642000	8,97	5,42	7,80	9,34	8,86	6,48	6,63	9,67 13,7	7,91	9,60	10,84	8,39	7,84
85735000	1,51	1,82	0,83	0,90	1,34	1,72	2,16	3	7,84	9,03	7,08	3,46	1,16
85830000	1,33	0,42	0,39	0,87	0,88	0,91	2,37	8,25	1,68	9,54	6,62	1,35	0,77
86410000	2,60	2,17	1,68	1,53	1,61	2,12	3,08	8,48	6,35	11,70	6,95	5,11	2,26
86420000	3,56	3,31	2,78	2,22	1,96	1,95	4,26	7,76	7,10	10,41	7,82	6,34	3,56
86500000	2,45	2,16	1,76	1,35	1,32	1,71	3,59	6,92	4,22	7,80	5,13	3,69	2,07
86580000	3,25	2,72	2,20	2,36	1,98	1,88	4,49	8,34	5,95	8,46	5,63	4,33	3,33
86745000	2,21	1,90	1,11	1,18	1,17	1,61	2,93	9,57	5,54	8,94	6,12	3,78	1,45
86895000	4,47	3,41	3,14	3,77	4,27	4,31	5,73	9,76	6,30	9,67	7,68	4,43	3,15

								11,0					
86950000	3,65	3,58	1,67	3,12	6,06	1,22	0,14	0	8,57	4,25	7,10	3,56	3,77
87160000	2,19	1,60	1,86	1,33	1,61	1,65	3,22	4,53	4,26	6,60	5,42	2,93	1,66
87270000	3,76	2,84	2,89	2,98	3,51	4,04	5,69	7,43	3,90	6,93	6,49	3,65	3,12
87374000	2,96	1,29	1,88	2,62	2,54	1,71	4,21	8,63	7,60	11,30	4,64	2,88	2,14
87380000	3,66	2,20	2,38	2,34	2,71	2,92	7,17	8,76	8,03	10,62	8,17	4,52	2,42
87398800	1,63	1,13	0,50	1,50	0,13	1,70	2,83	9,08	8,92	5,50	4,24	2,60	1,53
87401600	3,53	0,74	1,20	2,79	1,12	1,83	10,10	5,03	12,76	7,29	8,29	5,28	2,32

Considerando os dados da Tabela 7, o maior valor para a Q_{95} específica, com base na série mensal, ocorreu na Estação 85642000 (Passo São Lourenço), 85400000 (Dona Francisca), 85080000 (Espumoso) e 86895000 (Porto Mariante). Esse fato se deve as características intrínsecas das bacias, as quais: localizam-se em rios constituídos historicamente pelo grande volume de água em seu fluxo, Rio Jacuí e Rio Taquari; possuem a maior extensão do curso d'água principal; contemplam o maior comprimento total dos rios principais; e possuem barramento hidrelétricos com reservatório d'água à montante do ponto de monitoramento fluviométrico (Estação).

As menores Q_{95} específica se deram nas Estações 85480000 (Passo do Rocha) no rio Vacacaí, 85830000 (Santa Cruz - montante) no rio Pardinho, 85600000 (Passo das Tunas) no rio Vacacaí e 85470000 (Ponte São Gabriel) no rio Vacacaí. Outra vez esse comportamento pode ser explicado individualmente pelos seguintes aspectos: maior uso de agricultura e campo e menor declividade média; menor comprimento do curso d'água principal e menor comprimento total dos rios principais; maior uso de áreas úmidas e rios/lagos; ausência de barramentos hidrelétricos à montante.

A maior precipitação acumulada anual ocorreu na Estação 85080000 (Espumoso) com 2.173,0 mm. Considerando que o uso da terra para agricultura e campo per fez 83,8%, pode-se inferir que houve influência no comportamento da vazão, ao mesmo tempo em que há barramento hidrelétrico à montante do ponto de monitoramento no Rio Jacuí.

Diante da vazão específica para a Q_{95} , Euclides (2001) destaca que além dos resultados diretos que fornece para o estudo do aproveitamento das disponibilidades do curso d'água, as curvas de permanência constituem um instrumento valioso de comparação entre as características distintas das bacias hidrográficas, colocando em evidência os efeitos do relevo, da vegetação e uso da terra e da precipitação, sobre a distribuição das vazões. A curva de permanência pode ser estabelecida baseando-se em valores diários, semanais ou mensais. Esta função hidrológica é utilizada em estudo hidrelétrico, navegação, qualidade da água dentre outros. Por exemplo, em sistemas de captação a fio d'água, isto é, sem reservatório de acumulação, usualmente considera vazões com intervalo diário e 95% de permanência.

4.3 Atributos físicos de influência

Os atributos físicos para cada uma das 21 bacias obtidos a partir da análise espacial da estatística zonal são: A (área, em Km²); H (altitude média, em Metros); Hr (desnível altimétrico, em Metros); S (declividade média, em %); L (comprimento do rio principal, em Km); LE (comprimento total dos rios principais, em Km); D (densidade da drenagem, em Km/Km²), Tabela 8.

Tabela 8. Atributos físicos das bacias referentes às 21 Estações fluviométricas, RHG, RS.

Estacao	A (km ²)	H (m)	Hr (m)	S (%)	L (km)	LE (km)	D (km ²)
85080000	2957	530,2	424	7,03	131,3	312.115,0	105,6
85400000	14016	412,6	738	8,61	329,9	1.490.299,1	106,3
85470000	969	185,3	365	4,37	79,4	93.568,2	96,6
85480000	2974	166,8	408	5,12	131,7	226.400,1	76,1
85600000	6758	92,3	415	3,86	220,4	444.332,2	65,8
85642000	27432	168,7	718	7,57	413,4	1.081.360,2	39,4
85735000	1379	447,2	695	19,47	123,8	149.245,0	108,2
85830000	789	400,4	681	23,57	74,7	71.737,8	90,9
86410000	2820	774,5	620	8,5	136,4	332.758,6	118,0
86420000	317	735,2	274	7,87	43,6	23.182,9	73,2
86500000	1818	677,9	679	14,22	140,9	208.767,2	114,8
86580000	2466	563,1	783	16,17	202,4	344.557,3	139,7
86745000	790	596,4	741	19,73	104,5	89.472,3	113,3
86895000	24602	626,0	1263	16,98	524,7	2.893.831,8	117,6
86950000	25801	87,9	665	6,49	545,0	217.718,5	8,4
87160000	2027	479,2	969	15,97	128,9	202.791,5	100,0
87270000	4472	300,5	977	18,53	200,1	303.521,3	67,9
87374000	1461	369,1	974	21,07	78,5	138.108,1	94,5
87380000	2847	274,1	940	18,08	118,9	141.413,5	49,7
87398800	121	94,1	364	6,31	18,8	7.595,6	62,5
87401600	198	121,7	376	10,03	29,2	12.912,9	65,1

Legenda: A (área, em km²); H (altitude média em metros); Hr (desnível altimétrico em metros); S (declividade média, em %); L (comprimento do rio principal, em km); LE (comprimento total dos rios principais, em km); D (densidade da drenagem, em km/km²).

Em face dos valores constantes na Tabela 8, pode-se inferir a Estação fluviométrica 85642000 possui a maior área (27.432 km²), altitude média de 168,7 m, desnível altimétrico de 718 m e extensão máxima do curso d'água de 413 km.

A Estação 86895000 possui a área de 24.602 km, maior desnível altimétrico de 1.263 m, altitude média de 626,0 m e extensão do curso d'água de 524 km. A Estação 86950000

possui área de 25.801 km², com a maior extensão do curso d'água de 544 km, altitude média de 87,9 m e desnível altimétrico de 665 m.

Cita-se que o maior comprimento total dos rios principais ocorre na bacia da Estação 86895000 com cerca de 2.893.831,8 km de extensão. A maior densidade de drenagem corresponde à 139,7 pela bacia da Estação 86580000, com o total da malha de drenagem de 334.557,3 km e área de 2.466 km².

Igualmente, as regressões múltiplas, são estabelecidas entre as séries de vazões e características físicas e climáticas como área de drenagem, comprimento do rio principal, densidade de drenagem, declividade média do rio principal e precipitação média da bacia (TUCCI, 2002; PINTO, 2006; LEMOS, 2006 *apud* PEREIRA, 2012).

Segundo Rodriguez (2008, *apud* Pereira, 2012), as características físicas mais utilizadas nos estudos de regionalização pelo método tradicional são a área de drenagem, o comprimento do rio principal, a densidade de drenagem e a declividade média do rio principal. Vendrusculo (2005) utilizou como variáveis independentes as principais características fisiográficas das bacias hidrográficas: área de drenagem; comprimento do rio principal; coeficiente de compacidade; densidade de drenagem; e a declividade do rio principal. Em consonância com o utilizado na metodologia do presente estudo.

O conhecimento das características físicas de uma bacia hidrográfica tem importância fundamental para o entendimento do comportamento hidrológico de uma região. As características físicas comumente aplicadas em estudos de regionalização são a área de drenagem, a densidade de drenagem, o comprimento do curso d'água principal e sua declividade (OLIVEIRA, 2013).

Nesse contexto, considerando os atributos físicos elencados no presente trabalho é possível inferir que são essenciais como variáveis independentes no processo de regionalização da Q₉₅. Uma vez que as sete variáveis físicas determinadas na Tabela 8 apresentam informações importantes para a aplicabilidade na modelagem de regionalização.

4.4 Atributos ambientais de influência

Os atributos ambientais foram obtidos para as áreas hidrográficas de cada Estação fluviométrica, os quais foram agrupados em 5 (cinco) temas de uso: F (% florestas); AC (% agricultura e campo); U (% urbano); AU (% áreas úmidas); RL (% rios e lagos), Tabela 9.

Tabela 9. Atributos ambientais das bacias referentes às 21 Estações fluviométricas, RHG, RS.

Estacao	F	AC	U	AU	RL
85080000	13,2	83,8	1,6	0,00	1,4
85400000	14,5	82,5	0,7	0,01	2,2
85470000	10,4	88,0	0,1	0,09	1,3
85480000	15,2	82,9	0,4	0,07	1,3
85600000	13,6	83,8	0,7	0,10	1,7
85642000	15,8	81,6	0,7	0,04	1,9
85735000	50,2	49,2	0,4	0,00	0,1
85830000	69,3	30,4	0,3	0,00	0,1
86410000	24,5	75,1	0,2	0,00	0,1
86420000	20,0	79,7	0,2	0,00	0,1
86500000	32,8	65,9	1,1	0,00	0,1
86580000	36,8	62,1	0,8	0,00	0,3
86745000	57,1	42,4	0,4	0,00	0,1
86895000	47,4	51,0	1,2	0,00	0,3
86950000	46,9	51,5	1,2	0,01	0,4
87160000	57,0	39,6	2,7	0,00	0,7
87270000	65,6	31,6	2,4	0,02	0,4
87374000	70,1	29,4	0,4	0,00	0,0
87380000	67,3	29,9	2,7	0,02	0,1
87398800	22,8	74,2	0,5	2,31	0,3
87401600	43,2	51,4	2,4	2,89	0,1

Legenda: F (% florestas); AC (% agricultura e campo); U (% urbano); AU (% áreas úmidas); RL (% rios e lagos).

Considerando os dados da Tabela 9 alusiva aos atributos ambientais mensurados, pode-se concluir que a Estação fluviométrica 87374000 possui a maior área ocupada pela classe Florestas (F), cerca de 70,1%, seguida pela Agricultura/Campo (AC) com 29,4%. A bacia localiza-se na porção Leste da Região Hidrográfica do Guaíba, no qual há significativa ocorrência de remanescentes de vegetação da Mata Atlântica, no rebordo da Serra Geral (Rolante, Riozinho, São Francisco de Paula).

A Estação 85080000 representou a classe AC com a maior ocupação, em 88,0%, e com F em 10,4%. A bacia localiza-se na porção Norte da RHG, caracterizada pela consolidação histórica da agricultura, bem como com ocorrência de formações campestres (região da produção de grãos: Tapera, Victor Graeff, Não-Me-Toque, Ibirapuitã, Nicolau Vergueiro, Santo Antônio do Planalto, Ernestina, Tio Hugo, Carazinho e Passo Fundo).

Diante das informações, a Estação 87380000 e a Estação 87160000 apresentaram o maior uso para a classe Urbano (U), em cerca de 2,7%. As duas bacias contemplam na sua área de distribuição núcleos urbanos de expressiva aglomeração e representação construtiva

na superfície terrestre, sendo eles: Campo Bom, Sapiranga, Parobé, Taquara (Rio dos Sinos) e Caxias do Sul (Rio Caí).

Para Ferreira (2010) as regiões hidrologicamente homogêneas habitualmente não se estendem por grandes áreas, devido à variabilidade do clima, da topografia, da cobertura vegetal e do tipo de solo. Contudo, a delimitação de áreas muito reduzidas resulta em uma carência de dados que dificulta a obtenção de estimativas confiáveis.

Diante do uso do solo, Souza *et al.* (2017) cita que as áreas com interferência humana, que passaram por algum tipo de modificação, contribuíram para a modificação nos componentes do ciclo hidrológico local, principalmente no escoamento superficial e na infiltração da água no solo; com isso, a vazão média anual tendeu a aumentar de 1985 a 1992, devido ao impacto do desmatamento.

Nesse sentido, a determinação do uso e cobertura da terra para a modelagem a partir da regressão múltipla pode ser utilizada, na medida em que influencia no comportamento da distribuição da Q_{95} .

4.5 Precipitação pluviométrica estimada por satélite

Os dados da precipitação pluviométrica foram obtidos com uso de imagem do TRMM com série histórica entre 2000 e 2018, com resultado para a Precipitação Acumulada média (mm) Mensal provenientes da análise de cada respectivo mês, Figuras 27 a 38. A representação de paleta de cores é conforme o limiar da chuva acumulada entre todos os meses e a tabela com o valor da precipitação mínima, média e máxima no respectivo mês.

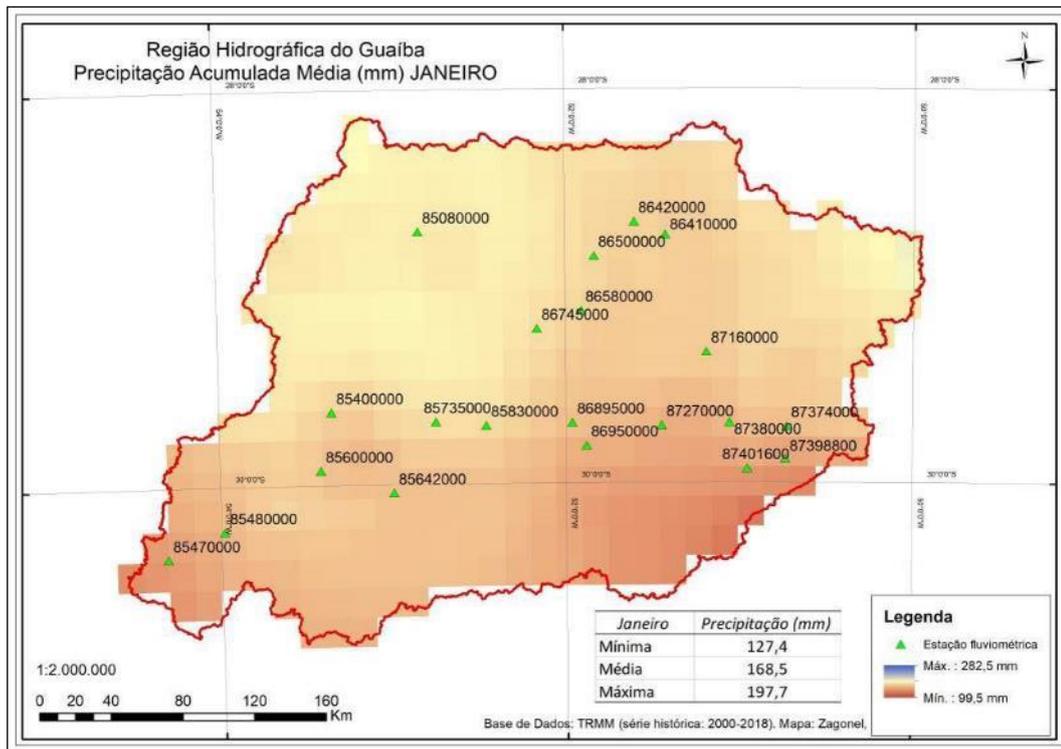


Figura 27. Precipitação Acumulada Média (mm) para JANEIRO, RHG, RS.

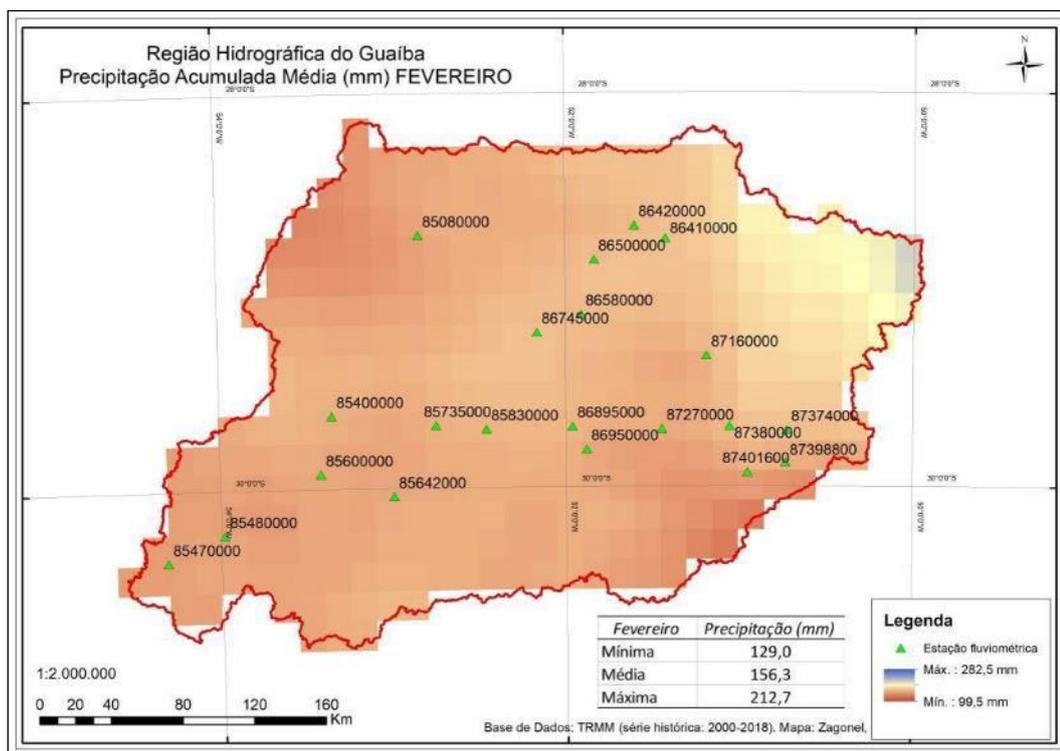


Figura 28. Precipitação Acumulada Média (mm) para FEVEREIRO, RHG, RS.

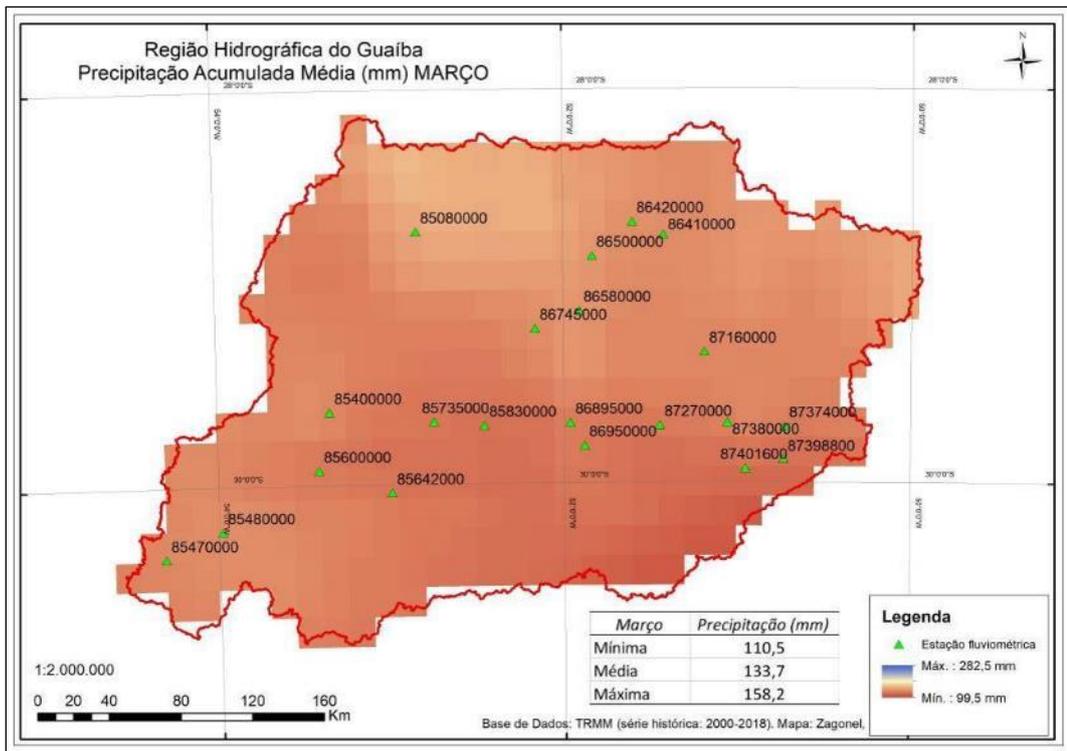


Figura 29. Precipitação Acumulada Média (mm) para MARÇO, RHG, RS.

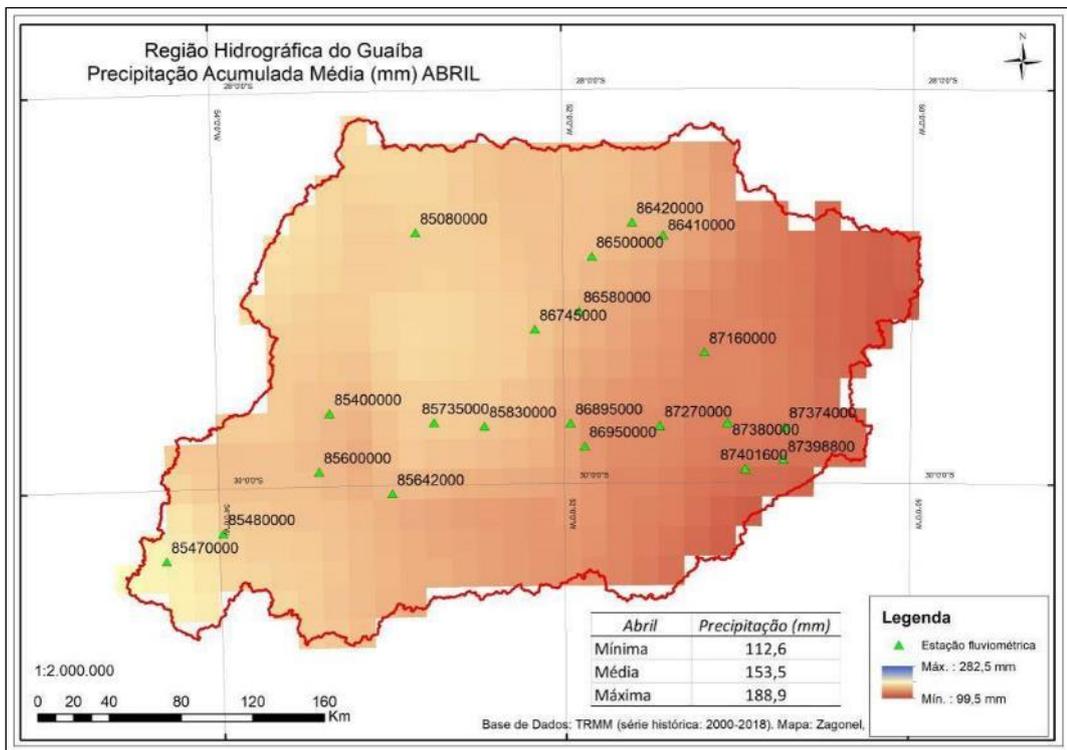


Figura 30. Precipitação Acumulada Média (mm) para ABRIL, RHG, RS.

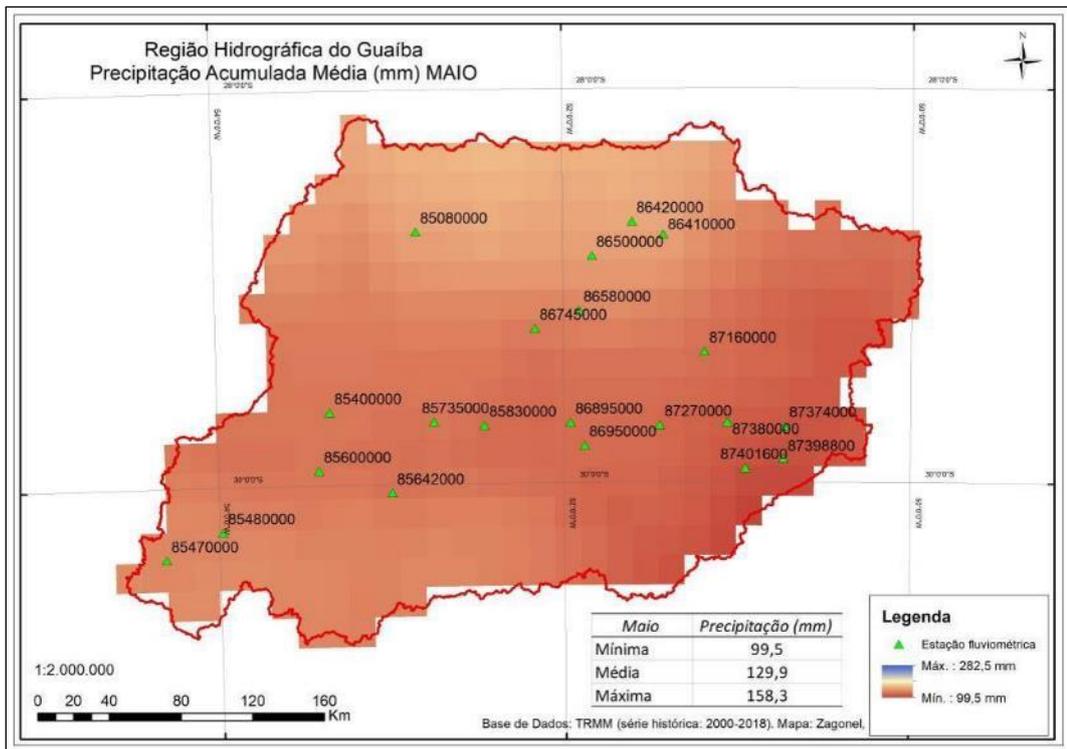


Figura 31. Precipitação Acumulada Média (mm) para MAIO, RHG, RS.

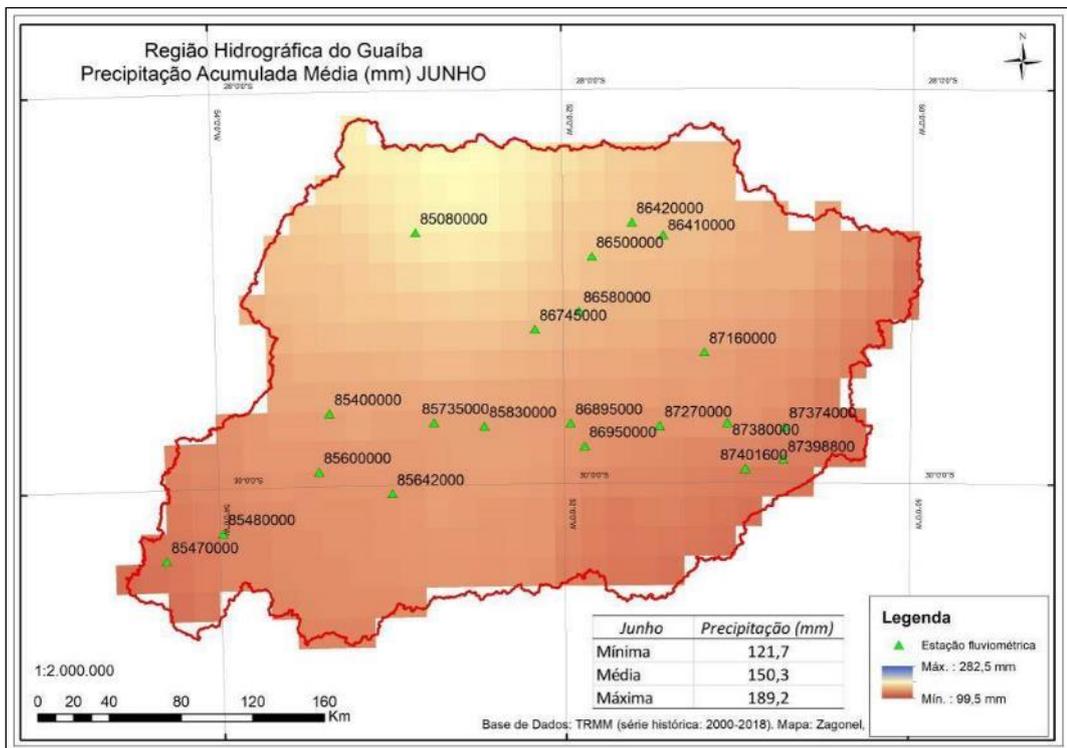


Figura 32. Precipitação Acumulada Média (mm) para JUNHO, RHG, RS.

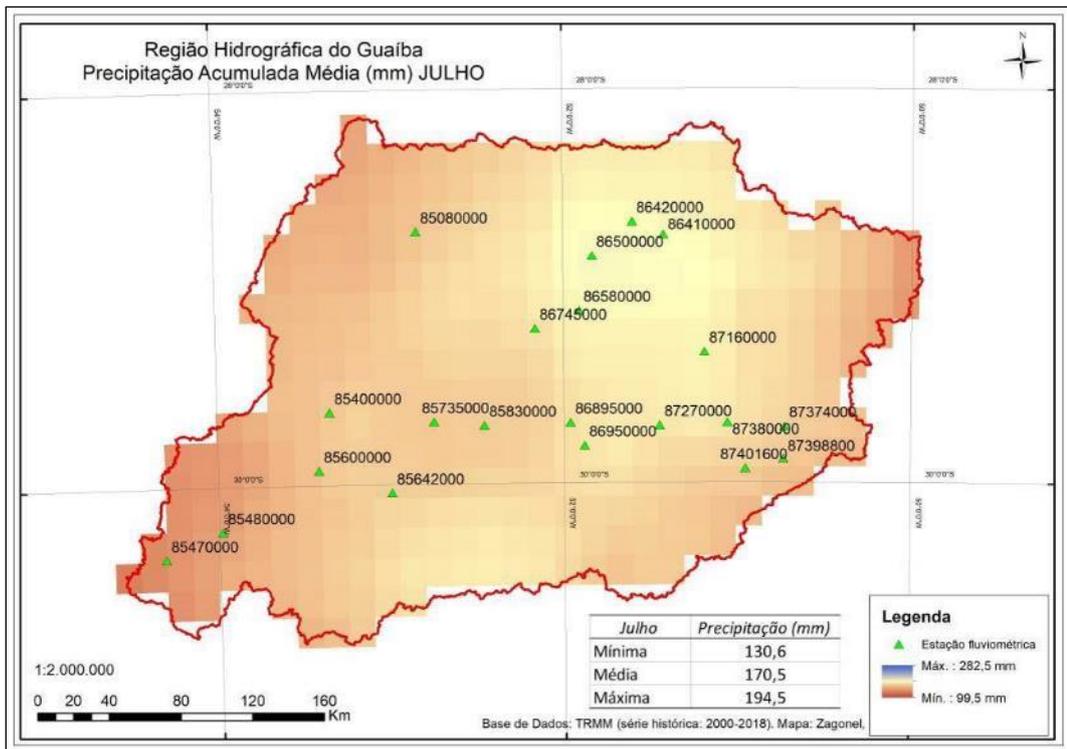


Figura 33. Precipitação Acumulada Média (mm) para JULHO, RHG, RS.

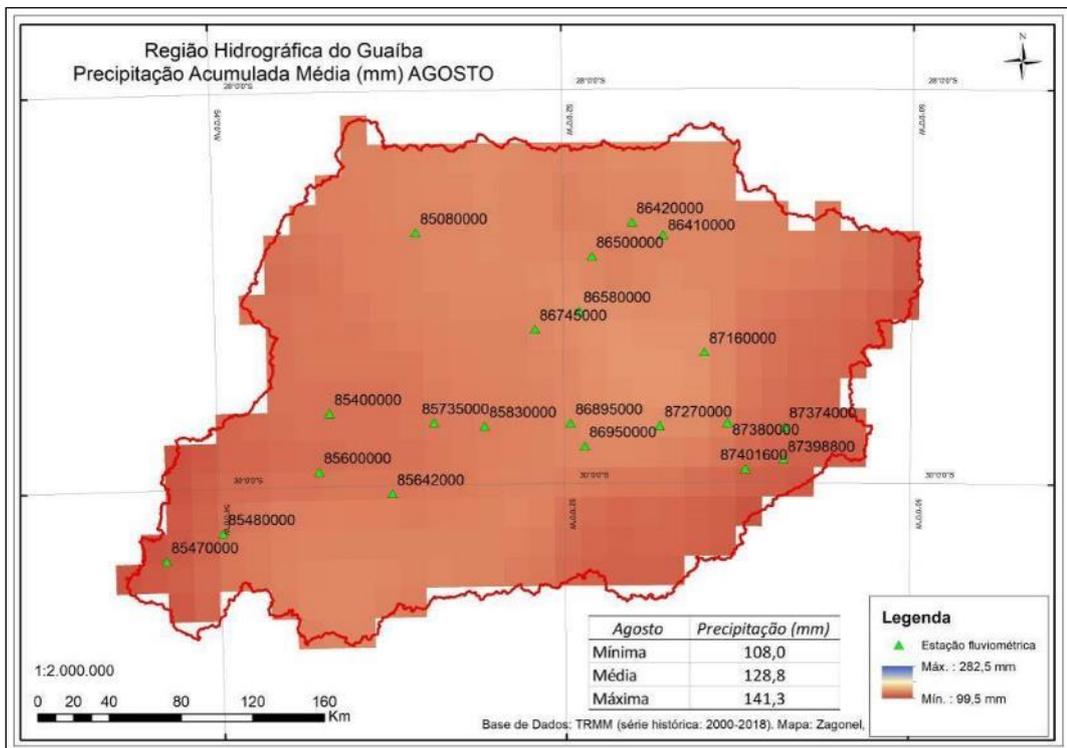


Figura 34. Precipitação Acumulada Média (mm) para AGOSTO, RHG, RS.

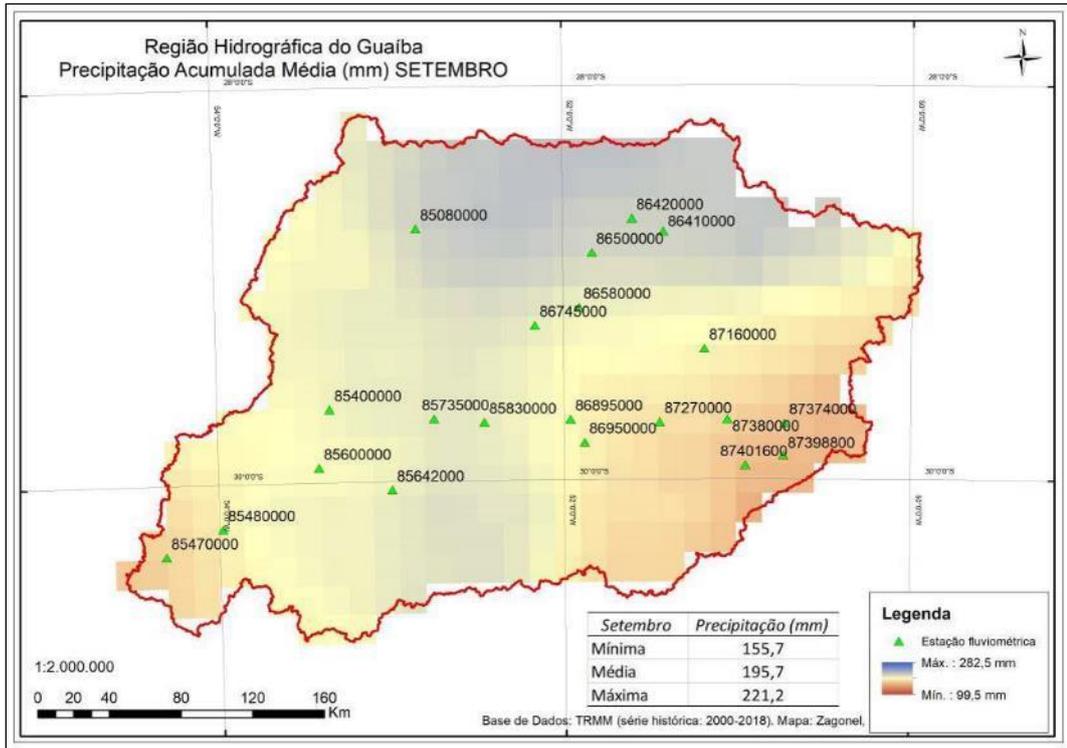


Figura 35. Precipitação Acumulada Média (mm) para SETEMBRO, RHG, RS.

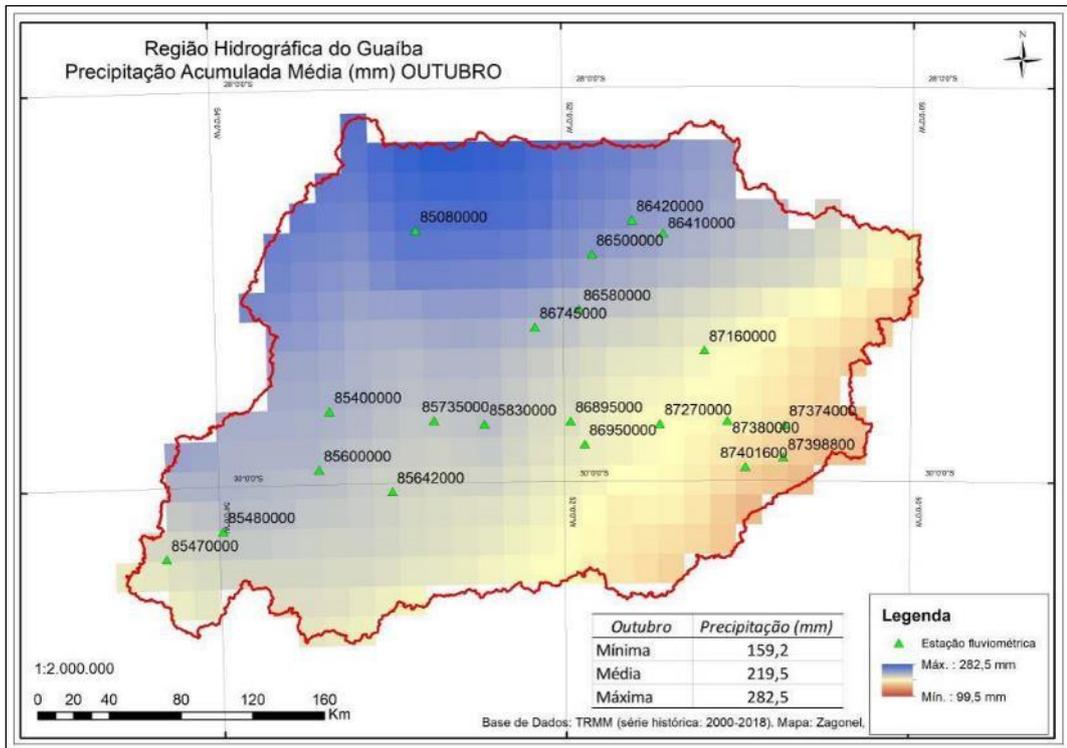


Figura 36. Precipitação Acumulada Média (mm) para OUTUBRO, RHG, RS.

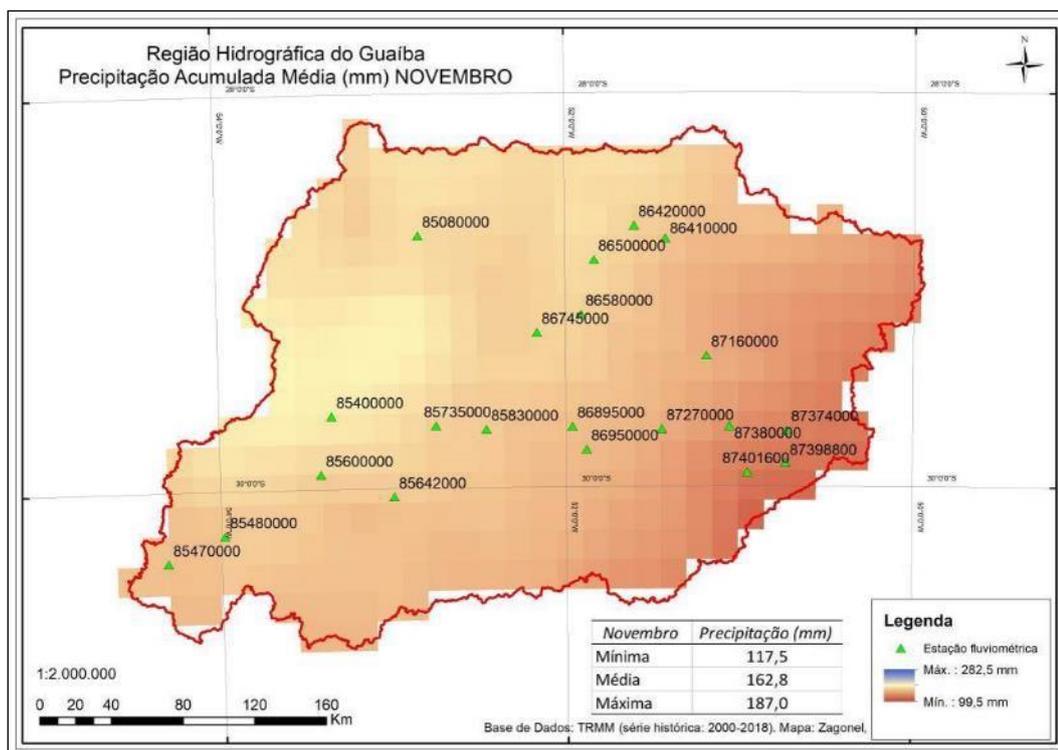


Figura 37. Precipitação Acumulada Média (mm) para NOVEMBRO, RHG, RS.

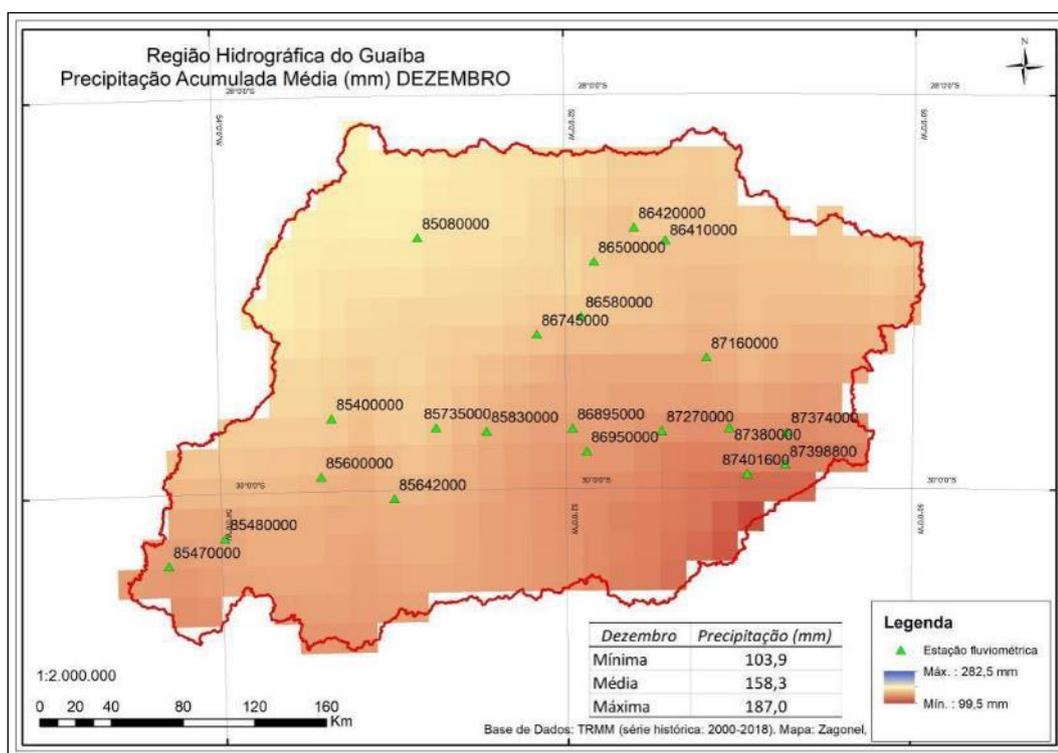


Figura 38. Precipitação Acumulada Média (mm) para DEZEMBRO, RHG, RS.

Em face das figuras referentes a Precipitação Acumulada Média Mensal, considerando o limiar, ratifica-se que o menor acumulado de chuva perfez 99,5 mm é alusivo mês de Maio e o maior 282,5 mm ao mês de Outubro. Nesse sentido, a paleta de cores tende

para a cor Vermelha quando a precipitação acumulada do mês for mais próxima de 99,5 mm (mín.) e inferior a 191,0 mm, e tende para a cor Azul quando for superior a 191,0 mm e mais próxima de 282,5mm (máx.). Ou seja, de forma prática para o acumulado de chuva menor que 191,0 mm = Vermelho, maior que 191,0 mm = Azul.

Perante o resultado da Precipitação Acumulada média (mm) Anual, destaca-se que houve a maior incidência de chuvas na porção Norte-Nordeste da RHG. Além disso, a precipitação acumulada anual mínima perfaz 1.578,97 mm, a média 1.955,95 mm e a máxima 2.197,07 mm, conforme Figura 18.

Destarte, auferiu-se os resultados para a Precipitação Acumulada média (mm) Anual em milímetros e para a Precipitação Acumulada média (mm) Mensal, conforme os valores correspondentes na Tabela 10.

Tabela 10. Precipitação acumulada referentes às 21 Estações fluviométricas, RHG, RS.

Estação	Área (km²)	Precipitação Acumulada média (mm) - série histórica TRMM 2000 a 2018												
		Anual	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
85080000	24602	2173,0	183,4	152,4	152,5	168,8	152,3	185,4	169,1	135,2	217,2	273,5	174,5	178,9
85400000	2847	2065,2	183,1	146,4	136,3	170,7	137,3	166,6	160,3	128,4	199,6	250,7	178,6	178,8
85470000	4472	1810,7	141,0	146,2	132,6	186,2	136,5	123,7	136,1	111,6	170,1	199,8	161,1	141,1
85480000	2027	1859,4	149,8	147,8	135,7	180,4	135,6	128,7	143,1	115,6	177,0	210,2	163,2	146,7
85600000	25801	1918,4	163,9	148,5	135,2	167,6	128,9	136,6	147,5	117,8	187,0	227,5	172,4	159,1
85642000	1461	1950,5	167,6	151,6	132,8	163,6	128,9	141,9	163,0	126,8	194,3	222,5	172,2	158,6
85735000	121	2033,1	181,8	155,4	129,3	171,1	128,8	158,5	171,0	129,5	203,3	230,2	176,8	169,5
85830000	198	2012,2	181,8	160,0	127,2	169,7	126,2	154,7	170,0	130,8	203,0	225,8	171,8	163,7
86410000	2466	2086,7	172,1	165,9	138,6	152,9	148,9	163,2	184,1	136,4	216,6	242,9	168,7	167,8
86420000	790	2111,8	172,4	159,6	141,0	161,1	151,8	166,6	187,5	135,0	217,2	252,0	172,9	165,9
86500000	1818	2138,1	175,7	159,3	145,3	163,3	151,3	170,7	187,1	133,8	217,9	257,6	175,5	171,2
86580000	2820	2144,2	180,2	156,2	149,8	162,6	149,0	175,8	180,6	135,9	216,3	261,8	172,8	173,9
86745000	317	2111,9	181,6	157,4	144,0	166,0	141,6	171,6	179,2	134,9	213,1	251,9	169,8	171,9
86895000	789	1977,0	174,6	170,1	138,0	143,2	127,8	152,8	177,7	131,7	200,0	214,3	158,0	161,8
86950000	1379	1913,9	165,3	156,1	125,5	155,2	120,4	145,2	172,9	133,0	193,4	210,1	162,7	147,9
87160000	27432	1870,7	171,0	170,4	134,9	130,8	117,5	144,8	176,5	126,9	182,8	189,2	144,9	155,4
87270000	6758	1883,1	164,0	156,3	132,6	137,6	120,8	145,1	182,6	137,8	182,8	195,4	154,0	148,3
87374000	2974	1714,5	160,7	159,8	128,8	124,1	109,8	130,1	165,9	116,6	161,6	167,6	128,2	137,8
87380000	969	1806,7	163,9	165,9	132,9	131,0	113,3	140,0	175,3	123,3	171,4	181,6	138,6	144,7
87398800	14016	1703,4	151,2	155,1	125,2	126,1	107,4	133,0	169,0	117,7	161,5	173,1	128,4	132,6
87401600	2957	1733,8	153,3	157,4	126,7	127,7	109,0	134,9	172,3	119,9	164,3	177,5	131,3	135,9

Diante dos valores expressos na Tabela 10 pode-se inferir que a Estação fluviométrica 85080000 apresentou o comportamento com a maior precipitação acumulada média anual, cerca de 2.173,0 mm, a qual possui área de 24.602 km². Os meses de Setembro

e Outubro denotam o período com maior precipitação acumulada média mensal para essa bacia com valores de 217,2 mm e 273,5 mm, respectivamente.

A Estação 87398800 apresentou a menor precipitação acumulada média anual, 1.703,4 mm em área de 14.016 km². Os meses de Maio e Agosto representaram a menor precipitação acumulada média mensal nessa bacia, com valores de 107,4 mm e 117,7 mm, respectivamente. A precipitação acumulada média mensal alcançou o maior valor para o mês de Outubro, 273,5 mm para a bacia da Estação 85080000, e cerca de 261,8 mm para Estação 86580000 (área de 2.820 km²).

A precipitação acumulada média mensal representou o menor valor para o mês de Maio na bacia da Estação 87398800, com 107,4 mm em área de 14.016 km², e para o mês de Agosto na Estação 85470000 com cerca de 111,6 mm em área de 4.472 km².

Para o mês de Agosto os dados denotam que ocorreu um baixo volume de chuvas, nesse sentido, houve reavaliação dos dados, repetição do procedimento de análise em ambiente SIG, e como resultado, verificou-se que são consolidados, não caracterizando erro no procedimento de obtenção dos dados. Nesse contexto, para Pereira (2013) o mês de Agosto representou o menor volume de precipitação pluviométrica.

A precipitação acumulada média anual alcançou o valor superior à 2.000 mm – no período da série histórica de 2000-2018 - na porção Norte-Noroeste da Região Hidrográfica do Guaíba. Com base nos dados de precipitação obtidos pelo emprego de técnicas de sensoriamento remoto há evidência de sazonalidade entre período chuvoso (Julho-Outubro) e período seco (Dezembro-Março) na RHG.

Destaca-se que a precipitação total anual é mais utilizada tanto para as vazões mínimas quanto vazões médias, pois sua variação reflete diretamente no comportamento das vazões específicas, representando assim uma melhoria do modelo de regionalização (BAENA, 2004 *apud* GASQUES, 2018). Além disso, a Q₉₅ denota uma situação de estiagem na bacia, com isso a precipitação acumulada média anual utilizada na equação de regressão múltipla é uma importante variável independente que deve ser utilizada na modelagem.

Silva *et al.* (2002, *apud* Ferreira, 2010), em estudo de regionalização de vazões para a bacia do rio Paraguaçu, confirmaram que a precipitação total anual foi a variável climática mais expressiva para a representação das vazões mínimas, média de longo período e das vazões correspondentes aos diferentes níveis de permanência.

Fioreze (2008) conclui que os modelos de regionalização que tem a precipitação média na bacia hidrográfica como variável independente não permitiram a obtenção de um

equação para a correção dos valores estimados, indicando que tais equações não são robustas a ponto de serem utilizadas indiscriminadamente.

Considerando a aplicabilidade de dados de precipitação estimada por satélite, Soares *et al.* (2016, *apud* Aires, 2016) citou a superestimativa dos dados do TRMM em relação aos valores observados, com desvio de 34 mm, nas regiões em que se observa menores índices pluviométricos. Entretanto, para Aires (2016) e também para Moreira *et al* (2017) sugerem como possível e viável a utilização das informações oriundas do TRMM para a variável precipitação.

Isto posto, infere-se que os dados de precipitação pluviométrica oriundos do TRMM podem ser utilizados como uma variável independente na modelagem de regionalização de vazão, uma vez que representa o comportamento das chuvas ao longo do tempo na Região Hidrográfica do Guaíba.

4.6 Análise de correlação entre as variáveis

Com o intuito de avaliar a existência e intensidade do relacionamento entre a Q_{95} observada e a Q_{95} específica e as variáveis estudadas considerando a série diária e mensal, procedeu-se a análise de correlação linear, conforme a Tabela 11. O coeficiente de correlação, também chamado de correlação linear ou *r de Pearson*, é um grau de relação entre duas variáveis quantitativas e exprime a associação entre elas e da proximidade dos dados a uma reta, de valores situados entre -1 e 1.

Tabela 11. Cálculo da correlação da Q_{95} entre as variáveis estudadas, RHG, RS.

Variável	A	H	Hr	S	L	LE	D	P	F	AC	U	AU	RL
$Q_{95\text{ obs}}$ (sér. diária)	0,95	-0,23	0,27	-0,22	0,85	0,58	-0,44	0,04	-0,17	0,17	-0,01	-0,17	0,41
$Q_{95\text{ obs}}$ (sér. mensal)	0,91	-0,19	0,28	-0,19	0,78	0,61	-0,37	0,05	-0,20	0,19	-0,03	-0,16	0,45
$Q_{95\text{ esp}}$ (sér. diária)	0,77	-0,08	0,23	-0,24	0,68	0,49	-0,37	0,13	-0,20	0,19	0,19	-0,15	0,42
$Q_{95\text{ esp}}$ (sér. mensal)	0,67	0,01	0,25	-0,13	0,55	0,50	-0,24	0,18	-0,18	0,16	0,21	-0,09	0,39

Legenda: A (área); H (altitude média); Hr (desnível altimétrico); S (declividade média); L (comprimento do rio principal máximo); LE (comprimento total dos rios principais); D (densidade da drenagem); P (precipitação acumulada); F (% florestas); AC (% agricultura e campo); U (% urbano); AU (% áreas úmidas); RL (% rios e lagos).

Em análise a Tabela 11, destaca-se que houve maior correlação positiva – *quando o valor da variável dependente aumenta à medida que o valor da variável independente também aumenta* - da Q_{95} observada com a variável Área (A) (série diária 0,95; série mensal

0,91) e com o Comprimento do rio principal (L) (série diária 0,85; série mensal 0,78). Igualmente, ocorreu a maior correlação positiva da Q_{95} específica com a variável Área (série diária 0,77; série mensal 0,67) e com o Comprimento do rio principal (série diária 0,68; série mensal 0,65).

Ao mesmo tempo, verificou-se que houve associação positiva da Q_{95} observada com a variável Comprimento total dos rios principais (LE) (série diária 0,58; série mensal 0,61) e da Q_{95} específica para a mesma variável (série diária 0,49; série mensal 0,50). Esses resultados estão em conformidade com o esperado, uma vez que as variáveis Área, Comprimento do rio principal, Comprimento total dos rios principais apresentam influência no comportamento da vazão.

Além disso, houve associação positiva da Q_{95} observada com a variável de Desnível altimétrico (Hr) (série diária 0,27; série mensal 0,28), e da Q_{95} específica com a mesma variável (série diária 0,23; série mensal 0,25). Salienta-se que essa associação positiva denota a influência da variação de altitude – desnível altimétrico – no comportamento da vazão, infere-se que quanto maior o desnível altimétrico existe a tendência de maior escoamento superficial, o qual ocasiona o maior fluxo d'água para os cursos d'água, influenciando diretamente a vazão.

Para as variáveis Altitude Média (H), Declividade Média (S) e Densidade de Drenagem (D) o grau de associação apresentou resultados negativos - *o valor da variável dependente aumenta à medida que o valor da variável independente diminui* - esse fato se deve a baixa influência entre as variáveis e a vazão em cada bacia objeto de estudo.

Destaca-se que houve maior correlação positiva da Q_{95} observada com a variável Rios e Lagos (RL) (série diária 0,41; série mensal 0,45), bem como com a Q_{95} específica com a mesma variável (série diária 0,42; série mensal 0,39). Apesar de caracterizar um valor intermediário esse aspecto representa que há uma associação entre o mapeamento – ocorrência de massas d'água no polígono da bacia – com o comportamento da Q_{95} .

Diante da variável referente ao uso Urbano (U, manchas de ocupação antrópica urbana) houve uma pequena associação positiva da Q_{95} específica resultando em 0,19 (série diária) e 0,21 (série mensal). Salienta-se que para o uso Agricultura e Campo (AC) também se evidenciou a correlação positiva tanto para a Q_{95} observada (série diária 0,17; série mensal 0,19) e Q_{95} específica (série diária 0,19; série mensal 0,16).

Nesse contexto, a associação positiva da Q_{95} com a variável RL, pode ser explicada pela capacidade de ocorrência em grande área, pois denota a existência da própria massa de água que pode ser identificado no mapeamento do uso do solo por meio do SR. A correlação

com os usos U e AC pode ser explicada também pelas próprias características singulares delas, ou seja, a ocupação urbana e o manejo do solo proporcionam uma maior capacidade de escoamento superficial da precipitação, fato que influencia no maior volume de água que pode percorrer por ravinas, sulcos, canais, córregos, riachos até os rios dentro da bacia, ocasionando um incremento na vazão.

Ao mesmo tempo, para a correlação da Q_{95} observada (série diária -0,17; série mensal -0,20) e Q_{95} específica (série diária -0,20; série mensal -0,18) com a variável Florestas (F) obteve-se resultados negativos, isto é, o valor da variável dependente cresce à medida que o valor da variável independente se reduz. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato em que nas áreas com vegetação florestal há maior infiltração no solo, maior capacidade de retenção de água no subsolo, menor potencial de escoamento superficial, menor ocorrência de processos erosivos, formação de ravinas, sulcos e córregos d'água.

Para o uso que contempla as Áreas Úmidas (AU) os dados expuseram uma associação negativa com a Q_{95} observada. Isso era esperado diante das características dessas áreas em armazenar água em seu próprio ambiente, formando um tipo de esponja de retenção de água, e até mesmo retardando a capacidade de escoamento superficial para os cursos d'água.

Diante dos dados auferidos, existe uma associação positiva da Precipitação Acumulada Anual (P) com a Q_{95} observada (série diária 0,04; série mensal 0,05) e Q_{95} específica (série diária 0,13; série mensal 0,18). Salienta-se que é algo esperado, pois a precipitação influencia na dinâmica do comportamento da vazão dentro da bacia hidrográfica. Contudo, há outras variáveis que interagem em graus diferentes de correlação entre a vazão de um curso d'água.

Tabela 12. Cálculo da correlação da Q_{95} entre a Precipitação acumulada mensal, RHG, RS.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Q_{95} obs. (sér. diária)	0,10	-0,13	-0,17	0,06	-0,12	-0,07	-0,03	0,18	0,11	0,08	0,24	0,10
Q_{95} obs. (sér. mensal)	0,13	-0,12	-0,11	0,06	-0,04	0,01	0,01	0,16	0,11	0,06	0,23	0,09
Q_{95} esp. (sér. diária)	0,27	-0,09	-0,04	-0,11	-0,18	0,05	0,37	0,37	0,52	0,42	0,33	0,35
Q_{95} esp. (sér. mensal)	0,46	-0,07	0,00	0,02	-0,02	0,05	0,51	-0,04	0,30	0,25	0,22	0,25

Considerando o exposto na Tabela 12, destaca-se que houve maior correlação da Q_{95} observada com a variável Precipitação acumulado mensal para o mês de Janeiro (série diária 0,10; série mensal 0,13) e ocorreu a maior correlação da Q_{95} específica também ao mesmo mês (série diária 0,27; série mensal 0,46). E, considerando os dados, houve maior associação da Q_{95} observada para o mês de Novembro (série diária 0,24; série mensal 0,23), bem como da Q_{95}

específica com a série diária para o mês de Setembro (0,52) e diante da série mensal para o mês de Julho (0,51).

Isto posto, em face da série histórica de dados pode-se salientar que o desempenho da Q_{95} com a Precipitação acumulada mensal proporciona a maior associação nos meses mais chuvosos do ano, principalmente diante da análise da série diária, os quais melhor representam o comportamento e distribuição da vazão ao longo do tempo. Entretanto, isso não pode ser generalizado, pois há variações possivelmente oriundas de outros fatores que não a interação direta da vazão com a precipitação.

4.7 Equações de regionalização para a RHG

Em face da base de dados da Área e da $Q_{95 \text{ obs.}}$, utilizou-se da estatística de regressão ANOVA de Análise da Variância aplicado aos vinte e um conjuntos de observações. Com o intuito de avaliar a aplicação de uma expressão matemática que considere somente a Área da Bacia, foi possível prover a Equação 13 – denominada **Eq1**. Essa equação com *Tendência Potencial* apresentou o Coeficiente de Determinação (R^2) de 0,9359, Figura 39, e análise do Erro residual entre a $Q_{95 \text{ obs.}}$ e a Q_{95} auferida pela equação **Eq1** obteve-se o RMSE que perpez $16,79 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

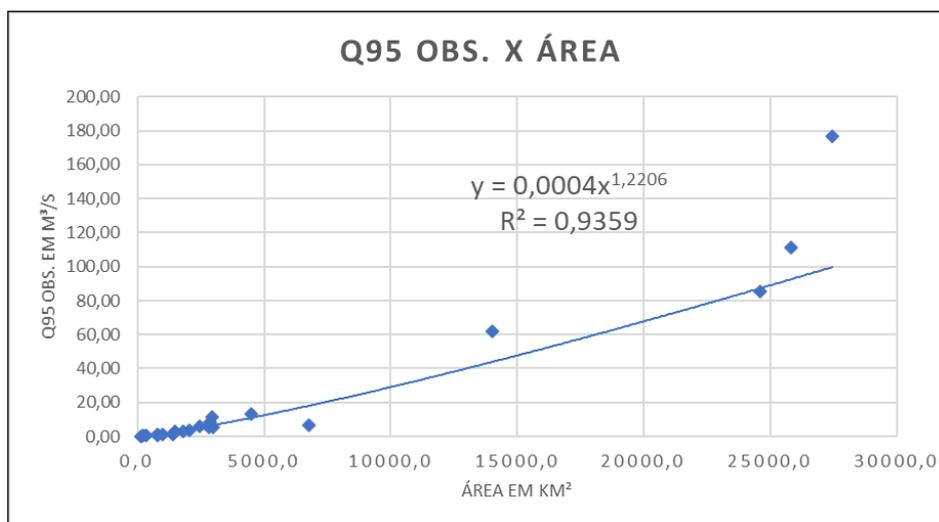


Figura 39. Representação gráfica da Equação da Vazão observada em função da área da bacia.

$$Q_{95} = 0,0004 \cdot A^{1,2206} \quad (\text{Equação 13})$$

Em que: A se refere a área da baia em km^2 .

Silva Junior *et al.* (2003, *apud* Pereira, 2012) aplicaram o método tradicional para regionalizar vazões máximas, mínimas, médias e da curva de permanência na bacia do rio Grande, evidenciando que a variável independente que melhor explicou o comportamento das vazões foi a Área de Drenagem. Ribeiro *et al.* (2005, *apud* Pereira, 2012) também adotaram o método tradicional para regionalizar as vazões mínimas de referência ($Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95}) da bacia do Rio Doce.

Oliveira (2008, *apud* Pereira, 2012) utilizou o programa para regionalizar vazões de permanência para a bacia do Rio Grande, a qual se localiza na bacia do Paraná e está dividida entre os Estados de São Paulo e Minas Gerais. Aplicou o método tradicional a partir dos modelos de regressão Linear, Potencial Exponencial e Logarítmico, constatando que o uso da variável área de drenagem com o modelo Potencial produziu resultados mais consistentes. Nesse sentido, destaca-se que a **Eq1** apresentou o melhor ajuste com a aplicação da regressão linear com tendência potencial, em consonância com a literatura.

Pereira (2012) encontrou cinco regiões homogêneas para a Região Hidrográfica do Rio Uruguai, destacando-se que o R^2 se comportou entre 0,94 e 0,97 nas equações de regionalização em modelo potencial que consideram somente a variável Área da bacia. O resultado da aplicação da **Eq1** correspondeu ao R^2 de 0,9359 em consonância com a literatura aplicada.

Para Euclides (2001) a curva de permanência, nos modelos escolhidos de vazão com probabilidades de 50% a 95%, a variável que permaneceu na regressão, nas três regiões, foi a área de drenagem. Nesse sentido, a **Eq1** pode prover os resultados para a estimativa da Q_{95} na RHG considerando somente a Área como variável independente no modelo.

Considerando a aplicabilidade de Regressão Linear Múltipla, foi possível auferir as Equações 14 e 15 - denominada **Eq2**, aplicada ao caso diante das oito variáveis selecionadas. A partir do emprego da estatística de regressão ANOVA obteve-se o R^2 de 0,9886 e o ep de $6,40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para os 21 conjuntos de observações. Além disso, considerando Erro residual entre a $Q_{95 \text{ obs.}}$ e a Q_{95} pela equação **Eq2** obteve-se o RMSE de $4,84 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, gráfico da dispersão na Figura 40.

Considerando o Coeficiente de Determinação auferido, cita-se que Córdova e Pinheiro (2000, *apud* Pereira, 2012) utilizaram 27 estações fluviométricas para o estudo de Regionalização de vazões da bacia do Rio Itajaí, obtendo um coeficiente de determinação (R^2) de 0,8833 para vazões com 80% de permanência. Porquanto, o R^2 resultante da **Eq2** está em consonância com a literatura frente ao exame da vazão da curva de permanência.

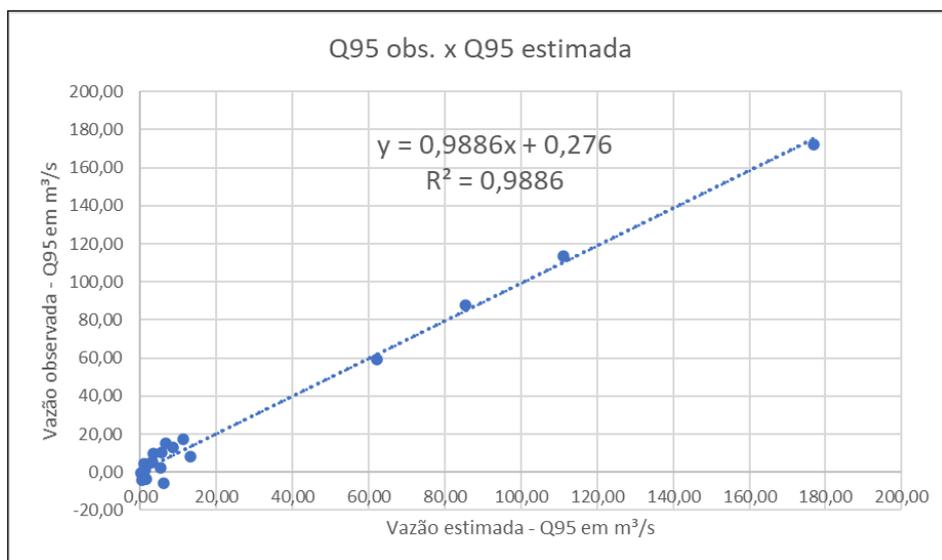


Figura 40. Representação gráfica da Dispersão da Q₉₅ em função das 8 (oito) variáveis independentes.

$$Q = a1.A + a2.Hr + a3.L + a4.LE + a5.P + a6.F + a7.AC + a8.RL \quad (\text{Equação 14})$$

Em que: $Q = f(A, Hr, L, LE, P, F, AC, RL)$; A representa a Área da bacia em km²; Hr o desnível altimétrico em metros; L o comprimento do rio principal em km; LE o Comprimento total dos rios principais na bacia em km; P a precipitação acumulada anual em mm; F a percentagem do uso de florestas na bacia; AC a percentagem de Agricultura e Campo; e RL a percentagem do uso referente aos rios e lagos).

Os coeficientes para cada variável estão expostos na Tabela 13.

Tabela 13. Coeficientes da regressão.

Variável	Coeficientes
A	0,01027348
H	0,04865793
L	-0,30564237
LE	-0,00001925
P	0,04323868
F	-1,54390178
AC	-1,24677646
RL	2,21397299

Legenda: A (área); Hr (desnível altimétrico); L (comprimento do rio principal máximo); LE (comprimento total dos rios principais); P (precipitação acumulada); F (florestas); AC (agricultura e campo); RL (rios e lagos).

$$Q_{95} = 0,01027348*A + 0,04865793*Hr + (-0,30564237*L) + (-0,00001925*LE) + 0,04323868*P + (-1,54390178*F) + (-1,24677646*AC) + 2,21397299*RL \quad (\text{Equação 15})$$

Avaliou-se o comportamento dos resultados dos erros residuais para o Desvio padrão, Erro padrão e o RMSE entre os dados da $Q_{95 \text{ obs.}}$ e a Q_{95} auferida pela **Eq1** e pela **Eq2**, conforme Tabela 14.

Nota-se que houve redução nos valores diante dos erros residuais entre a $Q_{95 \text{ obs.}}$ e a Q_{95} estimada para cada equação. Isso denota que a regressão linear múltipla com a determinação de oito variáveis independentes apresentou melhor resultado em comparação com somente a variável Área da Bacia.

Tabela 14. Métricas de desvio e erro.

Variável	Erros Eq1	Erros Eq2
Desvio Padrão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)	16,69	4,96
Erro Padrão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)	3,64	1,08
RMSE ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)	16,79	4,84
R^2	0,94	0,99

Considerando os erros avaliados, foi possível representar em gráfico o comportamento da linha de tendência para cada equação, Figura 41.

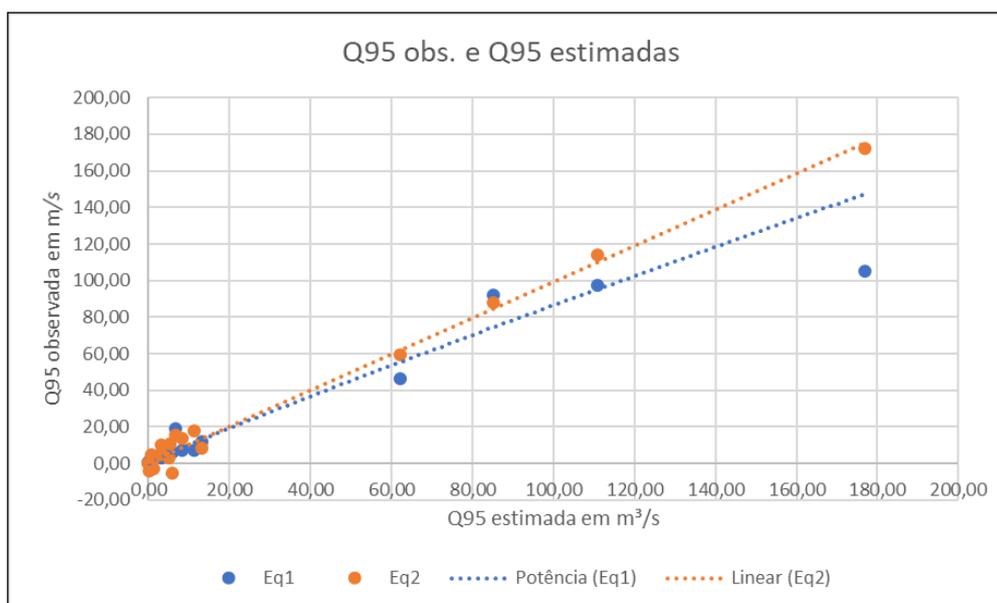


Figura 41. Representação gráfica do comportamento da Q_{95} conforme a equação Eq1 e Eq2.

A Tabela 15 apresenta os valores dos erros residuais em cada Estação fluviométrica em referência a vazão estimada por cada Equação de Regionalização e a vazão observada.

Tabela 15. Comportamento dos erros das equações em cada Estação fluviométrica, RHG, RS.

Estação	A	Q ₉₅ obs	Q ₉₅ Eq1	Erro Eq1	Q ₉₅ Eq2	Erro Eq2
85080000	2956,6	11,30	6,89	-4,41	17,27	5,97
85400000	14015,6	62,20	46,07	-16,13	59,36	-2,84
85470000	969,1	0,95	1,77	0,82	-2,91	-3,85
85480000	2974,0	5,30	6,94	1,64	2,44	-2,86
85600000	6757,7	6,78	18,91	12,13	15,04	8,26
85642000	27432,2	177,00	104,57	-72,43	172,06	-4,94
85735000	1378,8	1,44	2,72	1,28	-3,43	-4,87
85830000	789,2	0,50	1,38	0,87	-0,56	-1,06
86410000	2820,1	5,49	6,51	1,02	10,32	4,83
86420000	316,8	0,89	0,45	-0,44	4,26	3,36
86500000	1818,5	2,96	3,81	0,85	4,72	1,76
86580000	2466,0	6,12	5,52	-0,60	-5,85	-11,97
86745000	790,0	1,15	1,38	0,23	1,10	-0,05
86895000	24601,7	85,40	91,55	6,15	87,70	2,30
86950000	25801,0	111,00	97,03	-13,97	113,74	2,74
87160000	2027,0	3,35	4,35	1,00	9,89	6,54
87270000	4472,1	13,20	11,43	-1,77	8,23	-4,97
87374000	1460,8	3,24	2,92	-0,32	5,29	2,05
87380000	2847,4	8,56	6,58	-1,98	13,18	4,62
87398800	121,5	0,18	0,14	-0,04	-0,23	-0,41
87401600	198,4	0,42	0,25	-0,16	-4,19	-4,61

Legenda: A (área em km²); Q₉₅ observada; Eq1 - Equação 1 (considera apenas a área da bacia); Eq2 - Equação 2 (considera as oito variáveis independentes); Erro – representa o erro residual entre a vazão estimada e a vazão observada.

Primeiramente salienta-se que não existem vazões negativas, conseqüentemente, o comportamento do valor do erro leva em consideração a dispersão dos valores mensurados em cada bacia e diante da aplicabilidade da equação proposta naquele cenário.

Em análise aos dados dos erros, a **Eq1** apresentou o maior *erro absoluto* para a Estação 85642000 (Passo São Lourenço), na Estação 85400000 (Dona Francisca), na Estação 86950000 (Taquari) e na Estação 85600000 (Passo das Tunas). Esse aspecto pode ser explicado pela existência de barramentos hidrelétricos a montante da estação de medição, e por haver um gerenciamento da vazão turbinada e manutenção da vazão remanescente. Com isso, a variável área da bacia não consegue atuar de forma significativa no comportamento da vazão. Entretanto, no caso da Estação Passo das Tunas é possível que o fato de existir barragens para irrigação na bacia possa ter influenciado no desempenho do erro.

A **Eq1** apresentou o menor *erro absoluto* para a Estação 87398800 (Passo Grande), na Estação 87401600 (Cerâmica Cherubini), na Estação 86745000 (Passo do Coimbra) e na Estação 87374000 (Taquara Montante). As três primeiras possuem pequena área (<800,0 km²), e a Taquara Montante possui área de 1.460,8 km². Nesse sentido, é possível destacar que houve um melhor desempenho da equação **Eq1** para bacias menores que 800,0 km² na RHG diante do estudo em questão e naquelas com ausência de barramentos hidrelétricos.

Em alusão aos erros oriundos do emprego da **Eq2**, obteve-se o maior *erro absoluto* na Estação 86580000 (Santa Lúcia), na Estação 85600000 (Passo das Tunas), na Estação 87160000 (Nova Palmira) e na Estação 85080000 (Espumoso). Na qual todas as estações possuem área menor que 3 mil km², com exceção da Estação Passo das Tunas que possui área de 6.757,7 km².

Considerando o menor *erro absoluto* pela aplicação da **Eq2**, o mesmo ocorreu na Estação 86745000 (Passo do Coimbra), na Estação 87398800 (Passo Grande), na Estação 85830000 (Santa Cruz – Montante) e na Estação 86500000 (Passo Carreiro). Sendo que as três primeiras são bacias com área inferior a 800,0 km², e a Estação Passo do Carreiro possui área de 1.818,5 km².

Não se encontrou uma variável independente que explique efetivamente essa alteração de valores dos erros entre as bacias, porém, isso pode ser oriundo da baixa dispersão de valores de vazão em cada estação fluviométrica. Além disso, o uso somente da variável Área de Drenagem pode ser utilizado para locais hidrologicamente homogêneos, e livre de barramentos, pois o controle da vazão tem influência nas métricas de equações de regionalização. Para Fioreze (2008), a redução do número de variáveis explicativas normalmente leva à diminuição do desempenho das equações.

Outrossim, considerando as 8 (oito) variáveis independentes utilizadas no presente estudo para as 21 bacias mensuradas, frente à aplicabilidade da **Eq2**, infere-se que a mesma apresentou desempenho satisfatório, uma vez que fez o maior Coeficiente de Determinação ($R^2 = 0,989$) e o menor RMSE com 4,84 m³.s⁻¹.

Em contraponto, no trabalho de Bazzo (2017) para a Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas, o comportamento dos erros alterou-se dinamicamente conforme a aplicação do Método Tradicional, no qual obteve o RMSE de 4,69 m³.s⁻¹. O autor conclui que a magnitude dos erros relativos encontrados é inerente aos métodos aplicados, e as diferenças absolutas entre as vazões de cada estação fluviométrica demonstram a baixa dispersão dos valores.

Em análise as mesmas Estações fluviométricas na bacia do rio Taquari-Antas determinadas por Bazzo (2017), a partir do método tradicional em seu modelo com a variável independente Área de Drenagem, para a Estação 86410000 ele obteve $5,58 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($6,51 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pela Eq1), para a Estação 86420000 obteve $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Eq1= $0,46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), para a Estação 86500000 obteve $2,86 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Eq1= $3,81 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), e para a Estação 86580000 ele obteve $3,98 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Eq1= $5,52 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Desse modo, a equação ajustada por Bazzo (2017) teve, em geral, desempenho inferior ao mensurado pela Eq1 conforme evidenciam os resultados da Q_{95} nas estações supracitadas.

Fioreze (2008) inferiu que o modelos que utilizam as variáveis independentes: Área de Drenagem; Comprimento do Curso d'água principal; Densidade de Drenagem; Declividade do Curso d'água principal; Precipitação e Coeficiente de compacidade; estimam a Q_{95} com erro aceitável, produzindo resultados mais confiáveis que os fornecidos por poucas medições efetuadas no local de interesse. Sendo que a equação pode ser facilmente empregada em diferentes pontos da bacia e deve ser utilizada como apoio à gestão dos recursos hídricos. Algumas dessas variáveis foram utilizadas na modelagem auferida pela **Eq2**, sendo recomendado o seu uso em processos de regionalização da vazão de referência.

Considerando apenas a Área de Drenagem conclui-se que a **Eq1** pode ser utilizada para a regionalização da Q_{95} na Região Hidrográfica do Guaíba, pois seus dados calibrados corresponderam ao comportamento da vazão auferida para a bacia do rio Taquari-Antas por Bazzo (2017), com uma pequena variação dentro do domínio estatístico.

Além disso, diante das métricas auferidas pelo desempenho da **Eq2**, é recomendável a avaliação dos dados hidrológicos disponíveis e o emprego das oito variáveis independentes no processo de regionalização da Q_{95} na RHG. Uma vez que as unidades de amostragem em seu domínio estatístico resultaram no erro padrão de $1,08 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, fez o RMSE $4,84 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e o R^2 representou 0,99.

4.8 Mapas de regionalização para a RHG

Com o intuito de espacializar o comportamento da vazão frente a regionalização, foram elaborados dois Mapas de Regionalização de Vazão para a RHG.

O primeiro Mapa embasa-se na aplicação da **Eq1**, a qual considera como a variável independente a Área da Região Hidrográfica (km^2), Figura 42. Com isso, foi possível

observar a influência do aumento da área no incremento do comportamento da vazão ao longo dos cursos d'água, a qual representa a maior Q_{95} no ponto exutório, com o valor mínimo de 1 m^3 e o valor máximo de $417,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Essa equação possibilitou auferir o comportamento das vazões inferiores a $53,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ em comparação com a equação da **Eq2**.

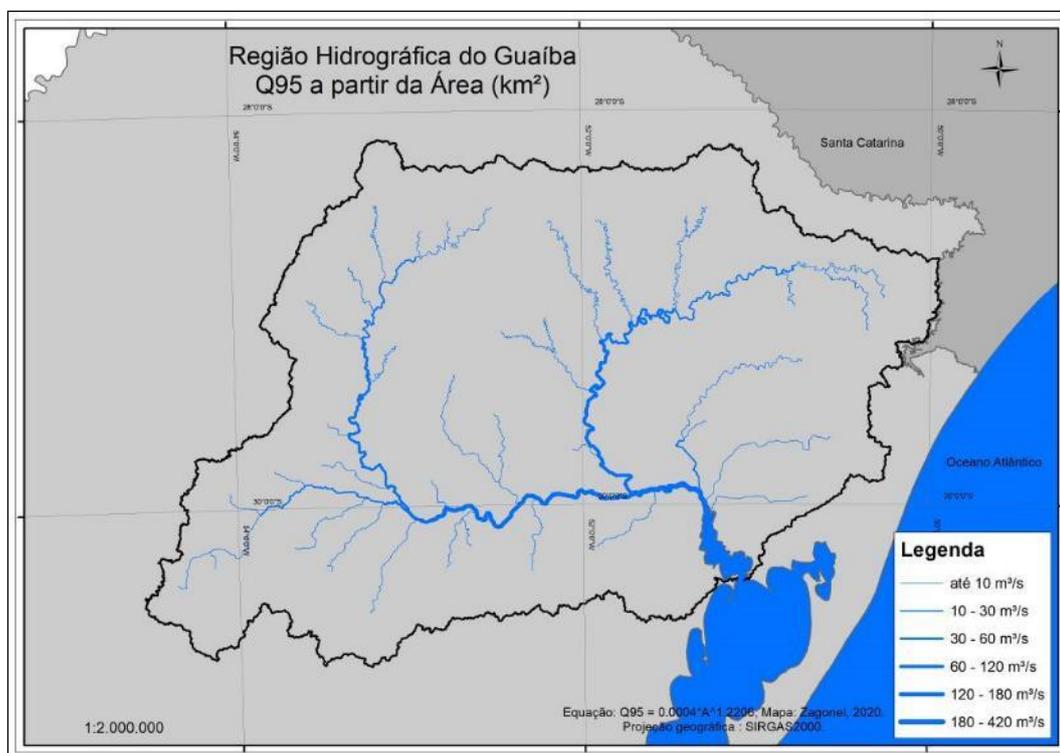


Figura 42. Mapa de regionalização da vazão pela Eq1, RHG, RS.

O Mapa a partir da aplicação da **Eq2** considera as 8 (oito) variáveis independentes, sendo elas: A, Área em km^2 ; Hr, o desnível altimétrico em metros; L, o comprimento do rio principal em km; LE, o Comprimento total dos rios principais na bacia em km; P, a precipitação acumulada anual em mm; F, a percentagem do uso de florestas na bacia; AC a percentagem de Agricultura e Campo; e RL, a percentagem do uso referente aos rios e lagos; Figura 43.

Destarte, considerando os resultados no Mapa da **Eq2**, cabe citar que se obteve a Q_{95} entre $603,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $742,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ da confluência do Rio Taquari até o ponto exutório no Lago Guaíba. O menor valor da vazão fez $53,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e o maior valor $742,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ como resultado da aplicabilidade da **Eq2**. Esse aspecto está de acordo com a precisão dentro do domínio estatístico na medida em que para a calibração utilizou-se 21 bacias hidrográficas, na qual a menor possui a área de $121,0 \text{ km}^2$ e a maior possui a área de 27.432 km^2 . Considerando a área das unidades amostrais possuem o limiar de 121 a 27.432 km^2 existe a

possibilidade da Q_{95} nos cursos d'água nas porções extremas apresentarem certa imprecisão devido ao tamanho da bacia. Com isso, é recomendado estudos específicos para a Q_{95} para bacias com área menor que 121 km^2 e maior que 27.432 km^2 . Em face de estimativas além desse intervalo é necessário a revalidação dos valores da curva de permanência da Q_{95} .

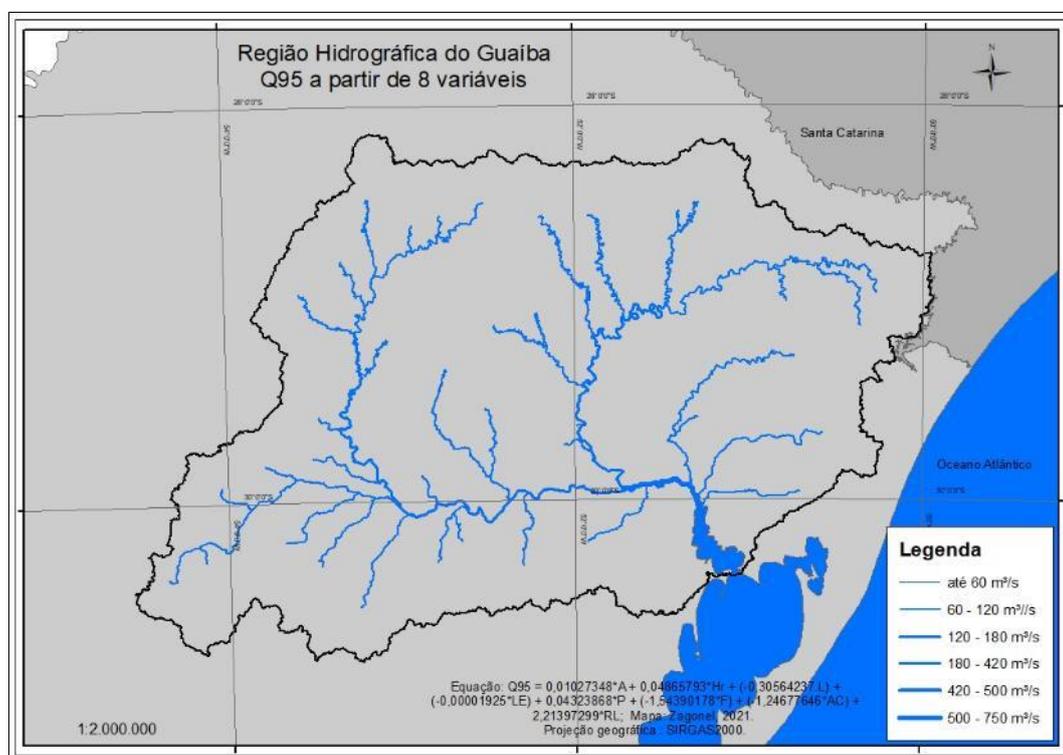


Figura 43. Mapa de regionalização da vazão pela Eq2.

A representação em mapa da distribuição espacial da Q_{95} resultante da aplicação da **Eq2** apresentou anomalias na largura da rede de drenagem, ou seja, houve alguns trechos dos rios em que houve uma pequena alteração da vazão, ora aumenta, ora diminui, porém em baixa amplitude, isto é, menos de $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Esse aspecto é explicado pela flutuação da ocorrência das 7 (sete) variáveis, e não só da área da bacia, uma vez que não foi observado erro no procedimento em ambiente georreferenciado.

Com isso, diferentemente da **Eq1**, na **Eq2** não se observa o crescimento da Q_{95} em função da área da bacia, pois, a dinâmica do comportamento das outras 7 (sete) variáveis influenciam no desempenho da vazão.

Molina (2014) conclui que a Q_{95} , para os períodos anuais, é a vazão de referência mais adequada para regionalização de vazões mínimas na bacia. Nesse sentido, infere-se que para a RHG é indicada a vazão de referência, Q_{95} , frente aos estudos hidrológicos de viabilidade de aproveitamentos hidrelétricos e de manutenção dos ecossistemas aquáticos.

Isto posto, considerando os resultados oriundos da aplicabilidade da **Eq1** (regressão simples com tendência potencial) e da **Eq2** (regressão linear múltipla) a Região Hidrográfica do Guaíba (RHG) apresenta o potencial de geração de energia de fonte hídrica, frente as características físicas que abarcam o relevo, diante dos aspectos ambientais que contemplam o uso e cobertura da terra, perante a precipitação pluviométrica e do comportamento da Q_{95} .

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÃO

Diante do presente trabalho, foi possível definir as vazões de referências a partir de séries históricas em estações de monitoramento fluviométrico para a Região Hidrográfica do Guaíba (RHG).

Destarte, determinou-se os atributos físicos e ambientais, obtidos a partir de dados de sensoriamento remoto, que exerceram um papel relevante para estimar a Q_{95} na RHG: Área da bacia; Desnível Altimétrico; Comprimento do rio principal; Comprimento total dos rios principais; Precipitação acumulada anual; Percentagem do uso de Florestas; Percentagem do uso de Agricultura e Campo; Percentagem do uso de Rios e Lagos.

Igualmente, pode-se fazer uso dos dados de precipitação pluviométrica estimada por satélite (TRMM) no processo de regionalização. O uso de imagem de satélite para a precipitação é recomendado diante da obtenção e otimização dessa variável.

Em face do presente estudo, foi definida a equação de regressão simples e a equação de regressão linear múltipla para a regionalização da Q_{95} . Além disso, foi possível elaborar dois mapas referentes a espacialização da vazão de referência na RHG.

Nesse sentido, as equações e os mapas podem ser utilizados como uma ferramenta de apoio na análise dos parâmetros dos estudos hidrológicos frente ao licenciamento ambiental de empreendimentos com atividade a geração de energia a partir de fonte hídrica na Região Hidrográfica do Guaíba, RS.

Em face do componente ambiental, a implantação de aproveitamentos hidrelétricos ocasiona impactos físicos, ambientais e antrópicos em sua área de influência. Entretanto, com o intuito de atenuar esses efeitos são determinadas ações de controle, medidas mitigadoras e compensatórias no âmbito do licenciamento ambiental. Além disso, tornam-se imprescindíveis a elaboração e execução de planos, programas e projetos ambientais de

gestão, proteção, conservação e monitoramento no decorrer da instalação e na continuidade da operação do empreendimento.

Por fim, recomenda-se o emprego das equações de regionalização da Q_{95} elencadas no presente estudo para bacias com área de contribuição entre 121 km² e 27.432 km², considerando as métricas de erros auferidas.

Nesse sentido, para o licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia de fonte hídrica, outorgas do uso da água e gestão dos recursos hídricos recomenda-se a análise hidrológica e aplicação de equação de regionalização na respectiva bacia hidrográfica.

Para trabalhos futuros sugere-se a revalidação dos valores de permanência frente às alterações de fatores que impactam no escoamento hídrico superficial na bacia hidrográfica.

6. REFERÊNCIAS

AIRES, U. R. V. Estimativas de precipitação derivadas do satélite TRMM para a bacia hidrográfica do Rio Paraopeba, MG. **Revista Scientia Agraria**. Vol. 17 n° 2. Curitiba abril/maio. 2016, p. 57-66.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa N° 673, de 04 de Agosto de 2015**. Estabelece os requisitos e procedimentos para a obtenção de outorga de autorização para exploração de aproveitamento de potencial hidráulico com características de Pequena Central Hidrelétrica de PCH. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015673.pdf>>. Acesso em 30/08/2019.

_, **Plano de Dados Abertos 2016-2017**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656835/15191504/DD_IG_1_1a_f_II/cdafdee5-efa9-eacc-f0a3-ec3e2ec923bf>. Acesso em: 30/08/2019.

AMORIM, E. L. C. **Estudo de métodos para regionalização de vazão**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, ABRH, 2005. Disponível em: <<http://www.ctec.ufal.br/professor/elca/Amorim2-ABRH2005.pdf>>. Acesso em: 02/04/2019.

ANA, Agência Nacional de Águas. **Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos da Agência Nacional de Águas.** Brasília, 2013.

__, **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos - SNIRH** (Portal *HidroWeb*). Brasília, 2017. Disponível em: < <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf> >. Acesso em: 15/03/2019.

__, **Usos da Água.** Brasília, 2019. Disponível em: < <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/usos-da-agua/outros-usos> >. Acesso em: 22/03/2019.

BAENA, L. G. N. Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do Rio Paraíba do Sul. **Eng. Agrícola, Jaboticabal.** V. 24, n. 3, p. 612-627, set/dez, 2004. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v24n3/a13v24n3.pdf> >. Acesso em: 22/03/2019.

BAZZO, K. R. Regionalização da Vazão Q_{95} : comparação de métodos para a bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas. **Revista Ambiente e Água**, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2032> >. Acesso em 01/06/2020.

BARBOSA, S. E. S. **Análise de dados hidrológicos e regionalização de vazões da bacia do Rio do Carmo.** Dissertação de Mestrado, UFOP, 2004. Outro Preto, MG. Disponível em: < https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/3146/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_An%C3%A1liseDadosHidrol%C3%B3gicos.pdf >. Acesso em 22/03/2019.

__, Geração de modelos de regionalização de vazões Máximas, médias de longo período e mínimas de sete Dias para a bacia do rio do Carmo, Minas Gerais. **Eng. Sanitária e Ambiental.** Vol.10 - Nº 1 - jan/mar 2005, 64-71. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522005000100008 >. Acesso em: 19/02/2021.

BIODIVERSIDADE. **Mapa das Regiões Hidrográficas do Rio Grande do Sul.** Projeto Biodiversidade da SEMA-RS. Porto Alegre, 2019. Disponível em: <

<http://www.biodiversidade.rs.gov.br/portal/index.php?acao=downloads&id=2>>. Acesso em 15/03/2019.

BORK, Carina Krüger. **Regionalização de vazões mínimas para o estado do Rio Grande do Sul**. 2018. 156f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

BRASIL, **Lei Federal nº 9.433, de 08 de Janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm >. Acesso em 19/02/2021.

__, **Lei Federal nº 13.097, de 19 de Janeiro de 2015**. Dispõe sobre a legislação aplicada ao Setor Elétrico à Pequenas Centrais Hidrelétricas. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2015/Lei/L13097.htm >. Acesso em 30/08/2019.

__, **Lei Federal nº 13.360, de 17 de novembro de 2016**. Altera a Lei nº 5.655, de 20 de maio de 1971 e dá outras providências. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2016/Lei/L13360.htm >. Acesso em 25/06/2019.

BRUBACHER, J. P. Avaliação de bases SRTM para extração de variáveis morfométricas e de drenagem. **Geociências**. V. 31, n. 3, p. 381-393. UNESP, São Paulo, SP, 2012. Disponível em: < https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/31_3/Art_06_Brubacher_et_al.pdf >. Acesso em: 28/02/2021.

CARNEIRO, D. **Pequenas Centrais Hidrelétricas: aspectos jurídicos, técnicos e comerciais**. 2 ed. Rio de Janeiro : Ed. Synergia, 2017.

CHAVES, H. M. L. *et al.* Regionalização de Vazões Mínimas em Bacias Através de Interpolação em Sistemas de Informação Geográfica. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 7 n.3 Jul/Set, 43-51, Porto Alegre, 2002. Disponível em: < <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=100&SUMARIO=1593> >. Acesso em: 19/02/2021.

COLLISCHONN, W. **Da vazão ecológica ao hidrograma ecológico**. 2006. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/237250787_Da_Vazao_Ecologica_ao_Hidrograma_Ecologico > . Acesso em 22/03/2019.

__, **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 2ª Edição revisada e ampliada, Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), Porto Alegre, 2015.

CONSEMA, Conselho Estadual do Meio Ambiente. **Resolução n° 388/2018**. Dispõe sobre os critérios e diretrizes gerais, bem como define os estudos ambientais e os procedimentos básicos a serem seguidos no âmbito do licenciamento ambiental de Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCHs, e Centrais Geradoras Hidrelétricas - CGHs. Porto Alegre, 2018.

__, **Resolução CONSEMA n° 389/2019**. Altera a Resolução CONSEMA n° 372/2018 que dispõe sobre os empreendimentos e atividades utilizadores de recursos ambientais, efetiva ou potencialmente poluidores ou capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental, passíveis de licenciamento ambiental no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2019.

COSTA, L. C. B. Comportamento sazonal de remanescentes de fitofisionomias da mata atlântica, bacia do rio dos Sinos - RS, por meio de NDVI. **Boletim gaúcho de geografia**. V. 44, n° 1/2, 2017. Disponível em: < <https://www.seer.ufrgs.br/bgg/article/view/59071/49415> >. Acesso em: 20/02/2021.

CRH, Conselho de Recursos Hídricos. **Resolução n° 306/2018**. Dispõe sobre os critérios e diretrizes da vazão remanescente em Empreendimentos de Geração Hidroenergética, vinculados à outorga de uso da água em cursos hídricos de domínio estadual no Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Shuttle Radar Topography Mission – SRTM*. Brasília, 2019. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/srtm> >. Acesso em: 15/03/2019.

_, *ALOS – Advanced Land Observing Satellite*. Brasília, 2019. Disponível em: < https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_alos.html >. Acesso em: 22/03/2019.

CPRM, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil. **Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras: estudo da vazão de 95% de permanência da sub-bacia 50 – Bacias dos rios Itapicuru, Vaza Barris, Real, Inhambupe, Pojuca, Sergipe, Japarutuba, Subaúma e Jacuípe**. / CPRM – Serviço Geológico do Brasil. – Recife: CPRM, 2014.

ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Metodologia para regionalização de vazões**. v. 1, 202 p. Rio de Janeiro, 1985a.

_, **Manual de minicentraís hidrelétricas**. Rio de Janeiro, 1985b.

EUCLYDES, H. P. Regionalização Hidrológica na Bacia do Alto São Francisco a Montante da Barragem de Três Marias, Minas Gerais. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 6 n.2 Abr/Jun 2001, 81-105. Disponível em: < <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=41&SUMARIO=621> >. Acesso em: 19/02/2021.

FARIAS JUNIOR, J. E. F. **Análise de metodologias utilizadas para a determinação da vazão ecológica. Estudo de caso: Rio Corripe/AL e Rio Solimoes/AM**. Dissertação de Mestrado, UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

FEPAM, Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler. **Região Hidrográfica do Guaíba, Qualidade Ambiental**. Porto Alegre, 2019. Disponível em: < <http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/guaiba.asp> >. Acesso em 15/03/2019.

_, **Portaria FEPAM n° 39/2017**. Dispõe sobre os critérios e diretrizes gerais, bem como define os estudos ambientais e os procedimentos básicos a serem seguidos no âmbito do

licenciamento ambiental de Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCHs, e Centrais Geradoras Hidrelétricas - CGHs. Porto Alegre, 2017.

_, **Portaria FEPAM n° 43/2019**. Disciplina os procedimentos e critérios gerais para aplicação da Licença Prévia e de Instalação Unificadas – LPI. Porto Alegre, 2019.

FERREIRA, G. M. **Regionalização de vazões de referência Q_{7,10} e Q₉₀**. Dissertação de Mestrado. UFES, Vitória, ES, 2010.

FIGUEIREDO, A. P. Avaliação do desempenho de equações de regionalização de vazões na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara, Goiás, Brasil. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 3, n. 2, p. 62-76, 2008.

GASQUES, A.C. F. Regionalização de vazões mínimas: breve revisão teórica. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil – REEC**. Volume 14, N° 2, 60-70; Jul/Dez, 2018.

GOBO, J. P. A. **Integração de dados de precipitação TRMM com índices de vegetação do MODIS para o monitoramento de estiagem na região sul do Brasil**. INPE, Santa Maria, 2010.

MAPBIOMAS. **MapBiomas - Mapeando as transformações do território brasileiro nas últimas três décadas**. Instituto de Botânica, São Paulo, 2019. Disponível em: < https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutodebotanica/wp-content/uploads/sites/235/2019/11/anais_viii_simposio-de-restauracao-2019.pdf >. Acesso em: 01/03/2020.

_, **Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil**. Disponível em: < <http://mapbiomas.org/> >. Acesso em 09/01/2020.

MELATI, M. D. Regressões simples e robusta na regionalização da vazão Q₉₅ na Bacia Hidrográfica do Taquari-Antas. **Ciência e Natura, Santa Maria**. V.38 n.2, 2016, Mai.- Ago. p. 722 – 739. Disponível em: < <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/16858> >. Acesso em: 12/06/2020.

MOLINA, S. K. Caracterização de disponibilidade hídrica e comparação de metodologias de regionalização de vazões. **Revista Geociências**. V. 33, n. 3. UNESP, SP, 2014.

MOREIRA, A. *et al.* Dados meteorológicos estimados em condições de clima subtropical e a relação com índices de vegetação. **Revista Brasileira de Cartografia (2017), Edição de Fotogrametia e Sensoriamento Remoto**. No 69/6: 1075-1091. Disponível em: < http://mtc-m21c.sid.inpe.br/attachment.cgi/sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/05.08.16.01/doc/moreira_dados.pdf >. Acesso em: 20/02/2021.

NASA, *National aeronautics and Space Administration. Precipitation Measurement Missions. Tropical Rainfall Measuring Mission - TRMM*. Disponível em: < https://trmm.gsfc.nasa.gov/trmm_rain/Events/3B43.06.color.annotated.gif >. Acesso em 09/01/2020.

OLIVEIRA, V. A. **Regionalização de vazões nas regiões das unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos GD1 e GD2, Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado, UFLA. Lavras, MG, 2013.

PERALTA, A. S. **Análise de regionalização de vazão máxima para pequenas bacias hidrográficas**. Dissertação de Mestrado, UEC. Campinas, SP, 2003.

PERAZZOLI, M. Efeitos de cenários de uso do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Concórdia – SC. **Rev. Árvore**. Vol.37 no.5 Viçosa Sept./Oct. 2013. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622013000500008 >. Acesso em: 20/02/2021.

PEREIRA, G. Avaliação dos dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM para o Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos, RBRH**. Volume 18 n.3 – Jul/Set 2013, 139-148. Disponível em: < https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/109/d048c00bdaedc63c049413cff59b4209_55d02d0208b13874ecb3648e589459c0.pdf >. Acesso em: 26/05/2020.

PEREIRA, L. A. **Regionalização de vazões de permanência aplicada na região hidrográfica do Uruguai utilizando o programa SisCoRV**. Faculdade de Engenharia e Arquitetura. UFP; Passo Fundo, 2012. Disponível em: < <http://usuarios.upf.br/~engeamb/TCCs/2012-2/LUIS%20ADRIEL%20PEREIRA.pdf> >. Acesso em: 18/09/2019.

RS, Rio Grande do Sul. **Lei Estadual n° 10.350, de 30 de dezembro de 1994**. Institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos, regulamentando o artigo 171 da Constituição do Estado do Rio Grande do Sul.

__, Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul, 2020. **Clima, temperatura e precipitação**. Disponível em: < <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/clima-temperatura-e-precipitacao> >. Acesso em: 26/05/2020.

RUHOFF, A. L. **Sensoriamento Remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais**. Tese de Doutorado, UFRGS. Porto Alegre, RS, 2011.

QUEIROZ, R. Geração de energia elétrica através da energia hidráulica e seus impactos ambientais. **Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas - UFSM, Santa Maria**. e-ISSN 2236 1170 - v. 13 n. 13 Ago. 2013, p. 2774- 2784. Disponível em: < <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/download/9124/pdf> >. Acesso em: 20/02/2021.

SAMMARTANO, V. **Identification of Potential Locations for Run-of-River Hydropower Plants Using a GIS-Based Procedure**. *Energies*, 2019, 12, 3446; doi:10.3390/en12183446. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/335653669_Identification_of_Potential_Locations_for_Run-of-River_Hydropower_Plants_Using_a_GIS-Based_Procedure >. Acesso em: 19/02/2021.

SEMA, Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Infraestrutura. **Regiões Hidrográficas do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2019. Disponível em: < <https://www.sema.rs.gov.br/bacias-hidrograficas> >. Acesso em: 15/03/2019.

__, **Departamento de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, 2019. Disponível em: < <https://www.sema.rs.gov.br/recursos-hidricos> >. Acesso em 22/03/2019.

SILVA, A. M. Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. V.10, n.2, p. 374-380, 2006. Campina Grande, PB.

SILVA, R. V. Estudo comparativo de três formulações do TOPMODEL na bacia do rio pequeno, São José dos Pinhais, PR. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH**. Volume 12, n.2, Abr/Jun 2007, 93-105.

SILVA JUNIOR, O. B. Extrapolação Espacial na Regionalização da Vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 8, n. 1; Jan/Mar 2003, 21-37.

SOBRINHO, T. A. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. Eng. Agrícola, Jaboticabal. V. 30, n. 1, p. 46-57, jan/fev. 2010. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v30n1/a05v30n1> >. Acesso em 22/03/2019.

SOUZA, N. S. *et al.* Caracterização hidrológica e influência da cobertura do solo nos parâmetros de vazão do Rio das Fêmeas. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**. V. 22, n. 3, p. 453-462, 2017. Disponível em: < https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522017000300453&script=sci_arttext >. Acesso em: 19/02/2021.

TOMAZONI, J. C. Uso de modelo digital de elevação gerados a partir do ASTER GDEM e SRTM para a caracterização de rede de drenagem. **Revista Brasileira de Geografia Física**. V. 02, 2014. Disponível em: < <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1289> >. Acesso em: 22/03/2019.

_, Avaliação dos impactos ambientais gerados na implantação das pequenas centrais hidrelétricas Canhadão e Tigre no Sudoeste do Paraná, pelo método RIAM. **Geografia Ensino e Pesquisa**. UFSM. Santa Maria, v.23, e19, 2019. Disponível em: < <https://periodicos.ufsm.br/geografia/article/view/39737/pdf> >. Acesso em: 20/02/2021.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 1ª Edição. Ed. Universidade. UFRGS, 1998.

_, **Regionalização de vazões**. 1ª Edição. Ed. Universidade. UFRGS, 2002.

VENDRUSCOLO, J. **Regionalização dos parâmetros de um modelo chuva-vazão para estimativa de vazões em bacias sem monitoramento sistemático**. Dissertação de Mestrado, UFSM, Santa Maria, RS, 2005.

VIANA, L. Q. **Avaliação do potencial de regionalização hidrológica do modelo chuva-vazão SMAP na bacia do Rio Preto usando NDVI**. Dissertação de Mestrado, UFRJ, RJ, 2012.

WARREN, M. S. Utilização do Sensoriamento remoto termal na gestão de recursos hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 7, n. 1, 2014. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/985612/-utilizacao-do-sensoriamento-remoto-termal-na-gestao-de-recursos-hidricos> >. Acesso em: 22/03/2019.

WEBER, E.; HASENACK, H.; FERREIRA, C.J.S. **Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação**. Porto Alegre, UFRGS Centro de Ecologia, 2004. ISBN 978-85-63843-02-9. Disponível em [http: < www.ecologia.ufrgs.br/labgeo >](http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo). Acesso em: 15/01/2020.

WOLFF, W. Nova metodologia de regionalização de vazões, estudo de caso para o Estado de São Paulo. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 19 n.4 –Out/Dez 2014, 21-33. Disponível em: < https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/173/9e6fcb897d165dccb0cf5d1db17f8d9c_922953d37c94ed184f77b65fef54a70a.pdf >. Acesso em 19/02/2021.

_, **Regionalização hidrológica do Estado de Santa Catarina: uma abordagem sazonal e geoestatística baseada em modelos**. ESALQ, UPS. Piracicaba, SP, 2017. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11152/tde-08062017-164415/>>. Acesso em 18/09/2019.

ZAGONEL, J. F. **Diagnóstico do licenciamento ambiental de hidrelétricas no Rio Grande do Sul**. Estudo interno da Divisão de Energia – DIGEN/FEPAM. Porto Alegre, RS, 2019.