



APRESENTAÇÃO

O Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP) aprovou, em 14 de junho de 2021, o Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (PIRH-PS), importante instrumento de gestão da Política Nacional de Recursos Hídricos, essencial para orientar as decisões do comitê.

Durante a complementação e finalização do PIRH-PS, foi realizada a consolidação do diagnóstico e prognóstico da bacia, além da proposição de diretrizes e ações concretas para solucionar os problemas e lacunas identificados ao longo do processo.

Para um gerenciamento eficaz dos recursos hídricos, é essencial compreender a disponibilidade hídrica, as demandas e o balanço hídrico da bacia. Assim, o PIRH-PS estabeleceu, em seu Programa de Ações, a Agenda 5 – Produção de Conhecimento, que delinea a contratação de estudos para suprir as lacunas de conhecimento identificadas.

Diante disso, a AGEVAP, em cumprimento à deliberação do CEIVAP, lançou, em 2022, o Ato Convocatório nº 09/2022, visando contratar uma empresa especializada para desenvolver o Estudo das Disponibilidades Hídricas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (EDH-PS). A empresa Profill Engenharia e Ambiente S.A. foi selecionada, e o contrato foi assinado em dezembro de 2022.

O estudo foi acompanhado pelo Grupo de Trabalho de Estudos Estratégicos do CEIVAP e pela equipe técnica da AGEVAP, resultando no presente documento, que constitui o Resumo Executivo do trabalho realizado.

O aprimoramento das disponibilidades hídricas na bacia do Rio Paraíba do Sul representa um marco significativo para a gestão dos recursos hídricos da região. Com este estudo, o CEIVAP fortalece sua capacidade de tomar decisões informadas e eficazes. Este trabalho não apenas enriquece o entendimento técnico e científico sobre a bacia, mas também embasa ações concretas e diretrizes estratégicas para enfrentar os desafios identificados, orientando diversas outras iniciativas previstas no PIRH-PS.

Assim, o CEIVAP reafirma seu compromisso com uma gestão integrada, visando garantir a segurança hídrica na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul.

Setembro de 2024.

Diretoria Colegiada CEIVAP

Presidente

Marcelo Pereira Manara

Vice-Presidente

João Gomes de Siqueira

Secretário

Matheus Machado Cremonese

Grupo de Trabalho Acompanhamento dos
Estudos Estratégicos CEIVAP – GTEE

Coordenação

Jackson Rodrigues Primo
Marcos Pufal

Composição

Fernanda Spitz Dias
Ingrid Delgado Ferreira
João Gomes de Siqueira
Marina Mendonça Costa de Assis
Miguel Fernandes Felipe
Renato Traballi Veneziani
Vera Lúcia Teixeira

AGEVAP

Diretor-Presidente

André Luis de Paula Marques

Gerente de Contrato de Gestão CEIVAP

Aline Raquel de Alvarenga

Gerente Técnica CEIVAP

Marina Mendonça Costa de Assis

Equipe Gerência CEIVAP

Daiane Alves dos Santos
Júlio César da Silva Ferreira
Flávio Augusto Monteiro dos Santos
Ana Caroline Pitzer Jacob
Maíra Simões Cucio
Márcio Fonseca Peixoto
Raissa Bahia Guedes
Vivian Letícia dos Santos Faria
Ronaldo Rodrigues Júnior
Jéssica Freitas da Silva
Maria Clara Pimentel da Silva
Raíssa Galdino da Silva

Fiscalização Contratual

Ingrid Delgado Ferreira
Marina Mendonça Costa de Assis
Raissa Bahia Guedes

PROFILL

Coordenação Geral

Me. Eng. Civil Carlos Ronei Bortoli

Coordenação Técnica

Dr. Eng. Ambiental Maurício D. Melati
Me. Eng. Civil Sidnei Gusmão Agra
Ma. Eng. Ambiental Elisa Kich

Equipe Técnica

Tec. Antônia Homrich Da Silva
Eng. Hídrica Rafaela Cristina de Oliveira
Ma. Eng. Ambiental Ana Luiza Helfer
Ma. Eng. Civil Patrícia Luisa Cardoso
Geografo Guilherme Joaquim
Geógrafo Daniel Wiegand
Me. Eng. Civil Mauro Jungblut
Me. Pedro Henrique Bof

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. METODOLOGIA	22
2.1. Levantamento de Dados.....	24
2.2. Consistência dos Dados.....	26
2.3. Renaturalização das Vazões, Preenchimento das Séries e Análises de Estacionariedade.....	30
2.4. Disponibilidade Hídrica.....	33
2.5. Cenário de Mudanças Climáticas	39
3. RESULTADOS NAS SUB-BACIAS	43
3.1. Sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba Do Sul	46
3.2. Sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba Do Sul.....	61
3.3. Sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.....	82
3.4. Sub-bacia do Rio Piraí.....	101
3.5. Sub-bacia do Rio Preto.....	114
3.6. Sub-bacia do Rio Paraibuna	130
3.7. Sub-bacia do Rio Piabanga.....	146
3.8. Sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.....	159
3.9. Sub-bacia do Rio Pomba.....	177
3.10. Sub-bacia do Rio Dois Rios.....	193
3.11. Sub-bacia do Rio Muriaé	209
3.12. Sub-bacia do Rio Carangola.....	225
3.13. Sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul	239

4. ANÁLISE INTEGRADA DA BHPS	256
4.1. Dados Pluviométricos.....	256
4.2. Dados Fluviométricos	256
4.3. Ano Hidrológico	257
4.4. Renaturalização de Vazões	258
4.5. Estacionariedade das Séries.....	263
4.6. Disponibilidade Hídrica.....	263
4.7. Cenário de Mudanças Climáticas	278
5. AVALIAÇÃO DA REDE DE MONITORAMENTO	282
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	292
6.1. Limitações e recomendações FUTURaS.....	293
7. BANCO DE DADOS DE INFORMAÇÃO	295
7.1. Banco de Dados Hidrológico.....	296
7.2. Banco de Dados Geoespacial.....	296
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	297

LISTA FIGURAS

Figura 1.1 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul -----	21
Figura 2.1 – Fluxograma dos produtos desenvolvidos. -----	23
Figura 2.2 – Fluxograma das atividades de levantamento de dados do Produto 1. -----	24
Figura 2.3 – Fluxograma dos procedimentos de consistência dos dados hidrológicos do Produto 2 -----	26
Figura 2.4 – Fluxograma dos procedimentos de renaturalização, preenchimento e avaliação da estacionariedade do Produto 3 -----	30
Figura 2.5 – Fluxograma dos procedimentos para obtenção da disponibilidade hídrica do Produto 4. -----	34
Figura 2.6 – Fluxograma da metodologia usada para avaliação dos cenários de mudanças climáticas do Produto 5. -----	40
Figura 2.7 – Exemplo de interpretação das figuras de resultados. -----	42
Figura 3.1 – Sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul.-----	44
Figura 3.2 – Limites dos comitês de bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. -----	45
Figura 3.3 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul. -----	46
Figura 3.4 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul. -----	47
Figura 3.5 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul. -----	48
Figura 3.6 – Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul. -----	49
Figura 3.7 – Resultados da alteração da vazão Q_{m1t} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul após a renaturalização.-----	50
Figura 3.8 - Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.-----	51
Figura 3.9 - Resultados das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) de referência anuais Q_{m1t} e Q_{95} -----	53
Figura 3.10 - Vazões de entrega (m^3/s) da sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.-----	54
Figura 3.11 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{m1t} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul. -----	55
Figura 3.12 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{m1t} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul. -----	56
Figura 3.13 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{m1t} e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-Bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul. -----	57
Figura 3.14 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul. -----	59

Figura 3.15 - Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul. -----	62
Figura 3.16 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul. -----	62
Figura 3.17 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul. -----	65
Figura 3.18 - Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul. -----	66
Figura 3.19 – Resultados da alteração da vazão Q_{m1t} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul após a renaturalização.-----	66
Figura 3.20- Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul. -----	68
Figura 3.21 - Resultados das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) de referência anuais Q_{m1t} e Q_{95} .-----	70
Figura 3.22 - Vazões de entrega (m^3/s) da sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul. -----	71
Figura 3.23 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{m1t} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.-----	72
Figura 3.24 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{m1t} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.-----	73
Figura 3.25 – Resultados espaciais da redução das vazões Q_{m1t} e Q_{95} na sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.-----	74
Figura 3.26 - Resultados espaciais do aumento (%) das vazões Q_{m1t} e Q_{95} anual mantendo os volumes das transposições na BHPS e propagando para jusante na sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.-----	75
Figura 3.27 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul. -----	79
Figura 3.28 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. -----	83
Figura 3.29 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.-----	84
Figura 3.30 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. -----	85
Figura 3.31 - Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.-----	86
Figura 3.32 – Resultados da alteração da vazão Q_{m1t} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul após a renaturalização.-----	86
Figura 3.33- Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.-----	88
Figura 3.34 - Resultados das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) de referência anuais Q_{m1t} e Q_{95} . -----	90

Figura 3.35 - Vazões de entrega (m^3/s) da sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. -----	91
Figura 3.36 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. -----	92
Figura 3.37 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. -----	93
Figura 3.38 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{mlt} e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-Bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.-----	95
Figura 3.39 - Resultados espaciais do aumento (%) das vazões Q_{mlt} e Q_{95} anual mantendo os volumes das transposições na BHPS e propagando para jusante na sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.-----	95
Figura 3.40 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. -----	99
Figura 3.41 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na Sub-Bacia do Rio Piraí. -----	102
Figura 3.42 - Mapa das estações pluviométricas da Sub-Bacia do Rio Piraí.-----	102
Figura 3.43 - Mapa das estações fluviométricas da Sub-Bacia do Rio Piraí.-----	103
Figura 3.44 - Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da Sub-Bacia do Rio Piraí. -----	104
Figura 3.45 – Resultados da alteração da vazão Q_{mlt} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a Sub-Bacia do Rio Piraí após a renaturalização.-----	105
Figura 3.46 - Resultados das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) de referência anuais Q_{mlt} e Q_{95} . -----	107
Figura 3.47 - Vazões de entrega (m^3/s) da Sub-Bacia do Rio Piraí. -----	108
Figura 3.48 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Piraí. -----	109
Figura 3.49 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Piraí.-----	110
Figura 3.50 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{mlt} e Q_{95} no período 2014-2020 na Sub-Bacia do Rio Piraí.-----	111
Figura 3.51 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a Sub-Bacia do Rio Piraí.-----	113
Figura 3.52 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Rio Preto. -----	115
Figura 3.53 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Rio Preto.-----	115
Figura 3.54 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Preto.-----	116
Figura 3.55 – Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Rio Preto. -----	117
Figura 3.56 – Resultados da alteração da vazão Q_{mlt} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a sub-bacia do Rio Preto após a renaturalização.-----	118

Figura 3.57 - Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Preto.	119
Figura 3.58 - Resultados das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) de referência anuais Q_{mlt} e Q_{95} .	121
Figura 3.59 - Vazões de entrega (m^3/s) da sub-bacia do Rio Preto.	122
Figura 3.60 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Preto.	123
Figura 3.61 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Preto.	124
Figura 3.62 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{mlt} e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-bacia do Rio Preto.	125
Figura 3.63 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Preto.	128
Figura 3.64 - Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Rio Paraibuna.	131
Figura 3.65 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Rio Paraibuna.	131
Figura 3.66 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Paraibuna.	132
Figura 3.67 – Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Rio Paraibuna.	133
Figura 3.68 – Resultados da alteração da vazão Q_{mlt} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a sub-bacia do Rio Paraibuna após a renaturalização.	134
Figura 3.69- Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Paraibuna.	135
Figura 3.70 - Resultados das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) de referência anuais Q_{mlt} e Q_{95} .	137
Figura 3.71 - Vazões de entrega (m^3/s) da sub-bacia do Rio Paraibuna.	138
Figura 3.72 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Paraibuna.	139
Figura 3.73 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Paraibuna.	140
Figura 3.74 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{mlt} e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-Bacia do Rio Paraibuna.	141
Figura 3.75 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Paraibuna.	144
Figura 3.76 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Rio Piabanha.	146
Figura 3.77 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Rio Piabanha.	147
Figura 3.78 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Piabanha.	148
Figura 3.79 – Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Rio Piabanha.	149

Figura 3.80 – Resultados da alteração da vazão Q_{mlt} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a sub-bacia do Rio Piabanhá após a renaturalização. -----	149
Figura 3.81 - Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Piabanhá. -----	151
Figura 3.82 - Resultados das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) de referência anuais Q_{mlt} e Q_{95} . -----	152
Figura 3.83 - Vazões de entrega (m^3/s) da sub-bacia do Rio Piabanhá. -----	153
Figura 3.84 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Piabanhá.-----	154
Figura 3.85 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Piabanhá.-----	155
Figura 3.86 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{mlt} e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-Bacia do Rio Piabanhá.-----	156
Figura 3.87 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Piabanhá.-----	158
Figura 3.88 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul. -----	160
Figura 3.89 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul. -----	161
Figura 3.90 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul. -----	162
Figura 3.91 – Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.-----	163
Figura 3.92 – Resultados da alteração da vazão Q_{mlt} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul após a renaturalização.-----	164
Figura 3.93- Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Dois Rios. -----	165
Figura 3.94 - Resultados das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) de referência anuais Q_{mlt} e Q_{95} . -----	167
Figura 3.95 - Vazões de entrega (m^3/s) da sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.-----	168
Figura 3.96 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.-----	169
Figura 3.97 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.-----	170
Figura 3.98 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{mlt} e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-Bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul. -----	171
Figura 3.99 - Resultados espaciais do aumento (%) das vazões Q_{mlt} e Q_{95} anual mantendo os volumes das transposições na BHPS e propagando para jusante na sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul. -----	172
Figura 3.100 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.-----	175

Figura 3.101 - Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Rio Pomba. -----	178
Figura 3.102 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Rio Pomba. -----	178
Figura 3.103 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Pomba. -----	179
Figura 3.104 - Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Rio Pomba. -----	180
Figura 3.105 – Resultados da alteração da vazão Q_{mlt} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a sub-bacia do Rio Pomba após a renaturalização. -----	181
Figura 3.106 - Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Pomba. -----	182
Figura 3.107 - Resultados das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) de referência anuais Q_{mlt} e Q_{95} . -----	184
Figura 3.108 - Vazões de entrega (m^3/s) da sub-bacia do Rio Pomba. -----	185
Figura 3.109 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Pomba. -----	186
Figura 3.110 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Pomba. -----	187
Figura 3.111 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{mlt} e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-bacia do Rio Pomba. -----	188
Figura 3.112 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Pomba. -----	191
Figura 3.113 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Rio Dois Rios. -----	193
Figura 3.114 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Rio Dois Rios. -----	194
Figura 3.115 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Dois Rios. -----	195
Figura 3.116 - Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Rio Dois Rios. -----	196
Figura 3.117 – Resultados da alteração da vazão Q_{mlt} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a sub-bacia do Rio Dois Rios após a renaturalização. -----	197
Figura 3.118- Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Dois Rios. -----	198
Figura 3.119 - Resultados das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) de referência anuais Q_{mlt} e Q_{95} . -----	200
Figura 3.120 - Vazões de entrega (m^3/s) da sub-bacia do Rio Dois Rios. -----	201
Figura 3.121 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Dois Rios. -----	202
Figura 3.122 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Dois Rios. -----	203
Figura 3.123 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{mlt} e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-Bacia do Rio Preto. -----	204

Figura 3.124 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Dois Rios.-----	207
Figura 3.125 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Rio Muriaé. -----	209
Figura 3.126 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Rio Muriaé.-----	210
Figura 3.127 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Muriaé. -----	211
Figura 3.128 – Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Rio Muriaé.-----	212
Figura 3.129 – Resultados da alteração da vazão Q_{mlt} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a sub-bacia do Rio Muriaé após a renaturalização. -----	213
Figura 3.130- Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Muriaé.-----	214
Figura 3.131 - Resultados das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) de referência anuais Q_{mlt} e Q_{95} .-----	216
Figura 3.132 - Vazões de entrega (m^3/s) da sub-bacia do Rio Muriaé.-----	217
Figura 3.133 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Muriaé.-----	218
Figura 3.134 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Muriaé.-----	219
Figura 3.135 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{mlt} e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-bacia do Rio Muriaé. -----	220
Figura 3.136 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Muriaé.-----	223
Figura 3.137 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Rio Carangola.-----	225
Figura 3.138 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Rio Carangola.-----	226
Figura 3.139 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Carangola.-----	227
Figura 3.140 – Resultados de vazão específica média anual (primeiro gráfico) e sazonal (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Rio Carangola. -----	228
Figura 3.141 – Resultados do aumento de Q_{mlt} (primeiro mapa) e Q_{95} (segundo mapa) para a sub-bacia do Rio Carangola. -----	229
Figura 3.142- Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Carangola.-----	230
Figura 3.143 - Resultados das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) de referência anuais Q_{mlt} e Q_{95} .-----	232
Figura 3.144 - Vazões de entrega (m^3/s) da sub-bacia do Rio Carangola.-----	233
Figura 3.145 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Carangola.-----	234
Figura 3.146 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Carangola.-----	235
Figura 3.147 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{mlt} e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-Bacia do Rio Carangola. -----	236

Figura 3.148 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Carangola.-----	238
Figura 3.149 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul. -----	240
Figura 3.150 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.-----	241
Figura 3.151 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.-----	242
Figura 3.152 - Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.-----	243
Figura 3.153 – Resultados da alteração da vazão Q_{m1t} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul após a renaturalização.-----	243
Figura 3.154- Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.-----	245
Figura 3.155 - Resultados das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) de referência anuais Q_{m1t} e Q_{95} . -----	247
Figura 3.156 - Vazões de entrega (m^3/s) da sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul. -----	248
Figura 3.157 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{m1t} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul. -----	249
Figura 3.158 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{m1t} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.-----	250
Figura 3.159 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{m1t} e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-Bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.-----	251
Figura 3.160 - Resultados espaciais do aumento (%) das vazões Q_{m1t} e Q_{95} anual mantendo os volumes das transposições na BHPS e propagando para jusante na sub-bacia do Baixo Paraíba do Sul.-----	252
Figura 3.161 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.-----	254
Figura 4.1 - Vazões médias específicas de longo termo com as estações que foram utilizadas na análise com dados a partir de 1978.-----	257
Figura 4.2 - Boxplot da análise do ano hidrológico com as estações que foram utilizadas com dados a partir de 1978. -----	258
Figura 4.3 - Mapa das estações pluviométricas da BHPS.-----	259
Figura 4.4 - Mapa das estações fluviométricas da BHPS. -----	260
Figura 4.5 - Resultados da alteração da vazão Q_{95} após a renaturalização.-----	261
Figura 4.6 – Resultados da alteração da vazão Q_{m1t} após a renaturalização.-----	262
Figura 4.7- Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para BHPS.-----	264
Figura 4.8- Resultados de Boxplot da calibração do modelo hidrológico para todos os indicadores estatísticos usados. -----	265

Figura 4.9 - Vazões de entrega (m^3/s) em pontos importantes (m^3/s) da BHPS. -----	266
Figura 4.10 - Resultados da vazão de referência anual Q_{m1t} na BHPS. -----	267
Figura 4.11 - Resultados da vazão de referência anual Q_{90} na BHPS. -----	268
Figura 4.12 - Resultados da vazão de referência anual Q_{95} na BHPS. -----	269
Figura 4.13 - Resultados da vazão de referência anual $Q_{7,10}$ na BHPS. -----	270
Figura 4.14 - Anomalia das vazões médias anuais específicas ($m^3/s/km^2$) para as estações com dados completos entre 1960 e 2021. -----	272
Figura 4.15 - Resultados espaciais da redução da vazão Q_{m1t} no período 2014-2020 na BHPS. -----	273
Figura 4.16 - Resultados espaciais da redução da vazão Q_{95} no período 2014-2020 na BHPS. -----	274
Figura 4.17 - Resultado espacial do aumento (%) da vazão Q_{m1t} anual mantendo os volumes das transposições na BHPS e propagando para jusante no Rio Paraíba do Sul. -----	276
Figura 4.18 - Resultado espacial do aumento (%) da vazão Q_{95} anual mantendo os volumes das transposições na BHPS e propagando para jusante no Rio Paraíba do Sul. -----	277
Figura 4.19 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo. -----	279
Figura 4.20 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no longo prazo. -----	280
Figura 5.1 - Estações pluviométricas em operação da base de dados do projeto. -----	286
Figura 5.2 - Estações fluviométricas em operação da base de dados do projeto. -----	287
Figura 7.1 - Construção do banco de dados do projeto. -----	296

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Principais barramentos na BHPS	32
Quadro 2.2 – Total de estações consistidas e renaturalizadas para cada sub-bacia.	36
Quadro 3.1 – Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.	48
Quadro 3.2 – Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.	64
Quadro 3.3 – Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.	84
Quadro 3.4 – Informações sobre as estações fluviométricas da Sub-Bacia do Rio Piraí.	103
Quadro 3.5 – Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Preto.	116
Quadro 3.6 – Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Paraibuna.	132

Quadro 3.7 – Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Piabanha.....	147
Quadro 3.8 – Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.....	162
Quadro 3.9 - Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Pomba.....	179
Quadro 3.10 – Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Dois Rios.....	195
Quadro 3.11– Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Muriaé.....	211
Quadro 3.12 – Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Carangola.....	227
Quadro 3.13– Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.....	241
Quadro 5.1 – Total de estações consistidas em operação para cada sub-bacia e densidade de monitoramento	283

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.....	52
Tabela 3.2 - Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.....	59
Tabela 3.3 - Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.....	60
Tabela 3.4 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.....	69
Tabela 3.5 - Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.....	77
Tabela 3.6 - Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.....	80
Tabela 3.7 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.....	88
Tabela 3.8 - Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.....	97
Tabela 3.9 - Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.....	100
Tabela 3.10 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na Sub-Bacia do Rio Piraí.....	106
Tabela 3.11 – Resultados de vazões máximas para as estações da Sub-Bacia do Rio Piraí.....	112
Tabela 3.12 – Resultados de vazões mínimas para as estações da Sub-Bacia do Rio Piraí.....	113
Tabela 3.13 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Rio Preto.....	120
Tabela 3.14 - Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Rio Preto.....	127
Tabela 3.15 - Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Rio Preto.....	129
Tabela 3.16 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Rio Paraibuna.....	136
Tabela 3.17 - Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Rio Paraibuna.....	143
Tabela 3.18 - Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Rio Paraibuna.....	145

Tabela 3.19 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Rio Piabanha.	151
Tabela 3.20 - Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Rio Piabanha.	157
Tabela 3.21 - Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Rio Piabanha.....	159
Tabela 3.22 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.	166
Tabela 3.23 - Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.	174
Tabela 3.24 – Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.	176
Tabela 3.25 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Rio Pomba.....	183
Tabela 3.26 – Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Rio Pomba.	190
Tabela 3.27 – Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Rio Pomba.....	192
Tabela 3.28 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Rio Dois Rios.	199
Tabela 3.29 - Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Rio Dois Rios.	206
Tabela 3.30 - Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Rio Dois Rios.	208
Tabela 3.31 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Rio Muriaé.....	215
Tabela 3.32 – Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Rio Muriaé.	222
Tabela 3.33 – Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Rio Muriaé.	224
Tabela 3.34 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Rio Carangola.	230
Tabela 3.35 – Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Rio Carangola.	237
Tabela 3.36 - Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Rio Carangola.	239
Tabela 3.37 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.	245
Tabela 3.38 – Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.	253
Tabela 3.39 – Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.	255
Tabela 4.1. Resultados de aumento percentual médio (%) dos trechos dos principais reservatórios após a propagação das vazões transpostas para jusante do Rio Paraíba do Sul.	275
Tabela 4.2 – Resultados médios das alterações nas vazões máximas em percentual (%) das estações por bacia hidrográfica.	278
Tabela 4.3 – Resultados das alterações médias nas vazões de referência por bacia hidrográfica.	281

LISTA SIGLAS

AD – Área de Drenagem
AGEVAP – Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul
ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
BHO – Base Hidrográfica Ottocodificada
BHPS – Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul
CBH – Comitê de Bacia Hidrográfica
CGH – Central Geradora Hidrelétrica
CEIVAP – Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul
CLIMBra – *Climate Change Dataset for Brazil*
CMIP6 – *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*
DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica (Estado de São Paulo)
EDH-PS – Estudo de Disponibilidade Hídrica do Rio Paraíba do Sul
GTEE – Grupo de Trabalho Acompanhamento dos Estudos Estratégicos
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDE – Infraestrutura de Dados Espaciais
IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INEA – Instituto Estadual do Ambiente (Estado do Rio de Janeiro)
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*
LTR – *Long Term Release*
MGB – Modelo de Grandes Bacias

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PIRH-PS – Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul

QGIS – Quantum GIS

Qmáx – Vazão máxima

Q_{mlt} – Vazão média de longo termo

Q₉₀ – Vazão igualada ou superada em 90% do tempo

Q₉₅ – Vazão igualada ou superada em 95% do tempo

Q_{7,10} – Vazão mínima referente a setes dias de duração com tempo de retorno de 10 anos

SAR – Sistema de Acompanhamento de Reservatórios

SIDRA – Sistema IBGE de Recuperação Automática

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SIGA-CEIVAP – Sistema de Informações Geográficas e Geoambientais da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul

SIRGAS2000 - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

SSP – *Shared Socioeconomic Pathways*

TR – Tempo de Retorno

UHE – Usina Hidrelétrica de Energia

WMO – *World Meteorological Organization*

Relação de fotos da capa, da esquerda para a direita, do topo da página para a base da página:

- Bacia Hidrográfica do Rio Dois Rios - rio Dois Rios - Município de São Fidelis/RJ - Foto: Acervo Profill
- Bacia Hidrográfica do Baixo Paraíba do Sul - rio Muriaé - Município de Campos dos Goytacazes/RJ - Foto: Acervo Profill
- Divisa Bacias Hidrográficas do Rio Dois Rios e do Baixo Paraíba do Sul - rio Paraíba do Sul - Município de São Fidelis/RJ - Foto Acervo Profill
- Bacia Hidrográfica do Baixo Paraíba do Sul - rio Paraíba do Sul - Município de Campos dos Goytacazes/RJ - Foto: Acervo Profill
- Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul (SP) - rio Paraitinga - Reservatório Paraibuna Paraitinga - Município de Paraibuna/SP - Foto: Acervo Profill
- Bacia Hidrográfica do Médio Paraíba do Sul - rio Paraíba do Sul - Resende/RJ - Foto: Márcio Fabian
- Bacia Hidrográfica do Baixo Paraíba do Sul - rio Pomba - Município de Santo Antônio de Pádua/RJ - Foto: Acervo Profill
- Bacia Hidrográfica do Rio Piabanga - rio Piabanga - Município de Três Rios/RJ - Foto: Ruan Mayworm
- Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul (SP) - rio Paraíba do Sul - Reservatório Santa Branca - Município de Paraibuna/SP - Foto: Acervo Profill

1. INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (BHPS) fica situada na região sudeste do Brasil (compartilhada entre os estados de SP, MG e RJ) e abastece grandes polos industriais e centros urbanos. A Bacia possui três transposições de água para bacias adjacentes (Piraí/Guandu-RJ, Jaguari/Atibainha-SP e Macabu/São Pedro-RJ), e fornece uma parte significativa da água utilizada pelas metrópoles de São Paulo e do Rio de Janeiro, sendo uma bacia de grande importância para o país. A Figura 1.1 mostra a localização da BHPS.

A BHPS é, portanto, caracterizada por seus usos múltiplos e, por abranger três estados da federação e rios de dominialidade federal e estadual, possui um complexo e refinado sistema de gestão. Sendo assim, é imprescindível que a bacia seja profundamente estudada e conhecida por seus gestores a fim de que a gestão das águas seja realizada com base em dados fiéis à realidade e que acompanhe as mudanças de usos da água, do solo e climáticas.

O Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (PIRH-PS) foi finalizado em 2021 e identificou que uma das fragilidades a respeito do que se conhece sobre a BHPS são as vazões de referência, ou seja, a disponibilidade hídrica. Essa informação é de suma importância, pois a partir dela que são concedidas as outorgas de uso da água e, por meio dessa

informação, os órgãos gestores fazem a alocação das águas e acabam impactando toda a sociedade em termos de desenvolvimento econômico, limitando ou concedendo permissão para a instalação de novos empreendimentos.

Sendo assim, resultou do PIRH-PS a necessidade de refinamento das disponibilidades hídricas da BHPS tendo como base os resultados obtidos no plano. O objeto do estudo foi previsto no âmbito do Programa de Ações, mais especificamente na "Ação 5.1.2.1 - Elaborar estudo de atualização do quadro de demandas hídricas, refinamento das disponibilidades hídricas e atualização dos balanços hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul".

A partir do Ato convocatório Nº09/2022 a empresa Profill Engenharia e Ambiente foi selecionada para a realização desta ação intitulada "Estudo de Disponibilidades Hídricas da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul (EDH-PS)" e que, portanto, revela-se como importante continuidade à implementação do PIRH-PS. O presente documento é a consolidação resumida de cinco documentos previamente desenvolvidos ao longo do projeto, disponíveis no seguinte link: <https://www.ceivap.org.br/estudos-estrategicos>. Maiores detalhes sobre cada um dos documentos desenvolvidos serão apresentados a seguir.

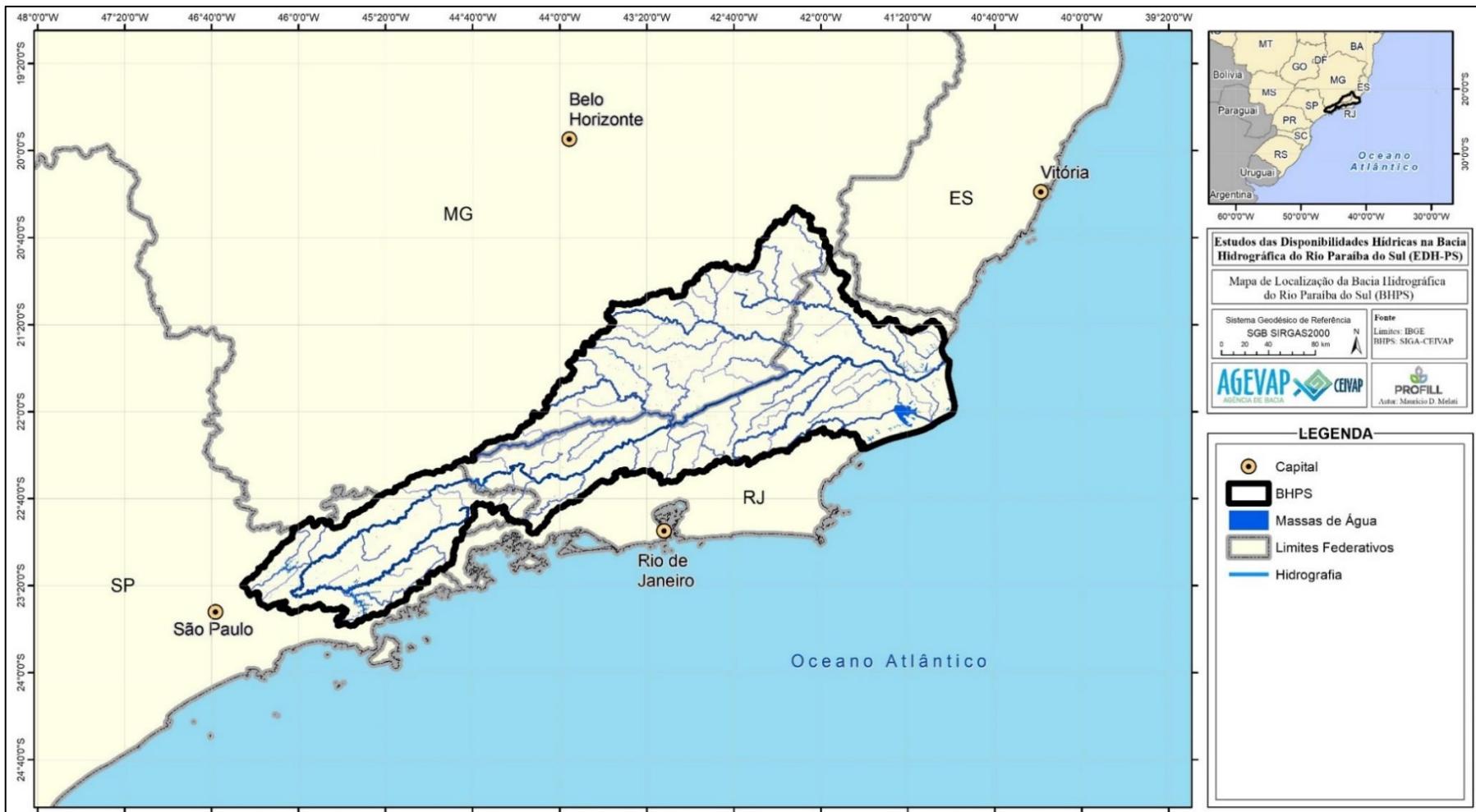


Figura 1.1 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul

2. METODOLOGIA

Este estudo foi conduzido em cinco grandes etapas, caracterizando um processo sequencial no qual cada fase subsequente é dependente da anterior. Essa abordagem em etapas permite uma análise progressiva e aprofundada do problema em estudo, garantindo que as conclusões e resultados sejam baseados em uma fundamentação sólida e em uma compreensão abrangente de cada aspecto investigado.

O trabalho desenvolvido não se limitou à aplicação de metodologias conhecidas apenas, também se buscou investigar dentre as possibilidades existentes, qual abordagem era mais adequada para representar o singular comportamento hidrológico da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Os resultados foram avaliados de forma crítica para garantir que os resultados obtidos fossem reais e representassem a realidade da bacia, muitas vezes implicando em alterações metodológicas no decorrer das atividades desenvolvidas.

As condições atuais observadas nas bacias hidrográficas por meio do monitoramento de chuva e vazão retratam a contínua interação entre o uso da água (usos consuntivos) e a produção natural da água na bacia. Este estudo buscou gerar resultados que representassem o comportamento natural dos cursos d'água, ou

seja, como seria o regime de vazões dos rios sem a interferência dos usos consuntivos. O processo de renaturalização dessas vazões dos rios produziu importantes resultados para a gestão dos corpos hídricos para os órgãos gestores responsáveis. As particularidades desses processos fazem com que eles sejam diferentes dos usualmente utilizados em estudos tradicionais de disponibilidade hídrica e foram discutidas ao longo desse trabalho, visando subsidiar a escolha dos métodos mais adequados.

As etapas iniciais do estudo começaram na origem da informação hidrológica, revisando e repassando procedimentos de consistência hidrométrica para construção de um banco de dados inicial, evoluindo para informações hidrológica refinadas que permitiram atualizar as disponibilidades hídricas da Bacia do Rio Paraíba do Sul no cenário atual. Somado a isso, também possibilitou investigar o que a área pode esperar para os cenários futuros de mudanças climáticas associados a vazões máximas e disponibilidade.

O fluxograma apresentado na Figura 2.1 resume de forma direta e simplificada as cinco etapas que foram desenvolvidas no estudo, onde são apresentados questionamentos e como eles foram respondidos nos respectivos produtos. Por fim, nos itens a seguir será feito um aprofundamento da metodologia utilizada em cada um dos produtos desenvolvidos.



Figura 2.1 – Fluxograma dos produtos desenvolvidos.

2.1. LEVANTAMENTO DE DADOS

O estudo iniciou levantando os principais dados hidrológicos disponíveis para a BHPS. Essas informações permitiram compreender a situação atual do monitoramento da bacia e subsidiaram a escolha da abordagem metodológica a ser usada no estudo de disponibilidade e avaliação de cenários futuros associados a mudanças climáticas da bacia. A Figura 2.2 apresenta o fluxograma de como os dados foram trabalhados neste produto.

2.1.1. Inventário de Estações e Dados Hidrológicos

Para inicialmente avaliar as estações de monitoramento existentes na BHPS, foi utilizado o inventário de estações da plataforma Hidroweb disponibilizado na data de 24/02/2023. Essa base de dados consiste no histórico de estações de monitoramento hidrológico registradas no sistema com diversos tipos de informações, tanto em operação quanto desativadas. Neste trabalho, somente as estações de monitoramento dos rios com dados de vazão e chuva foram utilizadas, tanto as do tipo convencional quanto as telemétricas. A análise prévia a partir do inventário permitiu compreender os principais órgãos e entidades responsáveis pela geração de dados na bacia, subsidiando a busca por mais informações diretamente junto aos órgãos.

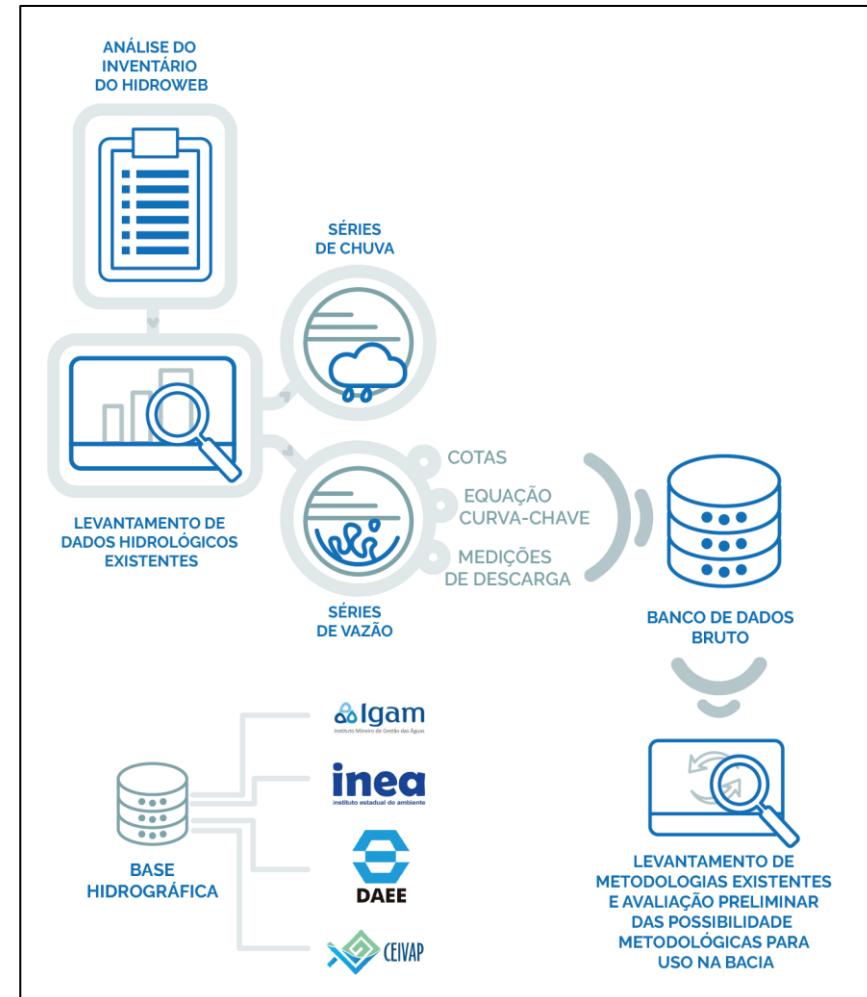


Figura 2.2 – Fluxograma das atividades de levantamento de dados do Produto 1.

2.1.1.1. *Estações Fluviométricas*

Os dados de vazão foram obtidos principalmente pelo portal Hidroweb da ANA. Em complemento, também foram levantados os dados do sistema HIDRO Telemetria e de órgãos e empresas como o DAEE e o INEA. Além dos dados de vazão, também foram levantadas informações de medições de descarga líquida, cota e equações de curva-chave para subsidiar as atividades de consistência de dados que foram realizadas nas etapas seguintes. Os dados passaram por uma etapa inicial de verificação de duplicidade de dados e construção de um banco de dados inicial fluviométrico bruto.

2.1.1.2. *Estações Pluviométricas*

Os dados de precipitação foram obtidos em sua maior parte pelo portal Hidroweb. Em complemento, também foram levantados os dados do sistema HIDRO Telemetria e de órgãos e empresas como o DAEE, Furnas, Light Energia, INMET e INEA. Os dados passaram por uma etapa inicial de verificação de duplicidade de dados e construção de um banco de dados inicial pluviométrico bruto.

2.1.1.3. *Dados dos Reservatórios*

Os principais reservatórios (tanto os que operam a fio d'água quanto os que regularizam as vazões) foram analisados em relação

à sua disponibilidade de dados de vazão para serem usados no estudo de disponibilidade. Para isso, as séries históricas de vazão defluente observada foram levantadas para subsidiar o desenvolvimento de produtos subsequentes a este. As séries de defluência dos reservatórios foram obtidas por meio do sistema SAR (Sistema de Acompanhamento de Reservatórios) da ANA e pelo Hidroweb.

2.1.2. *Base Hidrográfica*

Para este estudo foi utilizado como referência o banco de dados georreferenciado “Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 6 (BHO 6)”. O novo banco de dados apresenta cursos d'água bastante similares ao produto anterior (BHO 2017) com exceção de pequenos trechos de rio em cabeceiras da BHPS e na região da foz, onde o novo produto apresentou detalhamento superior dos cursos d'água.

Além disso, também foram utilizadas as bases hidrográficas usadas pelos órgãos gestores atuantes na bacia (IGAM, INEA e DAEE) e pelo CEIVAP. Os resultados do estudo foram inicialmente gerados usando a base BHO 6, e posteriormente compatibilizados e disponibilizados nas bases indicadas pelos órgãos gestores.

2.2. CONSISTÊNCIA DOS DADOS

Com o intuito de verificar a qualidade dos dados hidrológicos obtidos no Produto 1, foram estruturadas atividades de verificação e consistência das séries de dados. Os trabalhos foram organizados em duas etapas: nas séries fluviométricas e séries pluviométricas. A Figura 2.3 apresenta a organização do fluxo de trabalho de consistência dos dados hidrológicos de precipitação e vazão.

2.2.1. Consistência Pluviométrica

A análise foi efetuada após a pré-seleção das estações do banco de dados com base em critérios de tempo e tamanho da série de dados. Em seguida, foram criados grupos de estações com características homogêneas para realização da consistência dos dados. Os dados diários do banco bruto foram transformados em mensais para confecção das curvas de Dupla-Massa. Também se buscou identificar valores extremos dentro das séries, eliminando ruídos e dados não reais das séries. Por fim, foi realizada uma análise regional a partir da verificação dos quantitativos médios anuais e mensais de precipitação em cada estação. Cada uma dessas etapas está mais bem detalhada nos itens a seguir. O processo de consistência deu origem a um banco de dados pluviométrico consistido que foi usado nos Produtos subsequentes do estudo.

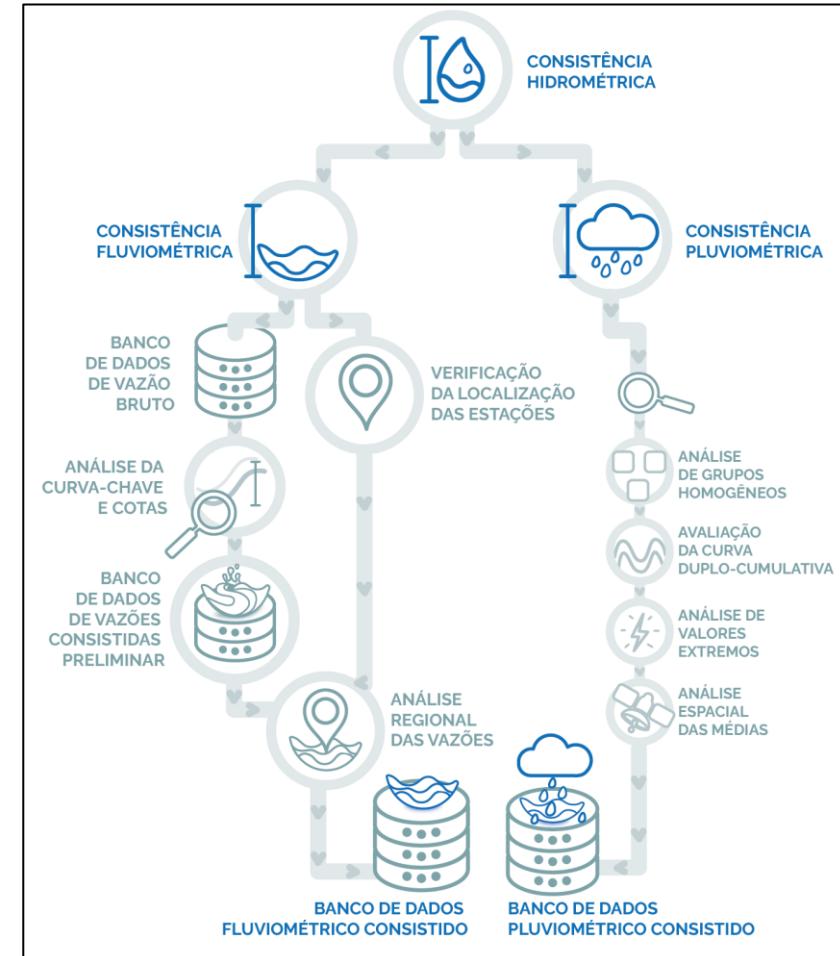


Figura 2.3 – Fluxograma dos procedimentos de consistência dos dados hidrológicos do Produto 2

2.2.1.1. Seleção das Estações e Grupos de Regiões Homogêneas

A base de dados bruta de estações pluviométricas obtida na elaboração do Produto 1 apresentou um total de 1.402 estações, que representam o total de estações registradas historicamente no inventário de dados do Hidroweb. Esta base foi inicialmente tratada conforme os critérios elencados a seguir para início da consistência dos dados de chuva: a) estações sem séries foram removidas; b) estações com menos do que um ano de dados foram removidas; c) estações que possuíam dados apenas antes de 1978 foram desconsideradas; e d) foram desconsideradas da seleção estações fora da bacia hidrográfica e que estavam em regiões de relevo muito discrepante, como na porção sul da BHPS.

Além disso, a área trabalhada foi dividida em 30 regiões de pluviosidade homogênea que respeitaram questões que tipicamente interferem nos regimes pluviométricos tais como relevo, altimetria e médias anuais de chuvas. Alguns dos procedimentos de consistência apresentados a seguir foram executados dentro dessas regiões pré-definidas.

2.2.1.2. Avaliação dos dados Mensais e Métodos de Dupla-Massa

A primeira etapa da avaliação consistiu na transformação dos dados diários de precipitação para a escala mensal. Cada estação foi consistida a partir da comparação com, no mínimo, outras duas

estações vizinhas de apoio, sendo estas as duas estações com maior número de dados coincidentes com a estação principal dentro do grupo de precipitação homogênea. Dessa forma, foi possível observar se a inconsistência identificada estava na estação analisada ou na estação de apoio. Em alguns casos, em que duas estações de apoio não foram suficientes, foram escolhidas outras estações com grande número coincidente de dados para a avaliação.

O método usado na análise foi o da Dupla-Massa desenvolvido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 1966) que, de acordo com (ANA, 2011a), é o mais comum adotado no Brasil para análise de consistência de dados pluviométricos, que deve ser usado apenas para séries mensais ou anuais. A análise de consistência em uma determinada região busca comprovar a homogeneidade dos dados disponíveis no posto que está sendo analisado em relação aos registros observados em outros postos de apoio (TUCCI, 1993).

2.2.1.3. Análise Espacial e de Valores Extremos

Para avaliar medições pontuais muito altas nas análises anteriores e que não foram detectadas na análise da Dupla-Massa, uma nova verificação foi feita. Para isso, as estações foram avaliadas em análise conjunta e iterativa usando as estações dentro dos mesmos grupos de regiões homogêneas.

Os valores considerados anômalos foram removidos da base de dados. Para a análise conjunta, foi utilizado o visualizador de dados Super Manejo de Dados 2.1 (FAN; COELHO, 2016).

Por fim, no intuito de buscar erros discrepantes que não necessariamente seriam encontrados pelas análises anteriores e compreender os dados espacialmente, optou-se por calcular as médias mensais e anuais de todas as estações avaliadas como consistentes e consistidas nas etapas anteriores e plotar os dados para procurar discrepâncias visualmente.

2.2.2. Consistência Fluviométrica

A organização do fluxo de trabalho de consistência dos dados hidrológicos de vazão é fundamental para garantir a qualidade e boa representação dos processos que ocorrem na BHPS. O uso de dados de vazão sem verificação sistemática da informação pode implicar em grandes inconsistências nos resultados buscados.

Sendo assim, a análise teve início com a verificação de erros grosseiros nas cotas e avaliação das curvas-chave com dados disponíveis. As estações que tiveram alguma consistência efetuada tiveram suas novas séries de vazões incorporadas à base de dados de vazão consistida preliminar, substituindo ou complementando o dado antigo de vazão obtido que foi considerado inconsistente.

Em paralelo a isso, foi feita a consistência da localização e área de drenagem das estações para subsidiar a construção dos diagramas unifilares de cada sub-bacia. Os diagramas unifilares, associados às sub-bacias da BHPS, deram origem aos grupos de trabalho onde a análise regional foi realizada. Os resultados da aplicação das metodologias deram origem às bases de dados consistidas que foram utilizadas nas etapas posteriores do presente projeto. Cada uma dessas etapas do processo de consistência fluviométrica está mais bem detalhada nos itens a seguir.

2.2.2.1. Localização e Área de Drenagem das Estações

Foi feita uma avaliação de consistência da localização e área de drenagem das estações fluviométricas com base na hidrografia da BHO 6, informações do inventário de estações fluviométricas do Hidroweb, imagens de satélite e modelo digital de terreno SRTM. Esse trabalho deu origem a um novo banco de dados consistido de localização das estações. Essa etapa buscou confirmar a localização exata das estações que possuíam dados de vazão e subsidiar a construção de diagramas unifilares, que indicam a conexão entre as estações fluviométricas para avaliação regional das vazões.

2.2.2.2. Avaliação das Cotas e Curva-Chave

Inicialmente, a análise de cotas buscou identificar e corrigir erros grosseiros, onde os cotogramas com curva-chave disponível foram

avaliados individualmente e em conjunto, preferencialmente usando estações no mesmo trecho de rio. Esta atividade foi feita por meio de gráficos e análise comparativa de cotogramas simultâneos das estações em análise, utilizando planilhas eletrônicas. A análise de cota avaliou os dados oriundos das diferentes fontes de dados para compor a série final, ou seja, mesclando dado telemétrico e dado convencional, ou dados de estações coincidentes, mas obtidos de bancos diferentes.

A avaliação das curvas-chave foi baseada na nuvem de resumos das medições de descarga líquida, esses dados foram avaliados em planilha de Excel juntamente com os parâmetros das curvas-chave obtidas levantadas das bases de dados.

As métricas de avaliação de curva-chave usadas neste estudo foram: a) análises gráficas; b) desvios em relação às cotas; c) desvios em relação ao tempo; d) desvio absoluto médio percentual; e e) número de medições acima e abaixo de cada validade. As metodologias estão de acordo com os procedimentos desenvolvidos pela ANA em estudos de consistência de séries de estações fluviométricas (ANA, 2011b).

2.2.2.3. *Análise regional das vazões*

A análise regional das vazões buscou avaliar o comportamento de estações fluviométricas próximas ou no mesmo rio em relação à consistência da informação disponibilizada. Para isso as estações foram agrupadas com base na continuidade do fluxo de vazões e disponibilidade temporal dos dados. A criação dos grupos buscou agrupar estações com o máximo de dados temporais coincidentes, ainda assim, nem sempre 100% dos dados puderam ser avaliados combinados com as estações do grupo. Por esse motivo, diferentes tipos de análises de consistência foram feitos para complementar a avaliação coincidente no tempo.

Cada um dos grupos teve as suas vazões diárias e mensais (normais e específicas) avaliadas de forma gráfica. Além disso, a análise regional também avaliou as estações dos grupos em relação as suas curvas duplo cumulativas, cada grupo teve todas as combinações possíveis feitas, dando origem a diversos gráficos que foram usados para identificar inconsistências nas séries de dados.

Por fim, a análise regional das estações avaliou o comportamento da curva de permanência de todas as estações fluviométricas dos grupos de análise. A curva de permanência das vazões (m^3/s) e a curva de permanência das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) foram utilizadas na análise.

2.3. RENATURALIZAÇÃO DAS VAZÕES, PREENCHIMENTO DAS SÉRIES E ANÁLISES DE ESTACIONARIEDADE

O presente item avançou na análise das séries de dados observadas e consistidas das estações fluviométricas, criando um banco de dados para o estudo de disponibilidade hídrica dos Produto seguintes do estudo. As análises iniciaram com a renaturalização das vazões observadas, reconstituindo as séries com base nos usos consuntivos da bacia. Também foram feitas análises de preenchimento de dados nas séries. E por fim, as séries de vazão e chuva foram avaliadas em relação à estacionariedade dos dados. Todas as etapas estão mais bem descritas a seguir. A Figura 2.4 mostra um fluxograma dos procedimentos adotados para no presente Produto, que deu origem a um novo banco de dados para o presente estudo.

2.3.1. Renaturalização das Vazões

A representação dos usos consuntivos nas séries de vazões diárias foi feita por meio da prévia incorporação do dado de uso consuntivo no hidrograma diário observado. Nesse caso, a série fluviométrica da estação foi renaturalizada e o modelo hidrológico foi calibrado já usando o dado observado renaturalizado. Nesse caso, as séries

geradas no modelo durante a calibração já representam as vazões renaturalizadas.

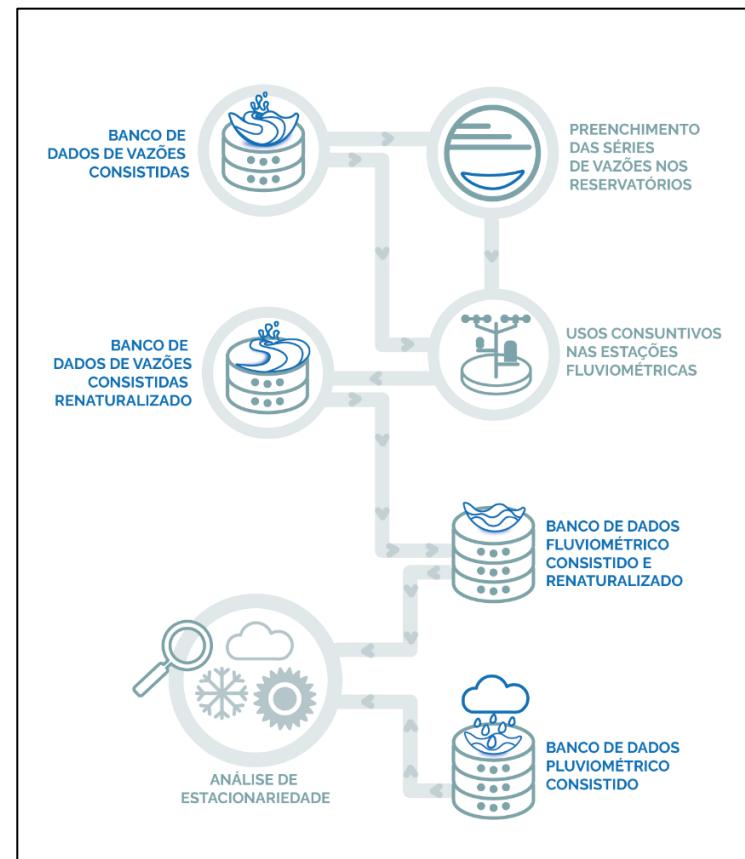


Figura 2.4 – Fluxograma dos procedimentos de renaturalização, preenchimento e avaliação da estacionariedade do Produto 3

Sendo assim, em todas as estações fluviométricas com séries de dados diários, os volumes de usos consuntivos acumulados (séries mensais desagregadas para diárias) foram somados às séries históricas conforme equação de renaturalização apresentada abaixo (PRUSKI et al., 2011).

$$Q_{nat_d} = Q_{obs_d} + Q_c \quad \text{Equação 2.1}$$

Em que, Q_{nat_d} é a vazão renaturalizada diária, Q_{obs_d} é a vazão observada diária, e Q_c é a vazão de uso consuntivo consumida (não sendo considerada a vazão que retorna ao rio).

2.3.1.1. Usos Consuntivos

O presente capítulo levantou as seguintes informações sobre usos consuntivos da BHPS: a) dados públicos das Resoluções ANA nº 92 e 93 de 2021 que apresentam as séries históricas de usos consuntivos a montante de aproveitamentos hidrelétricos, para fins de reconstituição de séries de vazões e de planejamento; b) dados de usos consuntivos processados pela ANA para áreas a montante de estações fluviométricas, e disponibilizados especialmente para este projeto.

Nesta etapa foi gerado um banco de dados de usos consuntivos para 203 estações fluviométricas do estudo que podem ser

acessados no banco de dados do projeto já desagregado para a escala diária.

Ainda, com o intuito de validar os resultados gerados nas estações fluviométricas, os resultados foram avaliados espacialmente para auxiliar na identificação de tendências espaciais, onde os valores absolutos de usos consuntivos e alterações nas vazões de referências após a renaturalização foram verificados.

Também foi avaliada a evolução dos usos com os dados da plataforma SIDRA do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), as séries históricas de "área colhida" e "área plantada ou destinada para colheita" foram obtidos em hectares para o período entre 1974 e 2021 e comparadas com os dados de usos consuntivos. Por fim, ainda foram levantadas questões legais associadas aos usos da água na bacia para compreender alterações temporais das tendências, como por exemplo, início de políticas de cobrança pelo uso da água.

2.3.2. Preenchimento das Séries Hidrológicas nos Barramentos

Os barramentos interferem no comportamento das vazões naturais dos rios. Entender o seu funcionamento em termos de armazenamento, reserva, geração, transposições, etc., é

fundamental para a análise da disponibilidade hídrica de bacias hidrográficas. O curso principal do rio Paraíba do Sul é altamente regularizado devido aos reservatórios e aproveitamentos hidroelétricos existentes e sua dinâmica não responde mais ao comportamento natural passado da BHPS, e sim à nova dinâmica induzida pelos barramentos. O Quadro 3.1 apresenta a lista de doze importantes reservatórios existentes na BHPS

Quadro 2.1 – Principais barramentos na BHPS

Nome	Rio	Regime	Potência (MW)
Paraibuna-Paraitinga	Paraíba do Sul	Regularização	87
Santa Branca	Paraíba do Sul	Regularização	56
Jaguari	Rio Jaguari	Regularização	28
Funil	Paraíba do Sul	Regularização	216
Santa Cecília	Paraíba do Sul	Fio d'água	-//-
Santana	Piraí	Fio d'água	-//-
Vigário	Ribeirão Vigário	Fio d'água	91
Tocos	Piraí	Fio d'água	--//-
Furnas/Simplício	Paraíba do Sul	Fio d'água	306
Ilha dos Pombos	Paraíba do Sul	Fio d'água	187
Barra do Braúna	Pomba	Fio d'água	39
Picada	Peixe	Fio d'água	50

Fonte: CEIVAP (2021).

Devido à abordagem metodológica prevista para as etapas posteriores do projeto usando modelagem hidrológica, onde foi necessário o uso de séries completas nos pontos com barramentos para representação de condições de contorno, o preenchimento dos dados nas séries das defluências foi feito usando dados de

estações fluviométricas muito próximas ao local. Sendo assim, métodos mais simplificados associados às relações de áreas de drenagem são o suficiente para o preenchimento das séries diárias de dados nesses locais.

2.3.3. Análise de Estacionariedade das Séries Hidrológicas

A estacionariedade é um conceito aplicado em séries históricas que analisa como seus valores estatísticos variam ao longo do tempo. Na hidrologia esse conceito é aplicado para avaliar se os dados fluviométricos ou pluviométricos possuem uma tendência significativa à diminuição ou ao aumento. Há vários métodos para testar a estacionariedade, destacando-se o teste não-paramétrico de Mann-Kendall (KENDALL, 1975; MANN, 1945), que foi utilizado neste estudo. O resultado do teste informa se as séries anuais apresentam tendência de aumento ou diminuição para um determinado nível de significância, que foi adotado nas análises em 5%.

2.3.3.1. Tendência das Vazões

Para a avaliação das tendências das séries de dados de vazão da bacia, foram selecionadas estações fluviométricas com ao menos 20 anos de dados anuais entre 1960 e 2021 e com ao menos 4 anos de dados entre 2015 e 2021, para que o período recente caracterizado

por uma estiagem prolongada pudesse ser representado. Somente dados anuais após 1960 foram mantidos para a análise de estacionariedade. Nessas condições, foi possível aplicar o método de tendência de Mann-Kendall em 56 estações fluviométricas. Para avaliar as tendências do comportamento hidrológico na bacia, os seguintes índices de referência foram avaliados: a) vazão média anual; b) máxima vazão anual registrada de 1 dia; c) máxima vazão anual registrada em 5 dias consecutivos; d) mínima vazão anual registrada em 7 dias consecutivos (Q7); e) mínima vazão anual registrada em 7 dias consecutivos (Q7) durante o trimestre mais úmido (Dezembro-Janeiro-Fevereiro).

2.3.3.2. *Tendência das Precipitações*

Para a avaliação das séries de dados de precipitação da bacia, também foram selecionadas estações pluviométricas com ao menos 20 anos de dados anuais entre 1960 e 2021 e com ao menos 4 anos de dados entre 2015 e 2021, para que o período recente caracterizado por uma estiagem prolongada pudesse ser representado na análise. Somente dados anuais após 1960 foram mantidos para a análise de estacionariedade. Nessas condições foi possível aplicar o método de tendência de Mann-Kendall em 115 estações pluviométricas. Para avaliar as tendências do comportamento hidrológico na bacia, os seguintes índices de referência foram avaliados considerando o ano hidrológico: a)

precipitação total anual; b) número de dias com chuva no ano hidrológico; c) número de dias com chuva em cada mês; d) número de dias com precipitação $\geq 50\text{mm}$ no ano; e) precipitação diária máxima nos meses do ano; e f) precipitação diária máxima em cinco dias consecutivos no ano.

2.4. DISPONIBILIDADE HÍDRICA

No presente estudo, o método definido como principal para regionalização das vazões da BHPS, após a análise da disponibilidade de dados e características da região, foi o modelo chuva-vazão MGB (COLLISCHONN, 2001). Ainda, para complementar a regionalização em trechos de rios pequenos, foi utilizado o método da vazão específica para transferência dos dados desde os rios maiores. A organização do produto está mais bem detalhada na Figura 2.5.

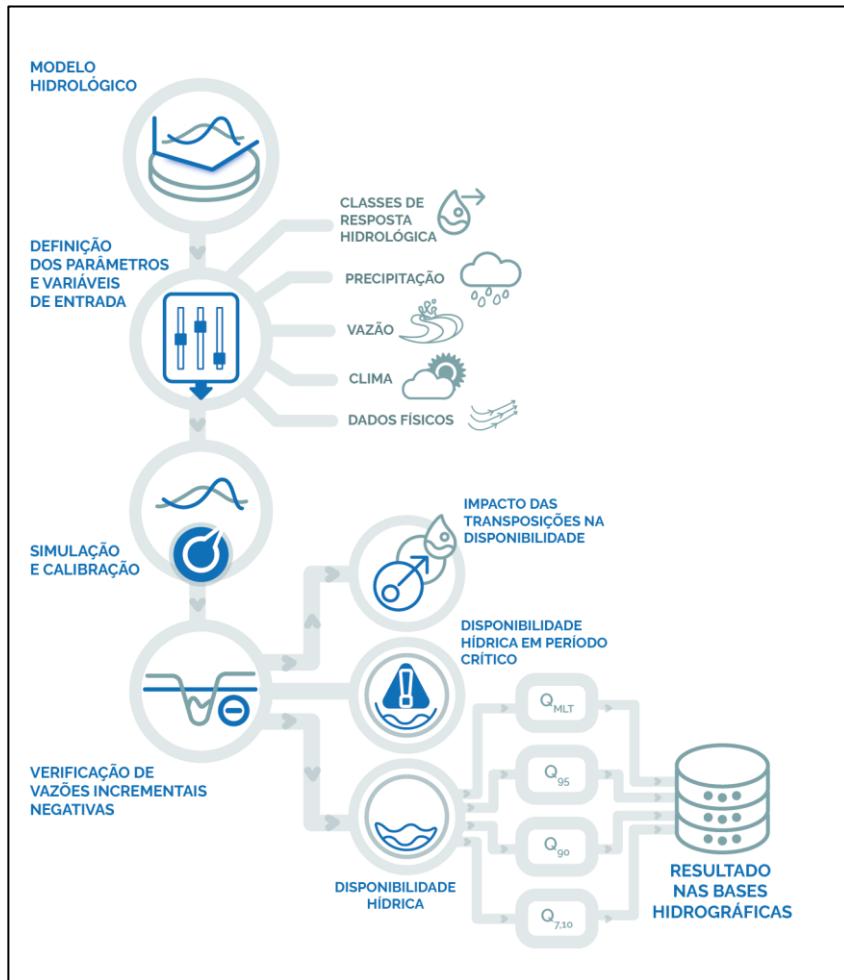


Figura 2.5 – Fluxograma dos procedimentos para obtenção da disponibilidade hídrica do Produto 4.

2.4.1. Modelo Hidrológico Chuva-Vazão MGB

O Modelo Hidrológico de Grandes Bacias MGB é um modelo semi-distribuído desenvolvido para aplicações em grandes bacias. O MGB é um modelo baseado em processos que simula o ciclo hidrológico através de relações físicas e conceituais. São simuladas todas as etapas do ciclo hidrológico terrestre, incluindo balanço de água no solo, evapotranspiração, interceptação, escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo e propagação na rede de drenagem. A seguir o modelo será mais bem detalhado.

2.4.1.1. Discretização Espacial: Sub-bacias e Minibacias

Para a aplicação do modelo MGB, a BHPS foi dividida espacialmente em sub-bacias e minibacias. As sub-bacias representam unidades dentro da bacia com comportamento hidrológico semelhante e que são utilizadas para calibração do modelo, onde diferentes grupos de parâmetros calibráveis são aplicados a cada sub-bacia. Buscou-se identificar por meio da análise física, hidrológica e antrópica, regiões da bacia com características regionais semelhantes entre si para definição das sub-bacias.

No modelo, a menor unidade de discretização da bacia é no formato de minibacias, e cada uma destas possui um trecho de rio correspondente onde os resultados hidrológicos são processados,

gerando como produto as séries de vazão. O processamento das minibacias foi realizado com o plugin BHO2MGB, que utiliza as informações previamente existentes na Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO 6) disponibilizada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

2.4.1.2. Representação dos Barramentos

Ao longo da BHPS, existem grandes barramentos de água que causam impactos no balanço hídrico da bacia e na dinâmica de fluxo. Para representar esse comportamento, os barramentos com capacidade de regularizar as vazões dos rios foram representados no modelo hidrológico como condições de contorno, ou seja, pontos do modelo onde as vazões foram substituídas por séries de vazões renaturalizadas. Sendo assim, os reservatórios Santa Branca, Jaguari, Funil, Santa Cecília, Furnas/Simplício e Picada foram representados com essas condições no modelo devido às suas maiores relevâncias em relação à capacidade de regularização dos rios.

2.4.1.3. Classes Hidrológicas da Paisagem

Para simular os processos hidrológicos foram utilizados mapas de classes hidrológicas da paisagem (HLC, em inglês), que representam uma combinação de mapas de uso e ocupação do solo e mapas de terreno.

O mapa de uso e ocupação do solo é dividido em cinco classes: Floresta, Campo, Agricultura, Não Vegetado e Água. Já o mapa de terreno é dividido em três classes: Área Úmida, Área Plana e Área de Encosta. A combinação dessas classes deu origem ao mapa de HLC usado no modelo hidrológico.

2.4.1.4. Dados de Precipitação e Vazão

Os dados pluviométricos e fluviométricos usados foram os processados nas etapas anteriores que resultaram na formação do banco de dados consistido e renaturalizado. O Quadro 2.2 apresenta um resumo dos dados consistidos e renaturalizados que serviram como dado de entrada para a construção do modelo hidrológico. Foi selecionado um total de 203 estações fluviométricas e 475 estações pluviométricas para uso no desenvolvimento do modelo hidrológico.

2.4.1.5. Dados de Clima

Por fim, para calcular a evapotranspiração no modelo MGB foram utilizados dados de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e insolação (horas de sol por dia). Esses dados foram obtidos por meio de estações climatológicas do INMET no site do Instituto Nacional de Meteorologia. Foram avaliadas as bases de normais climatológicas disponíveis pelo órgão.

e optou-se pela utilização das normais do período de 1980 – 2010 devido ao maior número de estações disponíveis.

Quadro 2.2 – Total de estações consistidas e renaturalizadas para cada sub-bacia.

Sub-bacia	Estações Pluviométricas	Estações Fluviométricas
Alto Vale do Rio Paraíba	46	9
Baixo Vale do Rio Paraíba	14	4
Médio Vale do Rio Paraíba	40	20
Médio Vale Inferior do Rio Paraíba	11	11
Médio Vale Superior do Rio Paraíba	186	47
Rio Carangola	6	6
Rio Dois Rios	35	19
Rio Muriaé	18	11
Rio Paraibuna	21	20
Rio Piabanga	37	10
Rio Piraí	16	7
Rio Pomba	24	28
Rio Preto	21	11
Total	475	203

Fonte: Elaboração própria.

2.4.1.6. Período de Simulação do Modelo

O modelo foi simulado a partir do início do ano hidrológico de 1978 até o final do ano hidrológico de 2020, que termina em novembro de 2021. Isso resultou em séries históricas de 43 anos para a BHPS, que é considerado um período robusto e representativo para

obtenção de vazões de referência. Um período de aquecimento de 23 meses foi utilizado para que o modelo atingisse um estado otimizado, ou seja, a simulação a partir da chuva teve início em 1977, mas os resultados somente foram gerados a partir do início do ano hidrológico de 1978.

2.4.1.7. Calibração do Modelo Hidrológico MGB

Após definido o período de simulação, deu-se início ao processo de calibração do modelo. A calibração de um modelo é um processo em que os valores dos parâmetros das bacias que não variam no tempo são modificados e seu efeito nos resultados é avaliado repetidamente, até que o hidrograma de vazões calculado reproduza o hidrograma renaturalizado com resultado adequado avaliado por meio de estimadores estatísticos.

Os procedimentos utilizados para calibração do modelo MGB envolveram análises visuais de ajuste dos hidrogramas renaturalizados e modelados em conjunto com medidas de desempenho quantitativas dos ajustes para toda a série histórica de dados de vazão. Para a avaliação quantitativa dos ajustes foram utilizados alguns indicadores de eficiência como o coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe das vazões, o coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões, o erro relativo do volume

total dos hidrogramas, o erro de Q_{95} e Q_{90} , o erro de Q_{mlt} e o erro de $Q_{7,10}$.

Ainda, em algumas estações do modelo foi utilizada a assimilação de dados, que consiste em um processo de retroalimentação em que as observações são utilizadas para corrigir as variáveis de estado do modelo hidrológico, aproximando as condições simuladas pelo modelo e as observadas em campo. Ao modificar as variáveis de estado para condições iguais às observadas em locais com dados, são atualizados os resultados em toda a bacia, gerando um efeito a princípio positivo na qualidade da informação gerada para os locais não monitorados. Ou seja, o procedimento faz com que em locais específicos o dado simulado no modelo seja idêntico ao dado observado na estação fluviométrica.

2.4.2. Cálculo da Disponibilidade Hídrica

Após a conclusão da calibração com assimilação de dados na BHPS, foi definida a metodologia de cálculo das vazões de referência. Segundo a Resolução nº 129 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, a vazão de referência pode ser definida como “aquela que representa a disponibilidade hídrica do curso de água, associada a uma probabilidade de ocorrência” (CNRH, 2011). Essa vazão é tipicamente utilizada como um dos parâmetros para concessão de

outorgas de direito de uso de recursos hídricos, sendo um dado fundamental para a gestão responsável das águas.

Em Minas Gerais, de acordo com a Portaria IGAM nº 48 de 04 de outubro de 2019, “a vazão de referência a ser utilizada para o cálculo das disponibilidades hídricas superficiais no Estado de Minas Gerais é a vazão mínima de sete dias de duração e dez anos de recorrência – $Q_{7,10}$ ” (IGAM, 2019). O mesmo ocorre com o Estado de São Paulo, onde o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) emprega a $Q_{7,10}$ como base para concessão de outorgas (DAEE, 2017). Já para o Estado do Rio de Janeiro, a vazão de referência utilizada é Q_{95} (INEA, 2018).

As vazões de referência calculadas neste estudo foram as seguintes: vazão mínima média de 7 dias de duração e 10 anos de período de retorno ($Q_{7,10}$), vazão média de longo termo (Q_{mlt}), e vazões que são igualadas ou superadas em 95% do tempo (Q_{95}) e em 90% do tempo (Q_{90}). Os cálculos foram aplicados nas vazões anuais, trimestrais, bimestrais e mensais.

As vazões Q_{95} e Q_{90} foram obtidas por meio da elaboração de curvas de permanência, as quais expressam a frequência com que a vazão do rio é superada ou igualada no tempo. Para a definição das curvas de permanência, foram usadas as séries históricas diárias de vazão. O valor da vazão Q_{mlt} foi obtido a partir da série histórica total de

vazão, onde foi feita uma média aritmética simples das vazões diárias do período definido de análise. Por fim, a vazão $Q_{7,10}$, foi obtida através do método empírico das distribuições de probabilidade de excedência de Weibull (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

2.4.3. Avaliação das Vazões Incrementais Negativas

Os resultados foram tratados em relação à ocorrência de vazões incrementais negativas, uma vez que as bases serão usadas para fins de gestão. Ou seja, não é desejado que uma vazão de referência no trecho de jusante tenha vazão menor que o trecho de montante (com exceção de locais com reservatórios), ou que dois afluentes somem uma vazão de referência superior ao trecho logo de jusante. Nas situações em que ocorreram vazões incrementais negativas, foi feita a modificação do resultado do trecho de rio considerando a vazão do trecho de montante somada. Ou seja, em uma confluência ou troca de trecho de rio, os casos em que a vazão incremental negativa foi observada, o valor de montante (ou a soma da confluência) foi adotado para o trecho de jusante. Esse procedimento implicou em atualização de vazões de referência nos trechos de rio de forma crescente para jusante. E que, em alguns casos, implicou em aumento do erro em determinado ponto com observação.

2.4.4. Resultados nas Bases Hidrográficas

Para compatibilizar os resultados gerados pelo modelo MGB com a base hidrográfica BHO 6, foi feito um tratamento de dados espacialmente, onde os resultados das minibacias foram transferidos para os 272.188 trechos de rio da base para cada uma das vazões de referência e suas variações temporais.

Os resultados de disponibilidade gerados para o presente estudo também foram compatibilizados com as bases hidrográficas dos órgãos gestores atuantes. As bases do INEA-RJ e DAEE-SP são espacialmente idênticas à BHO6, com exceção de trechos extras como drenagem urbana e meandros. Como nessas exceções não é possível obter dados de vazão de referência, os resultados para esses órgãos é o mesmo obtido para a BHO6. Já em relação à base do IGAM-MG, a metodologia utilizada foi baseada no uso de centroides dos trechos da BHO6 coincidentes com trechos da BHO 2017, além da varredura de trechos sem vazão com preenchimento por meio da vazão específica do trecho mais a jusante com dados.

2.4.5. Avaliação dos Resultados em Períodos Críticos

Em relação aos resultados, se buscou compreender a resposta das vazões de referência para períodos críticos na bacia hidrográfica. As análises mostraram que o período entre 2014 e 2021 esteve

submetido à anomalia negativa mais intensa na região desde 1960 (período máximo avaliado). Assim, os resultados obtidos no período entre os anos hidrológicos de 2014 e 2020 foram inicialmente avaliados comparativamente usando as vazões de referência estudadas.

2.4.6. Impacto das Transposições na Disponibilidade

Com o intuito de compreender como a transposição das águas da BHPS afeta a disponibilidade hídrica do rio Paraíba do Sul, foi feita uma análise posterior ao estudo de disponibilidade por meio do uso dos volumes transpostos na defluência dos reservatórios onde ocorre a captação. É importante destacar que a abordagem é um cenário aproximado e simplificado da dinâmica da bacia, e teve como objetivo comparar com os resultados obtidos no presente estudo de disponibilidade hídrica.

Foi simulado como seriam as vazões de referência caso os volumes transpostos fossem propagados para jusante dos reservatórios ao invés de saírem das bacias. Para isso os locais de transposição na bacia foram representados no modelo hidrológico a partir da soma da defluência observada renaturalizada no barramento com a vazão transposta estimada acumulada a montante. Os resultados obtidos para o trecho principal do rio Paraíba do Sul foram comparados com

os resultados da disponibilidade obtidos, permitindo compreender como as transposições afetam a situação atual da bacia.

2.5. CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A metodologia desenvolvida para a análise do impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos da BHPS é apresentada na Figura 2.6 a seguir.

2.5.1. Modelos Climáticos

Para analisar a disponibilidade hídrica e as vazões máximas a longo prazo na BHPS, foram selecionados modelos climáticos com base no sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, CMIP6 - *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*), documento elaborado pelo IPCC, que analisa questões associadas às mudanças climáticas. O relatório é uma referência global, e foi desenvolvido por cientistas da Organização das Nações Unidas para monitorar e assessorar a ciência em relação às mudanças climáticas.

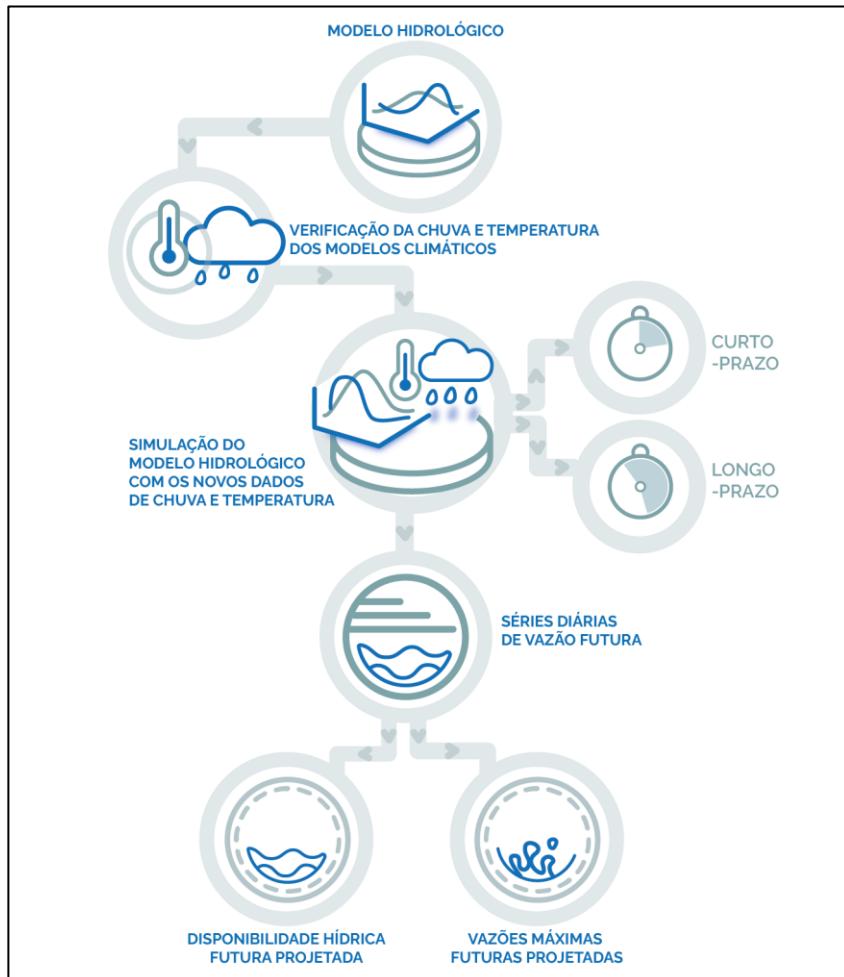


Figura 2.6 – Fluxograma da metodologia usada para avaliação dos cenários de mudanças climáticas do Produto 5.

A fonte dos dados de mudanças climáticas do CMIP6 utilizada foi a base *CLIMBra - Climate Change Dataset for Brazil* (BALLARIN et al., 2023), que conta com um total de 19 modelos climáticos, projetados para o território brasileiro e baseados nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. No presente estudo, foi adotado o cenário SSP2-4.5, que representa a sociedade submetida à uma vulnerabilidade intermediária com um nível médio de forçante radiativa, representando ainda condições não extremas de uso da terra e de aerossóis quando comparado aos demais SSP's.

A base conta com dados disponíveis em escala diária, com séries históricas entre 1980 e 2013 e séries futuras entre 2015 e 2100. Os dados históricos são fruto de combinações entre dados observados e simulados, já os dados futuros são oriundos de simulações. As variáveis climáticas obtidas dos modelos foram a precipitação e temperatura média (resultante da média entre os dados de temperatura mínima e temperatura máxima). Os dados originalmente passaram por correção de viés pelos autores.

Após a aquisição dos dados da base climática “CLIMBra”, eles foram previamente analisados visando garantir a qualidade dos dados de entrada para o modelo hidrológico MGB, que foi usado na avaliação da disponibilidade hídrica e vazões máximas do presente estudo. Para isso foi avaliada a sazonalidade dos dados de precipitação e temperatura dos modelos climáticos, comparando-os com os dados

observados na bacia. Em complemento, foram verificadas as anomalias e a estacionariedade para as séries de dados de precipitação e temperatura contendo os dados dos períodos histórico e futuro de forma integrada.

As verificações de anomalia e estacionariedade foram feitas com base em diversos indicadores para os dados de precipitação e temperatura. O objetivo foi compreender como a bacia irá evoluir no tempo em relação à dinâmica climática.

2.5.2. Uso e Ocupação do Solo

Ainda, para compreender a evolução do uso e ocupação do solo na bacia, foram analisadas as variações entre o passado e o presente por meio dos resultados do projeto MapBiomas (SOUZA et al., 2020). A avaliação buscou compreender se as bacias hidrográficas foram submetidas à alterações relevantes do ponto de vista da geração do escoamento no rios.

2.5.3. Simulação com o Modelo Chuva-Vazão MGB

As simulações para avaliação da alteração da disponibilidade e vazões máximas foram feitas com o modelo hidrológico MGB, este calibrado e validado para a BHPS usando dados observados e realizado no Produto 4 deste estudo. Nas simulações foram

utilizados como arquivos de entrada os dados de precipitação diária e temperatura média de cada um dos 19 modelos. Assim, foram feitas 19 simulações para o período histórico e 38 simulações para o período futuro, que foi dividido em curto prazo (correspondente aos anos entre 2015 e 2045) e longo prazo (correspondente aos anos entre 2046 e 2100), totalizando 57 simulações. Os procedimentos deram origem às séries históricas diárias de vazão que foram usadas nas etapas seguintes do estudo.

2.5.4. Vazões Máximas

Com os resultados de vazão gerados nas 57 simulações, foram calculadas as vazões máximas com tempos de retorno (TR) de 10, 25, 50 e 100 anos. Nos cálculos de TR foi utilizada a distribuição teórica de Gumbel para os pontos correspondentes às estações fluviométricas utilizadas no estudo. Para verificar os resultados gerados pelo ajuste teórico de Gumbel, os resultados da distribuição empírica foram comparados com os oriundos do método teórico para verificar a aderência do ajuste usando o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov. Assim, para trazer confiabilidade aos resultados gerados, foram utilizadas as estações que apresentaram aderência.

Para cada um dos TRs em cada uma das estações fluviométricas analisadas, foi calculada a mediana dos resultados de vazões

máximas para cada um dos 19 modelos, para o cenário histórico e para os cenários futuros de curto e longo prazo. Com base nas alterações entre passado e presente foi possível calcular fatores de alteração percentual, tanto para o curto quanto para o longo prazo. Uma vez definidos os fatores de alteração, eles foram aplicados nas vazões máximas obtidas pelo ajuste de Gumbel para cada TR nos dados renaturalizados de vazão gerados no Produto 3 e nas séries históricas modeladas obtidas no Produto 4.

Usando um exemplo hipotético, ao avaliar as vazões máximas observadas em uma determinada estação, obtém-se uma vazão para um TR de 10 anos. Em condições de mudanças climáticas em cenários futuros, ocorreria a alteração da vazão obtida para o TR de 10 anos, pois a série de dados seria atualizada. Nesse sentido, buscou-se mostrar qual o TR dessa vazão futura em relação aos dados atuais das estações fluviométricas. Então, os resultados gerados mostram qual seria o tempo de recorrência de um TR10 futuro (curto e longo prazo) nos dias de hoje.

A Figura 2.7 mostra um exemplo para interpretação dos resultados: se ocorrer um dimensionamento de uma ponte na bacia que exige um risco com TR de 100 anos, e deseja-se considerar questões associadas à mudanças climáticas, deve-se usar no mínimo um TR de 250 anos (obtido ao consultar a barra amarela do exemplo) com os dados de hoje para ter o risco de 100 anos no futuro próximo.

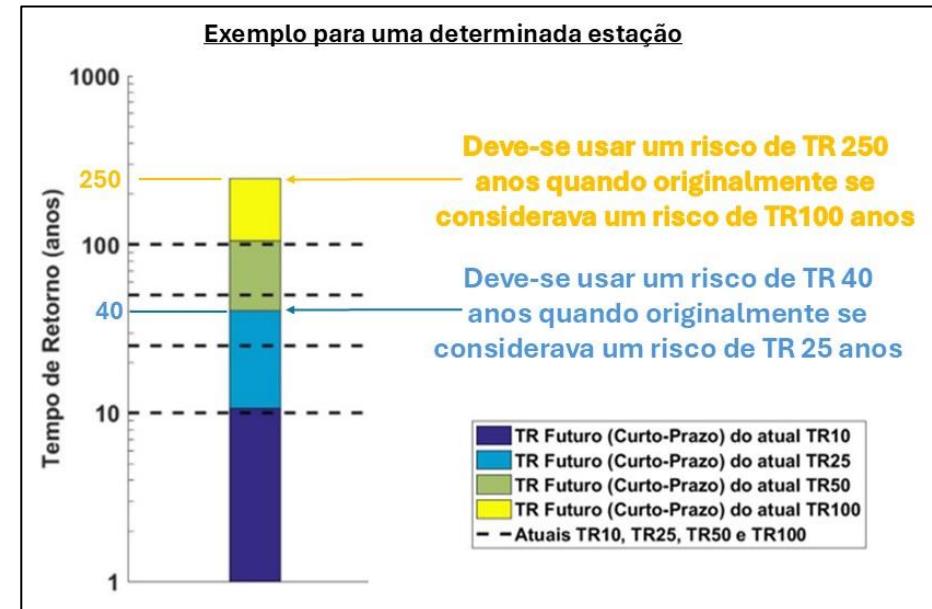


Figura 2.7 – Exemplo de interpretação das figuras de resultados.

Sendo assim, foram gerados os resultados de TR de vazões futuras em relação aos valores de TR atualmente usados nas séries de vazões máximas históricas simuladas no Produto 4 da contratação. Esses dados servem como subsídio para o planejamento da BHPS em cenários de mudanças climáticas.

2.5.5. Disponibilidade

Para avaliar os resultados de alteração na disponibilidade hídrica, assim como foi feito para as vazões máximas, foram calculadas as porcentagens de alteração das vazões de referência entre o período histórico e futuro, tanto no curto prazo como no longo prazo nos locais com estações fluviométricas. As vazões de referência avaliadas foram a vazão mínima $Q_{7,10}$, a vazão média de longo termo (Q_{mlt}), e as vazões que são igualadas ou superadas em 95% do tempo (Q_{95}) e em 90% do tempo (Q_{90}). Ainda, para melhor compreender os resultados de alteração da disponibilidade hídrica, foi feita a identificação de quantos dos 19 modelos climáticos apontavam para o aumento e quantos apontavam para a diminuição das vazões de referência em cada cenário futuro, uma vez que a BHPS está localizada em uma região onde não existe convergência entre todos os modelos climáticos sobre as alterações futuras esperadas.

Por fim, os percentuais de alteração das vazões foram aplicados sobre os resultados de disponibilidade gerados no Produto 4 desse estudo para projetar a disponibilidade hídrica futura nos rios nos dois cenários futuros simulados.

3. RESULTADOS NAS SUB-BACIAS

Os resultados obtidos no presente estudo e apresentados nos Produtos anteriores foram divididos de acordo com a Bacia Hidrográfica para facilitar a análise dos resultados pelos órgãos gestores e pelos Comitês de Bacia. Sendo assim, os resultados foram divididos em 13 sub-bacias e serão apresentados a seguir. Na Figura 3.1 é possível observar a divisão adotada baseada nas sub-bacias da BHPS. Ainda, para melhor compreender a divisão espacialmente em relação às áreas dos comitês de bacia hidrográfica, A Figura 3.2 mostra a sobreposição entre os limites. Posteriormente no Item 4, será feita a análise integrada da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul.

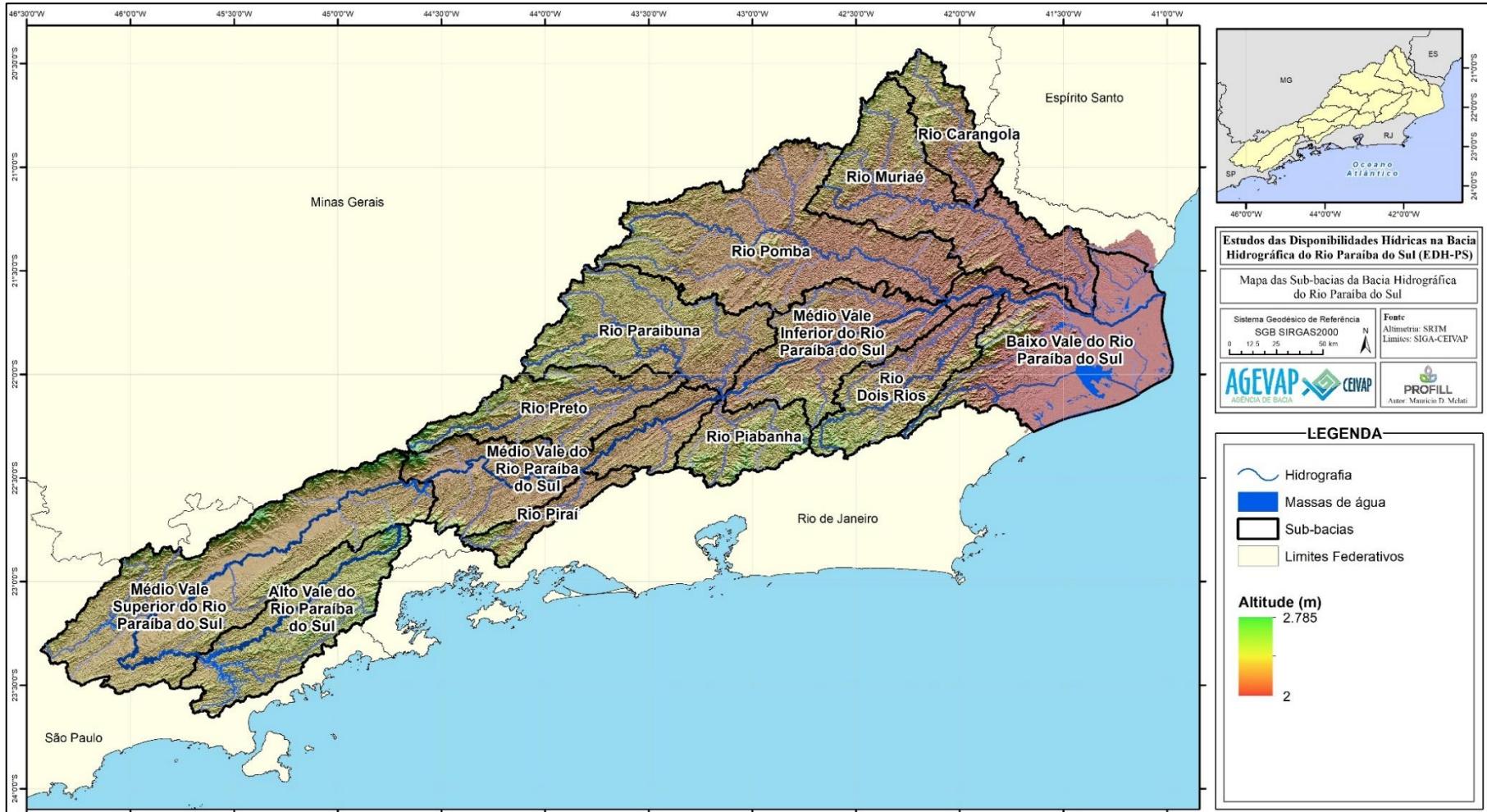


Figura 3.1 – Sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul.

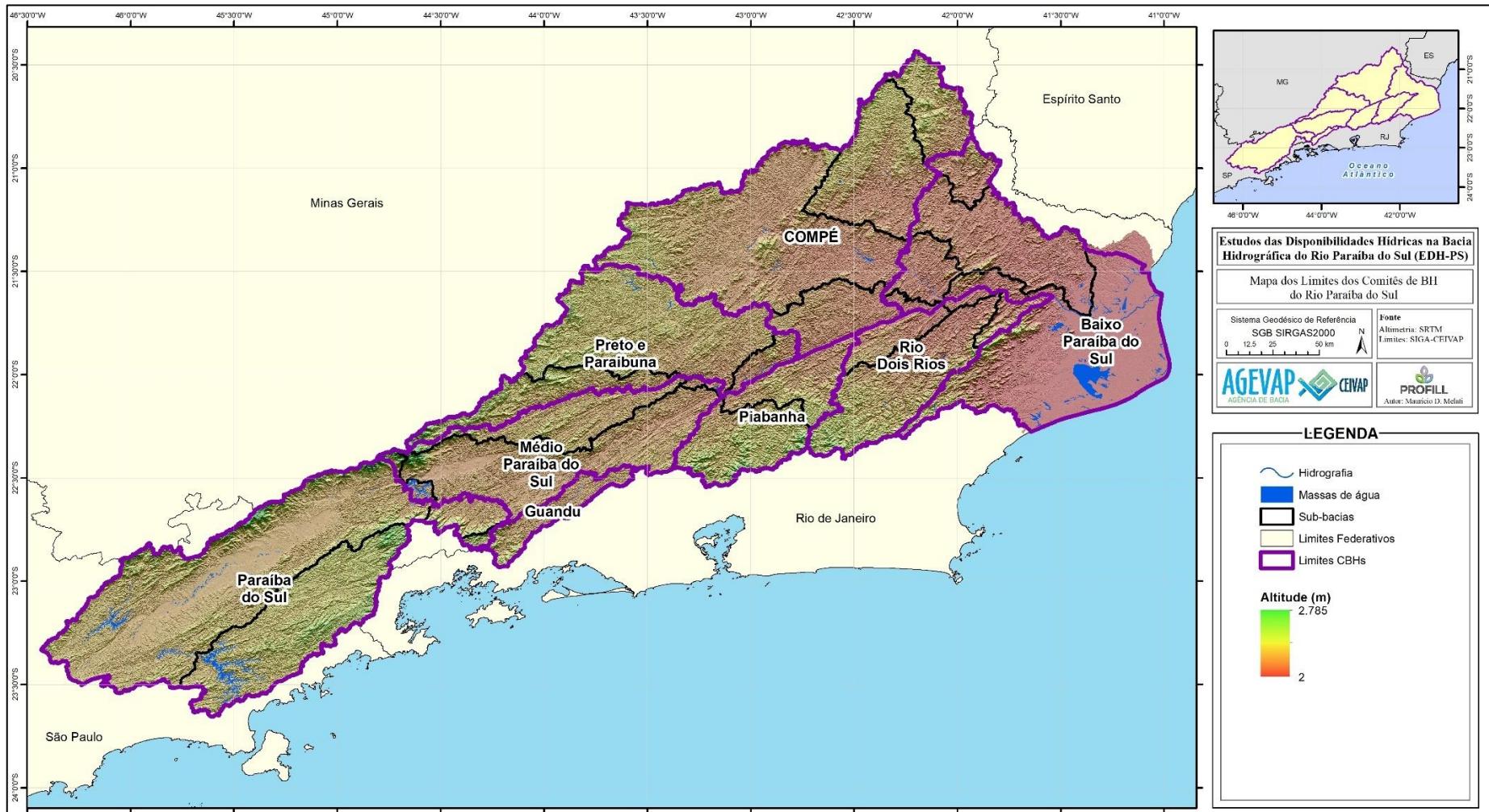


Figura 3.2 – Limites dos comitês de bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul.

3.1. SUB-BACIA DO ALTO VALE DO RIO PARAÍBA DO SUL

A sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul está localizada no oeste da BHPS em uma de suas partes mais altas, situada integralmente no estado de São Paulo. Os rios Paraítinga e Paraibuna são os rios principais desta sub-bacia, e sua confluência chega nos reservatórios Paraibuna-Paraítinga e Santa Branca, que dão origem ao rio Paraíba do Sul. A cabeceira do rio Paraibuna encontra-se a uma altitude de 1.800 metros e sua foz a 650 metros. A sub-bacia possui uma média pluviométrica anual de 1.495 mm, sendo a região junto ao curso do rio Paraibuna, próximo de sua confluência com o rio Paraítinga a área com menor precipitação; enquanto a região que recebe a maior quantidade de chuva localiza-se próximo à cabeceira do rio Paraibuna. Na sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul está localizado um importante reservatório da BHPS: UHE Paraibuna-Paraítinga. O reservatório opera em regime de regularização de vazões, e foi considerado nos estudos desenvolvidos no presente projeto em conjunto com seu reservatório de jusante Santa Branca.

A gestão de recursos hídricos tem como unidade territorial a bacia hidrográfica. No entanto, a área de atuação dos Comitês de Bacia

Hidrográfica poderá ser, também, a sub-bacia hidrográfica de tributário do curso de água principal da bacia, ou de tributário desse tributário ou, ainda, um grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas. Além disso, a área de atuação de CBHs estaduais deverá respeitar os limites geográficos dos estados que compõem a bacia hidrográfica do rio federal. Dessa forma, as sub-bacias apresentadas no estudo podem ter seus limites geográficos diferentes das áreas de atuação dos Comitês, conforme observado na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.

3.1.1. Dados Pluviométricos

Na etapa de levantamento de dados pluviométricos realizada para o EDH-PS, foram identificadas 131 estações pluviométricas na área da sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul e suas adjacências, das quais apenas 78 possuíam algum registro de precipitação ao longo do seu período de operação. Contudo, após tratamento e consistência das séries históricas, permaneceram 46 estações no banco de dados consistido, o qual subsidiou as demais etapas do presente estudo. Todas as estações podem ser visualizadas na Figura 3.4.

3.1.2. Dados Fluviométricos

Na fase de levantamento de dados fluviométricos do presente estudo, foram inventariadas 35 estações fluviométricas na área da sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul, porém somente 19 delas possuíam algum dado de vazão. Já na etapa de consistência dos dados hidrológicos, foram removidas do banco de dados oficial estações cujas séries eram muito curtas, apresentavam muitas falhas, ou algum tipo de inconsistência que pudesse comprometer o estudo de disponibilidade hídrica; assim, restaram 4 estações com boa qualidade de dados nesta sub-bacia, para serem utilizadas nas etapas seguintes do EDH-PS. As informações como código, nome, nome do rio, nome do município, localização e área de drenagem

de cada estação podem ser visualizadas no Quadro 3.1. A distribuição espacial das estações pode ser observada na Figura 3.5.

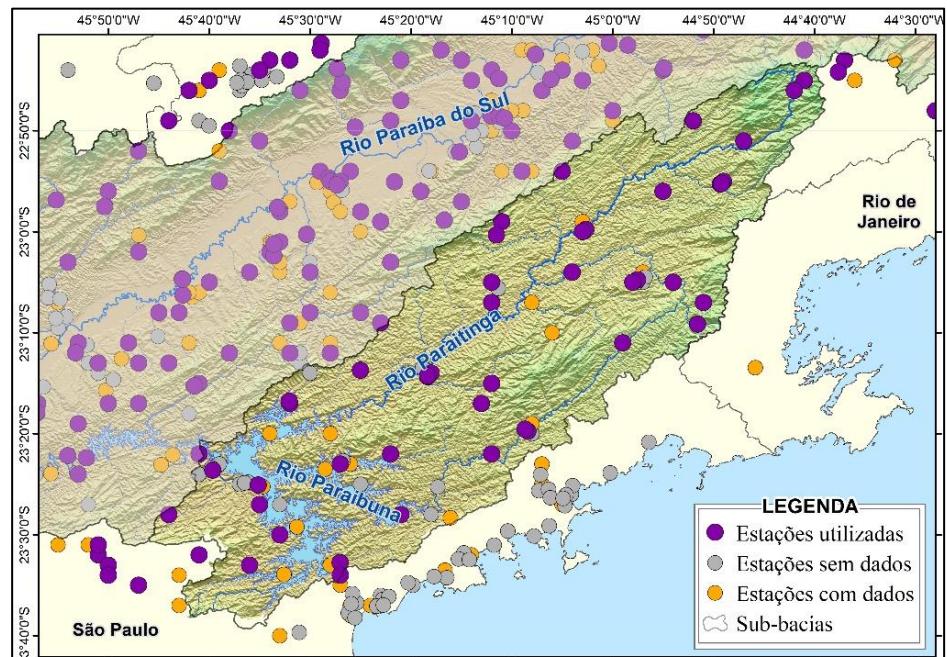


Figura 3.4 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.

Quadro 3.1 – Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.

Estação	Nome	Nome do Rio	Nome do município	Latitude	Longitude	AD (Km ²)
58068000	UHE PARAIBUNA FAZENDA PALMEIRAS	RIO PARAÍBUNA	NATIVIDADE DA SERRA	-23,42	-45,29	437
58040000	SÃO LUIS DO PARAITINGA	RIO PARAITINGA	SÃO LUÍS DO PARAITINGA	-23,24	-45,31	1.950
58030000	ESTRADA DO CUNHA	RIO PARAITINGA	CUNHA	-22,99	-45,04	796
58060000	PONTE ALTA 1	RIO PARAÍBUNA	SÃO LUÍS DO PARAITINGA	-23,33	-45,14	277

Fonte: ANA (2023).

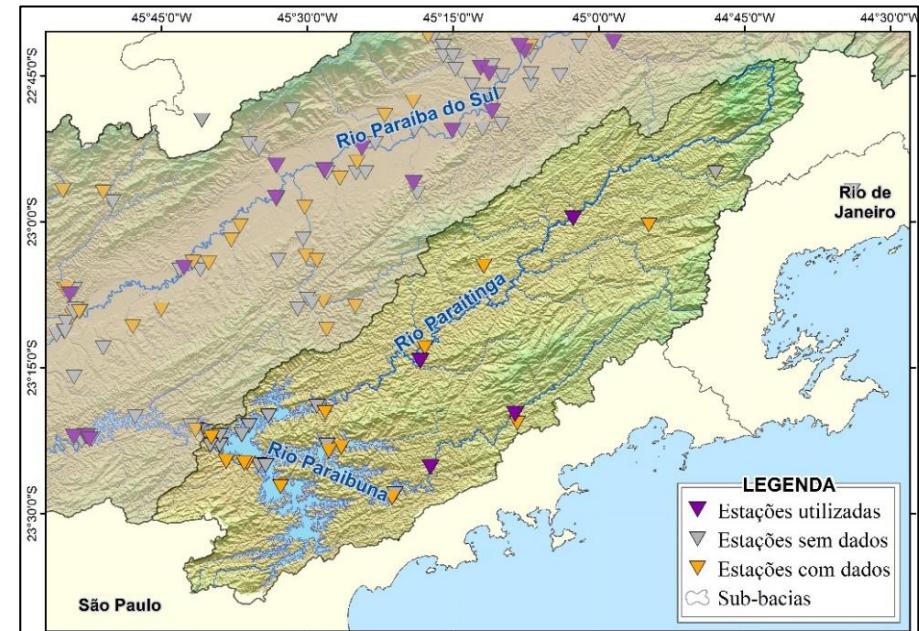


Figura 3.5 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.

3.1.3. Renaturalização de vazões

Buscando entender o quanto de água disponível em um rio ainda pode ser usada, foram calculadas as séries de vazões renaturalizadas, através da soma das séries de usos consuntivos totais com as séries observadas nas estações fluviométricas. O objetivo é conhecer a vazão natural dos rios, auxiliando na gestão

dos recursos hídricos. Para isso são apresentadas as séries de usos consuntivos específicos anuais e sazonais para a sub-bacia (Figura 3.6) e os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões (Figura 3.7).

Em relação aos gráficos da série de vazões específicas dos usos consuntivos (Figura 3.6), observa-se que na análise anual a maioria das estações apresentou uma tendência de aumento dos usos nos últimos anos do período de análise. Já na análise sazonal, percebeu-se uma tendência de diminuição no uso consuntivo no período mais seco do ano em relação ao período mais úmido bem determinado em duas estações, enquanto nas outras duas ocorre um leve aumento, com comportamento mais constante ao longo dos meses.

Em seguida, a Figura 3.7 mostra os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões. Ou seja, indica quanto a devolução do uso consuntivo para o hidrograma implica em alteração da vazão de referência avaliada. Observa-se que as porcentagens de aumento variaram de 0,08% a 0,61% para a Q_{m1t} e de 0,13% a 1,45% para a Q_{95} . De maneira geral, as estações localizadas nas regiões de cabeceira da sub-bacia apresentaram as menores taxas de aumento, enquanto as estações próximas ao exutório da sub-bacia apresentaram as maiores taxas de aumento. Singularmente, uma estação localizada na cabeceira da sub-bacia apresentou taxas mais altas de aumento da Q_{m1t} .

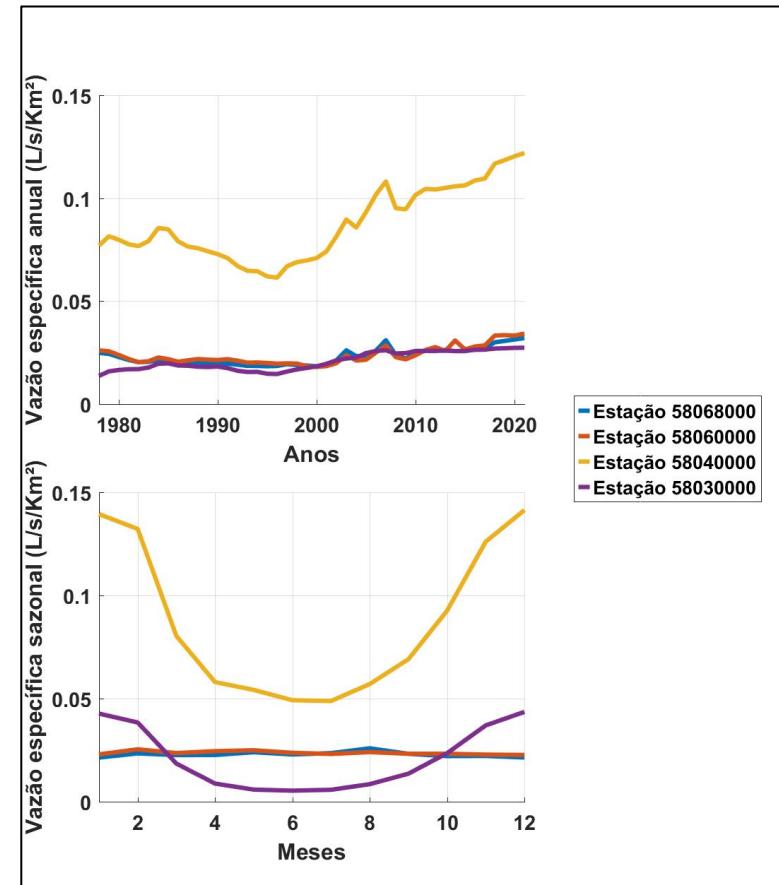


Figura 3.6 – Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.

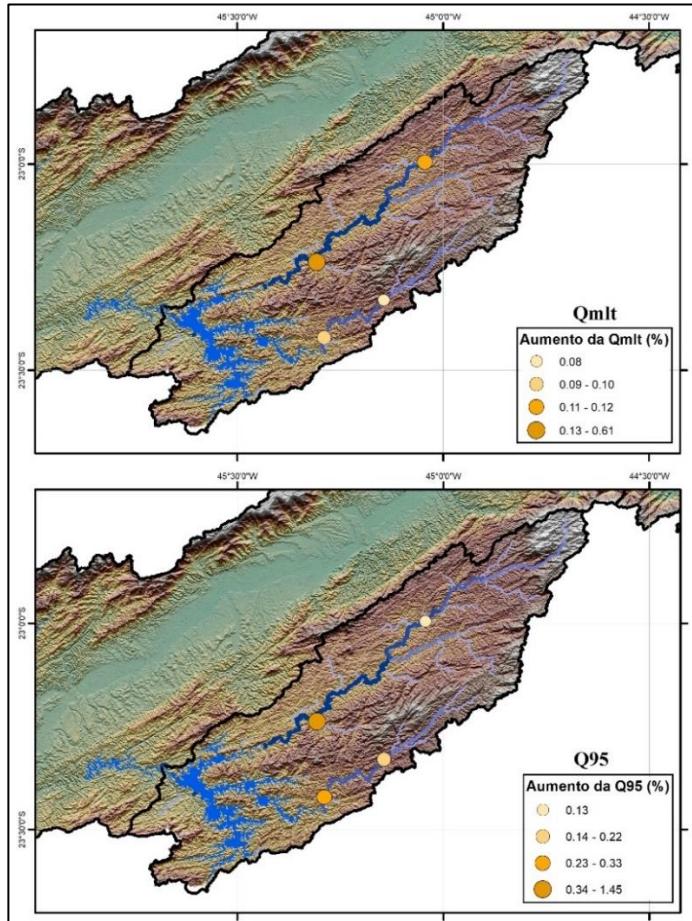


Figura 3.7 – Resultados da alteração da vazão Q_{m1t} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul após a renaturalização.

3.1.4. Estacionariedade das Séries

A análise da estacionariedade das séries de vazões busca entender, ao longo do período analisado, se ocorre uma estabilidade dos dados (comportamento estacionário), uma redução dos valores (tendência negativa) ou um aumento dos valores (tendência positiva). A Figura 3.8 mostra a análise da estacionariedade das estações fluviométricas (no primeiro gráfico) e das estações pluviométricas (no segundo gráfico).

Nas estações fluviométricas foram avaliados os seguintes índices: vazão média anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada em 5 dias consecutivos, vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos e vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos no período úmido (entre os meses de dezembro a fevereiro). Para as estações pluviométricas foram avaliados os seguintes índices: precipitação total anual, número de dias com precipitação no ano, precipitação diária igual ou superior a 50 mm no ano e precipitação diária máxima em 5 dias consecutivos no ano.

Nas estações fluviométricas, todos os índices apresentaram grande parte das estações indicando a estacionariedade. Destaca-se que em um índice as estações indicaram resultados tanto de tendência positiva, quanto negativa e estacionariedade. Nas estações

pluviométricas 2 índices apresentam predomínio de estações indicando a estacionariedade. No índice do número de dias com precipitação ao ano grande parte das estações apresentou tendência negativa, seguida pela estacionariedade e tendência positiva. No índice do número de dias com precipitação acima de 50 mm no ano metade das estações apresentou comportamento estacionário, seguido pela tendência negativa e tendência positiva.

Dessa forma, grande parte das estações fluviométricas indicam que não ocorreram alterações significativas nos valores de vazão na sub-bacia. Para os dados pluviométricos, os resultados apontam que, de maneira geral, não ocorreram grandes alterações nas taxas de precipitação ao longo das séries históricas analisadas. Entretanto, para o índice do número total de dias com chuva no mês, metade das estações indicaram diminuição das taxas de precipitação.

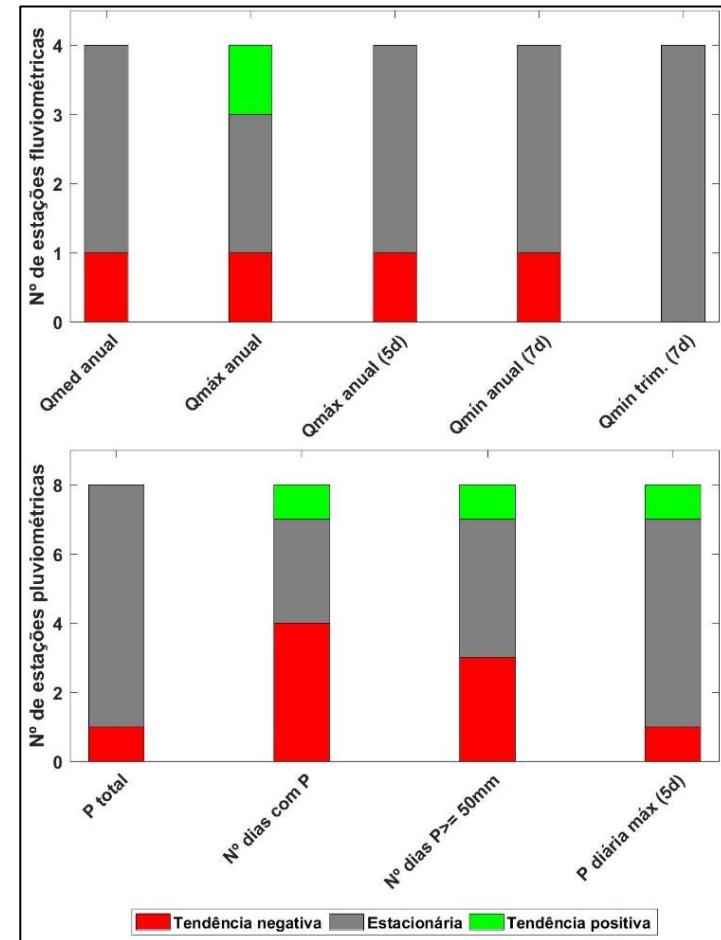


Figura 3.8 - Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.

3.1.5. Disponibilidade Hídrica

3.1.5.1. Calibração do modelo

Na Tabela 3.1 podem ser visualizados os valores dos indicadores estatísticos e dos erros percentuais obtidos a partir da calibração do modelo hidrológico MGB em cada estação fluviométrica da sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul. Os resultados obtidos na calibração estão dentro da margem considerada satisfatória para modelos hidrológicos. Na metodologia, é detalhado o significado de cada um dos indicadores utilizados. Destaca-se que, na presente sub-bacia, o menor erro médio foi observado na vazão $Q_{7,10}$, de 0,1%, enquanto o maior erro médio ocorreu na vazão Q_{95} , com 3,3%. Em relação aos indicadores estatísticos, o Nash-Sutcliffe e o Nash-Sutcliffe Logarítmico médios da sub-bacia foram iguais a 0,9, o que indica que os resultados foram muito bons. Os resultados de calibração mostrado para cada estação podem ser verificados com maior nível de detalhe no Produto 4 do presente estudo.

Tabela 3.1 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.

Estação	Área de drenagem (km ²)	Tamanho da Série (anos)	Nash-Sutcliffe	Nash-Sutcliffe Logarítmico	Erro de Volume (%)	Erro de Q_{90} (%)	Erro de Q_{95} (%)	Erro de $Q_{m\text{lt}}$ (%)	Erro de $Q_{7,10}$ (%)
58030000	796	42,1	1	1	0	0	0,1	0	0
58040000	1.951	33,8	1	1	0	0	0	0	0
58060000	277	42,9	1	1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,1
58068000	439	11,4	0,7	0,8	-3,9	13,3	10,7	-3,9	-

3.1.5.2. Resultados das Vazões de Referência

Conhecer as vazões de referência é essencial para realizar a gestão responsável dos recursos hídricos, já que elas representam a quantidade de água disponível nos rios.

A disponibilidade das vazões de referência na sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul é apresentada na Figura 3.11, onde são mostradas a vazão de longo termo " $Q_{m\text{lt}}$ ", a vazão que é superada ou igualada em 90% do tempo na série histórica " Q_{90} ", a vazão superada ou igualada em 95% do tempo " Q_{95} " e a vazão de 7 dias consecutivos com tempo de retorno de 10 anos, " $Q_{7,10}$ ". Ainda, na Figura 3.9 é possível observar o mapa de vazões específicas (m³/s/km²) da $Q_{m\text{lt}}$ e Q_{95} .

Já o diagrama unifilar, apresentado pela Figura 3.10, mostra com detalhes o comportamento do rio principal e dos seus afluentes, como a ocorrência de hidrelétricas e transposição na sub-bacia. Também são apresentadas as entregas de vazão ao longo dos rios que compõem a sub-bacia, proporcionando uma visão geral e completa dos recursos hídricos.

Na sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul existem dois grandes rios, o rio Paraítinga e o rio Paraibuna, que desaguam no Reservatório Paraibuna-Paraítinga. Logo após o complexo dos dois reservatórios encontra-se o início do rio Paraíba do Sul. Quando o rio Paraítinga chega no reservatório Paraibuna-Paraítinga, a vazão Q_{mlt} é de 36,3 m^3/s , a vazão Q_{95} é de 13,7 m^3/s , a vazão Q_{90} é de 15,7 m^3/s e a vazão $Q_{7,10}$ é de 10,9 m^3/s . Já no encontro do rio Paraibuna com o reservatório Paraibuna-Paraítinga, a vazão Q_{mlt} é de 31,1 m^3/s , a vazão Q_{95} é de 11,0 m^3/s , a vazão Q_{90} é de 12,3 m^3/s e a vazão $Q_{7,10}$ é de 8,4 m^3/s .

Por fim, também são apresentados os resultados de vazão de referência na sub-bacia no formato de *Boxplot* para a vazão anual e mensais (Figura 3.12). Os resultados permitem identificar a sazonalidade das vazões de referência na bacia. Devido ao desproporcional número de trechos de pequena área de drenagem na base de resultados, o gráfico somente mostrou resultados de trechos com área de drenagem acima de 200 km^2 .

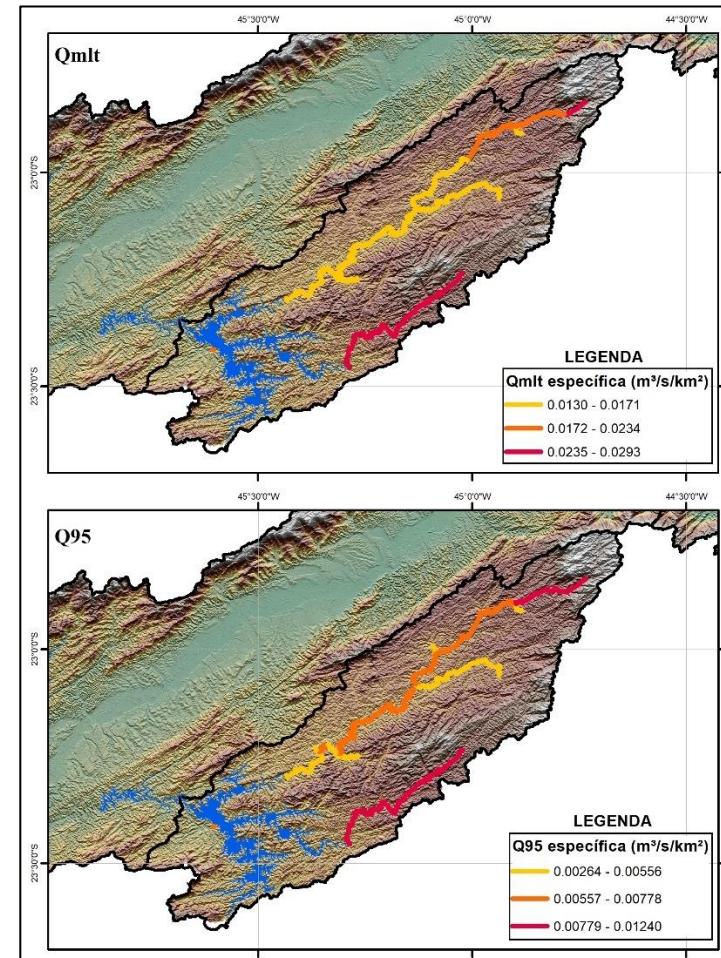


Figura 3.9 - Resultados das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) de referência anuais Q_{mlt} e Q_{95}

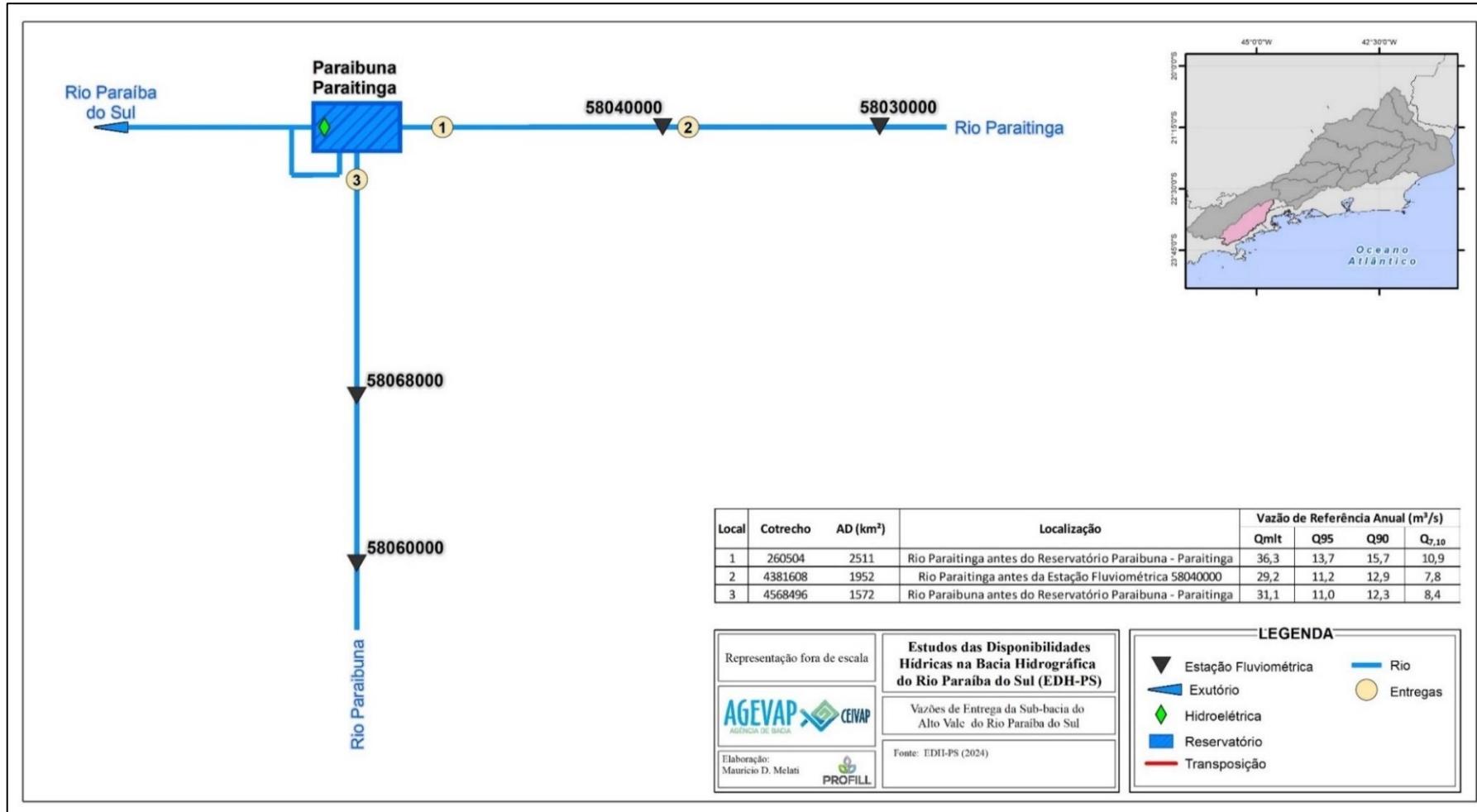


Figura 3.10 - Vazões de entrega (m³/s) da sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.

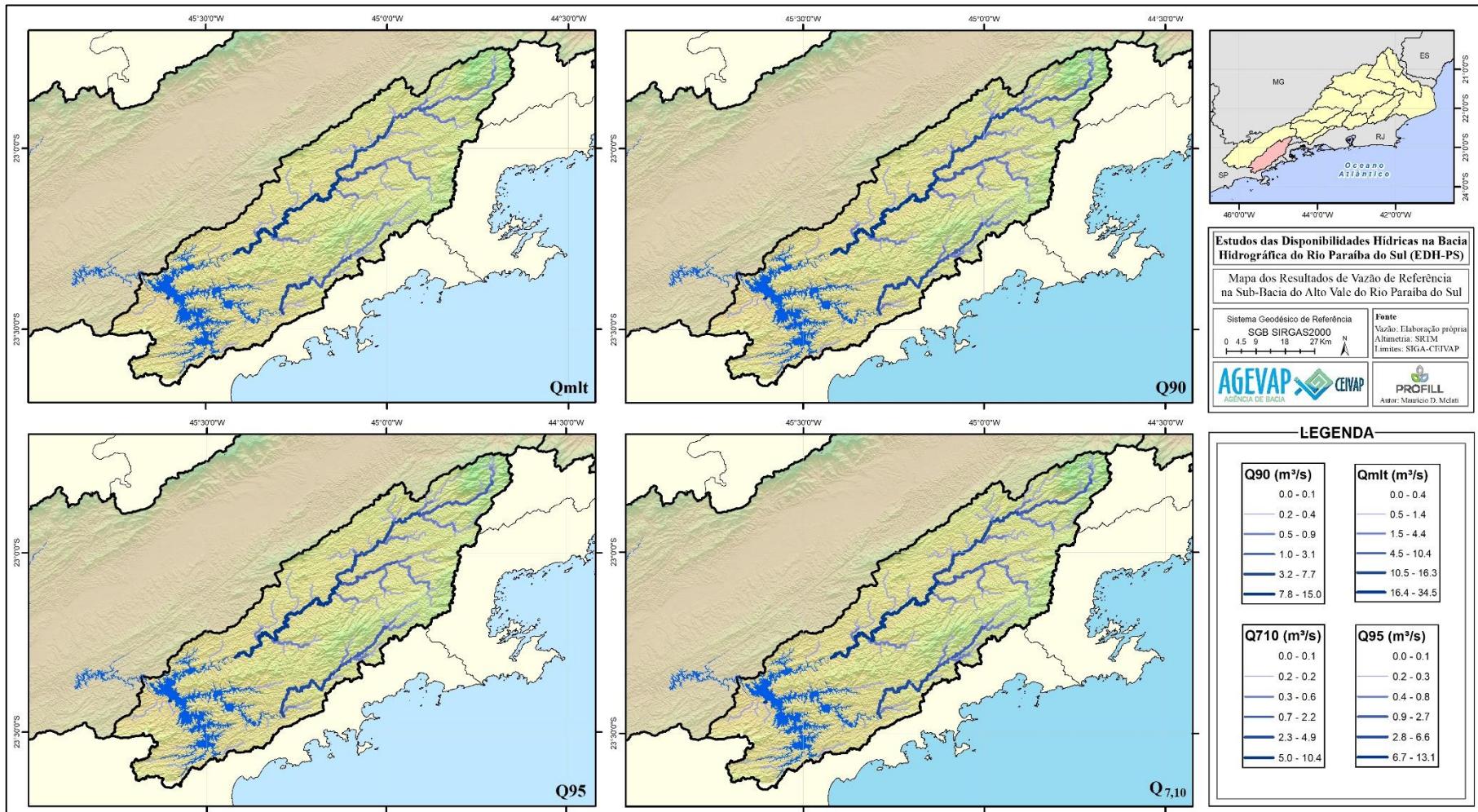


Figura 3.11 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{m1t}, Q₉₀, Q₉₅ e Q_{7,10} na sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.

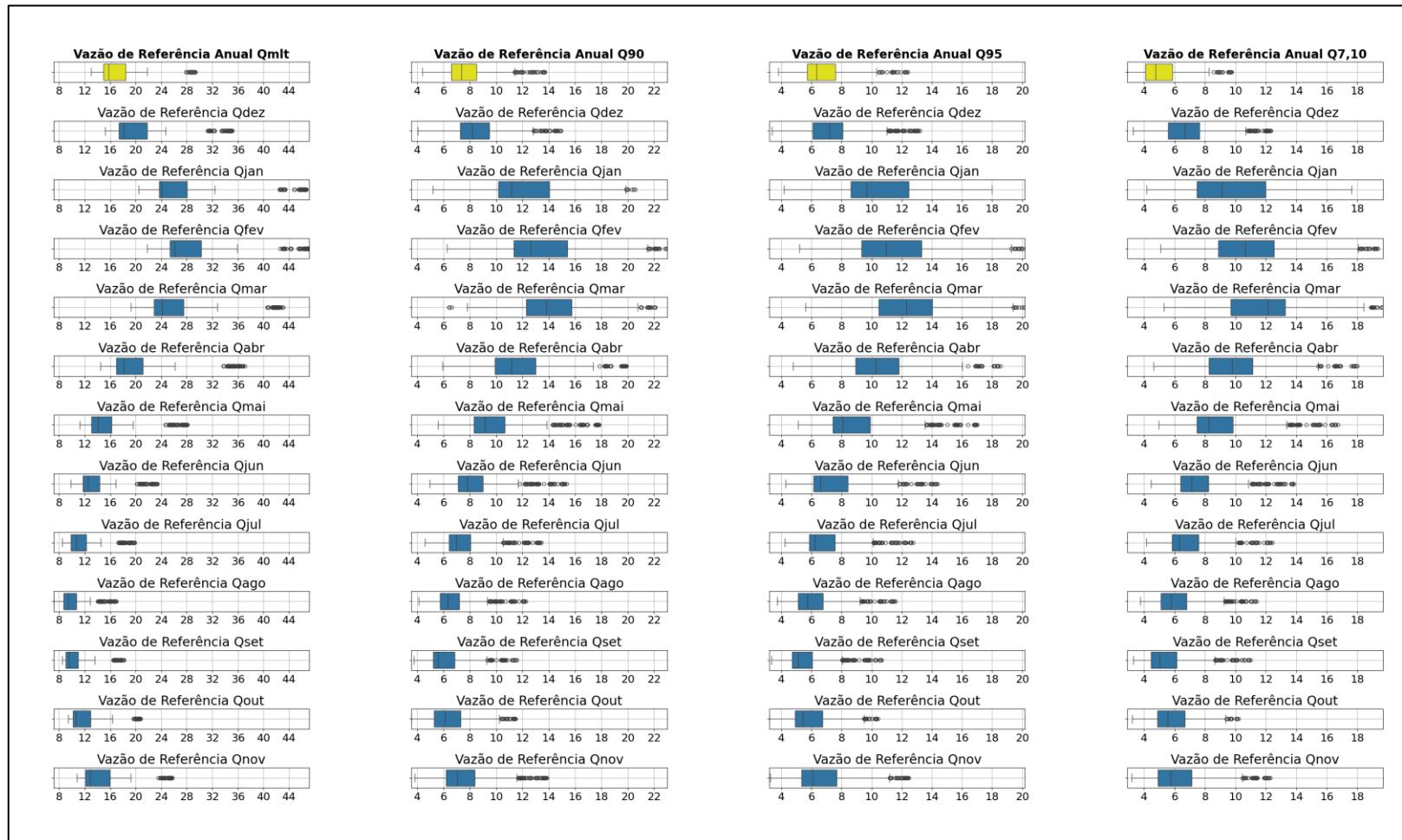


Figura 3.12 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{m1t} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.

3.1.5.3. Período Crítico

Entre os anos de 2015 e 2021 a BHPS passou pelas anomalias negativas mais intensas em suas vazões médias desde 1960 (período máximo avaliado no estudo), ocasionando na diminuição das vazões por longos períodos. A Figura 3.13 mostra as reduções de vazão verificadas no período crítico considerando as diferenças entre os anos hidrológicos de 1978-2020 e 2014-2020, nas vazões de referência Q_{m1t} (primeiro mapa) e Q_{95} (segundo mapa) anuais. A sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul apresentou reduções que variaram até 6,3 (m^3/s) na vazão Q_{m1t} , e 2,8 m^3/s na vazão Q_{95} . Ao longo do rio Paraíba do Sul a redução das vazões ocorre, de maneira geral, de forma crescente em ambas as vazões, apresentando as maiores reduções próximo ao exutório da sub-bacia.

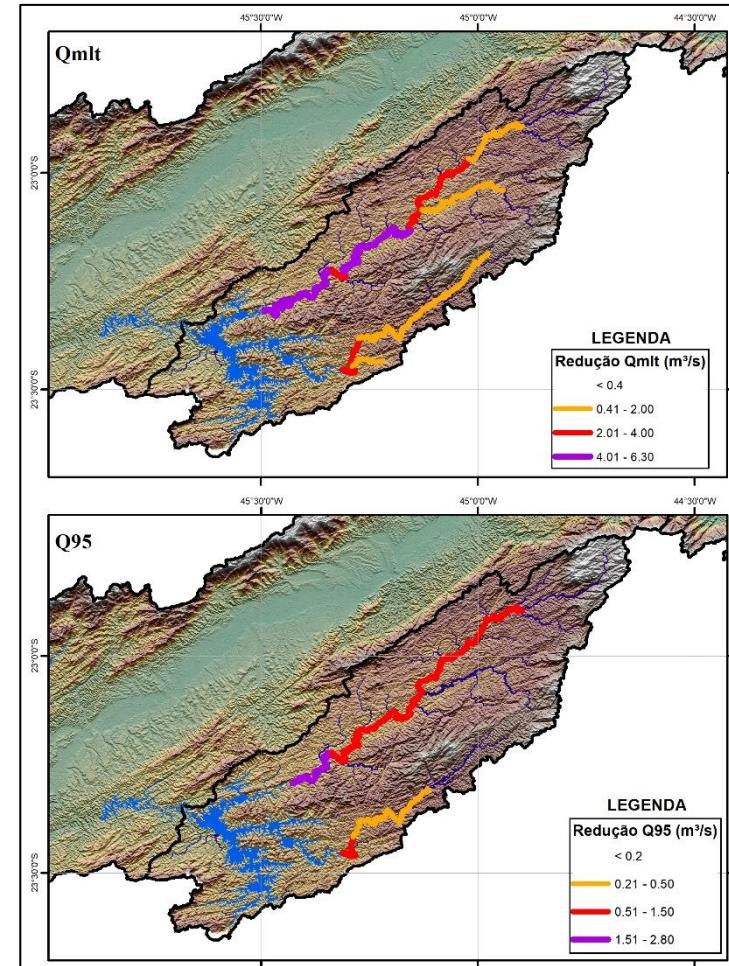


Figura 3.13 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{m1t} e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-Bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.

3.1.6. Cenário de Mudanças Climáticas

3.1.6.1. Vazões máximas

O cálculo de vazões máximas, considerando diferentes tempos de retorno, é essencial para o dimensionamento eficiente de sistemas hidráulicos, garantindo a resiliência e a segurança necessárias diante de variabilidades climáticas e condições extremas. O cálculo das vazões máximas ($Q_{máx}$) para os tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos foi realizado nas minibacias de localização das estações fluviométricas selecionadas na área de estudo, apresentadas no Produto 4.

A sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul teve um total de quatro estações avaliadas, onde foram observadas alterações de baixa magnitude para as vazões máximas. Os resultados mostraram alterações médias em todos os TRs de 7% no curto prazo e 14% no longo prazo. As estações 58060000 e 58040000 apresentaram, respectivamente, os maiores valores de vazão para os TRs no longo prazo e curto prazo. Destaca-se também que a estação 58030000, presente no rio Paraíba do Sul, apresentou alterações de vazão máxima inferiores a 10% em todos os TRs dos períodos curto e longo.

No curto prazo todas as estações apresentaram alterações de até 15%, e para o longo prazo as duas estações localizadas ao longo do rio Paraíba do Sul apresentaram alterações menores de vazão para todos os TRs, quando comparadas com as estações presentes nos tributários. Isso significa que as vazões máximas tendem a aumentar na sub-bacia, com baixa magnitude, nos períodos curto e longo.

Dessa forma, é importante efetivar a gestão de recursos hídricos, o planejamento urbano e o dimensionamento de sistemas hidráulicos considerando as consequências que o aumento das vazões pode trazer. Entre essas consequências estão inundações mais severas e intensas, ampliação das manchas de inundações urbanas, danos à infraestrutura das cidades, entre outras.

A Tabela 3.2 apresenta os fatores de alteração para o curto e longo prazo, as máximas vazões renaturalizadas ou simuladas no P4 e as suas projeções para o curto e longo prazo. Em complemento, a Figura 3.14 apresenta os resultados de alteração dos TRs considerando as vazões futuras em cenários de mudança climática para o curto e para o longo prazo.

Tabela 3.2 - Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.

Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)
TR 10					
58068000	1,7	16,3	178,6	181,6	207,7
58060000	7,4	24,4	176,2	189,2	219,2
58040000	3,5	8,6	273,2	282,8	296,7
58030000	1,4	7	70,1	71,1	75
TR 25					
58068000	3,6	16,4	221,2	229,1	257,4
58060000	9,8	25,4	231,8	254,5	290,6
58040000	7,2	7,5	356,5	382,2	383,2
58030000	5,2	5,7	79,5	83,6	84
TR 50					
58068000	4,7	16,4	252,7	264,6	294,2
58060000	10,2	25,9	273	300,8	343,7
58040000	9,6	6,9	418,3	458,4	447,1
58030000	7,4	5	86,5	92,9	90,8
TR 100					
58068000	5,5	16,4	284	299,7	330,6
58060000	10,5	26,3	313,9	346,9	396,5
58040000	11,4	6,4	479,6	534,2	510,3
58030000	9,2	4,4	93,4	102	97,6

** Nas estações sem vazão máxima renaturalizada calculada foram utilizados os dados de vazão máxima simulada no P4.

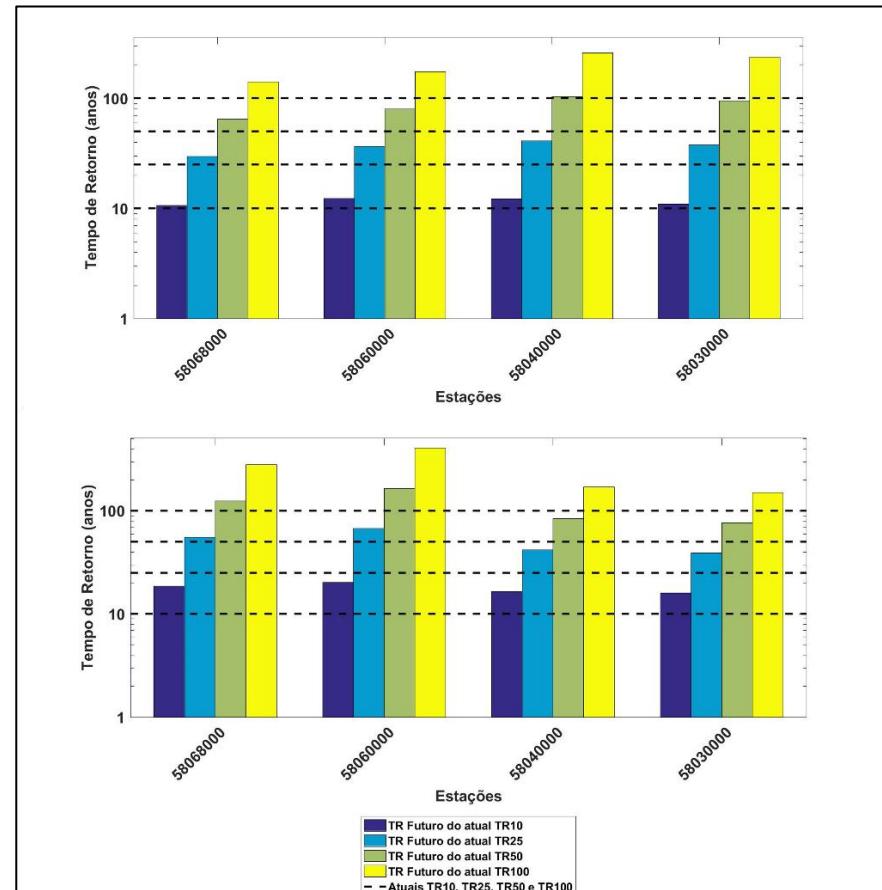


Figura 3.14 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.

3.1.6.2. Vazões Mínimas

Também foi estudado o impacto das mudanças climáticas nas vazões de referência para cenários futuros, com o objetivo de fornecer subsídios aos órgãos gestores e aos CBHs para a tomada de decisão e planejamento dos recursos hídricos da BHPS. A Tabela 3.3 mostra a mediana de alteração percentual dos 19 modelos para o curto e para o longo prazo, a vazão atual de referência e as vazões de referência futuras projetadas.

A sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul teve um total de quatro estações avaliadas, onde foram observadas reduções das vazões mínimas no curto e no longo prazo. Os resultados mostram alterações médias na disponibilidade de -8% no curto prazo e de -5% no longo prazo. As vazões médias de longo termo apresentaram alterações negativas no curto prazo e positivas no longo prazo.

Tabela 3.3 - Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul.

Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m ³ /s)
Q_{mit}					
58068000	-3,6	3,1	12,7	12,2	13,1
58060000	-2,6	5,2	8,1	7,9	8,5
58040000	-2	4,3	29,3	28,7	30,6
58030000	-3,6	1,7	12,5	12	12,7
Q_{90}					
58068000	-8,6	-4	4,9	4,5	4,7
58060000	-3,4	-0,6	3,8	3,7	3,8
58040000	-3,4	0	12,9	12,5	12,9
58030000	-9,5	-5,6	6,1	5,5	5,7
Q_{95}					
58068000	-9,7	-4,1	4,4	3,9	4,2
58060000	-4,7	-4,5	3,4	3,3	3,3
58040000	-4,2	-2	11,2	10,7	11
58030000	-10,7	-5,9	5,3	4,8	5
$Q_{7,10}$					
58068000	-9,1	-6,8	3,3	3	3,1
58060000	-10,2	-5,8	2,7	2,4	2,5
58040000	-8,6	-7,5	7,8	7,2	7,2
58030000	-11,9	-11,8	4,2	3,7	3,7

3.2. SUB-BACIA DO MÉDIO VALE SUPERIOR DO RIO PARAÍBA DO SUL

A sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul está localizada a oeste da BHPS, sendo que quase toda sua área está compreendida no estado de São Paulo, contudo há uma porção próxima ao exutório da sub-bacia que se encontra no Rio de Janeiro. O rio principal desta sub-bacia é o rio Paraíba do Sul, o qual recebe contribuições de pequenos rios ao longo do trecho. Um dos pontos mais altos na região das cabeceiras dos afluentes do rio Paraíba do Sul na sub-bacia do Médio Vale Superior encontra-se a cerca 1.800 metros, e próximo ao exutório da sub-bacia a altitude é de aproximadamente 500 metros. A sub-bacia possui uma média pluviométrica anual de 1.457 mm, sendo sua parte central a área com menor precipitação; enquanto a região que recebe a maior quantidade de chuva localiza-se na porção mais ao norte da sub-bacia. A sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul conta com algumas interferências hidráulicas. Dentre essas estruturas, as de maior relevância são as UHEs Santa Branca, Funil e Jaguari.

A sub-bacia tem em sua cabeceira as vazões da defluência do Reservatório Santa Branca e em seu exutório a defluência do Reservatório do Funil. Ambos estão localizados no rio Paraíba do Sul

e operam em regime de regularização de vazões. O Reservatório Jaguari atua regularizando as vazões do rio Jaguari, exercendo o papel de captação e reserva da água a ser transposta para fora da bacia na represa Atibainha.

A gestão de recursos hídricos tem como unidade territorial a bacia hidrográfica. No entanto, a área de atuação dos Comitês de Bacia Hidrográfica poderá ser, também, a sub-bacia hidrográfica de tributário do curso de água principal da bacia, ou de tributário desse tributário ou, ainda, um grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas. Além disso, a área de atuação de CBHs estaduais deverá respeitar os limites geográficos dos estados que compõem a bacia hidrográfica do rio federal. Dessa forma, as sub-bacias apresentadas no estudo podem ter seus limites geográficos diferentes das áreas de atuação dos Comitês, conforme observado na Figura 3.15.

Na sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul estão presentes os seguintes CBHs: Paraíba do Sul e Médio Paraíba do Sul. A sub-bacia está localizada quase totalmente no estado de São Paulo, com o comitê CBH Paraíba do Sul. Próximo do seu exutório, onde a sub-bacia faz divisa com o estado do Rio de Janeiro, está o comitê Médio Paraíba do Sul.



Figura 3.15 - Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.

3.2.1. Dados Pluviométricos

Na etapa de levantamento de dados pluviométricos realizada para o EDH-PS, foram identificadas 432 estações pluviométricas na área da sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul e suas adjacências, das quais apenas 299 possuíam algum registro de

precipitação ao longo do seu período de operação. Contudo, após tratamento e consistência das séries históricas, permaneceram 186 estações no banco de dados consistido, o qual subsidiou as demais etapas do presente estudo. Todas as estações podem ser visualizadas na Figura 3.16.

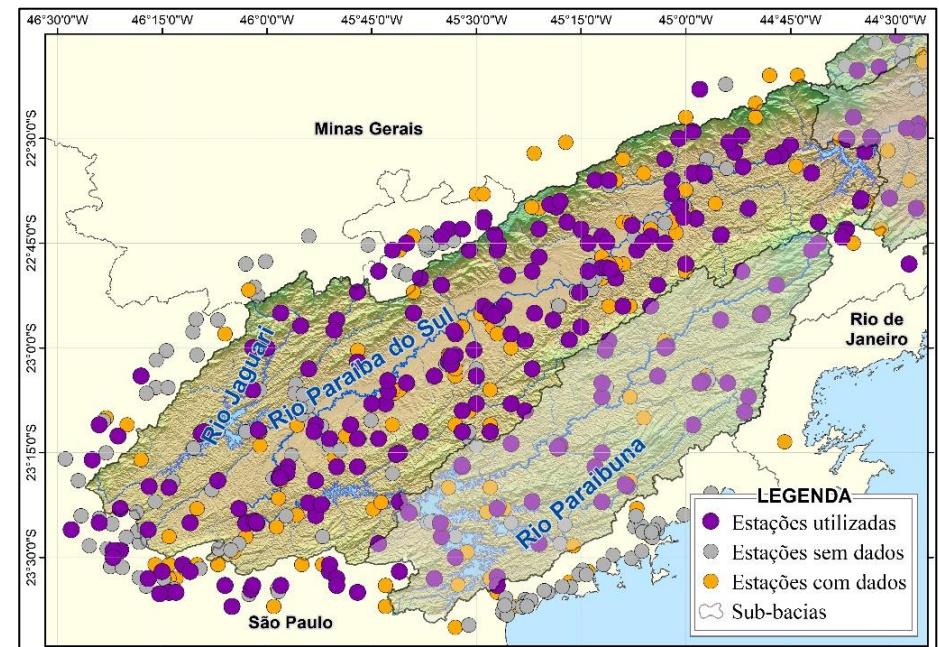


Figura 3.16 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.

3.2.2. Dados Fluviométricos

Na fase de levantamento de dados fluviométricos do presente estudo, foram inventariadas 175 estações fluviométricas na área da sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul, porém somente 86 delas possuíam algum dado de vazão.

Já na etapa de consistência dos dados hidrológicos, foram removidas do banco de dados oficial estações cujas séries eram muito curtas, apresentavam muitas falhas, ou algum tipo de inconsistência que pudesse comprometer o estudo de disponibilidade hídrica; assim, restaram 30 estações com boa qualidade de dados nesta sub-bacia, para serem utilizadas nas etapas seguintes do EDH-PS. As informações como código, nome, nome do rio, nome do município, localização e área de drenagem de cada estação podem ser visualizadas no Quadro 3.2. A distribuição espacial das estações pode ser observada na Figura 3.17.

Quadro 3.2 – Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.

Estação	Nome	Nome do Rio	Nome do município	Latitude	Longitude	AD (Km ²)
19092	JAGUARI-JACAREÍ	RIO JAGUARI	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,19	-46,02	1.314
19093	FUNIL	RIO PARAÍBA DO SUL	ITATIAIA	-23,53	-44,57	13.266
58096000	UHE SANTA BRANCA JUSANTE	RIO PARAÍBA DO SUL	JACAREÍ	-23,37	-45,88	4.920
58105300	UHE SANTA BRANCA GUARAREMA	RIO PARAÍBA DO SUL	GUARAREMA	-23,42	-46,02	5.210
58099000	SANTA BRANCA	RIO PARAÍBA DO SUL	SANTA BRANCA	-23,37	-45,90	4.940
58105000	GUARAREMA	RIO PARAÍBA DO SUL	GUARAREMA	-23,42	-46,03	5210
58201000	POTIM	RIO PARAÍBA DO SUL	GUARATINGUETÁ	-22,84	-45,25	10.300
58110002	JACAREÍ	RIO PARAÍBA DO SUL	JACAREÍ	-23,31	-45,98	5.470
58192000	VÁRZEA DO PARAÍBA	RIO PARAÍBA DO SUL	PINDAMONHANGABA	-22,87	-45,41	9.770
58182500	PONTE DE PINDAMONHANGABA	RIO PARAÍBA DO SUL	PINDAMONHANGABA	-22,91	-45,47	9.600
58152010	PARQUE MOÇOTA	RIO PARAÍBA DO SUL	CAÇAPAVA	-23,08	-45,71	8.360
58158100	TREMembé	RIO PARAÍBA DO SUL	TREMembé	-22,96	-45,55	8.860
58218000	UHE FUNIL MONTANTE 2	RIO PARAÍBA DO SUL	CACHOEIRA PAULISTA	-22,66	-45,01	11.500
58230100	CRUZEIRO	RIO PARAÍBA DO SUL	CRUZEIRO	-22,59	-44,96	12.200
58230200	CRUZEIRO	RIO PARAÍBA DO SUL	CRUZEIRO	-22,58	-44,95	12.200
58214250	PCH LAVRINHAS MONTANTE 2	RIO PARAÍBA DO SUL	LORENA	-22,71	-45,13	11.117
58227000	EMBAU	RIBEIRÃO EMBAÚ	CACHOEIRA PAULISTA	-22,60	-45,04	179
58215000	FAZENDA SANTA CATARINA	RIBEIRÃO DOS MACACOS	LORENA	-22,70	-45,14	36,4
58212150	PCH LAVRINHAS RIO PIAGUI	RIO PIAGUI	GUARATINGUETÁ	-22,75	-45,19	172
58211000	COLÔNIA PIAGUI	RIO PIAGUI	GUARATINGUETÁ	-22,74	-45,20	171
58240080	UHE FUNIL BARRAMENTO	RIO PARAÍBA DO SUL	ITATIAIA	-22,53	-44,57	13.400
58116900	UHE JAGUARI CACHOEIRA DO JAGUARIBE	RIO JAGUARI	SANTA ISABEL	-23,33	-46,28	350
58165000	FAZENDA KANEGAI	RIO PIRACUAMA	TREMembé	-22,90	-45,55	161
58198000	PIRAPITINGUI	RIO PIRAPITINGUI	ROSEIRA	-22,93	-45,32	66,9
58204000	GUARATINGUETÁ	RIO PARAÍBA DO SUL	GUARATINGUETÁ	-22,81	-45,18	10.800
58183000	PINDAMONHANGABA	RIO PARAÍBA DO SUL	PINDAMONHANGABA	-22,91	-45,47	9.600
58142200	BUQUIRINHA II	RIO BUQUIRIA OU FERRÃO	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,12	-45,91	407
58220000	FAZENDA SANTA CLARA	RIO BOCAINA	CACHOEIRA PAULISTA	-22,69	-44,98	240
58128100	UHE JAGUARI BARRAMENTO	RIO JAGUARI	SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	-23,19	-46,03	1.300
58093080	UHE SANTA BRANCA	RIO PARAÍBA DO SUL	SANTA BRANCA	-23,37	-45,88	4.920

Fonte: ANA (2023).

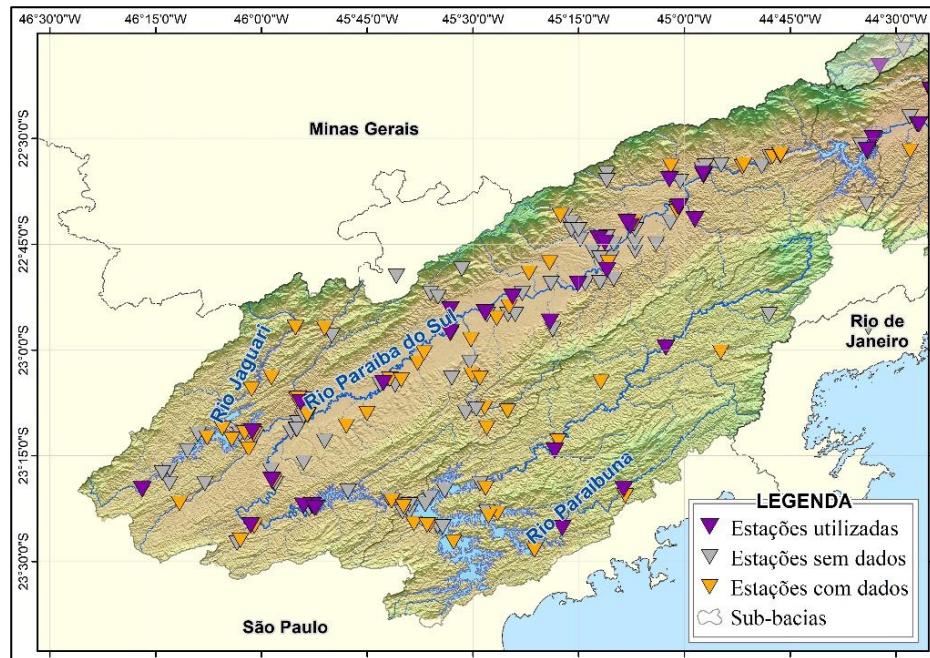


Figura 3.17 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.

3.2.3. Renaturalização de vazões

Buscando entender o quanto de água disponível em um rio ainda pode ser usada, foram calculadas as séries de vazões renaturalizadas, através da soma das séries de usos consuntivos totais com as séries observadas nas estações fluviométricas. O

objetivo é conhecer a vazão natural dos rios, auxiliando na gestão dos recursos hídricos. Para isso são apresentadas as séries de usos consuntivos específicos anuais e sazonais para a sub-bacia (Figura 3.18) e os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões (Figura 3.19).

Em relação aos gráficos da série de vazões específicas dos usos consuntivos (Figura 3.18), observa-se que na análise anual a maioria das estações apresentou uma estabilização nos usos consuntivos nos últimos anos. Já na análise sazonal, percebeu-se uma tendência de diminuição no uso consuntivo no período mais seco do ano em relação ao período mais úmido em grande parte das estações.

Em seguida, a Figura 3.19 mostra os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões. Ou seja, indica quanto a devolução do uso consuntivo para o hidrograma implica em alteração da vazão de referência avaliada.

Observa-se que as porcentagens de aumento variaram de 0,39% a 8,14% para a Q_{m1t} e de 0,48% a 50,29% para a Q_{95} . Para a Q_{m1t} pode-se observar um comportamento geral de aumento das taxas de alteração ao longo do rio principal, no sentido de montante para jusante da sub-bacia. Já na análise da vazão Q_{95} foram observadas alterações mais baixas nas estações da sub-bacia, onde somente 3 estações apresentaram valores mais altos de taxas de aumento, estando estas localizadas em tributários.

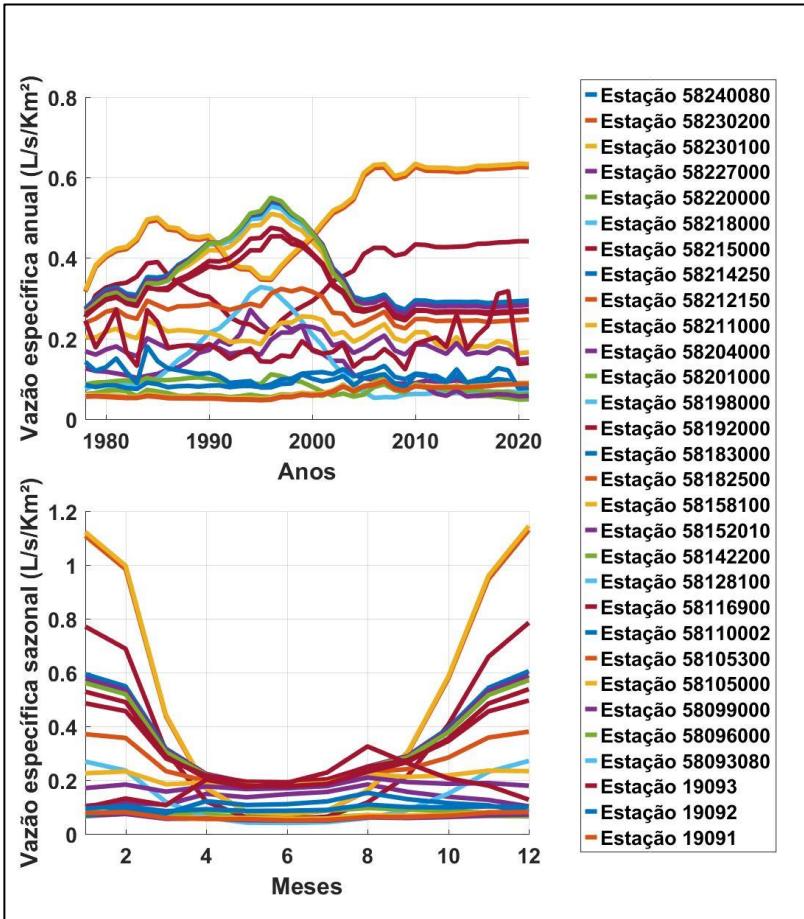


Figura 3.18 - Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.

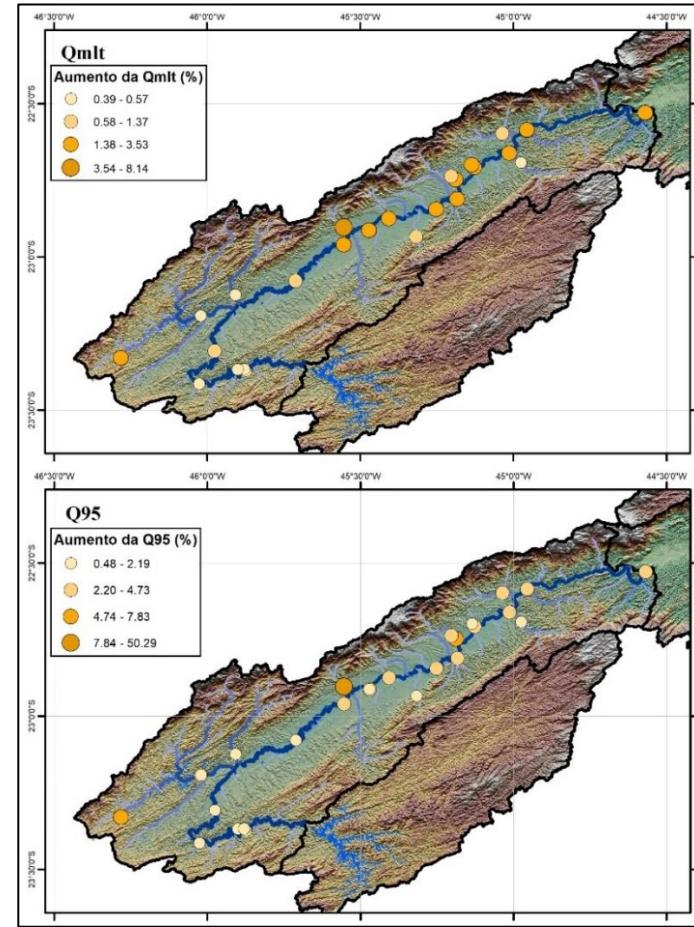


Figura 3.19 – Resultados da alteração da vazão Q_{milt} (primeiro mapa) e da vazão Q₉₅ (segundo mapa) para a sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul após a renaturalização.

3.2.4. Estacionariedade das Séries

A análise da estacionariedade das séries de vazões busca entender, ao longo do período analisado, se ocorre uma estabilidade dos dados (comportamento estacionário), uma redução dos valores (tendência negativa) ou um aumento dos valores (tendência positiva). A Figura 3.20 mostra a análise da estacionariedade das estações fluviométricas (no primeiro gráfico) e das estações pluviométricas (no segundo gráfico).

Nas estações fluviométricas foram avaliados os seguintes índices: vazão média anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada em 5 dias consecutivos, vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos e vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos no período úmido (entre os meses de dezembro a fevereiro). Para as estações pluviométricas foram avaliados os seguintes índices: precipitação total anual, número de dias com precipitação no ano, precipitação diária igual ou superior a 50 mm no ano e precipitação diária máxima em 5 dias consecutivos no ano.

Para as estações fluviométricas todos os índices apresentaram a maioria das estações indicando a estacionariedade dos dados, com a ocorrência de estações indicando tendência negativa e nenhuma estação tendência positiva. Nas estações pluviométricas três índices

indicaram a maior parte das estações com a ocorrência da estacionariedade, e algumas indicando tendência negativa e positiva. No índice do número de dias com precipitação ao ano metade das estações indicou a estacionariedade, seguida pela tendência negativa e tendência positiva.

Dessa forma, grande parte das estações fluviométricas indicam que não ocorreram grandes alterações nos valores de vazão na sub-bacia. Para as estações pluviométricas, grande parte delas também indicam que não ocorreram grandes alterações nos valores de precipitação da sub-bacia, onde ocorre uma tendência de redução somente no número de dias com precipitação ao ano.

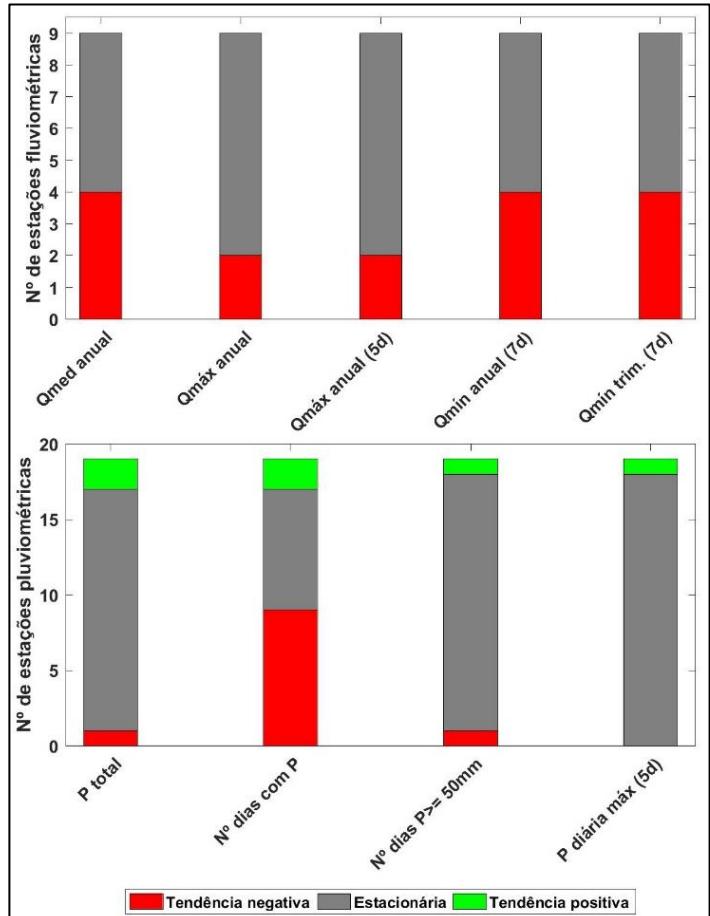


Figura 3.20- Resultados da análise da estacionariedade das estações
fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-
bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.

3.2.5. Disponibilidade Hídrica

3.2.5.1. Calibração do modelo

Na Tabela 3.4 podem ser visualizados os valores dos indicadores estatísticos e dos erros percentuais obtidos a partir da calibração do modelo hidrológico MGB em cada estação fluviométrica da sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul. Os resultados obtidos na calibração estão dentro da margem considerada satisfatória para modelos hidrológicos. Na metodologia, é detalhado o significado de cada um dos indicadores utilizados. Destaca-se que, na presente sub-bacia, o menor erro médio foi observado na vazão Q_{m1t} , de -0,5%, enquanto o maior erro médio ocorreu na vazão Q_{95} , com 3,7%. Em relação aos indicadores estatísticos, o Nash-Sutcliffe e o Nash-Sutcliffe Logarítmico médios da sub-bacia foram iguais a 0,8, o que indica que os resultados foram muito bons. Os resultados de calibração mostrado para cada estação podem ser verificados com maior nível de detalhe no Produto 4 do presente estudo.

Tabela 3.4 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.

Estação	Área de drenagem (km ²)	Tamano da Série (anos)	Nash-Sutcliffe	Nash-Sutcliffe Logarítmico	Erro de Volume (%)	Erro de Q ₉₅ (%)	Erro de Q _{mlt} (%)	Erro de Q _{7,10} (%)
58093080	4.908	20,4	1	1	1,2	-4,8	0,1	1,2
58116900	138	7,4	0,4	0,4	5,3	0,6	2,7	5,3
58128100	1.314	20,5	1	1	1,3	1,7	2,6	1,3
58240080	13.266	20,5	0,5	0,3	-0,3	6,7	-3	-0,3
58096000	4.908	41,5	1	0,9	1	2,3	-1,8	1
58099000	4.931	40	0,9	0,9	1,7	6,3	3,4	1,7
58105000	5.199	1,3	0,9	0,9	-2,7	-8,7	-4,3	-2,7
58105300	5.199	22,6	0,9	0,9	1,6	4,7	10,1	1,6
58110002	5.461	19,1	0,9	0,9	1,3	0	3,1	1,3
58142200	406	41,3	1	1	0	0,1	-0,1	0
58152010	8.402	6,4	0,9	0,8	-1,6	3,3	1,1	-1,6
58158100	8.851	4,7	0,8	0,9	-2,5	6,4	5,8	-2,5
58165000	122	16,7	0,3	0,6	1,7	10,5	4,9	1,7
58182500	9.580	16,8	0,9	0,9	-2,5	-5,4	-7	-2,5
58183000	9.580	42	1	1	0	0	0	0
58192000	9.631	20,9	0,9	0,9	-2,8	-5,1	-5,5	-2,8
58198000	72	9,8	0,4	0,6	2,2	15,3	12,6	2,2
58201000	10.304	21	0,9	0,9	-2,1	6,3	2,8	-2,1
58204000	10.757	43	1	1	0	0	0	0
58211000	171	18,8	0,5	0,6	-10,4	3,8	0,1	-10,4
58212150	174	5,2	0,5	0,6	-8	-13	-5	-8
58214250	11.122	4,9	0,7	0,8	-2,8	11,2	13	-2,8
58215000	37	18	0,5	0,6	-0,2	6,1	-2	-0,2
58218000	11.505	30,3	0,8	0,8	-7,1	5,9	5,9	-7,1
58220000	237	42,8	1	1	0	0,3	0,2	0
58227000	192	16,5	0,6	0,7	-4	2,6	1,7	-4
58230100	12.181	13	0,8	0,8	-5,9	4,1	3,6	-5,9
58230200	12.180	16	0,8	0,7	-5,9	5,6	2,2	-5,9
19093	13.266	43	1	1	0	0	0	0
19092	1.314	28,9	1	1	0	0	0	0

3.2.5.2. Resultados das Vazões de Referência

Conhecer as vazões de referência é essencial para realizar a gestão responsável dos recursos hídricos, já que elas representam a quantidade de água disponível nos rios. A disponibilidade das vazões de referência na sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul é apresentada na Figura 3.23, onde são mostradas a vazão de longo termo “Q_{mlt}”, a vazão que é superada ou igualada em 90% do tempo na série histórica “Q₉₀”, a vazão superada ou igualada em 95% do tempo “Q₉₅” e a vazão de 7 dias consecutivos com tempo de retorno de 10 anos, “Q_{7,10}”. Ainda, na Figura 3.21 é possível observar o mapa de vazões específicas (m³/s/km²) da Q_{mlt} e Q₉₅.

Já o diagrama unifilar, apresentado pela Figura 3.22, mostra com detalhes o comportamento do rio principal e dos seus afluentes, como a ocorrência de hidrelétricas e transposição na sub-bacia. Também são apresentadas as entregas de vazão ao longo dos rios que compõem a sub-bacia, proporcionando uma visão geral e completa dos recursos hídricos.

Na sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul, o rio Paraíba do Sul recebe contribuições de 3 principais afluentes, em termos de Q_{mlt}, sendo eles: ribeirão Passo-Vinte, rio Piagui e rio Bocaina. Próximo ao exutório da sub-bacia está localizado o

reservatório Funil, e após ele a vazão Q_{mlt} é de $214,7 \text{ m}^3/\text{s}$, a vazão Q_{95} é de $121,5 \text{ m}^3/\text{s}$, a vazão Q_{90} é de $146,1 \text{ m}^3/\text{s}$ e a vazão $Q_{7,10}$ é de $114,3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por fim, também são apresentados os resultados de vazão de referência na sub-bacia no formato de *Boxplot* para a vazão anual e mensais (Figura 3.24). Os resultados permitem identificar a sazonalidade das vazões de referência na bacia. Devido ao desproporcional número de trechos de pequena área de drenagem na base de resultados, o gráfico somente mostrou resultados de trechos com área de drenagem acima de 200km^2 .

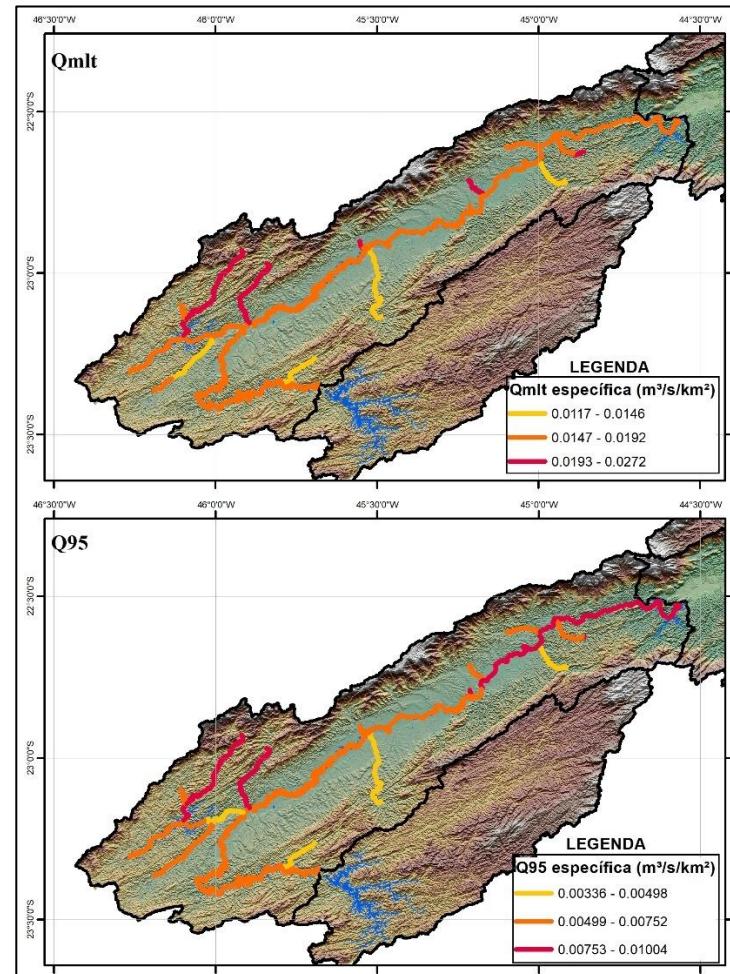


Figura 3.21 - Resultados das vazões específicas ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) de referência anuais Q_{mlt} e Q_{95} .

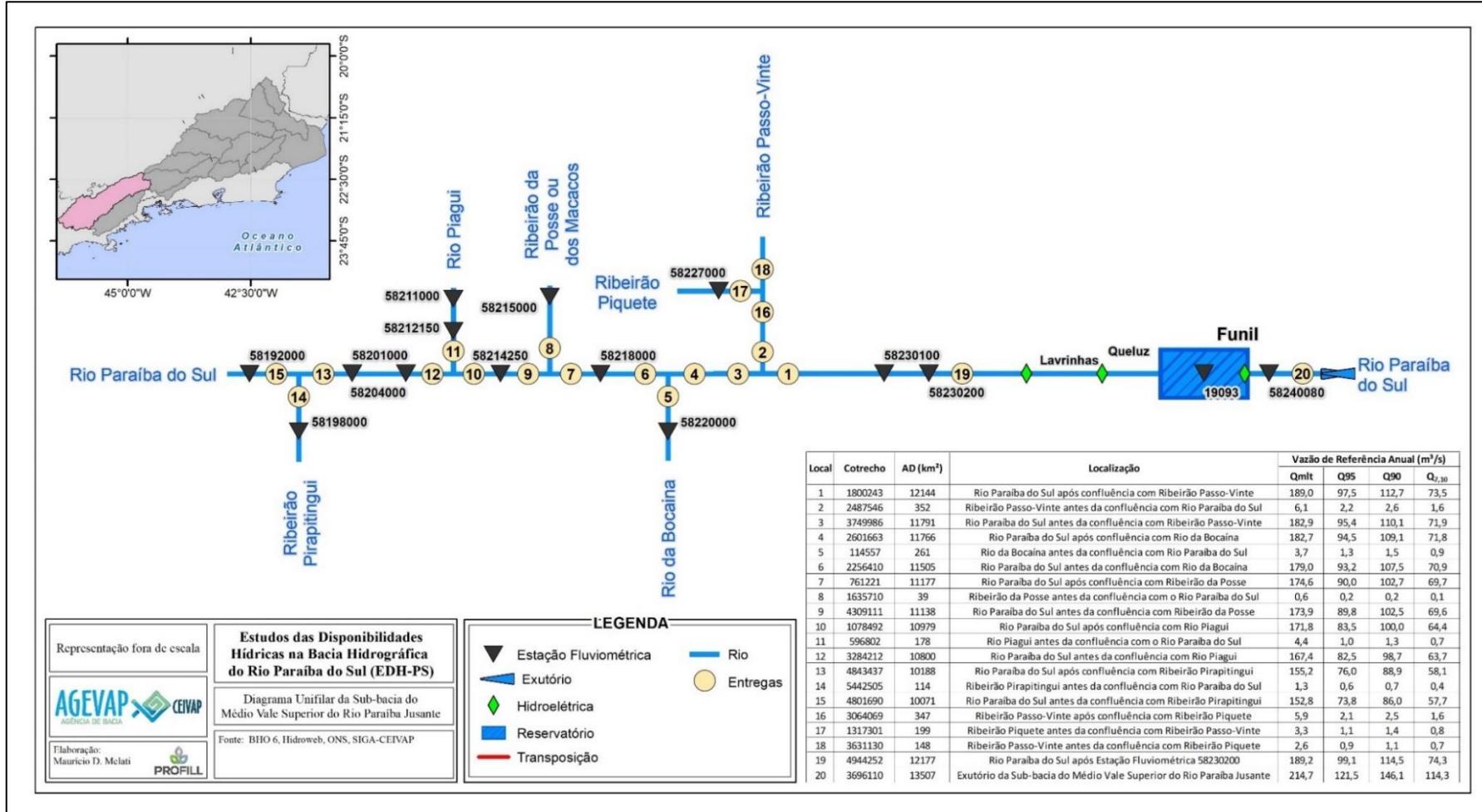


Figura 3.22 - Vazões de entrega (m³/s) da sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.

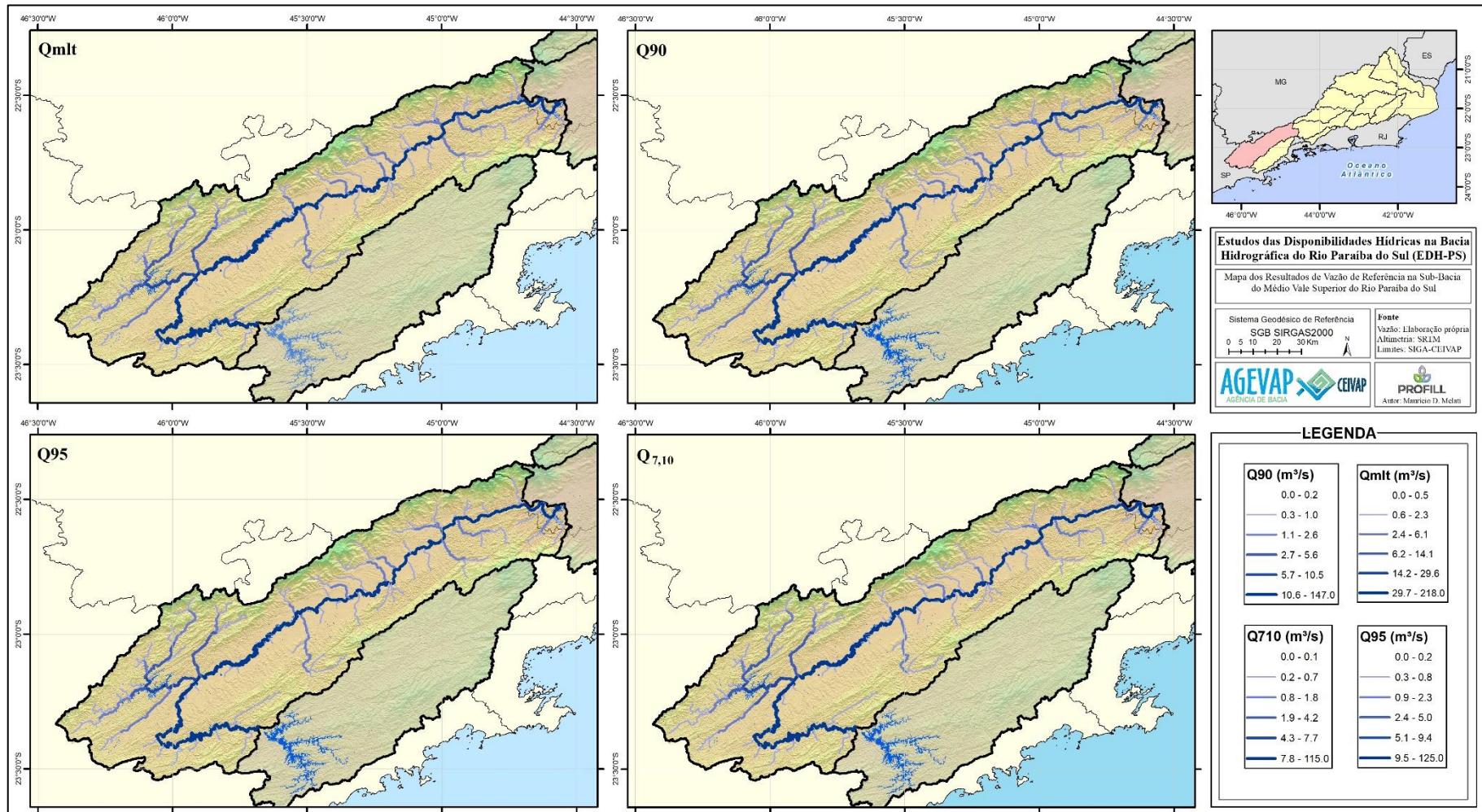


Figura 3.23 - Resultados das vazões de referência anuais Qmlt, Q₉₀, Q₉₅ e Q_{7,10} na sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.



Figura 3.24 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{milt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.

3.2.5.3. Período Crítico

Entre os anos de 2015 e 2021 a BHPS passou pelas anomalias negativas mais intensas em suas vazões médias desde 1960 (período máximo avaliado no estudo), ocasionando na diminuição das vazões por longos períodos. A Figura 3.25 mostra as reduções de vazão verificadas no período crítico considerando as diferenças entre os anos hidrológicos de 1978-2020 e 2014-2020, nas vazões de referência Q_{m1t} (primeiro mapa) e Q_{95} (segundo mapa) anuais. A sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul apresentou reduções que variaram até 52 m³/s na vazão Q_{m1t} , e de 29 (m³/s) na vazão Q_{95} .

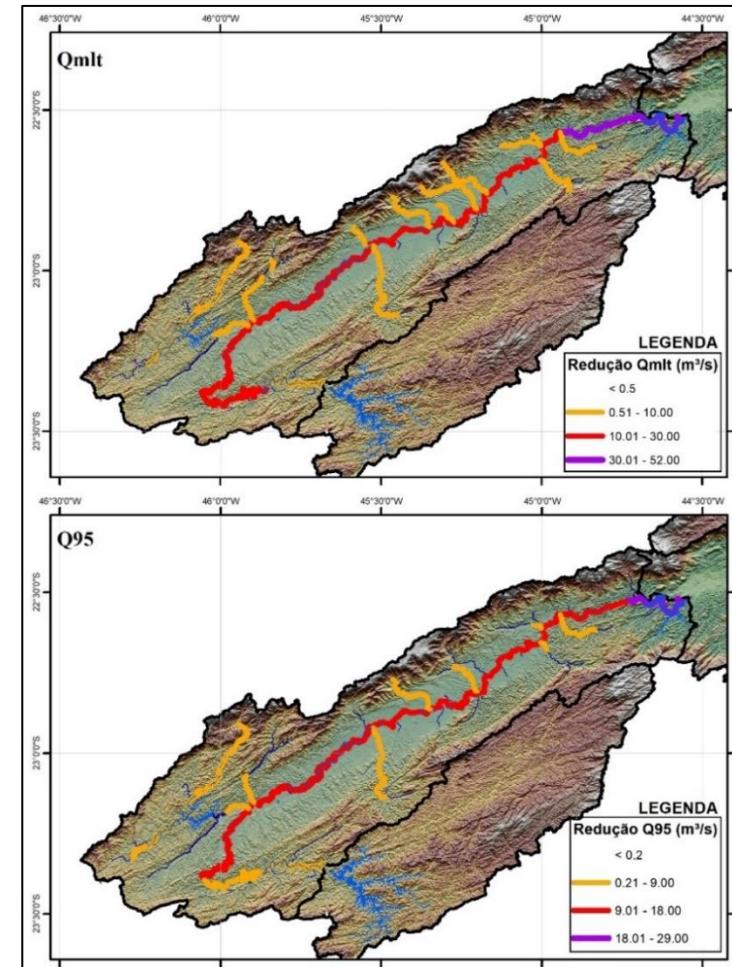


Figura 3.25 – Resultados espaciais da redução das vazões Q_{m1t} e Q_{95} na sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.

3.2.5.4. Impacto das Transposições na Disponibilidade

A sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul estende-se desde o Reservatório Santa Branca até a Usina Funil, no exutório. Na Figura 3.99 são apresentadas as variações espaciais percentuais de vazão Q_{m1t} e Q_{95} na região caso os volumes transpostos fossem mantidos na BHPS. Ou seja, caso o volume médio regularizado fosse direcionado para a defluência dos reservatórios, para jusante no rio Paraíba do Sul.

As porcentagens de variação mais altas nas vazões de referência se dão no trecho mais a montante, no rio Jaguari, antes de confluência com o rio Paraíba do Sul: 4,6 a 22,3% no caso da Q_{m1t} e 9,6 a 116,6% no caso da Q_{95} . As porcentagens de alteração diminuem gradativamente até o exutório da sub-bacia, local onde os trechos apresentam as menores porcentagens para a Q_{m1t} e para a Q_{95} : 1,7 a 2,4% e 3,5 a 4,2%, respectivamente.

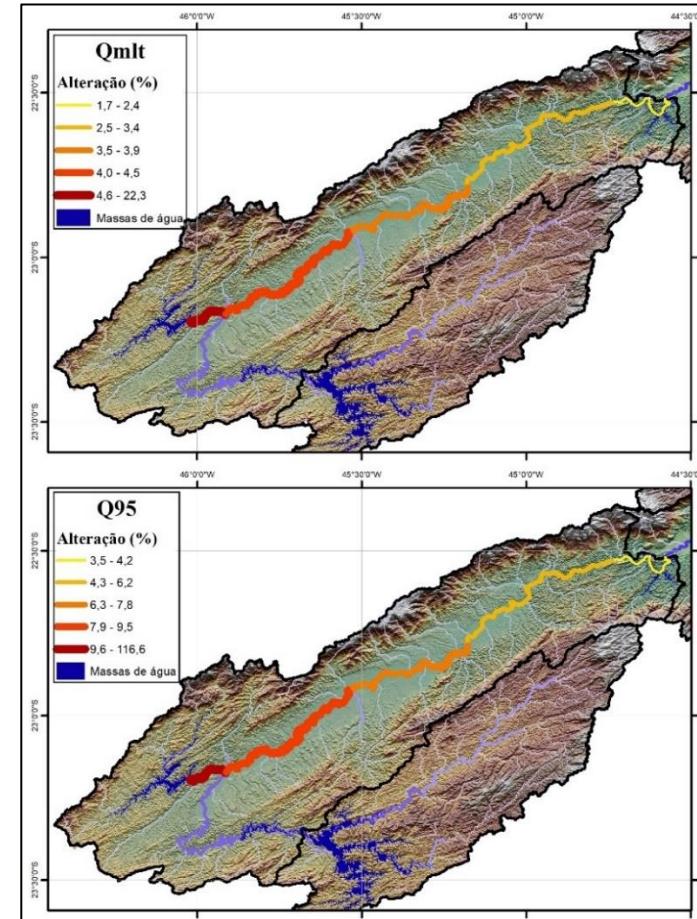


Figura 3.26 - Resultados espaciais do aumento (%) das vazões Q_{m1t} e Q_{95} anual mantendo os volumes das transposições na BHPS e propagando para jusante na sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.

3.2.6. Cenário de Mudanças Climáticas

3.2.6.1. Vazões máximas

O cálculo de vazões máximas, considerando diferentes tempos de retorno, é essencial para o dimensionamento eficiente de sistemas hidráulicos, garantindo a resiliência e a segurança necessárias diante de variabilidades climáticas e condições extremas. O cálculo das vazões máximas ($Q_{máx}$) para os tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos foi realizado nas minibacias de localização das estações fluviométricas selecionadas na área de estudo, apresentadas no Produto 4.

A sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul foi avaliada com um elevado número de estações fluviométricas, a maior parte delas localizadas no rio Paraíba do Sul. Os resultados mostraram alterações médias entre todos os TRs de 11% no curto prazo e 24% no longo prazo. No curto prazo as alterações médias são constantes entre as estações da sub-bacia, de maneira geral. No longo prazo as maiores taxas de aumento estão nas estações localizadas nos tributários, enquanto as estações localizadas no rio principal apresentam um comportamento semelhante de alteração média.

Assim, pode-se entender que na sub-bacia, o rio Paraíba do Sul poderá apresentar um aumento de suas vazões máximas, considerando as mudanças climáticas, em uma extensão considerável de todo o seu comprimento. Salienta-se que esse aumento de vazões irá ocorrer em uma região de menor altitude, propiciando o aumento da ocorrência de inundações nas regiões ribeirinhas. A Tabela 3.5 apresenta os fatores de alteração para o curto e longo prazo, as máximas vazões renaturalizadas ou simuladas no P4 e as suas projeções para o curto e longo prazo. Em complemento, a Figura 3.27 apresenta os resultados de alteração dos TRs considerando as vazões futuras em cenários de mudança climática para o curto e para o longo prazo.

Tabela 3.5 - Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.

Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)	Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)
TR 10						TR 50					
58240080	9,4	22,4	871,8	953,8	1067,1	58240080	19,2	22,7	1157,4	1379,6	1420,1
58230200	5,8	19,6	705,2	746,1	843,4	58230200	9,2	20,3	941,3	1027,9	1132,3
58230100	5,8	19,6	705,2	746,1	843,4	58230100	9,2	20,3	941,3	1027,9	1132,3
58227000	6,8	16,4	38,6	41,2	44,9	58227000	11,5	20,9	55,5	61,9	67,1
58220000	11,2	7,9	49,6	55,1	53,5	58220000	18	16,2	69,6	82,2	80,9
58218000	4,7	17,9	635,8	665,7	749,6	58218000	9,4	21,8	983,3	1075,7	1197,7
58215000	6,5	31,4	11,4	12,1	14,9	58215000	7,9	27,4	17,4	18,8	22,2
58214250	3,7	18,7	602,5	624,7	715,1	58214250	9,2	22,4	809,1	883,6	990,4
58212150	20	47,2	53	63,6	78,1	58212150	22,6	49	75,3	92,3	112,2
58211000	18,4	46,9	51,6	61,1	75,8	58211000	25,7	53,2	73,4	92,3	112,5
58204000	3,8	20,1	590,7	613,1	709,4	58204000	10,1	24,6	883	972,2	1100,2
58201000	4,1	21,9	534,7	556,6	651,8	58201000	13,7	25,5	689,8	784,3	865,7
58198000	8,2	14,5	4,7	5,1	5,3	58198000	19,5	18,3	5,9	7	6,9
58192000	3,8	22,4	487,5	506,1	596,7	58192000	13	25,7	631,4	713,5	793,7
58183000	3,2	22	541,2	558,6	660,3	58183000	12,4	25,4	811,4	912	1017,5
58182500	3,2	22	529,1	546	645,5	58182500	12,4	25,4	695,6	781,8	872,2
58165000	4,2	20,8	50,7	52,8	61,2	58165000	7,9	27,9	73,9	79,8	94,6
58158100	3,3	21	421,5	435,4	510	58158100	11,3	24,9	546,8	608,5	682,9
58152010	1,7	19,8	395,1	401,8	473,3	58152010	9,2	23,1	516,7	564,2	636,1
58142200	9	13,5	62	67,6	70,4	58142200	18,1	18,5	80,9	95,5	95,8
58128100	3,5	27,8	218,2	225,8	278,9	58128100	14	37,9	335,9	383	463,2
58116900	10,7	20,7	36,9	40,9	44,6	58116900	19,8	22,4	54,5	65,3	66,7
58110002	6,2	16,3	215,8	229,1	250,9	58110002	12,4	19	268,5	301,7	319,5
58105300	4,8	15,8	211,6	221,8	245	58105300	9,8	16,6	263	288,8	306,6
58105000	4,8	15,8	211,6	221,8	245	58105000	9,8	16,6	263	288,8	306,6
58099000	5,7	17,9	298	315	351,4	58099000	10,6	17,9	439	485,6	517,6
58096000	5,9	17,5	206,8	219	243	58096000	10,5	17,5	255,2	282	299,9
58093080	5,9	17,5	206,8	219	243	58093080	10,5	17,5	255,2	282	299,9
19093	9,4	22,4	722,7	790,6	884,6	19093	19,2	22,7	925,8	1103,5	1135,9
19092	3,5	27,8	218,2	225,8	278,9	19092	14	37,9	335,9	383	463,2
19091	5,9	17,5	198,2	209,9	232,9	19091	10,5	17,5	243,4	268,9	285,9

Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)	Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)
TR 25											
58240080	16,5	22,7	1035,8	1206,7	1270,9	58240080	21,3	22,6	1278,1	1550,3	1566,9
58230200	7,5	20,3	840,7	903,8	1011,4	58230200	11	20,8	1041,1	1155,6	1257,6
58230100	7,5	20,3	840,7	903,8	1011,4	58230100	11	20,8	1041,1	1155,6	1257,6
58227000	9,7	18,4	48,3	53	57,2	58227000	12,8	20	62,7	70,7	75,2
58220000	15,6	13,3	61,1	70,6	69,2	58220000	19,9	18,5	78,1	93,7	92,6
58218000	7,4	20,7	835,3	897,1	1008,2	58218000	11	22,7	1130,2	1254,5	1386,7
58215000	7,9	29,4	14,8	16	19,2	58215000	9,4	27,5	20	21,9	25,5
58214250	7,2	21	721,1	773	872,5	58214250	10,8	23,4	896,5	993,3	1106,3
58212150	22	49,2	65,8	80,3	98,2	58212150	22,7	48,9	84,7	103,9	126,1
58211000	24,7	52,4	64,1	80	97,8	58211000	25,8	52,8	82,6	104	126,3
58204000	7,3	23	758,5	813,9	932,9	58204000	13	25,9	1006,6	1137,4	1267,3
58201000	9,9	24,7	623,7	685,5	777,8	58201000	16	26,1	755,4	876,2	952,5
58198000	15,6	16,9	5,4	6,2	6,3	58198000	22,5	19,5	6,4	7,8	7,6
58192000	10,3	24,9	570,1	628,9	712,1	58192000	15,2	26,3	692,2	797,5	874,3
58183000	9,8	24,6	696,4	764,6	867,7	58183000	14,6	26	925,6	1060,8	1166,3
58182500	9,8	24,6	624,7	685,9	778,3	58182500	14,6	26	766	877,8	965,1
58165000	6,7	25,8	64	68,3	80,5	58165000	9,1	29,6	83,8	91,4	108,6
58158100	8,8	24,2	493,4	536,8	612,8	58158100	13,3	25,5	599,7	679,5	752,6
58152010	6,1	21,6	464,9	493,3	565,3	58152010	11,2	24,3	568,1	631,8	706,2
58142200	14,8	16,3	72,8	83,6	84,7	58142200	20,8	20,3	88,8	107,3	106,9
58128100	10,3	34,3	285,8	315,2	383,8	58128100	17	40,6	385,7	451,3	542,3
58116900	16,6	21,8	47	54,8	57,3	58116900	22,2	22,9	61,9	75,7	76,1
58110002	10,1	18,1	246	270,9	290,5	58110002	14,2	19,8	290,7	332	348,3
58105300	7,6	15,7	241,1	259,4	279	58105300	11,4	17,3	284,7	317,2	334
58105000	7,6	15,7	241,1	259,4	279	58105000	11,4	17,3	284,7	317,2	334
58099000	8,8	17,9	379	412,3	446,8	58099000	12,1	17,9	498,7	559	587,9
58096000	8,6	17,5	234,6	254,8	275,6	58096000	11,9	17,5	275,7	308,5	323,9
58093080	8,6	17,5	234,6	254,8	275,6	58093080	11,9	17,5	275,7	308,5	323,9
19093	16,5	22,7	839,3	977,8	1029,8	19093	21,3	22,6	1011,6	1227,1	1240,3
19092	10,3	34,3	285,8	315,2	383,8	19092	17	40,6	385,7	451,3	542,3
19091	8,6	17,5	224,1	243,4	263,4	19091	11,9	17,5	262,4	293,7	308,4

** Nas estações sem vazão máxima renaturalizada calculada foram utilizados os dados de vazão máxima simulada no P4.

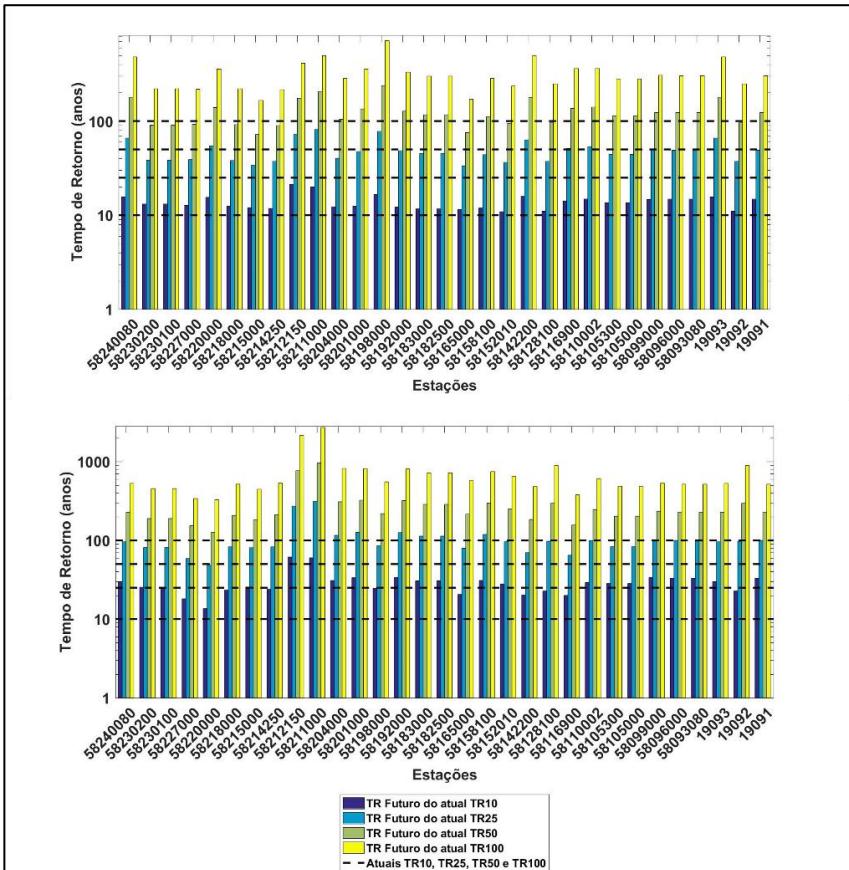


Figura 3.27 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.

3.2.6.2. Vazões Mínimas

Também foi estudado o impacto das mudanças climáticas nas vazões de referência para cenários futuros, com o objetivo de fornecer subsídios aos órgãos gestores e aos CBHs para a tomada de decisão e planejamento dos recursos hídricos da BHPS. A Tabela 3.6 mostra a mediana de alteração percentual dos 19 modelos para o curto e para o longo prazo, a vazão atual de referência e as vazões de referência futuradas.

A sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul foi avaliada com um elevado número de estações fluviométricas, a maior parte delas localizadas no rio Paraíba do Sul. Os resultados mostram a redução nas vazões mínimas, com -9% no curto prazo e -6% no longo prazo. A vazão média de longo período também apresentou uma redução no curto prazo, mas um aumento no longo prazo. No geral, os resultados indicam que irá ocorrer a redução das vazões mínimas na bacia no curto e no longo prazo.

Tabela 3.6 - Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul.

Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m ³ /s)	Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m ³ /s)
Q_{mlt}						Q₉₅					
58240080	-2,8	4,9	214,6	208,5	225	58240080	-8,9	-4,4	121,5	110,7	116,2
58230200	-2,8	4,9	189,2	183,9	198,4	58230200	-8,8	-4,4	99,1	90,4	94,8
58230100	-2,7	4,4	189,2	184,1	197,5	58230100	-9,4	-5,1	99,1	89,8	94,1
58227000	-2,7	4,4	2,9	2,9	3,1	58227000	-9,4	-5,1	1	0,9	1
58220000	-1,6	6,7	3,3	3,3	3,5	58220000	-6,4	-2,7	1,1	1	1,1
58218000	-3,8	6	179	172,3	189,6	58218000	-11,5	-12	93,2	82,5	82
58215000	-2,7	4,3	0,6	0,6	0,6	58215000	-9,5	-5,2	0,1	0,1	0,1
58214250	-1,2	7,7	173,9	171,9	187,3	58214250	-11,8	-9,1	89,8	79,2	81,6
58212150	-2,7	4,2	4,1	4	4,3	58212150	-9,4	-5	1	0,9	1
58211000	-1,1	5,7	4,1	4,1	4,4	58211000	-10,4	-8,1	1	0,9	0,9
58204000	-1,3	5,5	164,3	162,2	173,3	58204000	-10,4	-8,1	80,1	71,8	73,6
58201000	-2,8	4,1	157,6	153,2	164	58201000	-9,3	-5	77,1	69,9	73,2
58198000	-2,7	4,1	0,7	0,7	0,8	58198000	-9,4	-4,9	0,3	0,3	0,3
58192000	-4,8	2,5	148,4	141,3	152,1	58192000	-12,5	-5,4	71,6	62,6	67,7
58183000	-2,5	4,1	144,6	140,9	150,5	58183000	-9,4	-4,8	66,1	59,9	63
58182500	-2,5	4,1	144,6	141	150,5	58182500	-9,4	-4,6	66,1	59,9	63,1
58165000	-2,5	4,1	3,2	3,2	3,4	58165000	-9,4	-4,6	1	0,9	1
58158100	-4,1	2,1	134,7	129,2	137,6	58158100	-9,9	-6,2	60,6	54,6	56,9
58152010	-2,1	4,2	130,4	127,7	136	58152010	-9	-4,4	57	51,9	54,5
58142200	-2,1	4,3	8,9	8,7	9,3	58142200	-8,7	-4,3	3,4	3,1	3,3
58128100	-2,1	3,8	23	22,5	23,9	58128100	-9,5	-7,3	4,4	4	4,1
58116900	-0,5	4,3	2,2	2,2	2,3	58116900	-6,3	-2,9	0,8	0,7	0,8
58110002	-2,1	5	84,4	82,6	88,7	58110002	-6,9	-4,1	39,6	36,8	38
58105300	-3,8	3,4	81,2	78,2	84	58105300	-9,4	-4,1	37,1	33,6	35,6
58105000	-3,7	3,3	81,2	78,2	83,9	58105000	-9,6	-4,3	37,1	33,5	35,5
58099000	-3,7	3,3	76,9	74,1	79,5	58099000	-9,6	-4,3	32,6	29,5	31,2
58096000	-3,6	3,2	76,7	73,9	79,1	58096000	-9,7	-4,1	32,5	29,4	31,2
58093080	-3,6	3,1	76,7	74	79,1	58093080	-9,7	-4,1	32,5	29,3	31,2
19093	-3,2	6	214,6	207,7	227,6	19093	-8,1	-3	121,5	111,7	117,8
19092	-2,8	4,9	23	22,4	24,1	19092	-8,8	-4,4	4,4	4	4,2
19091	-0,5	4,3	76,7	76,2	80	19091	-6,3	-2,9	32,5	30,5	31,6

Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m ³ /s)	Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m ³ /s)
Q₉₀											
58240080	-7,7	-3,6	146,1	134,9	140,8	58240080	-7,2	-6,2	114,3	106,1	107,2
58230200	-7,8	-3,6	114,5	105,6	110,4	58230200	-7,2	-6,2	74,3	69	69,7
58230100	-8,1	-3,9	114,5	105,3	110,1	58230100	-6,4	-6,4	74,3	69,6	69,5
58227000	-8,1	-3,9	1,2	1,1	1,2	58227000	-6,4	-6,4	0,7	0,7	0,7
58220000	-7,9	-2,8	1,3	1,2	1,3	58220000	-10,5	-12,3	0,8	0,7	0,7
58218000	-9,4	-6	107,5	97,4	101,1	58218000	-13,4	-18,4	70,9	61,4	57,9
58215000	-8,3	-4	0,2	0,2	0,2	58215000	-6,3	-5,9	0,1	0,1	0,1
58214250	-7,3	-2,1	102,5	95	100,4	58214250	-19,8	-15,2	69,6	55,8	59
58212150	-8,5	-3,7	1,2	1,1	1,2	58212150	-6,6	-5,8	0,7	0,6	0,6
58211000	-8,1	-4,9	1,2	1,1	1,2	58211000	-13,8	-17,2	0,7	0,6	0,5
58204000	-8,4	-4,9	94,6	86,6	89,9	58204000	-13,5	-17,2	60,8	52,6	50,4
58201000	-8,5	-3,8	90,7	82,9	87,2	58201000	-7,2	-6,4	58,6	54,3	54,8
58198000	-8,4	-3,9	0,4	0,3	0,3	58198000	-6,9	-6,7	0,3	0,2	0,2
58192000	-12,9	-6,2	83,7	72,9	78,5	58192000	-14	-6,3	56,5	48,6	53
58183000	-8	-3,9	81,8	75,3	78,6	58183000	-6,6	-6,7	52,3	48,9	48,8
58182500	-7,9	-3,9	81,8	75,3	78,6	58182500	-6,4	-6,9	52,3	49	48,7
58165000	-7,9	-3,9	1,2	1,1	1,2	58165000	-6,4	-6,9	0,8	0,7	0,7
58158100	-8,4	-6,5	74,3	68,1	69,5	58158100	-6,7	-7,6	49,6	46,3	45,8
58152010	-7,6	-3,5	70,4	65	67,9	58152010	-6,6	-7,6	47,3	44,2	43,7
58142200	-7,7	-3,2	3,9	3,6	3,8	58142200	-6,5	-8	2,6	2,4	2,4
58128100	-7,5	-6,3	5	4,6	4,7	58128100	-12,7	-16	4,3	3,8	3,6
58116900	-6,4	-2,6	0,9	0,9	0,9	58116900	-5,3	-3,3	0,6	0,5	0,5
58110002	-5,9	-2,9	44,5	41,9	43,2	58110002	-6,4	-5,6	33,4	31,3	31,5
58105300	-8,7	-3,7	41,5	37,9	40	58105300	-9	-6,8	32	29,1	29,8
58105000	-8,7	-3,8	41,5	37,9	39,9	58105000	-8,9	-6,8	32	29,1	29,8
58099000	-8,7	-3,8	36,7	33,5	35,3	58099000	-8,9	-6,8	31	28,3	28,9
58096000	-8,7	-4	36,6	33,4	35,1	58096000	-9,1	-6,8	30,9	28,1	28,9
58093080	-8,6	-4	36,6	33,4	35,1	58093080	-9,1	-6,8	30,9	28,1	28,9
19093	-6,3	-2	146,1	137	143,2	19093	-10	-9,5	114,3	102,8	103,5
19092	-7,8	-3,6	5	4,6	4,8	19092	-7,2	-6,2	4,3	4	4,1
19091	-6,4	-2,6	36,6	34,2	35,6	19091	-5,3	-3,3	30,9	29,3	29,9

3.3. SUB-BACIA DO MÉDIO VALE DO RIO PARAÍBA DO SUL

A sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul está localizada na porção central da BHPS, sendo que a maior parte da sub-bacia se encontra no estado do Rio de Janeiro, porém há uma porção ao sul que fica situada em São Paulo. O rio principal desta sub-bacia é o rio Paraíba do Sul, o qual recebe contribuições significativas, ao longo do trecho compreendido na área do Médio Vale, do rio Bananal, rio do Turvo, rio Piraí e rio do Saco. Um dos pontos mais altos na região das cabeceiras dos afluentes do rio Paraíba do Sul na sub-bacia do Médio Vale encontra-se a cerca 2.500 metros, e próximo ao exutório da sub-bacia a altitude é de aproximadamente 650 metros. A sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul possui uma média pluviométrica anual de 1.413 mm, sendo a região mais próxima ao exutório a área com menor precipitação; enquanto a região que recebe a maior quantidade de chuva localiza-se próximo à cabeceira do rio Pirapetinga.

A sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul conta com algumas interferências hidráulicas, como o reservatório que faz parte do Complexo de Lajes: Reservatório Santa Cecília. O Complexo de Lajes é um sistema hídrico que, além de gerar energia elétrica,

também tem dois pontos de transposição de água para a Bacia Hidrográfica do Rio Guandu. O Reservatório Santa Cecília é o local do sistema no rio Paraíba do Sul que bombeia água para o Reservatório Vigário, no rio Piraí, e para a vertente Atlântica da Serra do Mar. Seu regime de operação é a fio d'água e não gera energia. O trecho do rio Paraíba do Sul onde está localizado o reservatório é crucial no entendimento das disponibilidades hídricas da bacia, uma vez que a retirada de água no local impacta o restante da dinâmica hídrica na continuidade do rio para jusante. A alteração brusca na disponibilidade do ponto será observada nos resultados gerados a seguir.

A gestão de recursos hídricos tem como unidade territorial a bacia hidrográfica. No entanto, a área de atuação dos Comitês de Bacia Hidrográfica poderá ser, também, a sub-bacia hidrográfica de tributário do curso de água principal da bacia, ou de tributário desse tributário ou, ainda, um grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas. Além disso, a área de atuação de CBHs estaduais deverá respeitar os limites geográficos dos estados que compõem a bacia hidrográfica do rio federal. Dessa forma, as sub-bacias apresentadas no estudo podem ter seus limites geográficos diferentes das áreas de atuação dos Comitês, conforme observado na Figura 3.28.

Na sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul estão presentes os seguintes CBHs: Médio Paraíba do Sul e Paraíba do Sul. O CBH

Paraíba do Sul está presente em uma pequena área da sub-bacia, correspondente a região do estado de São Paulo, enquanto o restante da sub-bacia é ocupado pelo CBH Médio Paraíba do Sul (localizado no estado do Rio de Janeiro).

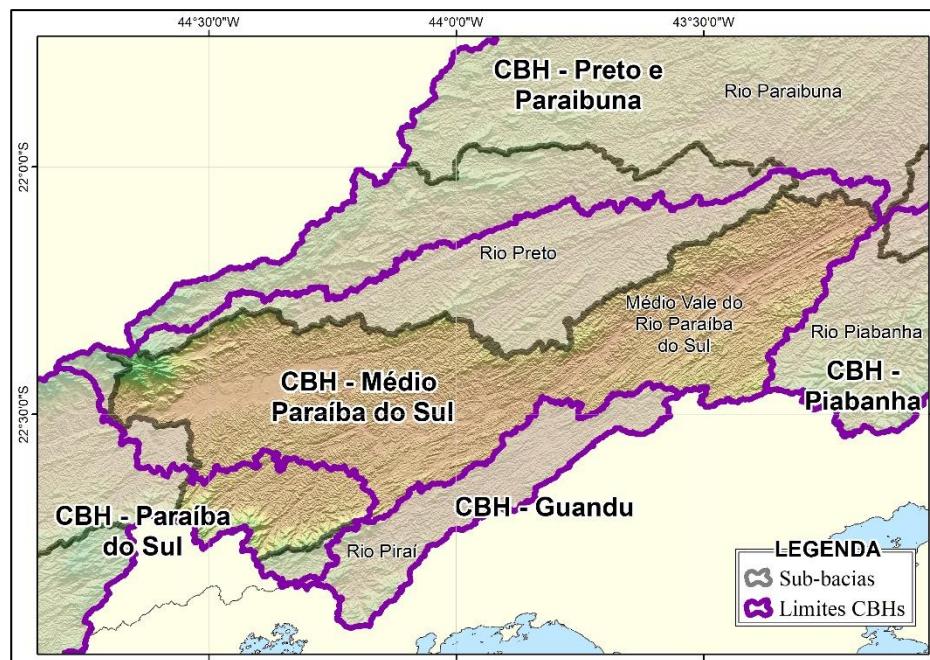


Figura 3.28 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.

3.3.1. Dados Pluviométricos

Na etapa de levantamento de dados pluviométricos realizada para o EDH-PS, foram identificadas 81 estações pluviométricas na área da sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul e suas adjacências, das quais apenas 63 possuíam algum registro de precipitação ao longo do seu período de operação. Contudo, após tratamento e consistência das séries históricas, permaneceram 40 estações no banco de dados consistido, o qual subsidiou as demais etapas do presente estudo. Todas as estações podem ser visualizadas na Figura 3.29.

3.3.2. Dados Fluviométricos

Na fase de levantamento de dados fluviométricos do presente estudo, foram inventariadas 62 estações fluviométricas na área da sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, porém somente 22 delas possuíam algum dado de vazão. Já na etapa de consistência dos dados hidrológicos, foram removidas do banco de dados oficial estações cujas séries eram muito curtas, apresentavam muitas falhas, ou algum tipo de inconsistência que pudesse comprometer o estudo de disponibilidade hídrica; assim, restaram 17 estações com boa qualidade de dados nesta sub-bacia, para serem utilizadas nas etapas seguintes do EDH-PS. As informações como código, nome, nome do rio, nome do município, localização e área de drenagem

de cada estação podem ser visualizadas no Quadro 3.3. A distribuição espacial das estações pode ser observada na Figura 3.30.

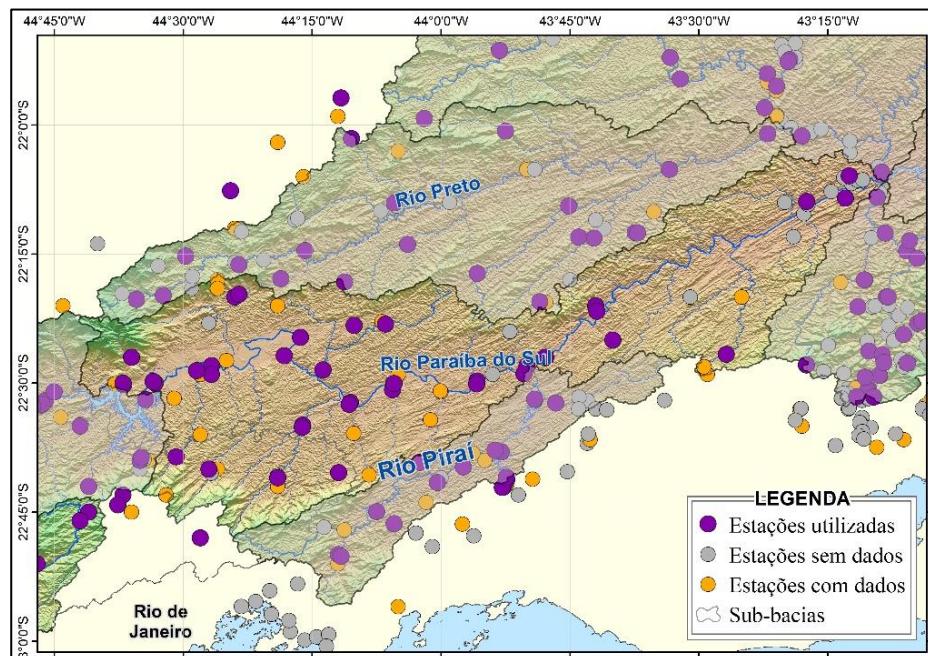


Figura 3.29 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.

Quadro 3.3 – Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.

Estação	Nome	Nome do Rio	Nome do município	Latitude	Longitude	AD (Km ²)
19094	SANTA CECÍLIA	RIO PARAÍBA DO SUL	BARRA DO PIRAI	-22,48	-43,84	16.640
58242000	UHE FUNIL JUSANTE 1	RIO PARAÍBA DO SUL	ITATIAIA	-22,50	-44,55	13.400
58385100	UHE SIMPLÍCIO MONTANTE	RIO PARAÍBA DO SUL	TRÊS RIOS	-22,12	-43,20	21.600
58300000	UHE FUNIL JUSANTE 2	RIO PARAÍBA DO SUL	BARRA MANSA	-22,54	-44,18	15.800
58315000	UEL SANTA CECÍLIA VARGEM ALEGRE	RIO PARAÍBA DO SUL	BARRA DO PIRAI	-22,50	-43,93	16.400
58250000	RESENDE	RIO PARAÍBA DO SUL	RESENDE	-22,47	-44,45	14.000
58318002	UEL SANTA CECÍLIA JUSANTE	RIO PARAÍBA DO SUL	BARRA DO PIRAI	-22,48	-43,83	16.700
58305000	UEL SANTA CECÍLIA VOLTA REDONDA	RIO PARAÍBA DO SUL	VOLTA REDONDA	-22,50	-44,09	16.000
58305001	VOLTA REDONDA	RIO PARAÍBA DO SUL	VOLTA REDONDA	-22,50	-44,09	16.000
58300001	BARRA MANSA	RIO PARAÍBA DO SUL	BARRA MANSA	-22,53	-44,18	15.800
58321000	BARRA DO PIRAI	RIO PARAÍBA DO SUL	BARRA DO PIRAI	-22,45	-43,80	19.800
58315100	VARGEM ALEGRE	RIO PARAÍBA DO SUL	BARRA DO PIRAI	-22,50	-43,93	16.400
58286000	UHE FUNIL RIO BANANAL	RIO BANANAL	BARRA MANSA	-22,54	-44,24	389
58270000	GLICÉRIO	RIO TURVO	BARRA MANSA	-22,48	-44,23	407
58380001	PARAÍBA DO SUL	RIO PARAÍBA DO SUL	PARAÍBA DO SUL	-22,16	-43,29	21.400
58287000	RIALTO	RIO BANANAL	BARRA MANSA	-22,59	-44,27	342
58258000	PONTE NOVA	RIO PIRAPETINGA	RESENDE	-22,39	-44,42	190

Fonte: ANA (2023).

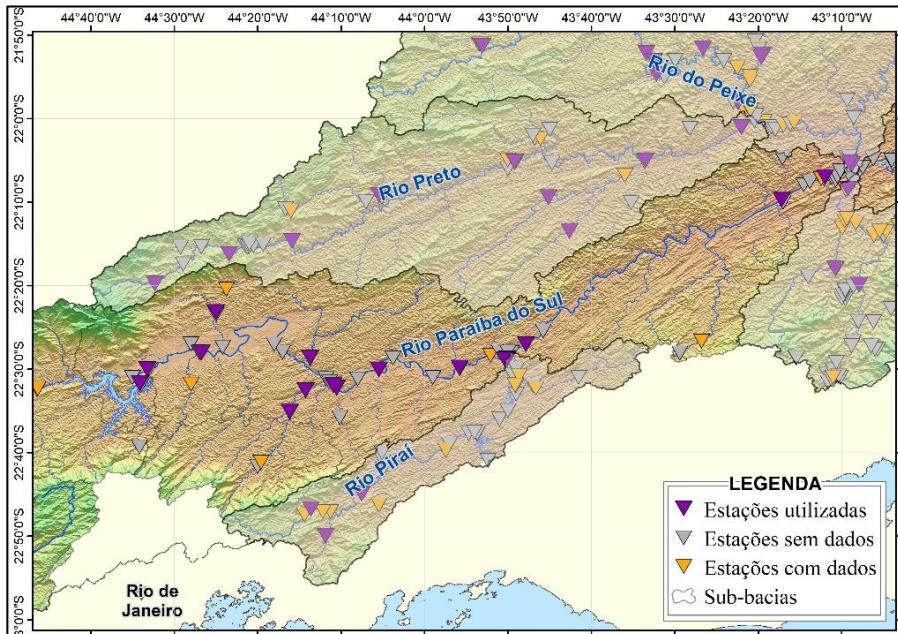


Figura 3.30 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.

3.3.3. Renaturalização de vazões

Buscando entender o quanto de água disponível em um rio ainda pode ser usada, foram calculadas as séries de vazões renaturalizadas, através da soma das séries de usos consuntivos totais com as séries observadas nas estações fluviométricas. O objetivo é conhecer a vazão natural dos rios, auxiliando na gestão

dos recursos hídricos. Para isso são apresentadas as séries de usos consuntivos específicos anuais e sazonais para a sub-bacia (Figura 3.31) e os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões (Figura 3.32).

Em relação aos gráficos da série de vazões específicas dos usos consuntivos (Figura 3.31), observa-se que na análise anual um aumento nos usos nos anos 90 seguido por períodos de diminuição e estabilização dos usos a partir dos anos 2000. Já na análise sazonal observa-se que em grande parte das estações ocorre a diminuição dos usos consuntivos no período seco.

Em seguida, a Figura 3.32 mostra os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões. Ou seja, indica quanto a devolução do uso consuntivo para o hidrograma implica em alteração da vazão de referência avaliada.

Observa-se que as porcentagens de aumento variaram de 0,15% a 4,29% para a Q_{m1t} e de 1,02% a 13,7% para a Q_{95} . Para a vazão Q_{95} observou-se um aumento nas taxas de alteração ao longo do rio principal, no sentido de montante para jusante. Na vazão Q_{m1t} a variação espacial das taxas de aumento foi mais heterogênea e com alterações mais altas nas estações próximas ao exutório da sub-bacia. Para as duas vazões de referência, os tributários apresentaram baixos valores de alteração da vazão de referência.

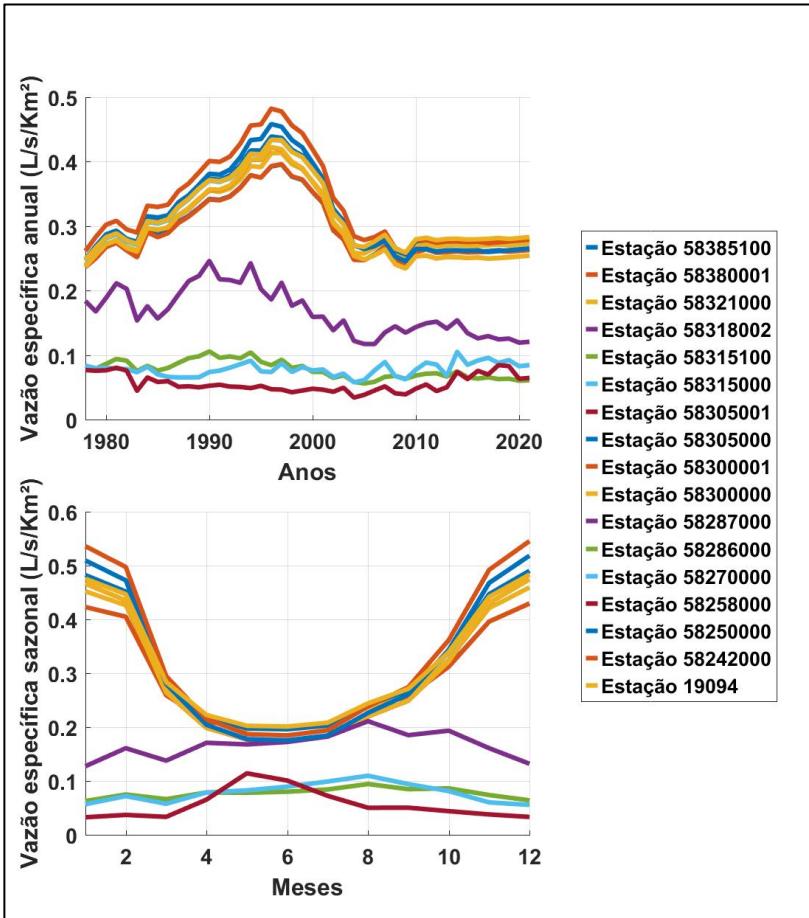


Figura 3.31 - Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.

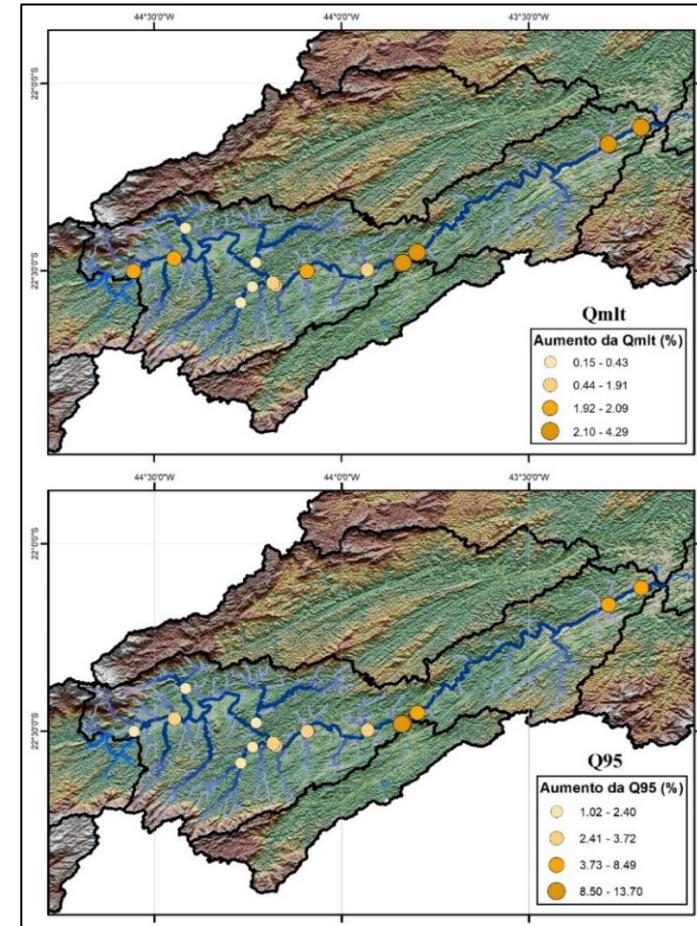


Figura 3.32 – Resultados da alteração da vazão Q_{m1t} (primeiro mapa) e da vazão Q₉₅ (segundo mapa) para a sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul após a renaturalização.

3.3.4. Estacionariedade das Séries

A análise da estacionariedade das séries de vazões busca entender, ao longo do período analisado, se ocorre uma estabilidade dos dados (comportamento estacionário), uma redução dos valores (tendência negativa) ou um aumento dos valores (tendência positiva). A Figura 3.33 mostra a análise da estacionariedade das estações fluviométricas (no primeiro gráfico) e das estações pluviométricas (no segundo gráfico).

Nas estações fluviométricas foram avaliados os seguintes índices: vazão média anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada em 5 dias consecutivos, vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos e vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos no período úmido (entre os meses de dezembro a fevereiro). Para as estações pluviométricas foram avaliados os seguintes índices: precipitação total anual, número de dias com precipitação no ano, precipitação diária igual ou superior a 50 mm no ano e precipitação diária máxima em 5 dias consecutivos no ano.

Os resultados das estações fluviométricas indicaram 4 índices com predominância da estacionariedade e 1 índice com predomínio de estações indicando tendência negativa. Nas estações pluviométricas ocorre o predomínio da estacionariedade em todos os índices,

ocorrendo também estações com tendência negativa e uma estação com tendência positiva.

De maneira geral, grande parte das estações fluviométricas indicam que não ocorreram grandes alterações significativas nos valores de vazão da sub-bacia. Somente no índice da vazão média a maior parte das estações indicaram a diminuição nos valores de vazão. Para os dados pluviométricos, grande parte das estações indicaram que não ocorreram alterações significativas nas taxas de precipitação.

3.3.5. Disponibilidade Hídrica

3.3.5.1. Calibração do modelo

Na Tabela 3.7 podem ser visualizados os valores dos indicadores estatísticos e dos erros percentuais obtidos a partir da calibração do modelo hidrológico MGB em cada estação fluviométrica da sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. Os resultados obtidos na calibração estão dentro da margem considerada satisfatória para modelos hidrológicos. Na metodologia, é detalhado o significado de cada um dos indicadores utilizados. Destaca-se que, na presente sub-bacia, o menor erro médio foi observado na vazão $Q_{7,10}$, de 0,4%, enquanto o maior erro médio ocorreu na vazão Q_{90} , com 4%. Em relação aos indicadores estatísticos, o Nash-Sutcliffe e o Nash-

Sutcliffe Logarítmico médios da sub-bacia foram iguais a 0,9, o que indica que os resultados foram muito bons. Os resultados de calibração mostrado para cada estação podem ser verificados com maior nível de detalhe no Produto 4 do presente estudo.

Tabela 3.7 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.

Estação	Área de drenagem (km ²)	Tamanho da Série (anos)	Nash-Sutcliffe	Nash-Sutcliffe Logarítmico	Erro de Volume (%)	Erro de Q _{5%} (%)	Erro de Q _{90%} (%)	Erro de Q _{99%} (%)	Erro de Q _{T,10} (%)
58242000	13.266	38,4	1	0,9	-1,6	-9,9	-5,9	-1,6	-5,4
58250000	13.958	31,1	0,9	0,9	0,6	-7,8	-5,6	0,6	-1,2
58258000	189	39,6	1	1	-0,7	0,1	0	-0,7	0
58270000	409	39,4	0,6	0,6	1,1	-2,8	-6,5	1,1	7,2
58286000	391	18,8	0,6	0,8	-1,7	1,2	-11,7	-1,7	-
58287000	132	24,3	1	1	-0,3	0,3	0,2	-0,3	-0,2
58300000	15.779	22,6	0,9	0,9	-0,9	-2,3	-2,6	-0,9	4,3
58300001	15.770	17	0,9	0,8	-8	-10,3	-9,2	-8	-
58305000	16.026	10,3	0,9	0,9	2,3	-0,4	-3,3	2,3	-
58305001	16.026	30,6	0,9	0,9	-3,2	-2,1	-2	-3,2	-1,3
58315000	16.500	5,6	0,9	0,9	-1,6	4,2	-6,7	-1,6	-
58315100	16.500	15,4	0,7	0,8	2,5	0,1	0,9	2,5	-
58321000	17.740	17	0,9	0,9	-7,9	-10,1	-5,9	-7,9	-
58380001	19.306	43	1	1	0	0	0	0	0
58385100	19.450	4,3	0,9	0,9	-5,7	-7,8	-7,8	-5,7	-
58318002	16.643	16,9	0,9	0,9	-3,4	-7,5	-2	-3,4	-
19094	16.640	43	1	1	0	0	0	0	0

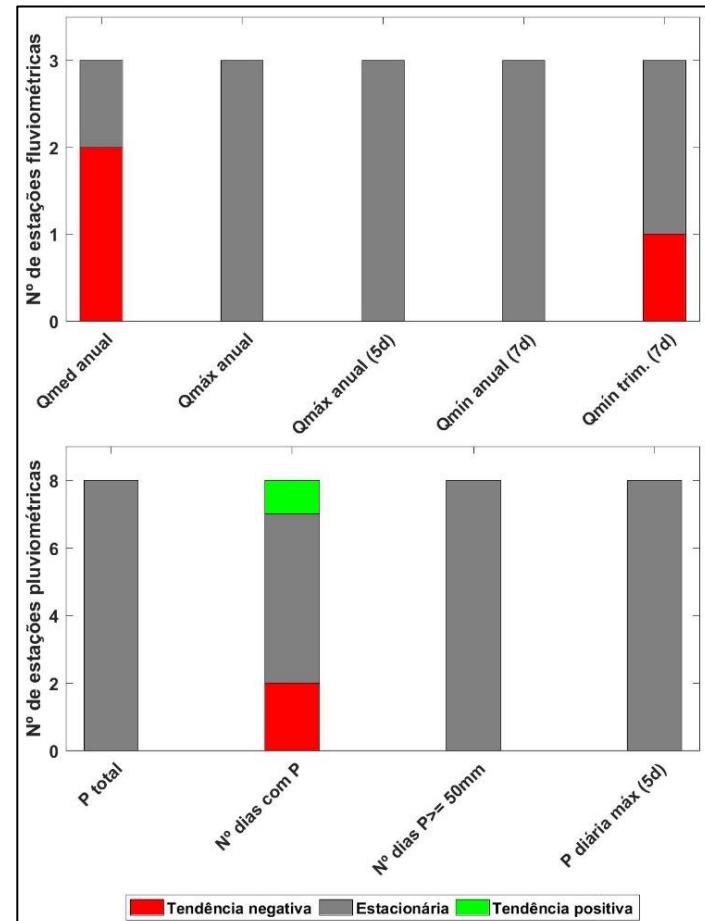


Figura 3.33- Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.

3.3.5.2. Resultados das Vazões de Referência

Conhecer as vazões de referência é essencial para realizar a gestão responsável dos recursos hídricos, já que elas representam a quantidade de água disponível nos rios. A disponibilidade das vazões de referência na sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul é apresentada na Figura 3.36, onde são mostradas a vazão de longo termo “ $Q_{m\text{lt}}$ ”, a vazão que é superada ou igualada em 90% do tempo na série histórica “ Q_{90} ”, a vazão superada ou igualada em 95% do tempo “ Q_{95} ” e a vazão de 7 dias consecutivos com tempo de retorno de 10 anos, “ $Q_{7,10}$ ”. Ainda, na Figura 3.34 é possível observar o mapa de vazões específicas ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) da $Q_{m\text{lt}}$ e Q_{95} .

Já o diagrama unifilar, apresentado pela Figura 3.35, mostra com detalhes o comportamento do rio principal e dos seus afluentes, como a ocorrência de hidrelétricas e transposição na sub-bacia. Também são apresentadas as entregas de vazão ao longo dos rios que compõem a sub-bacia, proporcionando uma visão geral e completa dos recursos hídricos.

A sub-bacia recebe contribuições de montante, da sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul. No trecho localizado na região mais de montante da sub-bacia está o reservatório Funil. Dentro os principais afluentes estão o rio Turvo, que é o afluente

que mais contribui, seguido pelo rio Bananal, pelo rio Pirapetinga, em termos de $Q_{m\text{lt}}$.

Além do reservatório Funil, está presente o reservatório Santa Cecília, onde ocorre uma transposição de água para o reservatório Santana na sub-bacia do Rio Piraí. No exutório da sub-bacia, o rio Paraíba do Sul apresenta vazão $Q_{m\text{lt}}$ de $191,0 \text{ m}^3/\text{s}$, a vazão Q_{95} é de $71,0 \text{ m}^3/\text{s}$, a vazão Q_{90} é de $91,1 \text{ m}^3/\text{s}$ e a vazão $Q_{7,10}$ é de $61,8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por fim, também são apresentados os resultados de vazão de referência na sub-bacia no formato de *Boxplot* para a vazão anual e mensais (Figura 3.37). Os resultados permitem identificar a sazonalidade das vazões de referência na bacia. Devido ao desproporcional número de trechos de pequena área de drenagem na base de resultados, o gráfico somente mostrou resultados de trechos com área de drenagem acima de 200km^2 .

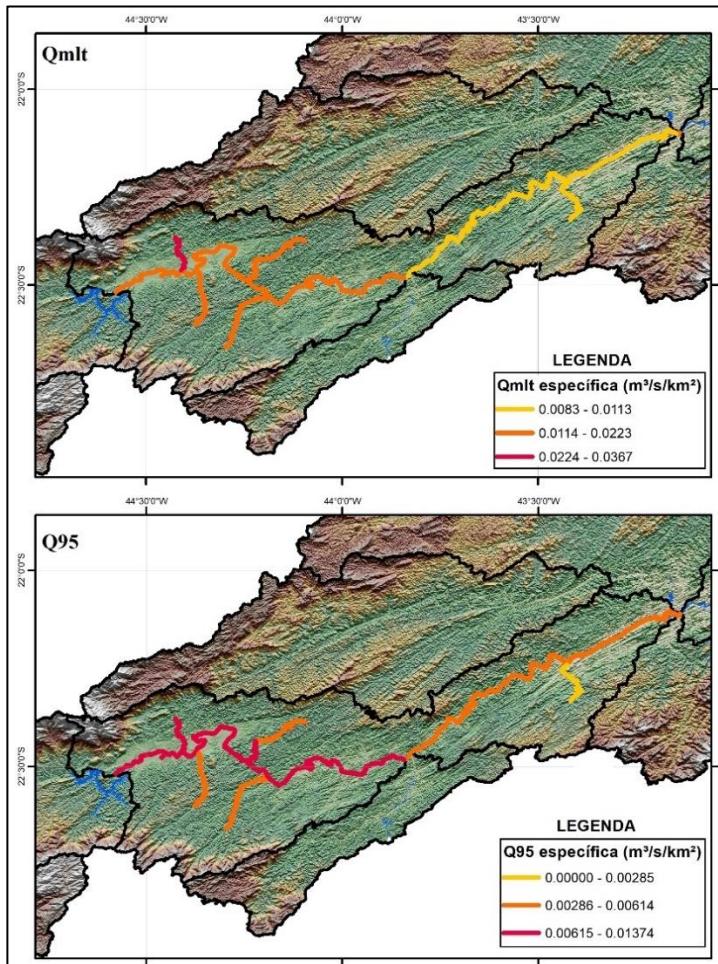


Figura 3.34 - Resultados das vazões específicas ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) de referência anuais
Q_{m1t} e Q₉₅.

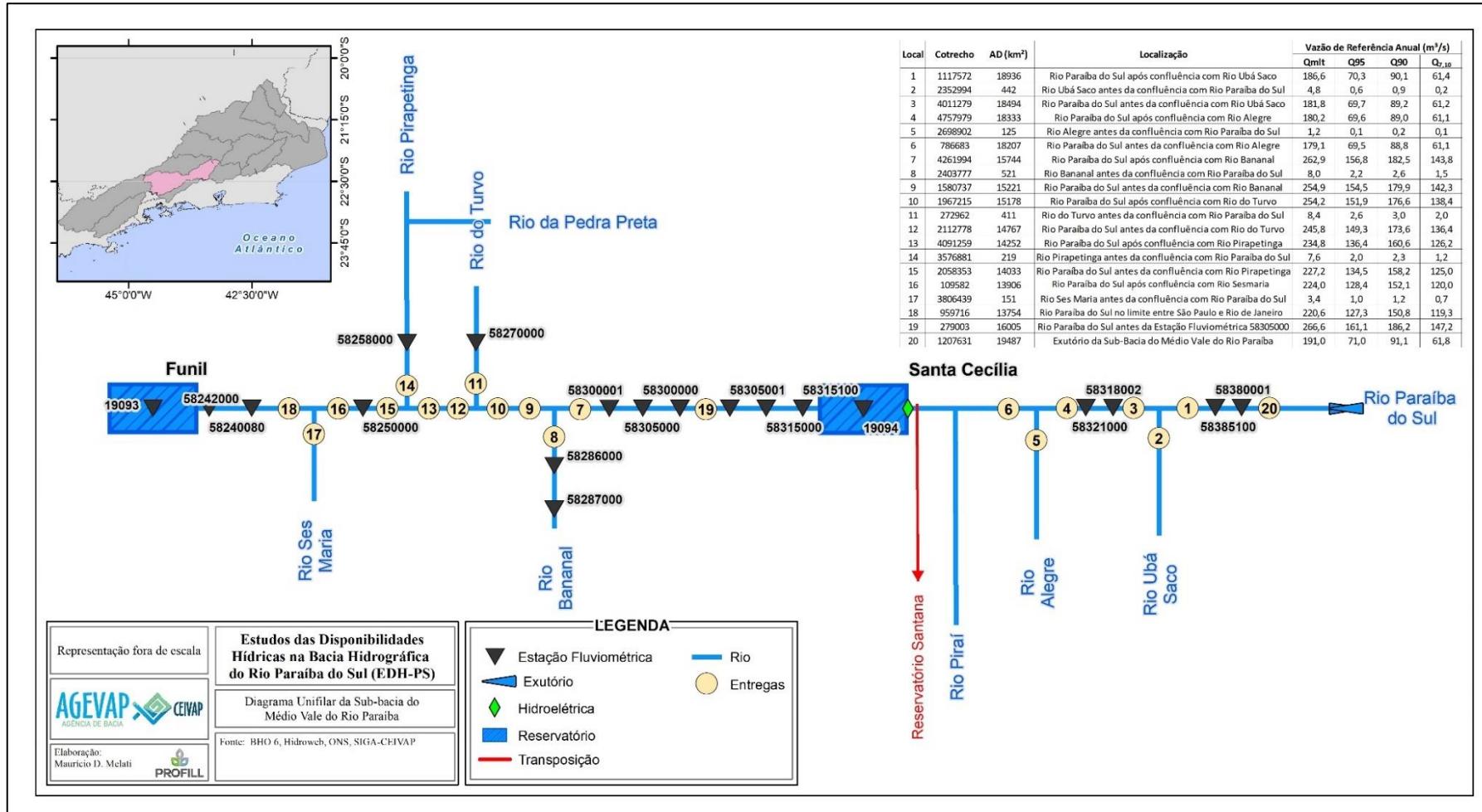


Figura 3.35 - Vazões de entrega (m³/s) da sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.

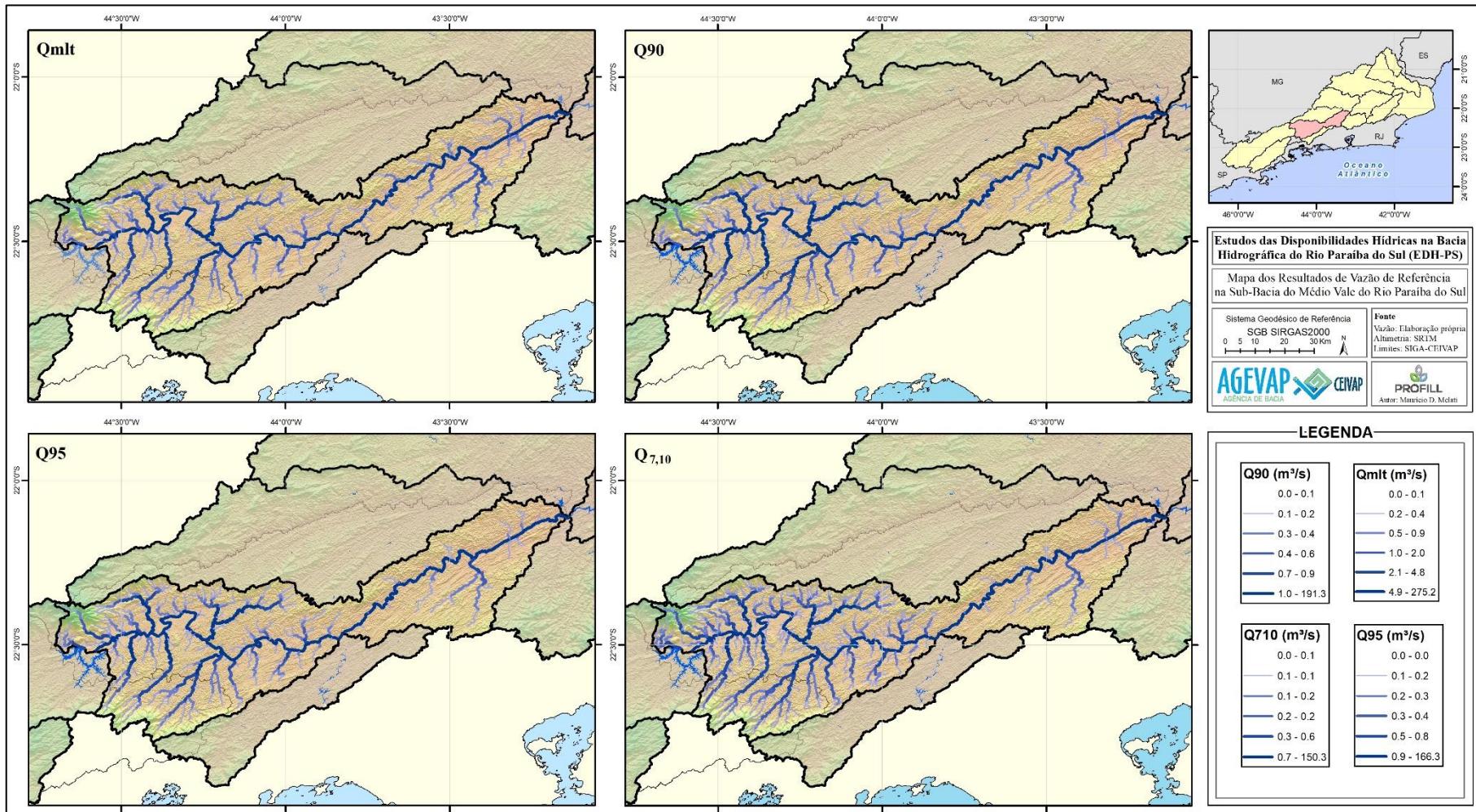


Figura 3.36 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{m1t}, Q₉₀, Q₉₅ e Q_{7,10} na sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.

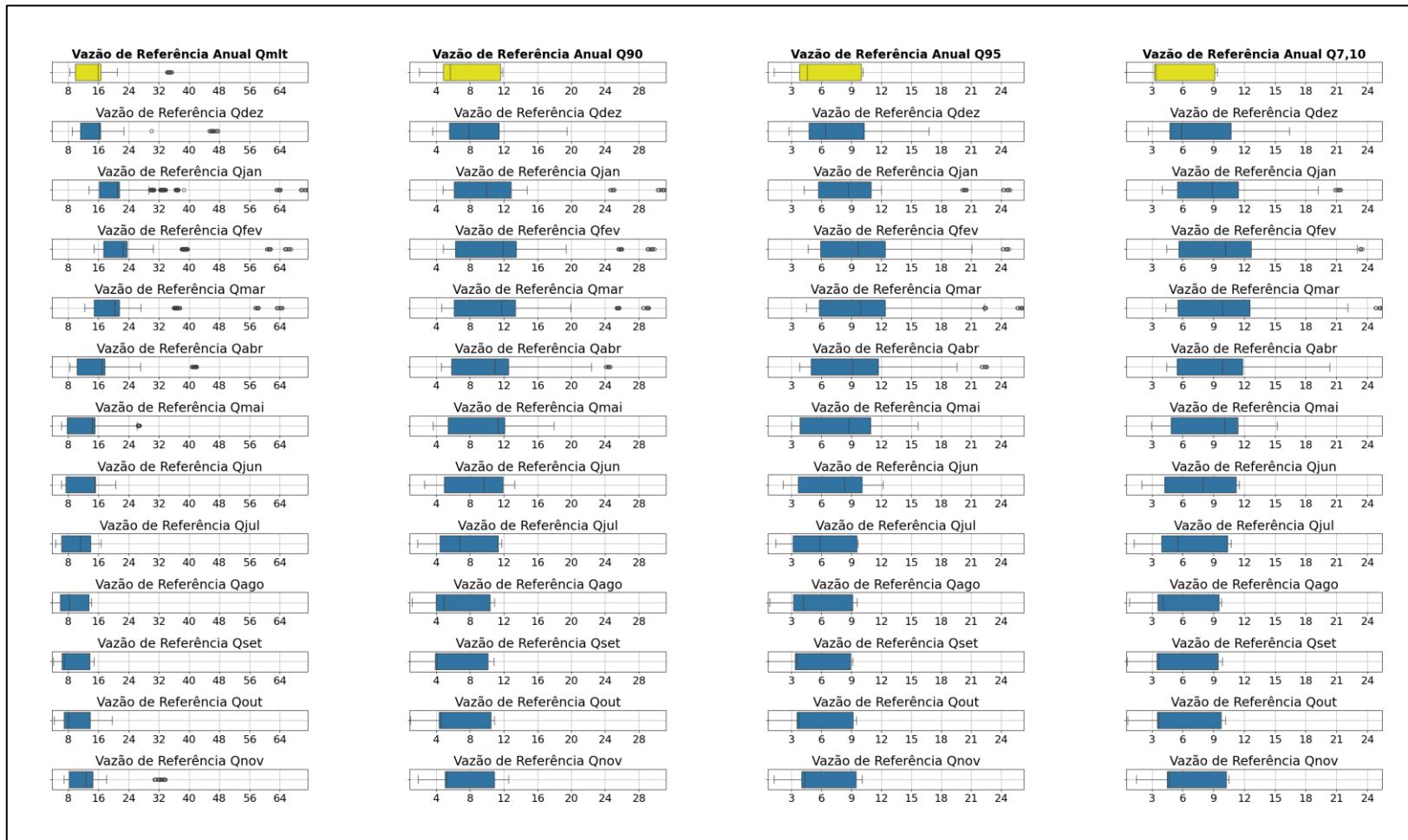


Figura 3.37 – Boxplot dos resultados das vazões específicas (L/s/km^2) de referência anual e mensais Q_{m1t} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.

3.3.5.3. Período Crítico

Entre os anos de 2015 e 2021 a BHPS passou pelas anomalias negativas mais intensas em suas vazões médias desde 1960 (período máximo avaliado no estudo), ocasionando na diminuição das vazões por longos períodos. A Figura 3.38 mostra as reduções de vazão verificadas no período crítico considerando as diferenças entre os anos hidrológicos de 1978-2020 e 2014-2020, nas vazões de referência Q_{m1t} (primeiro mapa) e Q_{95} (segundo mapa) anuais. A sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul apresentou reduções que variaram até $83 \text{ m}^3/\text{s}$ na vazão Q_{m1t} , e $50 \text{ m}^3/\text{s}$ na vazão Q_{95} . Ao longo do rio Paraíba do Sul a redução de ambas as vazões ocorre de forma descontínua, onde o trecho de rio mais próximo a cabeceira, que se estende até a metade da sub-bacia, aproximadamente, apresenta as maiores taxas de redução de vazão.

3.3.5.4. Impacto das Transposições na Disponibilidade

A sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul estende-se do reservatório da Usina Funil até a confluência com a sub-bacia do Rio Paraibuna. Na Figura 3.39 são apresentadas as variações espaciais percentuais de vazão Q_{m1t} e Q_{95} na região, caso os volumes transpostos fossem mantidos na BHPS. Ou seja, caso o volume médio regularizado fosse direcionado para a defluência dos reservatórios, para jusante no rio Paraíba do Sul.

As variações nos trechos a montante seguem o padrão de diminuição da porcentagem de alteração observada nos trechos finais da sub-bacia do Médio Vale Superior variando de 2,1 a 2,4%, no caso da Q_{m1t} e de 3,5 a 4,2% no caso da Q_{95} . A variação mais significativa, entretanto, se dá com a presença da Usina Santa Cecília, anterior à chegada do rio Piraí, local onde se inicia a transposição para o rio Guandu. Devido aos grandes volumes retirados do rio neste trecho, temos as maiores porcentagens de alteração nas vazões de referência, com 82,5% a 89,6% no caso da Q_{m1t} e 194,0% a 213,1% no caso da Q_{95} . A partir desse ponto, em direção ao exutório, as porcentagens de alteração seguem padrão de diminuição até a chegada do rio Paraibuna.

A sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul é a mais impactada pelo sistema de transposição das águas, isso ocorre devido à grande transferência de volumes hídricos pelo sistema do Complexo de Lajes. Chama a atenção o grande impacto da Q_{95} nesse trecho, com alteração que permitiria aumentar em aproximadamente 2 vezes a disponibilidade hídrica.

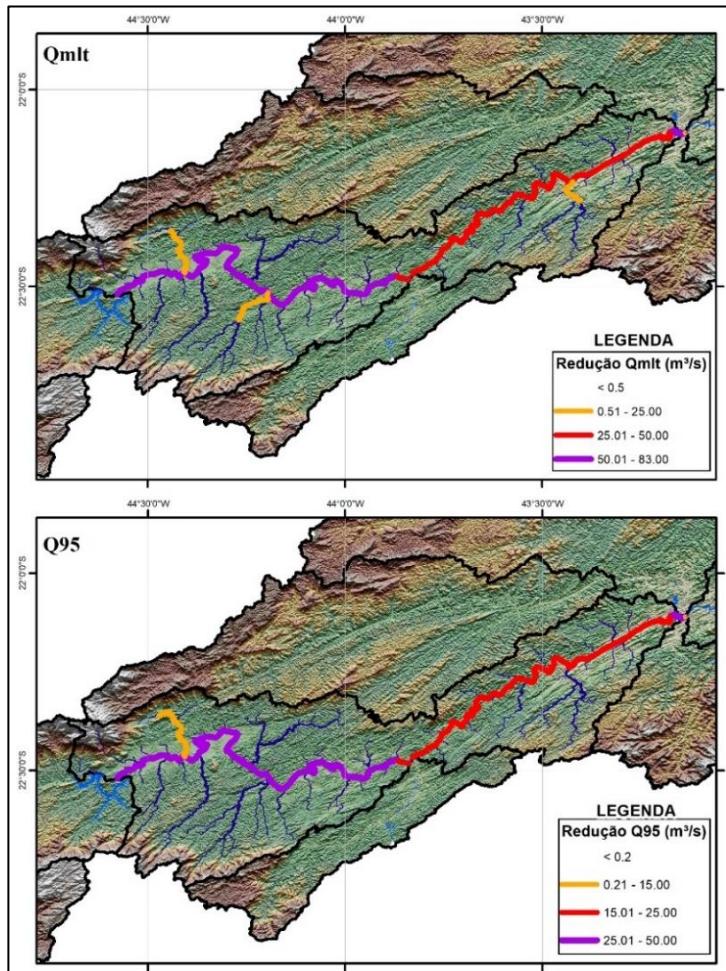


Figura 3.38 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{m1t} e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-Bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.

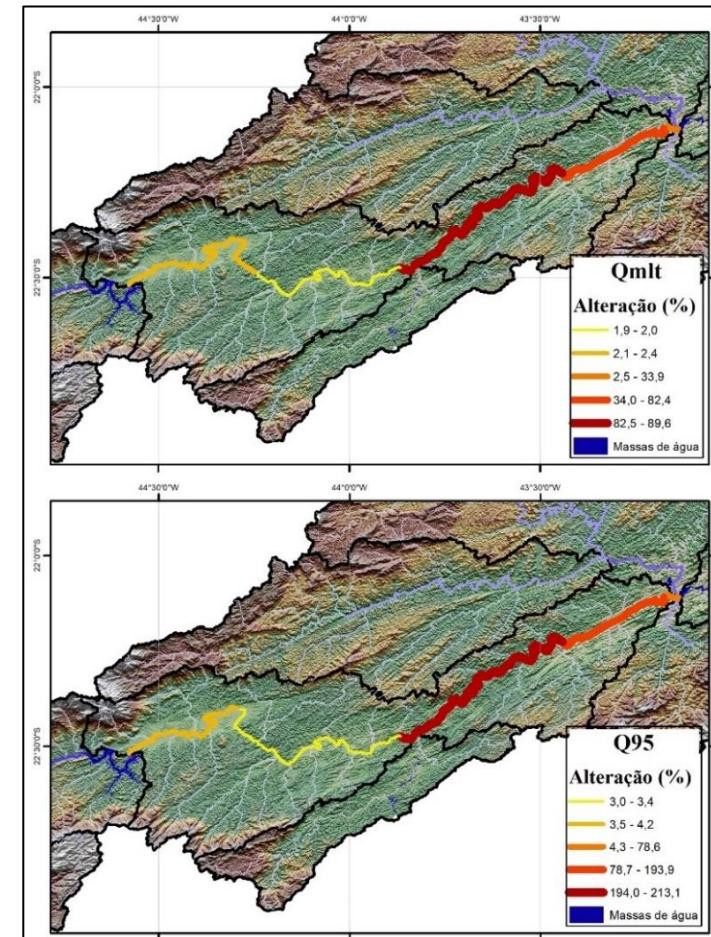


Figura 3.39 - Resultados espaciais do aumento (%) das vazões Q_{m1t} e Q_{95} anual mantendo os volumes das transposições na BHPS e propagando para jusante na sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.

3.3.6. Cenário de Mudanças Climáticas

3.3.6.1. Vazões máximas

O cálculo de vazões máximas, considerando diferentes tempos de retorno, é essencial para o dimensionamento eficiente de sistemas hidráulicos, garantindo a resiliência e a segurança necessárias diante de variabilidades climáticas e condições extremas. O cálculo das vazões máximas ($Q_{máx}$) para os tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos foi realizado nas minibacias de localização das estações fluviométricas selecionadas na área de estudo, apresentadas no Produto 4.

A sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul apresenta um grande número de estações avaliadas, tanto no rio principal como nos pequenos tributários. De maneira geral, as estações localizadas no rio Paraíba do Sul apresentaram valores superiores às dos pequenos tributários. Os resultados mostraram alterações médias entre todos os TRs de 13% no curto prazo e 26% no longo prazo. No longo prazo as estações localizadas ao longo do rio Paraíba do Sul apresentaram alterações constantes para todos os TRs dentro do intervalo de 15% a 30%. Observa-se no curto prazo que as

estações localizadas do Sul da bacia, no rio principal e em uma região de menor altitude, mostraram maiores taxas de alteração média, em comparação com as outras estações ao longo do rio principal. Isso significa que poderá ocorrer um aumento significativo de vazões máximas em toda a sub-bacia em ambos os períodos, com mais intensidade no longo prazo.

Dessa forma, torna-se essencial efetivar a gestão de recursos hídricos, o planejamento urbano e o dimensionamento de sistemas hidráulicos considerando as consequências que o aumento das vazões pode trazer. Entre essas consequências estão inundações mais severas e intensas, ampliação das manchas de inundações urbanas, danos a infraestrutura das cidades, entre outros.

A Tabela 3.8 apresenta os fatores de alteração para o curto e longo prazo, as máximas vazões renaturalizadas ou simuladas no P4 e as suas projeções para o curto e longo prazo. Em complemento, a Figura 3.40 apresenta os resultados de alteração dos TRs considerando as vazões futuras em cenários de mudança climática para o curto e para o longo prazo.

Tabela 3.8 - Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.

Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizad a ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)	Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizad a ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizad a ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)
TR 10						TR 50					
58385100	10,3	24,2	1091,3	1203,7	1355,4	58385100	19,9	24,7	1457,2	1747,1	1817,1
58380001	10	24,2	982,3	1080,5	1220	58380001	19,5	25,2	1277,2	1526,3	1599,1
58321000	8,3	22,6	923,9	1000,6	1132,7	58321000	12,6	26,3	1215,3	1368,4	1534,9
58318002	8,4	22,4	928,9	1006,9	1137	58318002	12,3	26,3	1221,8	1372,1	1543,2
58315100	7,5	21,6	954	1025,5	1160	58315100	14,4	26,9	1227,1	1403,8	1557,2
58315000	7,5	21,6	954	1025,5	1160	58315000	14,4	26,9	1227,1	1403,8	1557,2
58305001	7,7	20,6	1145,2	1233,3	1381,1	58305001	15,6	26,8	1527,9	1766,3	1937,4
58305000	7,7	20,6	931,6	1003,4	1123,5	58305000	15,6	26,8	1196,5	1383,1	1517,1
58300001	7,7	19,7	918,7	989,5	1099,7	58300001	16,4	26,4	1179,4	1372,8	1490,7
58300000	7,7	19,7	918,7	989,5	1099,7	58300000	16,4	26,4	1179,4	1372,8	1490,7
58287000	0,1	21,9	95,7	95,8	116,6	58287000	4	27,2	140,5	146,1	178,7
58286000	0	21,2	69,8	69,8	84,7	58286000	3,7	25,9	97,9	101,6	123,3
58270000	11,3	26,6	74,5	82,9	94,3	58270000	15,8	24,2	101,2	117,2	125,7
58258000	19	46,6	453,7	539,9	665,1	58258000	30,2	56,4	734,1	955,9	1148,2
58250000	9,8	21,1	813,6	893,4	985,3	58250000	18,4	22,1	1173,8	1389,8	1433,3
58242000	8,9	22	761,5	829,2	929	58242000	19	22,3	973,2	1158,1	1190,2
19094	8,4	22,4	1118,2	1212,1	1368,6	19094	12,3	26,3	1503,3	1688,2	1898,7

Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizad a ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)	Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizad a ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizad a ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)
TR 25						TR 100					
58385100	15,2	24,1	1301,3	1499,2	1615	58385100	23,6	25,2	1611,8	1992,2	2018
58380001	14,9	24,5	1151,6	1323,2	1433,8	58380001	23,1	25,6	1401,9	1725,8	1760,8
58321000	10,6	23,9	1091,2	1206,8	1352	58321000	15,5	28,9	1338,4	1545,9	1725,3
58318002	11	24,3	1097,1	1217,7	1363,7	58318002	15,1	29	1345,6	1548,8	1735,9
58315100	11,3	23,1	1110,8	1236,3	1367,4	58315100	17	29,9	1342,6	1570,8	1744
58315000	11,3	23,1	1110,8	1236,3	1367,4	58315000	17	29,9	1342,6	1570,8	1744
58305001	12,2	23	1364,9	1531,4	1678,8	58305001	18,3	29,9	1689,8	1999	2195
58305000	12,2	23	1083,7	1215,9	1332,9	58305000	18,3	29,9	1308,4	1547,9	1699,7
58300001	13	22,7	1068,4	1207,2	1310,9	58300001	19,2	29,5	1289,6	1537,2	1670
58300000	13	22,7	1068,4	1207,2	1310,9	58300000	19,2	29,5	1289,6	1537,2	1670
58287000	2,5	24,1	121,4	124,4	150,7	58287000	5,2	29,6	159,4	167,7	206,6
58286000	2	22,7	86	87,7	105,5	58286000	4,8	28,2	109,8	115,1	140,8
58270000	13,3	24,7	89,8	101,8	112	58270000	17,4	23,4	112,4	132	138,8
58258000	26,3	51,9	614,7	776,4	933,7	58258000	33,2	59,8	852,7	1135,8	1362,6
58250000	15,8	22,2	1020,4	1181,7	1247	58250000	20,5	22	1326,1	1598	1617,9
58242000	16,4	22,4	883	1027,8	1080,8	58242000	21,1	22,2	1062,7	1286,9	1298,6
19094	11	24,3	1339,3	1486,6	1664,7	19094	15,1	29	1666,1	1917,7	2149,3

** Nas estações sem vazão máxima renaturalizada calculada foram utilizados os dados de vazão máxima simulada no P4.

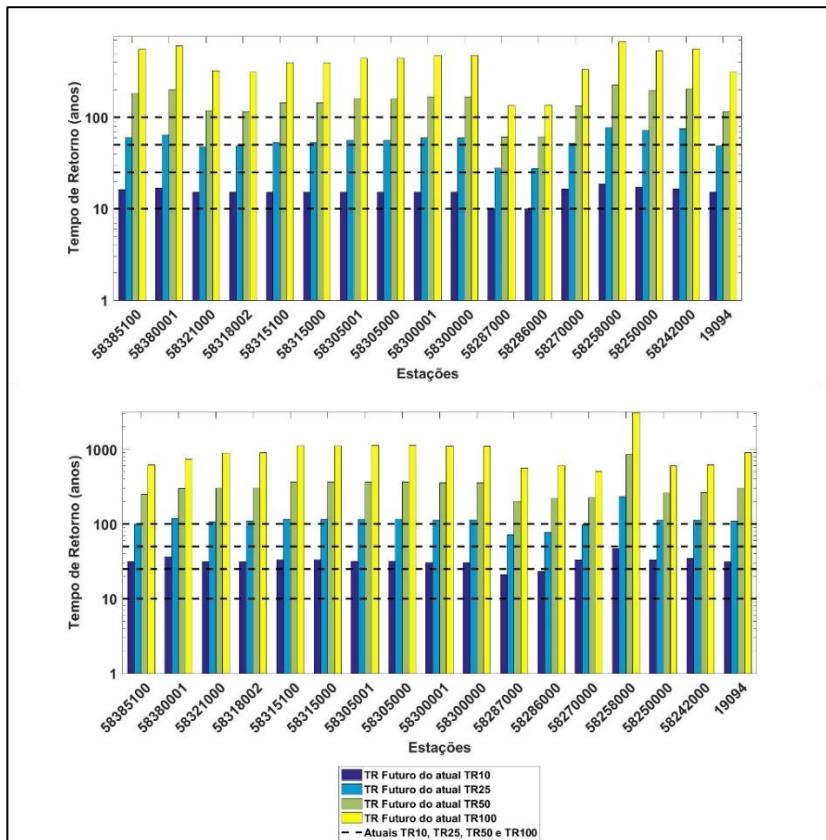


Figura 3.40 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.

3.3.6.2. Vazões Mínimas

Também foi estudado o impacto das mudanças climáticas nas vazões de referência para cenários futuros, com o objetivo de fornecer subsídios aos órgãos gestores e aos CBHs para a tomada de decisão e planejamento dos recursos hídricos da BHPS. A Tabela 3.9 mostra a mediana de alteração percentual dos 19 modelos para o curto e para o longo prazo, a vazão atual de referência e as vazões de referência futuradas.

A sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba apresenta diversas estações avaliadas, tanto no rio principal como nos pequenos tributários. Os resultados mostram redução das vazões mínimas médias em -8% no curto prazo e em -5% no longo prazo. As vazões médias de longo termo apresentaram alterações negativas no curto prazo e positivas no longo prazo. De maneira geral, os resultados indicam a diminuição da disponibilidade hídrica da sub-bacia no futuro, em especial no curto prazo.

Tabela 3.9 - Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul.

Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m ³ /s)	Vazão de Referência Projetada no Curto Prazo (m ³ /s)	Vazão de Referência Projetada no Longo Prazo (m ³ /s)	Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m ³ /s)	Vazão de Referência Projetada no Curto Prazo (m ³ /s)	Vazão de Referência Projetada no Longo Prazo (m ³ /s)
Q₉₀											
58385100	-2,5	9,1	190,6	185,8	208	58385100	-5	-1,4	70,9	67,4	70
58380001	-3,2	6,4	189,4	183,4	201,5	58380001	-8,3	-3,2	70,7	64,8	68,4
58321000	-1,8	6,1	174,9	171,7	185,6	58321000	-5,9	-2,9	69	65	67,1
58318002	-3,2	6,1	138,6	134,1	147	58318002	-8	-3	58,2	53,6	56,5
58315100	-3,2	6	271,7	262,9	288,1	58315100	-8,1	-3	164,2	151	159,3
58315000	-3,2	5,9	271,7	263	287,6	58315000	-8,1	-3,4	164,2	150,9	158,6
58305001	-3,2	5,9	266,6	258,1	282,2	58305001	-8,1	-3,4	161,1	148	155,6
58305000	-3,2	5,7	266,6	258,1	281,9	58305000	-8	-3,8	161,1	148,3	155
58300001	-3,2	5,7	263	254,6	278	58300001	-8	-3,8	158,9	146,2	152,9
58300000	-3,2	5,6	263,1	254,7	277,9	58300000	-8,2	-3,9	159	146	152,7
58287000	-3,2	5,6	5,4	5,2	5,7	58287000	-8,2	-3,9	1,3	1,2	1,2
58286000	-1,7	9,2	6,2	6,1	6,7	58286000	-12,9	-6,5	1,5	1,3	1,4
58270000	-1,7	9,1	8,4	8,2	9,1	58270000	-13,1	-5,6	2,6	2,2	2,4
58258000	-0,1	11,4	6,3	6,3	7,1	58258000	-4,6	3,9	1,6	1,6	1,7
58250000	-2,6	8,4	224	218,2	242,9	58250000	-13,4	-13,3	128,4	111,2	111,3
58242000	-2,9	5	214,8	208,6	225,5	58242000	-8,8	-4,3	121,6	110,9	116,3
19094	-3,2	6,5	138,5	134,2	147,5	19094	-5,9	-6,2	58,2	54,8	54,6
Q₉₅											
58385100	-3,8	-1,2	90,9	87,5	89,8	58385100	-8,5	-5,6	61,8	56,5	58,3
58380001	-6,5	-2,5	90,6	84,7	88,3	58380001	-9,6	-8,9	61,6	55,7	56,1
58321000	-1,8	1,1	88,2	86,6	89,1	58321000	-6,3	0,8	60,9	57	61,3
58318002	-6,2	-1,9	75,3	70,7	73,9	58318002	-10	-9,4	53,4	48	48,3
58315100	-6,3	-2	189,3	177,4	185,5	58315100	-10	-9,5	148,9	134	134,9
58315000	-7,7	-3	189,3	174,7	183,6	58315000	-5,7	-6,4	148,9	140,5	139,4
58305001	-7,7	-3	186,2	171,8	180,6	58305001	-5,7	-6,4	147,2	138,9	137,8
58305000	-7,8	-3,3	186,2	171,6	180,1	58305000	-5,9	-6,5	147,2	138,5	137,7
58300001	-7,8	-3,3	184,6	170,1	178,5	58300001	-5,9	-6,5	145,9	137,3	136,5
58300000	-7,9	-3,6	184,6	170	178	58300000	-6,2	-6,5	145,9	136,9	136,4
58287000	-7,9	-3,6	1,5	1,4	1,5	58287000	-6,2	-6,5	0,8	0,8	0,8
58286000	-5,4	-0,9	1,8	1,7	1,8	58286000	-18,9	-11,3	0,9	0,8	0,8
58270000	-6,4	-1	3	2,8	3	58270000	-16,5	-11,4	2	1,7	1,8
58258000	-5,6	2,9	2	1,9	2,1	58258000	-6,1	0,8	0,9	0,9	0,9
58250000	-11	-7,4	152,1	135,4	140,9	58250000	-21,4	-17,8	120	94,3	98,6
58242000	-7,9	-3,9	146,3	134,7	140,6	58242000	-6,8	-6,1	114,4	106,7	107,4
19094	-7,1	-2,4	75,3	70	73,5	19094	-6,3	-7,1	53,4	50	49,6

3.4. SUB-BACIA DO RIO PIRÁI

A sub-bacia do Rio Piraí está localizada na região central da BHPS, ao sul do rio Paraíba do Sul, sendo que quase toda a sub-bacia está inserida no estado do Rio de Janeiro, com uma pequena área em São Paulo. O rio Piraí é o rio principal desta sub-bacia e recebe à contribuição do rio São José. Além disso, o rio Piraí deságua na porção média do rio Paraíba do Sul a jusante do reservatório Santa Cecília. A cabeceira do rio Piraí encontra-se a uma altitude de 1.400 metros e sua foz a 400 metros. A sub-bacia possui uma média pluviométrica anual de 1.515 mm, sendo a região mais próxima ao exutório a área com menor precipitação; enquanto a região que recebe a maior quantidade de chuva é a cabeceira do rio Piraí. A Sub-Bacia do Rio Piraí possui diversas interferências hidráulicas, com destaque para o Complexo de Lajes, o qual transpõe águas da BHPS para Bacia Hidrográfica do Rio Guandu, e é formado por um conjunto de rios, canais, usinas hidrelétricas, reservatórios e estações elevatórias, além de outras estruturas hidráulicas (ANA, 2014). Nesta sub-bacia em específico, há três reservatórios que participam desse sistema hídrico, sendo eles:

- Reservatório Santana: localizado no rio Piraí, opera a fio d'água e não gera energia. A água acumulada neste reservatório é bombeada para o reservatório vigário;

- Reservatório Vigário: localizado no Ribeirão Vigário, opera a fio d'água e recebe a água bombeada do reservatório Santana. Desse reservatório a água deixa a bacia por transposição para o rio Guandu;
- Reservatório Tocos: localizado no rio Piraí, opera a fio d'água e não gera energia. A água acumulada neste reservatório é enviada através de um túnel para o reservatório de Lajes, fora da bacia, em direção ao rio Guandu.

A gestão de recursos hídricos tem como unidade territorial a bacia hidrográfica. No entanto, a área de atuação dos Comitês de Bacia Hidrográfica poderá ser, também, a sub-bacia hidrográfica de tributário do curso de água principal da bacia, ou de tributário desse tributário ou, ainda, um grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas. Além disso, a área de atuação de CBHs estaduais deverá respeitar os limites geográficos dos estados que compõem a bacia hidrográfica do rio federal. Dessa forma, as sub-bacias apresentadas no estudo podem ter seus limites geográficos diferentes das áreas de atuação dos Comitês, conforme observado na Figura 3.41.

Na sub-bacia do Rio Piraí estão presentes os seguintes CBHs: Gandu e Paraíba do Sul. O CBH Gandu ocupa a maior parte da área da sub-bacia, já que o CBH Paraíba do Sul ocupa uma pequena área,

correspondente a porção da sub-bacia localizada no estado de São Paulo.

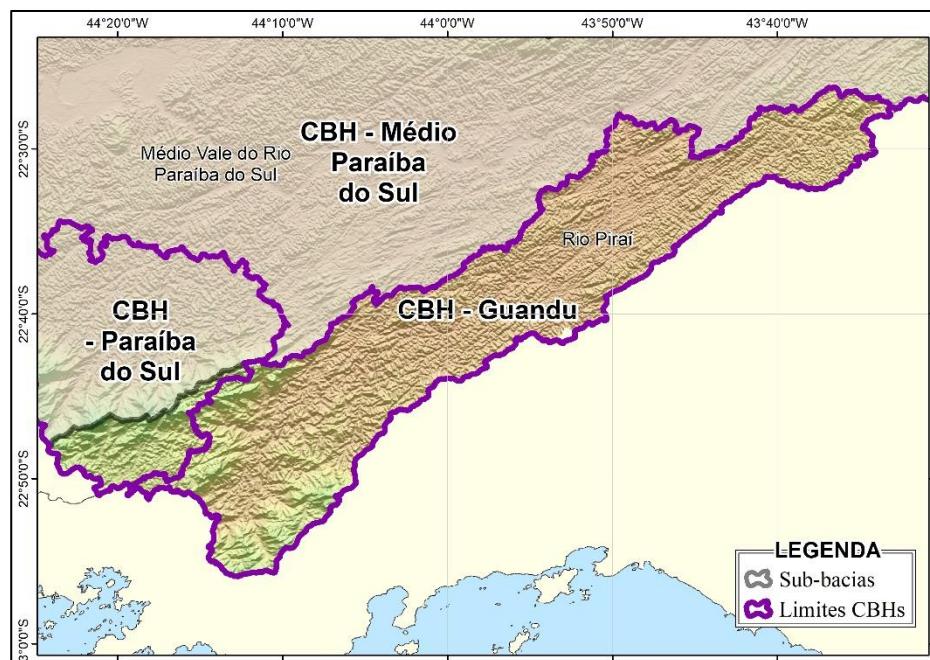


Figura 3.41 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na Sub-Bacia do Rio Piraí.

3.4.1. Dados Pluviométricos

Na etapa de levantamento de dados pluviométricos realizada para o EDH-PS, foram identificadas 62 estações pluviométricas na área

da Sub-Bacia do Rio Piraí e suas adjacências, das quais apenas 35 possuíam algum registro de precipitação ao longo do seu período de operação. Contudo, após tratamento e consistência das séries históricas, permaneceram 16 estações no banco de dados consistido, o qual subsidiou as demais etapas do presente estudo. Todas as estações podem ser visualizadas na Figura 3.42.

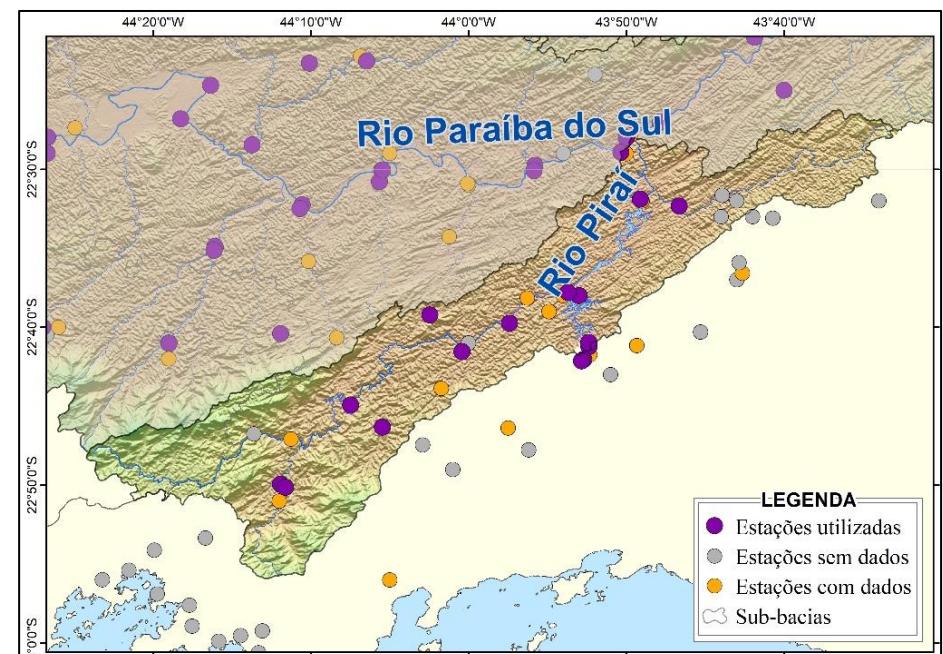


Figura 3.42 - Mapa das estações pluviométricas da Sub-Bacia do Rio Piraí.

3.4.2. Dados Fluviométricos

Na fase de levantamento de dados fluviométricos do presente estudo, foram inventariadas 37 estações fluviométricas na área da Sub-Bacia do Rio Piraí, porém somente 15 delas possuíam algum dado de vazão. Já na etapa de consistência dos dados hidrológicos, foram removidas do banco de dados oficial estações cujas séries eram muito curtas, apresentavam muitas falhas, ou algum tipo de inconsistência que pudesse comprometer o estudo de disponibilidade hídrica; assim, restaram 3 estações com boa qualidade de dados nesta sub-bacia, para serem utilizadas nas etapas seguintes do EDH-PS. As informações como código, nome, nome do rio, nome do município, localização e área de drenagem de cada estação podem ser visualizadas no Quadro 3.9. A distribuição espacial das estações pode ser observada na Figura 3.43.

Quadro 3.4 – Informações sobre as estações fluviométricas da Sub-Bacia do Rio Piraí.

Estação	Nome	Nome do rio	Nome do município	Latitude	Longitude	AD (Km ²)
58336000	PCH BRAÇO JUSANTE	RIO DO BRAÇO	RIO CLARO	-22,78	-44,23	122
58335000	UHE NILO PEÇANHA LÍDICE	RIO PIRAÍ	RIO CLARO	-22,83	-44,20	76
19098	TOCOS	RIO PIRAÍ	RIO CLARO	-22,75	-44,13	383

Fonte: ANA (2023).

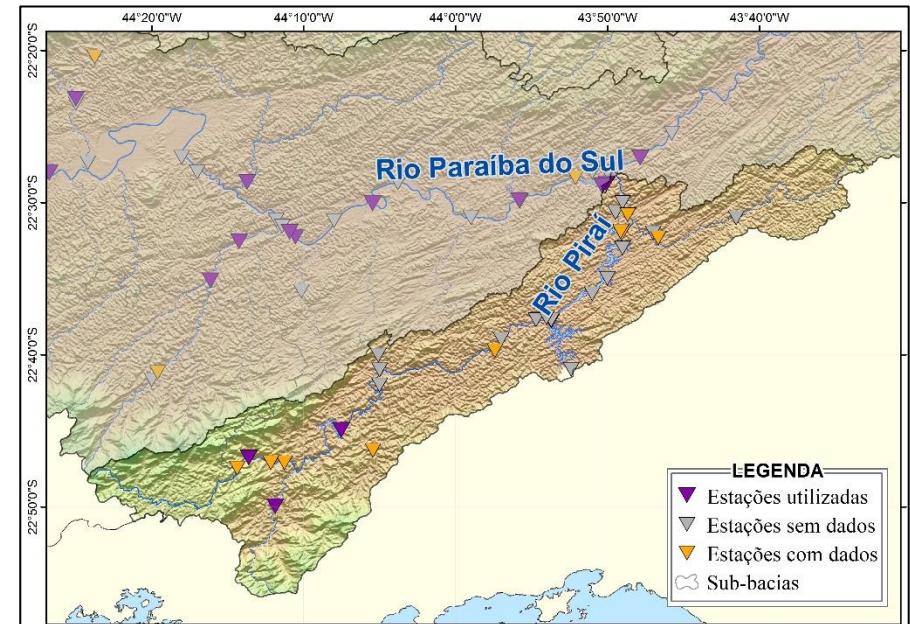


Figura 3.43 - Mapa das estações fluviométricas da Sub-Bacia do Rio Piraí.

3.4.3. Renaturalização de vazões

Buscando entender o quanto de água disponível em um rio ainda pode ser usada, foram calculadas as séries de vazões renaturalizadas, através da soma das séries de usos consuntivos totais com as séries observadas nas estações fluviométricas. O objetivo é conhecer a vazão natural dos rios, auxiliando na gestão dos recursos hídricos. Para isso são apresentadas as séries de usos

consutivos específicos anuais e sazonais para a sub-bacia (Figura 3.44) e os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e $Q_{m\text{lt}}$ após a renaturalização da série de vazões (Figura 3.45).

Em relação aos gráficos da série de vazões específicas dos usos consutivos (Figura 3.44), observa-se que na análise anual duas estações apresentaram vazões mais altas e que variam ao longo dos anos, enquanto uma estação apresentou usos menores e com tendência de redução ao longo dos anos. Já na análise sazonal, percebe-se uma tendência de aumento no uso consutivo no período mais seco do ano em relação ao período mais úmido.

Em seguida, a Figura 3.45 mostra os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e $Q_{m\text{lt}}$ após a renaturalização da série de vazões. Ou seja, indica quanto a devolução do uso consutivo para o hidrograma implica em alteração da vazão de referência avaliada. Observa-se que as porcentagens de aumento variaram de 0,03% a 0,17% para a $Q_{m\text{lt}}$ e de 0,09% a 0,58% para a Q_{95} .

As estações localizadas na região de cabeceira da sub-bacia apresentaram as menores taxas de aumento para a $Q_{m\text{lt}}$. Já para a Q_{95} , observa-se uma região na cabeceira com os maiores aumentos.

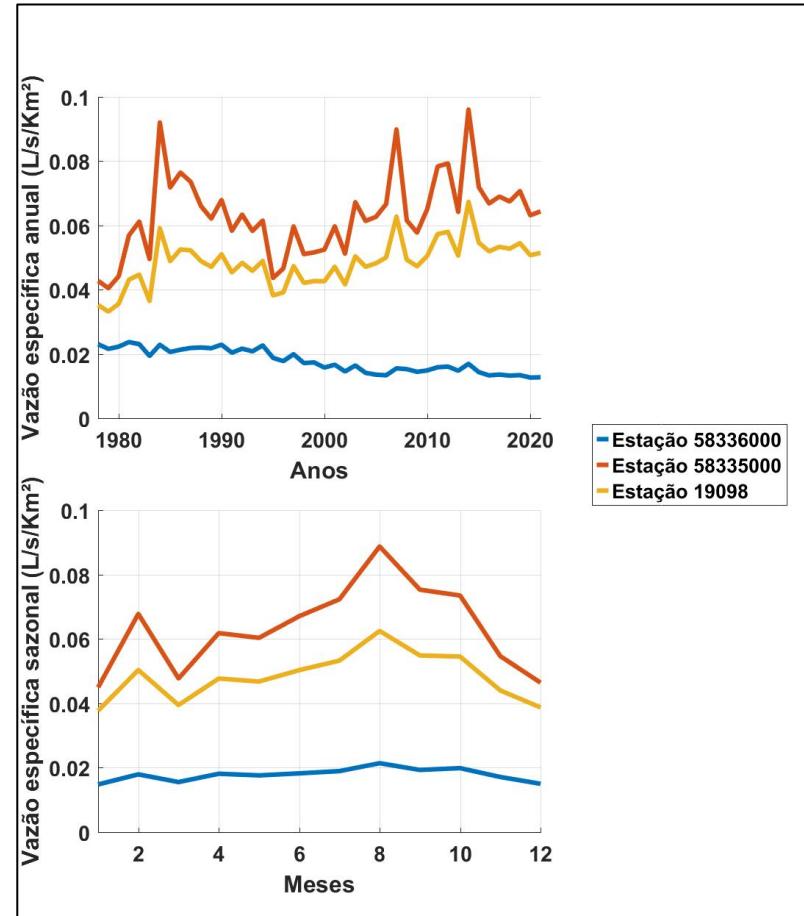


Figura 3.44 - Resultados da série de usos consutivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da Sub-Bacia do Rio Piraí.

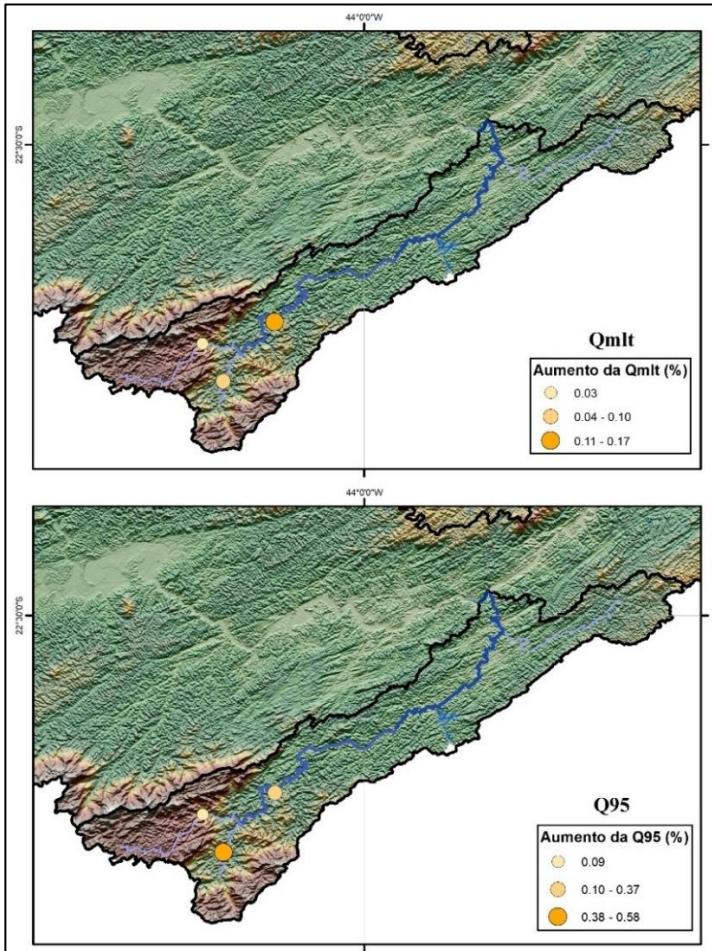


Figura 3.45 – Resultados da alteração da vazão Q_{mlt} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a Sub-Bacia do Rio Piraí após a renaturalização.

3.4.4. Estacionariedade das Séries

A Sub-Bacia do Rio Piraí não apresentou estações pluviométricas e fluviométricas com dados suficientemente longos para a análise da estacionariedade, sendo assim não foi aplicada a metodologia realizada nas outras sub-bacias.

3.4.5. Disponibilidade Hídrica

3.4.5.1. Calibração do modelo

Na Tabela 3.10 podem ser visualizados os valores dos indicadores estatísticos e dos erros percentuais obtidos a partir da calibração do modelo hidrológico MGB em cada estação fluviométrica da Sub-Bacia do Rio Piraí. Os resultados obtidos na calibração estão dentro da margem considerada satisfatória para modelos hidrológicos. Na metodologia, é detalhado o significado de cada um dos indicadores utilizados. Destaca-se que, na presente sub-bacia, o menor erro médio foi observado na vazão Q_{90} , de -2,5%, enquanto o maior erro médio ocorreu na vazão Q_{95} , com -4,8%. Em relação aos indicadores estatísticos, o Nash-Sutcliffe e o Nash-Sutcliffe Logarítmico médios da sub-bacia foram, respectivamente 0,4 e 0,6, o que indica que os resultados foram satisfatórios. Os resultados de calibração mostrado para cada estação podem ser verificados com maior nível de detalhe no Produto 4 do presente estudo.

Tabela 3.10 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na Sub-Bacia do Rio Piraí.

Estação	Área de drenagem (km ²)	Tamanho da Série (anos)	Nash-Sutcliffe	Nash-Sutcliffe Logarítmico	Erro de Volume (%)	Erro de Q ₉₅ (%)	Erro de Q ₉₀ (%)	Erro de Q _{milt} (%)	Erro de Q _{7,10} (%)
58336000	123	3,3	0,5	0,7	-8,4	-0,6	-2	-8,4	-
58335000	76	20,3	0,4	0,5	-2	-3,3	-5	-2	-
19098	383	22,1	0,4	0,5	-0,4	-10,5	-0,5	-0,4	-

3.4.5.2. Resultados das Vazões de Referência

Conhecer as vazões de referência é essencial para realizar a gestão responsável dos recursos hídricos, já que elas representam a quantidade de água disponível nos rios.

A disponibilidade das vazões de referência na Sub-Bacia do Rio Piraí é apresentada na Figura 3.60, onde são mostradas a vazão de longo termo “Q_{milt}”, a vazão que é superada ou igualada em 90% do tempo na série histórica “Q₉₀”, a vazão superada ou igualada em 95% do tempo “Q₉₅” e a vazão de 7 dias consecutivos com tempo de retorno de 10 anos, “Q_{7,10}”. Já o diagrama unifilar, apresentado pela Figura 3.59, mostra com detalhes o comportamento do rio principal e dos seus afluentes, como a ocorrência de hidrelétricas e transposição na sub-bacia. Ainda, na Figura 3.46 é possível observar o mapa de vazões específicas (m³/s/km²) da Q_{milt} e Q₉₅.

Também são apresentadas as entregas de vazão ao longo dos rios que compõem a sub-bacia, proporcionando uma visão geral e completa dos recursos hídricos. Ao longo do rio principal ocorre um aumento das vazões, devido à contribuição dos seus afluentes, onde observa-se que o rio Braço apresenta os maiores valores de contribuição ao rio Piraí, seguido pelo rio Santana e rio Gandu, em termos de Q_{milt}.

Na sub-bacia também existem 2 hidrelétricas e 3 reservatórios que fazem parte do sistema de transposições que levam a água do rio Paraíba do Sul para o rio Guandu. No exutório da sub-bacia, onde o rio Piraí contribui para o rio Paraíba do Sul, a vazão Q_{milt} é de 36,2 m³/s, a vazão Q₉₅ é de 10,8 m³/s, a vazão Q₉₀ é de 12,8 m³/s e a vazão Q_{7,10} é de 7,5 m³/s. O rio Piraí desagua depois do reservatório Santa Cecília.

Por fim, também são apresentados os resultados de vazão de referência na sub-bacia no formato de Boxplot para a vazão anual e mensais (Figura 3.49). Os resultados permitem identificar a sazonalidade das vazões de referência na bacia. Devido ao desproporcional número de trechos de pequena área de drenagem na base de resultados, o gráfico somente mostrou resultados de trechos com área de drenagem acima de 200km².

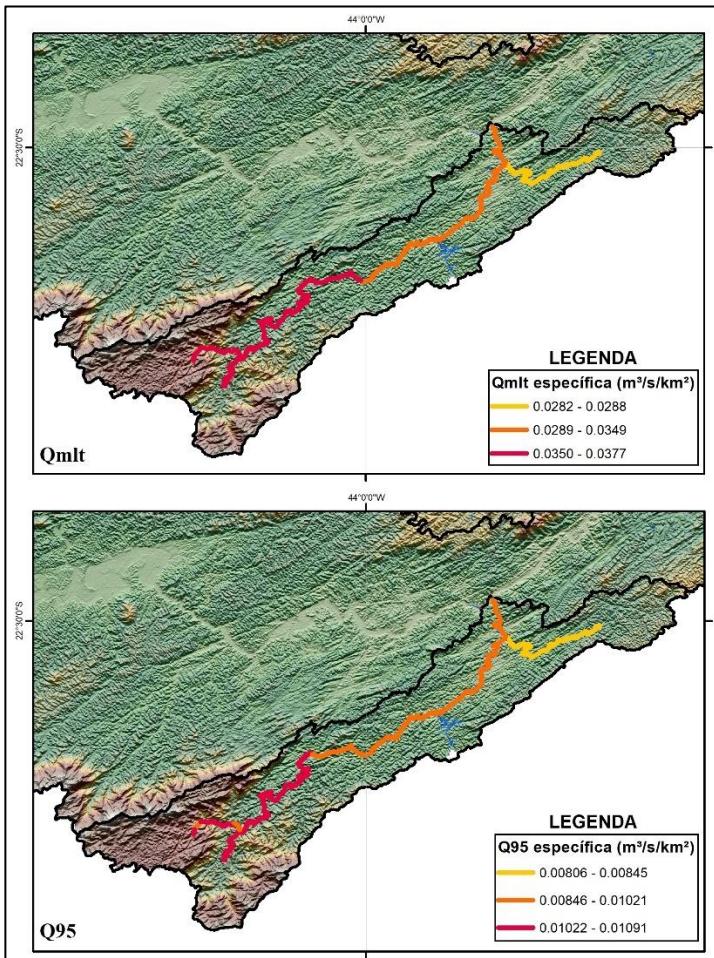


Figura 3.46 - Resultados das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) de referência anuais
Q_{mlt} e Q₉₅.

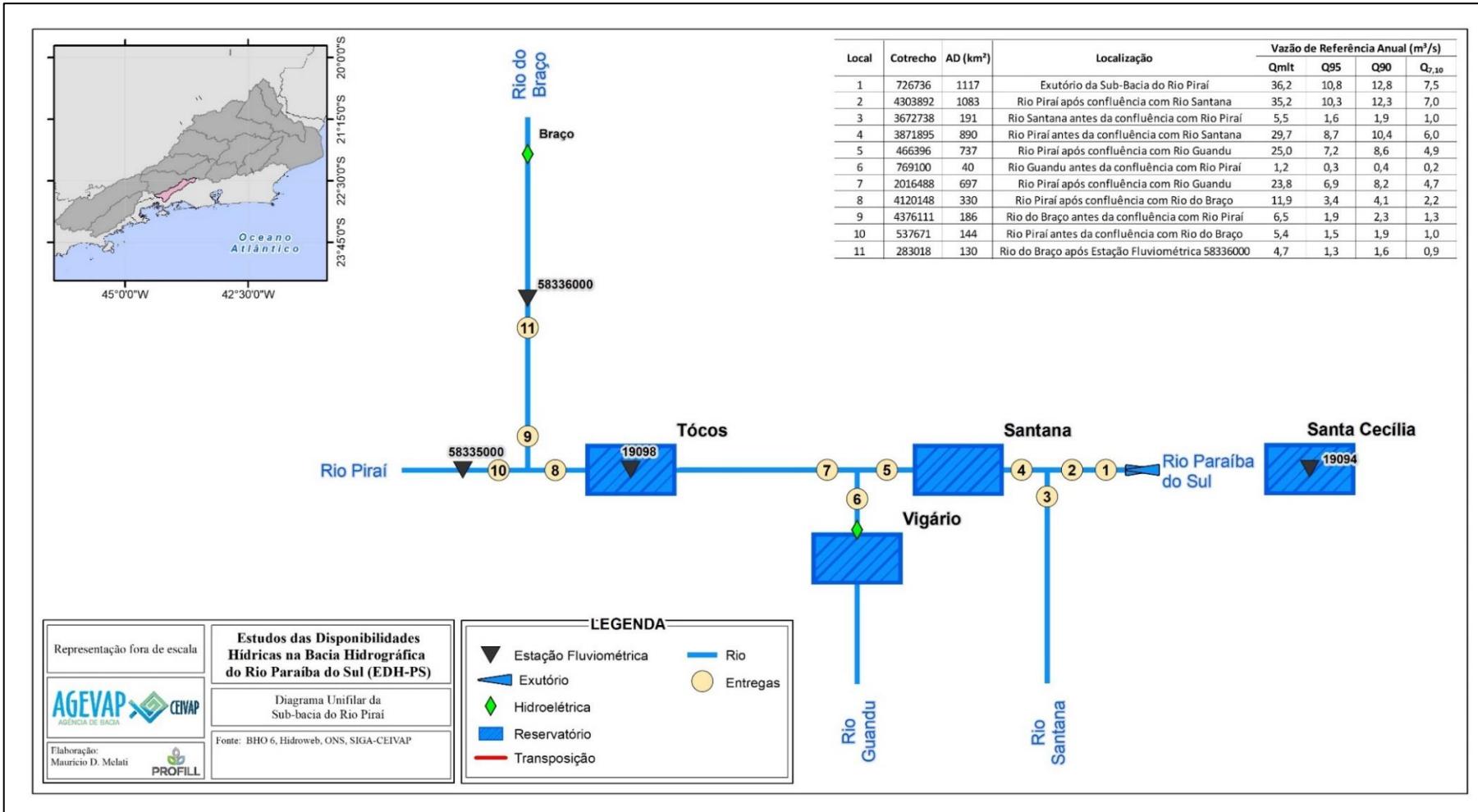


Figura 3.47 - Vazões de entrega (m³/s) da Sub-Bacia do Rio Piraí.

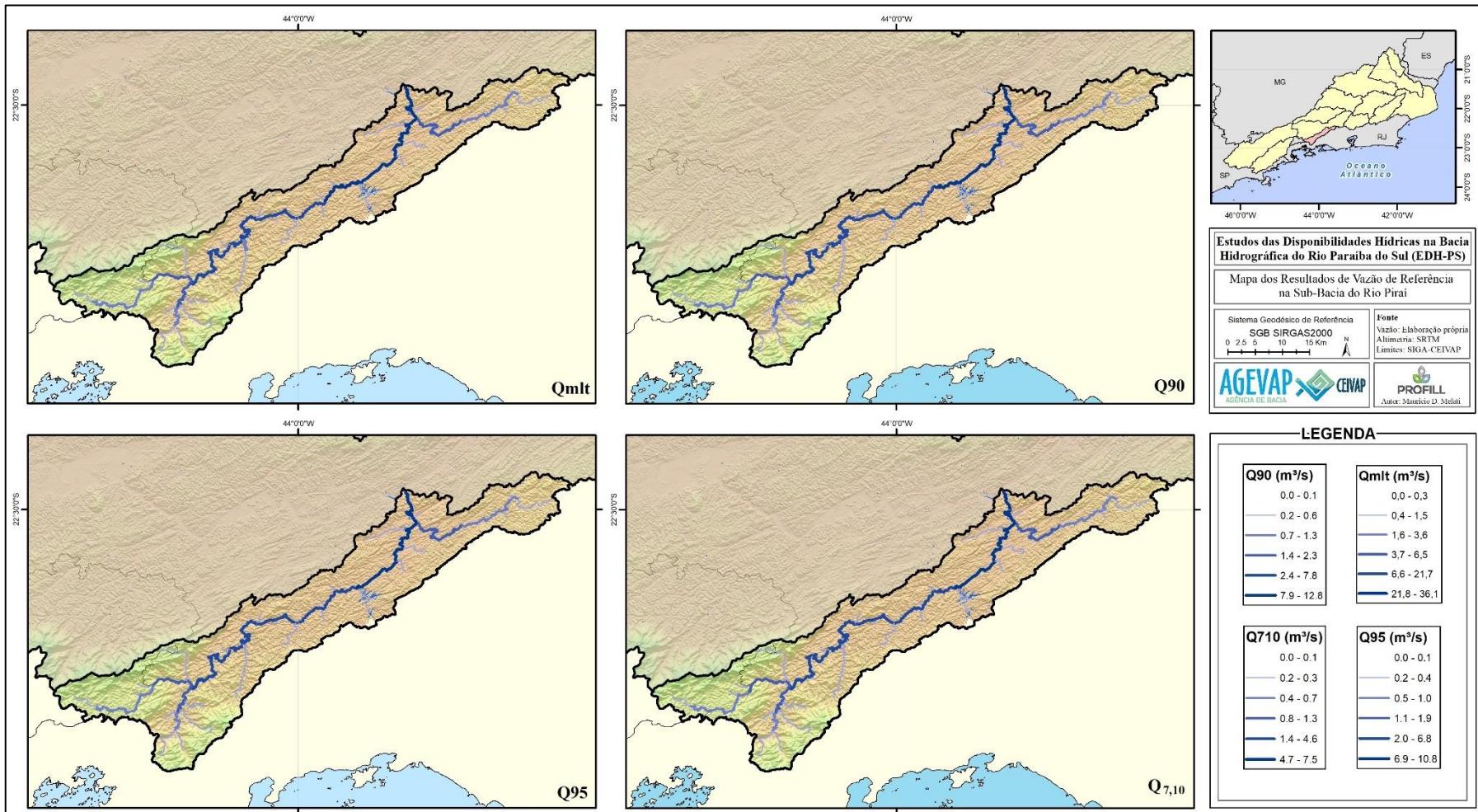


Figura 3.48 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{mlt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Piraí.



Figura 3.49 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{milt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Piraí.

3.4.5.3. Período Crítico

Entre os anos de 2015 e 2021 a BHPS passou pelas anomalias negativas mais intensas em suas vazões médias desde 1960 (período máximo avaliado no estudo), ocasionando na diminuição das vazões por longos períodos. A Figura 3.50 mostra as reduções de vazão verificadas no período crítico considerando as diferenças entre os anos hidrológicos de 1978-2020 e 2014-2020, nas vazões de referência Q_{m1t} (primeiro mapa) e Q_{95} (segundo mapa) anuais. A Sub-Bacia do Rio Piraí apresentou reduções que variaram até 0,64 m^3/s na vazão Q_{m1t} , e 11 (m^3/s) na vazão Q_{95} , indicando uma tendência de diminuição de ambas as vazões de maneira crescente ao longo do rio principal.

3.4.6. Cenário de Mudanças Climáticas

3.4.6.1. Vazões máximas

O cálculo de vazões máximas, considerando diferentes tempos de retorno, é essencial para o dimensionamento eficiente de sistemas hidráulicos, garantindo a resiliência e a segurança necessárias diante de variabilidades climáticas e condições extremas. O cálculo das vazões máximas ($Q_{máx}$) para os tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos foi realizado nas minibacias de localização das estações fluviométricas selecionadas na área de estudo, apresentadas no Produto 4.

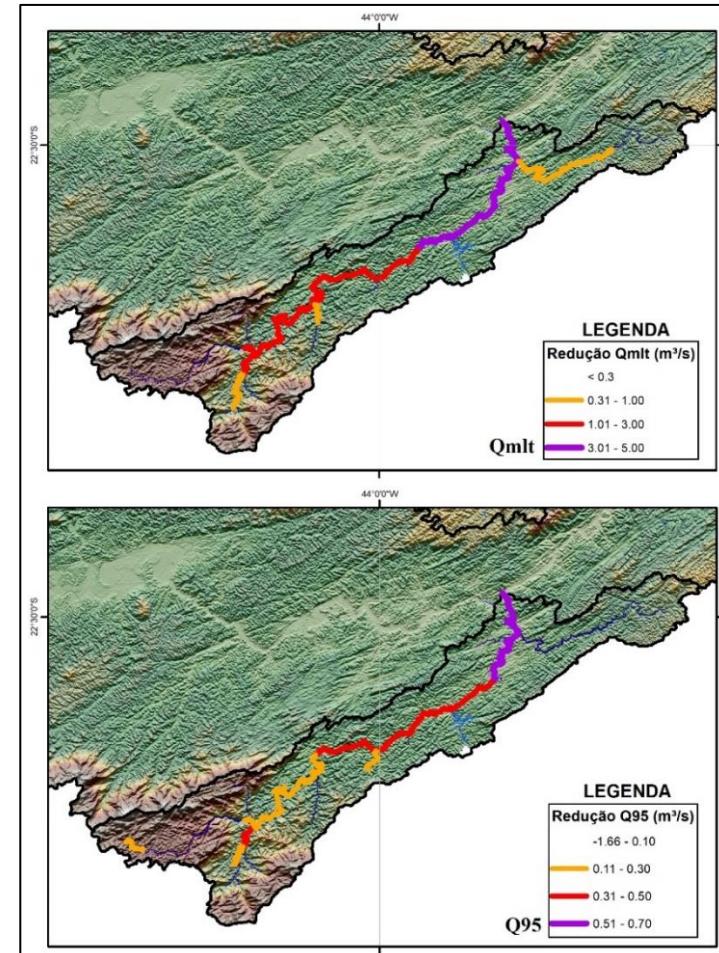


Figura 3.50 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{m1t} e Q_{95} no período 2014-2020 na Sub-Bacia do Rio Piraí.

A Sub-Bacia do Rio Piraí foi avaliada em 3 locais com estações fluviométricas nas cabeceiras do rio. Os resultados mostraram alterações médias entre todos os TRs de 7% no curto prazo e 12% no longo prazo. Tanto no curto, quanto no longo prazo, para todos os TRs, os valores de alteração das estações ficaram dentro do intervalo de até 15%. Isso significa que as vazões máximas tendem a aumentar na sub-bacia, porém com baixa magnitude, assim, não são esperadas grandes alterações nos eventos extremos da região.

Mesmo que sejam esperadas alterações de baixa magnitude, é importante realizar a gestão de recursos hídricos, o planejamento urbano e o dimensionamento de sistemas hidráulicos considerando as consequências que o aumento das vazões pode trazer. Entre essas consequências estão inundações mais severas e intensas, ampliação das manchas de inundaçao urbana, danos a infraestrutura das cidades, entre outros. A Tabela 3.11 apresenta os fatores de alteração para o curto e longo prazo, as máximas vazões renaturalizadas ou simuladas no P4 e as suas projeções para o curto e longo prazo. Em complemento, a Figura 3.51 apresenta os resultados de alteração dos TRs considerando as vazões futuras em cenários de mudança climática para o curto e para o longo prazo.

Tabela 3.11 – Resultados de vazões máximas para as estações da Sub-Bacia do Rio Piraí.

Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)
TR 10					
58336000	3,1	15,6	46,8	48,2	54,1
58335000	6,2	14,7	68,7	72,9	78,7
19098	5,5	12	165,4	174,5	185,3
TR 25					
58336000	6	14,9	57	60,4	65,5
58335000	5,1	10,2	85,2	89,6	93,9
19098	6,3	9,3	204,6	217,5	223,7
TR 50					
58336000	8,4	15,4	64,6	70	74,6
58335000	6,8	9,7	97,5	104,1	107
19098	7,3	8,5	233,7	250,8	253,6
TR 100					
58336000	9,7	15	72,1	79,1	83
58335000	8,6	9,4	109,7	119,1	120
19098	8,6	9,4	262,6	285,2	287,3

** Nas estações sem vazão máxima renaturalizada calculada foram utilizados os dados de vazão máxima simulada no P4.

3.4.6.2. Vazões Mínimas

Também foi estudado o impacto das mudanças climáticas nas vazões de referência para cenários futuros, com o objetivo de fornecer subsídios aos órgãos gestores e aos CBHs para a tomada de decisão e planejamento dos recursos hídricos da BHPS. A Tabela 3.12 mostra a mediana de alteração percentual dos 19 modelos para

o curto e para o longo prazo, a vazão atual de referência e as vazões de referência futuras projetadas.

A Sub-Bacia do Rio Piraí foi avaliada em 3 locais com estações fluviométricas nas cabeceiras do rio. Os resultados mostram reduções médias nas vazões mínimas de referência, com mais intensidade a curto prazo, cerca de 7%, e com menos intensidade no longo prazo, cerca de 4%. As vazões médias de longo período apresentaram alterações negativas no curto prazo e positivas no longo prazo.

Tabela 3.12 – Resultados de vazões mínimas para as estações da Sub-Bacia do Rio Piraí.

Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m ³ /s)
<i>Q_{mlt}</i>					
58336000	-3,2	6,3	4,4	4,3	4,7
58335000	-1,7	5,8	4	4	4,3
19098	-3,4	6,9	13,7	13,3	14,7
<i>Q₉₀</i>					
58336000	-6,7	-2,5	1,5	1,4	1,5
58335000	-1,9	0,4	1,4	1,4	1,4
19098	-7	-3	4,8	4,5	4,7
<i>Q₉₅</i>					
58336000	-8,3	-3,2	1,3	1,2	1,2
58335000	-4,8	-2,9	1,1	1,1	1,1
19098	-8,6	-3	4,1	3,8	4
<i>Q_{7,10}</i>					
58336000	-9,6	-9,1	0,9	0,8	0,8
58335000	-7,7	-1,2	0,7	0,7	0,7
19098	-5,5	-6,8	2,7	2,6	2,5

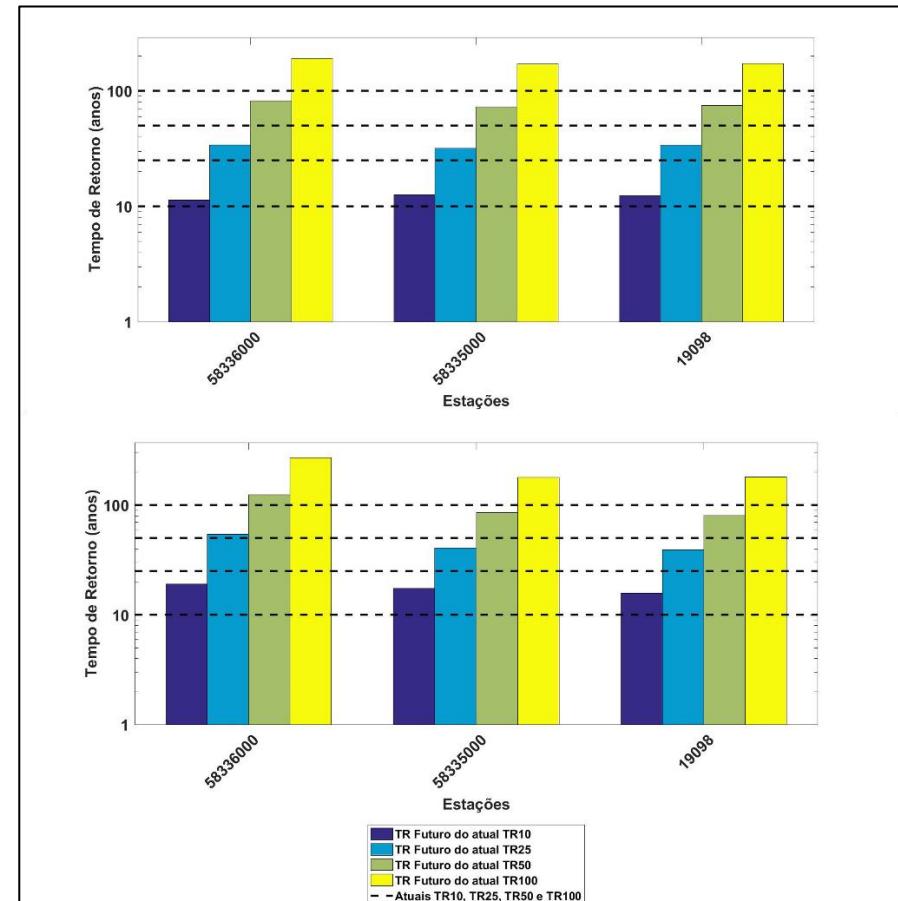


Figura 3.51 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a Sub-Bacia do Rio Piraí.

3.5. SUB-BACIA DO RIO PRETO

A Sub-Bacia do Rio Preto está localizada na parte média da BHPS, sendo que sua porção mais ao norte está situada em Minas Gerais, enquanto a parte sul fica no estado do Rio de Janeiro. O rio Preto é o rio principal desta sub-bacia, com o rio das Flores sendo seu principal afluente. Além disso, o rio Preto deságua no rio Paraibuna. A cabeceira do rio Preto encontra-se a uma altitude de 2.350 metros e sua foz a 490 metros. A sub-bacia possui a maior média pluviométrica anual da BHPS, com 1.620 mm, sendo a região sudeste, próximo à cabeceira do Ribeirão Manoel Pereira, a área com menor precipitação; enquanto a região que recebe a maior quantidade de chuva é a cabeceira do rio Preto. A Sub-Bacia do Rio Preto não possui interferências hidráulicas relevantes, como transposições, reservatórios e grandes hidrelétricas. Há, entretanto, alguns aproveitamentos hidrelétricos de menor escala, classificados como Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs) e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs).

A gestão de recursos hídricos tem como unidade territorial a bacia hidrográfica. No entanto, a área de atuação dos Comitês de Bacia Hidrográfica poderá ser, também, a sub-bacia hidrográfica de tributário do curso de água principal da bacia, ou de tributário desse tributário ou, ainda, um grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas

contíguas. Além disso, a área de atuação de CBHs estaduais deverá respeitar os limites geográficos dos estados que compõem a bacia hidrográfica do rio federal. Dessa forma, as sub-bacias apresentadas no estudo podem ter seus limites geográficos diferentes das áreas de atuação dos Comitês, conforme observado na Figura 3.52.

Na sub-bacia do Rio Preto estão presentes dois CBHs, divididos pela localização do rio principal. Na margem esquerda do rio está o CBH Preto e Paraibuna, e na margem direita está o CBH Médio Paraíba do Sul.

3.5.1. Dados Pluviométricos

Na etapa de levantamento de dados pluviométricos realizada para o EDH-PS, foram identificadas 49 estações pluviométricas na área da sub-bacia do Rio Preto e suas adjacências, das quais apenas 31 possuíam algum registro de precipitação ao longo do seu período de operação. Contudo, após tratamento e consistência das séries históricas, permaneceram 21 estações no banco de dados consistido, o qual subsidiou as demais etapas do presente estudo. Todas as estações podem ser visualizadas na Figura 3.53.



Figura 3.52 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Rio Preto.

3.5.2. Dados Fluviométricos

Na fase de levantamento de dados fluviométricos do presente estudo, foram inventariadas 39 estações fluviométricas na área da sub-bacia do Rio Preto, porém somente 17 delas possuíam algum dado de vazão. Já na etapa de consistência dos dados hidrológicos, foram removidas do banco de dados oficial estações cujas séries

eram muito curtas, apresentavam muitas falhas, ou algum tipo de inconsistência que pudesse comprometer o estudo de disponibilidade hídrica; assim, restaram 9 estações com boa qualidade de dados nesta sub-bacia, para serem utilizadas nas etapas seguintes do EDH-PS. As informações como código, nome, nome do rio, nome do município, localização e área de drenagem de cada estação podem ser visualizadas no Quadro 3.5. A distribuição espacial das estações pode ser observada na Figura 3.54.

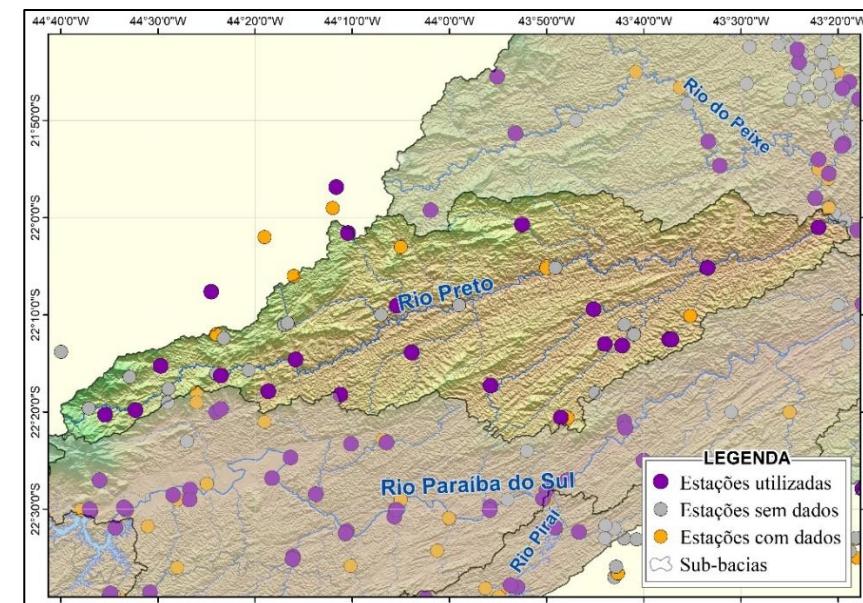


Figura 3.53 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Rio Preto.

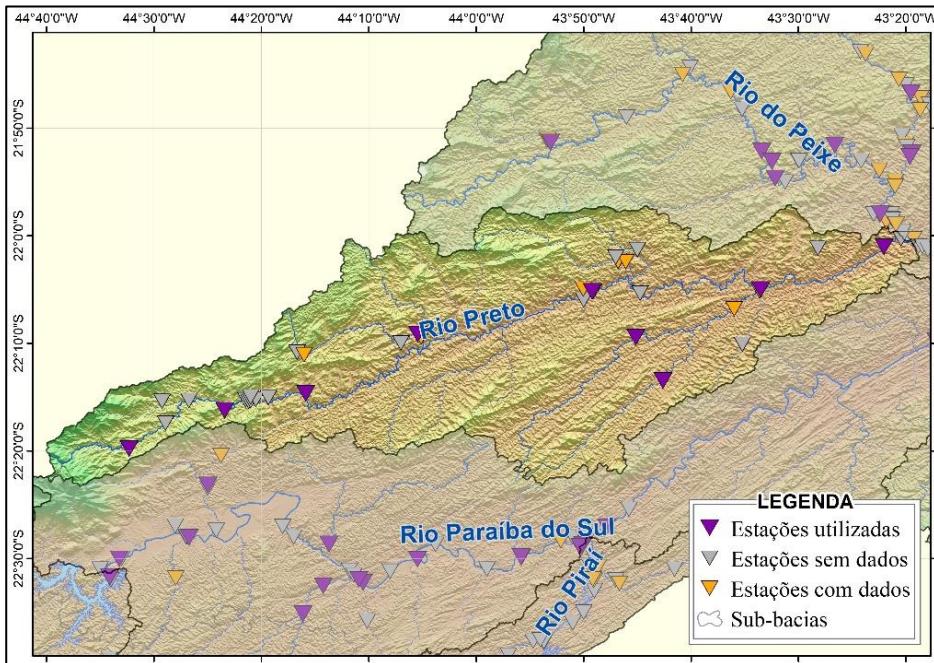


Figura 3.54 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Preto.

Quadro 3.5 – Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Preto.

Estação	Nome	Nome do rio	Nome do município	Latitude	Longitude	AD (Km ²)
58590000	AFONSO ARINOS	RIO PRETO	TRÊS RIOS	-22,02	-43,37	3.390
58585000	MANUEL DUARTE	RIO PRETO	RIO DAS FLORES	-22,08	-43,56	3.110
58530000	PONTE DO SOUZA	RIO PRETO	RESENDE	-22,27	-44,39	284
58550001	RIO PRETO	RIO PRETO	RIO PRETO	-22,09	-43,82	1.800
58535000	ZELINDA	RIO PRETO	PASSA VINTE	-22,24	-44,27	418
58525000	VISCONDE DE MAUÁ	RIO PRETO	RESENDE	-22,33	-44,54	103
58542000	SANTA RITA DO JACUTINGA	RIO BANANAL	SANTA RITA DO JACUTINGA	-22,15	-44,09	355
58560000	VALENÇA	RIO DAS FLORES	VALENÇA	-22,22	-43,71	173
58573000	PENTAGNA	RIO BONITO	VALENÇA	-22,16	-43,75	256

Fonte: ANA (2023).

3.5.3. Renaturalização de vazões

Buscando entender o quanto de água disponível em um rio ainda pode ser usada, foram calculadas as séries de vazões renaturalizadas, através da soma das séries de usos consuntivos totais com as séries observadas nas estações fluviométricas. O objetivo é conhecer a vazão natural dos rios, auxiliando na gestão dos recursos hídricos. Para isso são apresentadas as séries de usos consuntivos específicos anuais e sazonais para a sub-bacia (Figura

3.55) e os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões (Figura 3.56).

Em relação aos gráficos da série de vazões específicas dos usos consuntivos (Figura 3.55), observa-se que na análise anual a maioria das estações apresentou comportamento relativamente estável ao longo dos anos. Já na análise sazonal, percebeu-se uma tendência de aumento no uso consuntivo no período mais seco do ano em relação ao período mais úmido.

Em seguida, a Figura 3.56 mostra os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões. Ou seja, indica quanto a devolução do uso consuntivo para o hidrograma implica em alteração da vazão de referência avaliada. Observa-se que as porcentagens de aumento variaram de 0,07% a 1,6% para a Q_{m1t} e de 0,24% a 8,8% para a Q_{95} . As estações localizadas nas regiões de cabeceira da sub-bacia apresentaram as menores taxas de aumento, enquanto as estações próximas ao exutório e nos principais afluentes da região sul da sub-bacia apresentaram as maiores taxas de aumento.

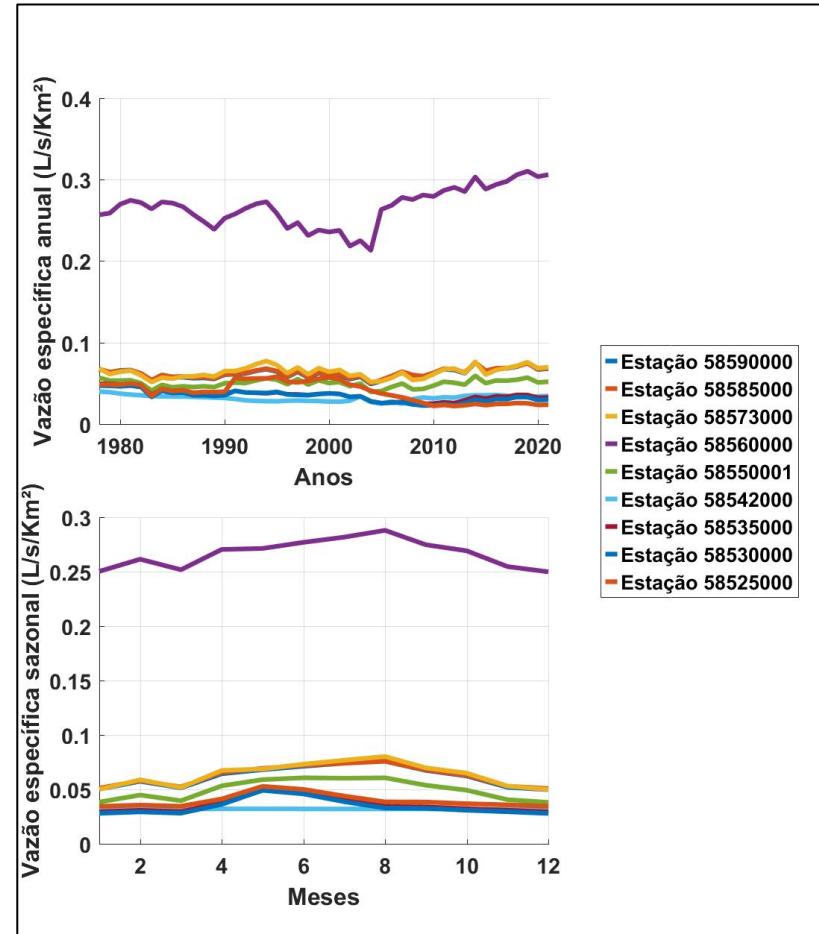


Figura 3.55 – Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Rio Preto.

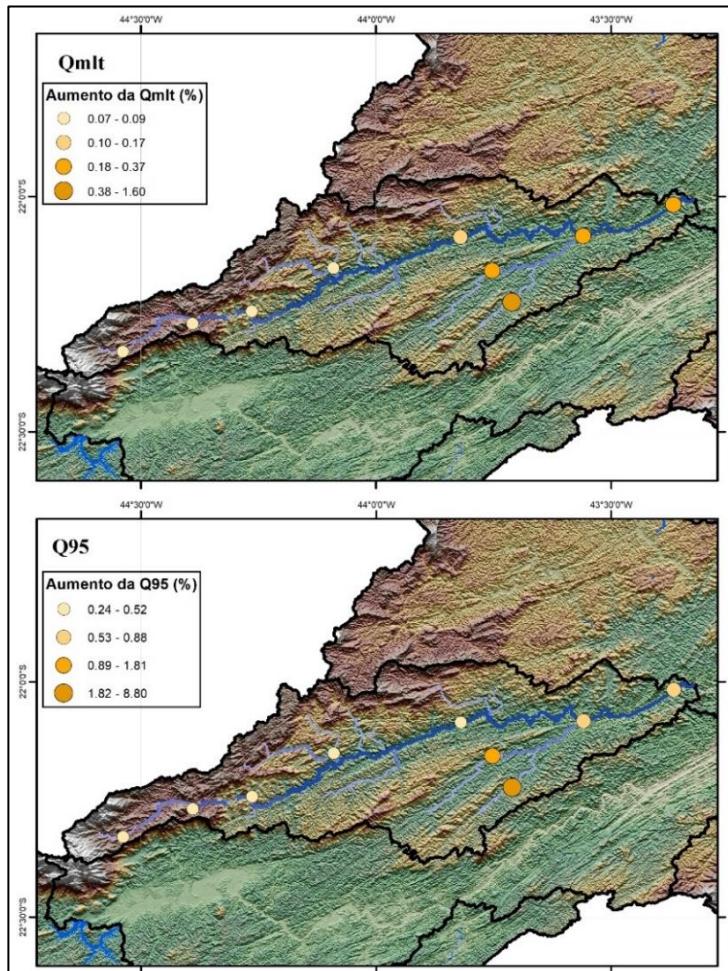


Figura 3.56 – Resultados da alteração da vazão Q_{m1t} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a sub-bacia do Rio Preto após a renaturalização.

3.5.4. Estacionariedade das Séries

A análise da estacionariedade das séries de vazões busca entender, ao longo do período analisado, se ocorre uma estabilidade dos dados (comportamento estacionário), uma redução dos valores (tendência negativa) ou um aumento dos valores (tendência positiva). A Figura 3.57 mostra a análise da estacionariedade dos dados das estações fluviométricas (no primeiro gráfico) e das estações pluviométricas (no segundo gráfico).

Nas estações fluviométricas foram avaliados os seguintes índices: vazão média anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada em 5 dias consecutivos, vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos e vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos no período úmido (entre os meses de dezembro a fevereiro). Para as estações pluviométricas foram avaliados os seguintes índices: precipitação total anual, número de dias com precipitação no ano, precipitação diária igual ou superior a 50 mm no ano e precipitação diária máxima em 5 dias consecutivos no ano.

Para as estações fluviométricas, 3 índices indicaram predominância da tendência negativa, enquanto 2 índices indicaram predominância do comportamento estacionário, sem a ocorrência de estações indicando tendência positiva nos resultados. Grande parte das

estações pluviométricas indicaram a ocorrência de estacionariedade em três dos quatro índices. Em complemento, no índice do número de dias com precipitação ao ano, o resultado abrangeu as três possibilidades, com estações indicando tendência positiva, tendência negativa e estacionariedade.

Dessa forma, grande parte das estações fluviométricas indicam uma diminuição das vazões máximas e mínimas na sub-bacia. Já para os dados pluviométricos, os resultados apontam, de maneira geral, que não ocorreram grandes alterações nas taxas de precipitação ao longo das séries históricas analisadas. Somente o número de dias com precipitação ao ano mostrou uma tendência de aumento.

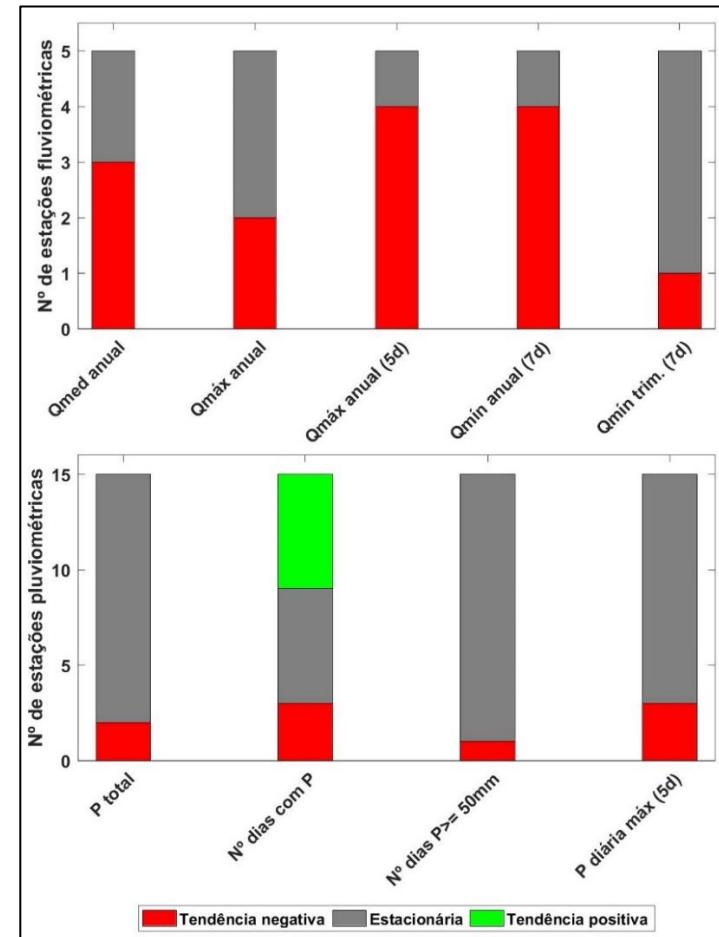


Figura 3.57 - Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Preto.

3.5.5. Disponibilidade Hídrica

3.5.5.1. Calibração do Modelo

Na Tabela 3.13 podem ser visualizados os valores dos indicadores estatísticos e dos erros obtidos a partir da calibração do modelo hidrológico MGB em cada estação fluviométrica da sub-bacia do Rio Preto. Os resultados obtidos na calibração estão dentro da margem considerada satisfatória para modelos hidrológicos. Na metodologia, é detalhado o significado de cada um dos indicadores utilizados. Destaca-se que, na presente sub-bacia, o menor erro médio foi observado na vazão $Q_{m\text{lt}}$, de 0%, enquanto o maior erro médio ocorreu na vazão Q_{95} , com -2,3%. Em relação aos indicadores estatísticos, o Nash-Sutcliffe e o Nash-Sutcliffe Logarítmico médios da sub-bacia foram iguais a 0,9, o que indica que os resultados foram muito bons. Os resultados de calibração mostrado para cada estação podem ser verificados com maior nível de detalhe no Produto 4 do presente estudo.

Tabela 3.13 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Rio Preto.

Estação	Área de drenagem (km^2)	Tamanho da Série (anos)	Nash-Sutcliffe	Nash-Sutcliffe Logarítmico	Erro de Volume (%)	Erro de Q_{95} (%)	Erro de Q_{90} (%)	Erro de $Q_{m\text{lt}}$ (%)	Erro de $Q_{7,10}$ (%)
58525000	88	42,8	0,6	0,8	1,8	0,1	3,9	1,8	4,3
58530000	285	43	0,8	0,9	5,2	-2,1	-2,4	5,2	4,6
58535000	385	42,9	0,7	0,8	-6,4	-5,6	-4,9	-6,4	-2,3
58542000	356	39,9	1	1	0	-0,1	0,1	0	0
58550001	1.779	43	0,8	0,9	4,6	-0,2	0,2	4,6	-2,2
58560000	167	40,5	1	1	0	0	0,2	0	1,5
58573000	262	39,9	1	1	-0,3	-0,2	0	-0,3	0,3
58585000	3.098	43	0,9	0,9	2,2	0,2	-1	2,2	11
58590000	3.387	4,1	0,9	0,9	-6,7	-12,8	-11	-6,7	-

3.5.5.2. Resultados das Vazões de Referência

Conhecer as vazões de referência é essencial para realizar a gestão responsável dos recursos hídricos, já que elas representam a quantidade de água disponível nos rios. A disponibilidade das vazões de referência na sub-bacia do Rio Preto é apresentada na Figura 3.60, onde são mostradas a vazão de longo termo " $Q_{m\text{lt}}$ ", a vazão que é superada ou igualada em 90% do tempo na série histórica " Q_{90} ", a vazão superada ou igualada em 95% do tempo " Q_{95} " e a vazão de 7 dias consecutivos com tempo de retorno de 10

anos, "Q_{7,10}". Ainda, na Figura 3.58 é possível observar o mapa de vazões específicas ($m^3/s/km^2$) da Q_{mlt} e Q₉₅.

Já o diagrama unifilar, apresentado pela Figura 3.59, mostra com detalhes o comportamento do rio principal e dos seus afluentes, como a ocorrência de hidrelétricas e transposição na sub-bacia. Também são apresentadas as entregas de vazão ao longo dos rios que compõem a sub-bacia, proporcionando uma visão geral e completa dos recursos hídricos.

Ao longo do rio principal ocorre um aumento das vazões, devido à contribuição dos seus afluentes, onde observa-se que o rio Bananal apresenta os maiores valores de contribuição ao rio Preto, seguido pelo rio das Flores e o Ribeirão Santana, em termos de Q_{mlt}. No exutório da sub-bacia, onde o rio Preto se transforma em afluente do rio Paraibuna, a vazão Q_{mlt} é de 82,5 m^3/s , a vazão Q₉₅ é de 26,9 m^3/s , a vazão Q₉₀ é de 30,7 m^3/s e a vazão Q_{7,10} é de 20,9 m^3/s .

Por fim, também são apresentados os resultados de vazão de referência na sub-bacia no formato de *Boxplot* para a vazão anual e mensais (Figura 3.61). Os resultados permitem identificar a sazonalidade das vazões de referência na bacia. Devido ao desproporcional número de trechos de pequena área de drenagem na base de resultados, o gráfico somente mostrou resultados de trechos com área de drenagem acima de 200 km^2 .

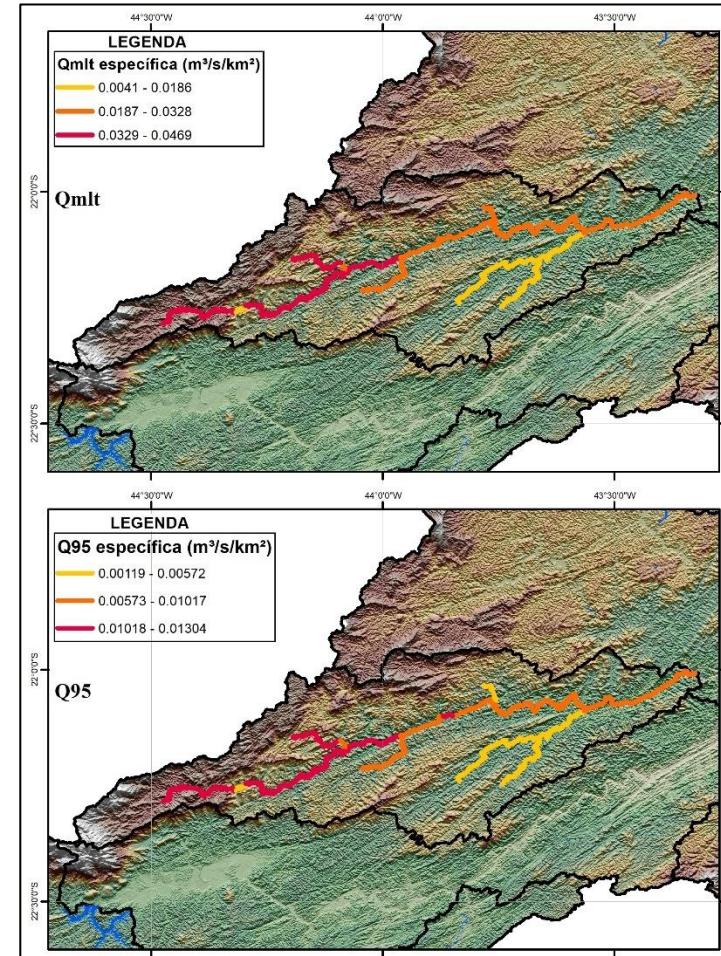


Figura 3.58 - Resultados das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) de referência anuais Q_{mlt} e Q₉₅.

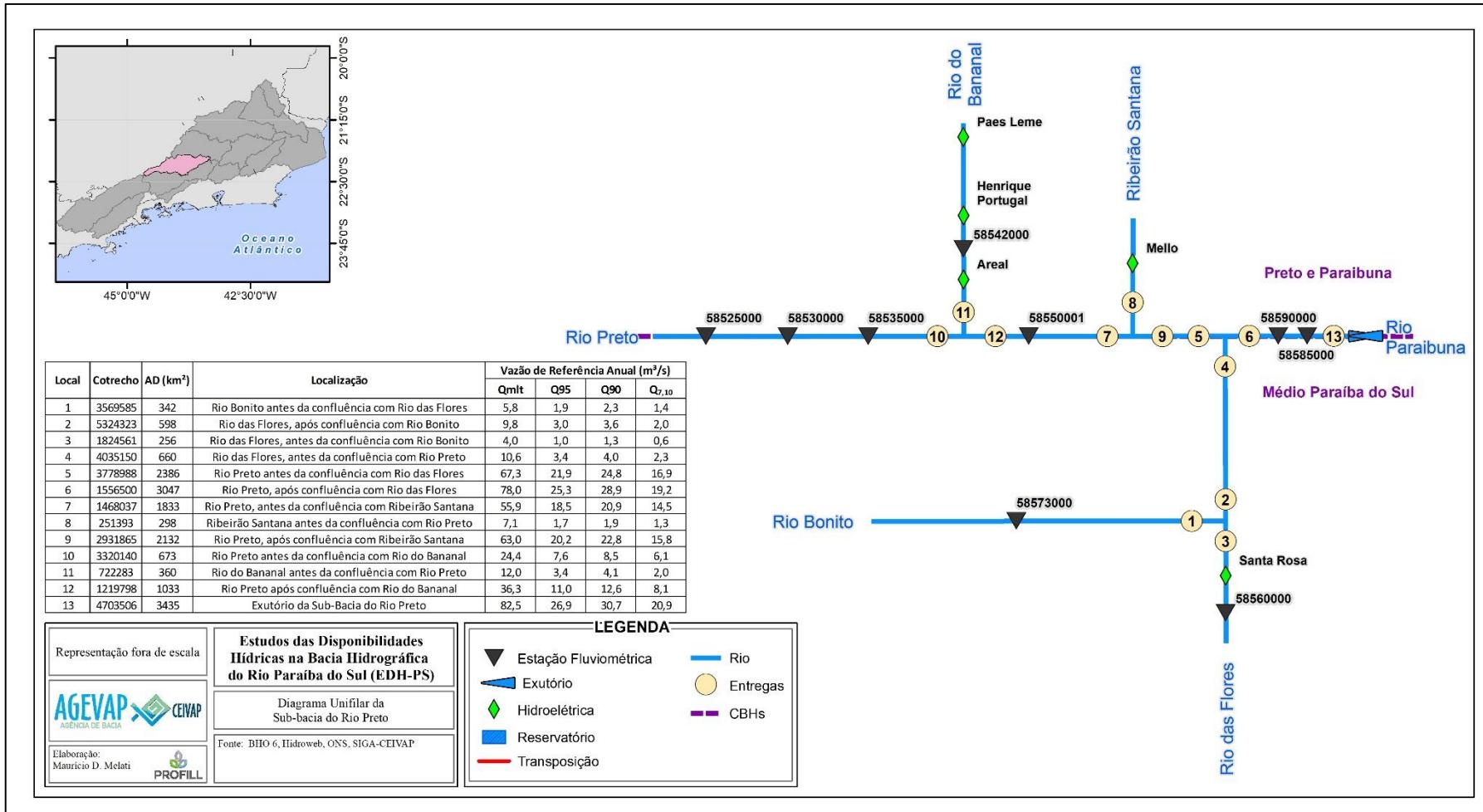


Figura 3.59 - Vazões de entrega (m³/s) da sub-bacia do Rio Preto.

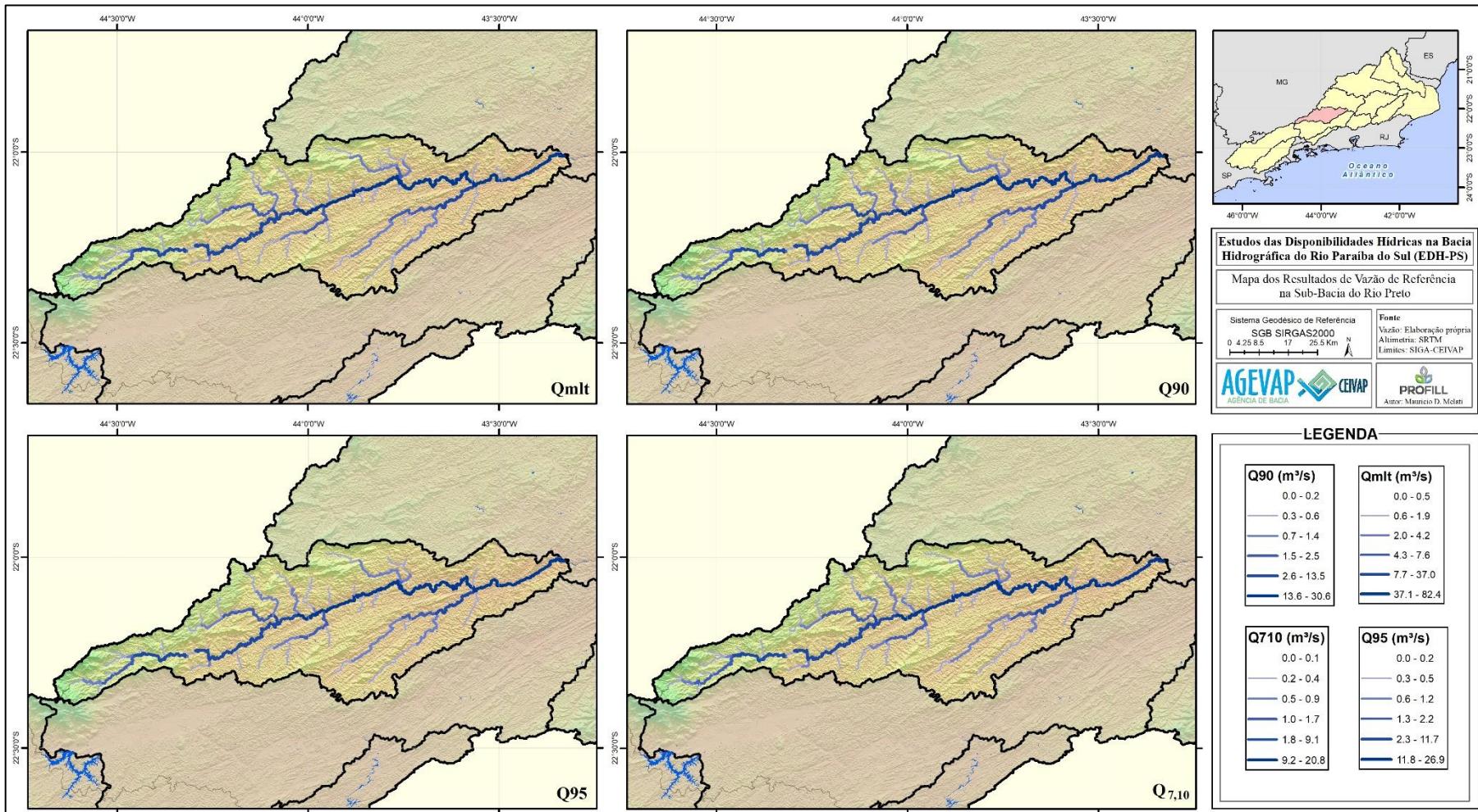


Figura 3.60 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{m1t} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Preto.



Figura 3.61 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{m1t} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Preto.

3.5.5.3. Período Crítico

Entre os anos de 2015 e 2021 a BHPS passou pelas anomalias negativas mais intensas em suas vazões médias desde 1960 (período máximo avaliado no estudo), ocasionando na diminuição das vazões por longos períodos. A Figura 3.62 mostra as reduções de vazão verificadas no período crítico considerando as diferenças entre os anos hidrológicos de 1978-2020 e 2014-2020, nas vazões de referência Q_{m1t} (primeiro mapa) e Q_{95} (segundo mapa) anuais. Na sub-bacia do Rio Preto a vazão Q_{95} apresentou reduções que variaram até 10 m³/s e 1,5 m³/s em relação à Q_{m1t} . Observa-se também que as reduções de vazão se amplificaram de montante para jusante ao longo do rio Preto.

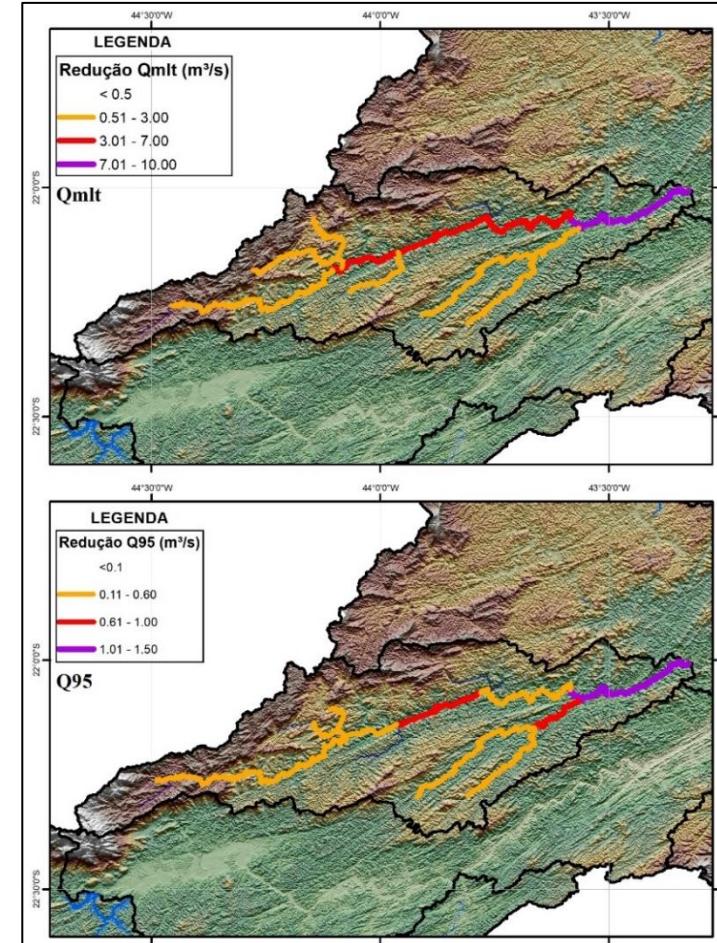


Figura 3.62 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{m1t} e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-bacia do Rio Preto.

3.5.6. Cenário de Mudanças Climáticas

3.5.6.1. Vazões Máximas

O cálculo de vazões máximas, considerando diferentes tempos de retorno, é essencial para o dimensionamento eficiente de sistemas hidráulicos, garantindo a resiliência e a segurança necessárias diante de variabilidades climáticas e condições extremas. O cálculo das vazões máximas ($Q_{máx}$) para os tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos foi realizado nas minibacias de localização das estações fluviométricas selecionadas na área de estudo, apresentadas no Produto 4.

A sub-bacia do Rio Preto foi avaliada em 9 locais com estações fluviométricas. Observou-se uma pequena tendência de menores alterações nas cabeceiras da sub-bacia. Os resultados mostraram alterações médias entre todos os TRs de 20% no curto prazo e 31% no longo prazo, indicando um aumento das vazões máximas com maior intensidade no longo prazo. As estações localizadas na cabeceira da sub-bacia apresentam alterações médias mais altas que as demais no longo prazo, superiores a 30%.

Isso significa que as vazões máximas tendem a aumentar na sub-bacia de maneira significativa, em especial para as estações localizadas na região de cabeceira no longo prazo. Diante desse

fato, torna-se essencial efetivar a gestão de recursos hídricos, o planejamento urbano e o dimensionamento de sistemas hidráulicos considerando as consequências que o aumento das vazões pode trazer. Entre essas consequências estão inundações mais severas e intensas, ampliação das manchas de inundações urbanas, danos à infraestrutura das cidades, entre outros.

A Tabela 3.14 apresenta os fatores de alteração para o curto e longo prazo, as máximas vazões renaturalizadas ou simuladas no P4 e as suas projeções para o curto e longo prazo. Em complemento, a Figura 3.63 apresenta os resultados de alteração dos TRs considerando as vazões futuras em cenários de mudança climática para o curto e para o longo prazo.

Tabela 3.14 - Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Rio Preto.

Estações Fluviométricas	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)	Estações Fluviométricas	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)
TR 10											
58590000	14	27,1	646	736,4	821,1	58590000	24	26,2	855,6	1061	1079,8
58585000	15,3	27,7	576,7	664,9	736,5	58585000	24,1	25,6	739,6	917,9	929
58573000	6,1	15,4	57,6	61,2	66,5	58573000	13,8	19,6	80,4	91,5	96,1
58560000	6,4	15,2	35,1	37,3	40,4	58560000	15	18,9	46,1	53	54,8
58550001	18,2	34,6	388,6	459,4	523,1	58550001	29,4	36	503,7	651,8	685,1
58542000	20,4	30	148,6	178,9	193,2	58542000	28,6	34,7	212,5	273,2	286,2
58535000	15,4	32,9	162	186,9	215,3	58535000	24,6	38	214,8	267,7	296,5
58530000	8,8	30,9	108,7	118,3	142,3	58530000	20,7	37,7	145,2	175,2	199,9
58525000	12,4	39,1	63,4	71,3	88,2	58525000	22,8	48,1	92,8	113,9	137,4
TR 25											
58590000	20,9	27	766,3	926,5	973,3	58590000	26,4	25,6	944,2	1193,5	1186
58585000	21	26,4	670,2	811	847,2	58585000	26,5	25	808,5	1022,8	1010,6
58573000	12	18,2	70,7	79,2	83,6	58573000	15,4	20,4	90	103,8	108,3
58560000	11,5	17,1	41,4	46,1	48,4	58560000	18,3	20,7	50,7	60	61,2
58550001	25,9	36	454,7	572,5	618,4	58550001	31,4	35	552,4	725,9	745,8
58542000	25,7	33,1	185,3	232,9	246,6	58542000	31,8	36,1	239,5	315,6	325,9
58535000	21,7	36,5	192,3	234	262,5	58535000	27	39,3	237,2	301,2	330,4
58530000	16	35	129,7	150,4	175	58530000	23,5	38,8	160,6	198,3	222,9
58525000	17,9	44,2	80,3	94,6	115,7	58525000	26	50,4	105,2	132,6	158,2

**Nas estações sem vazão máxima renaturalizada calculada foram utilizados os dados de vazão máxima simulada no P4.

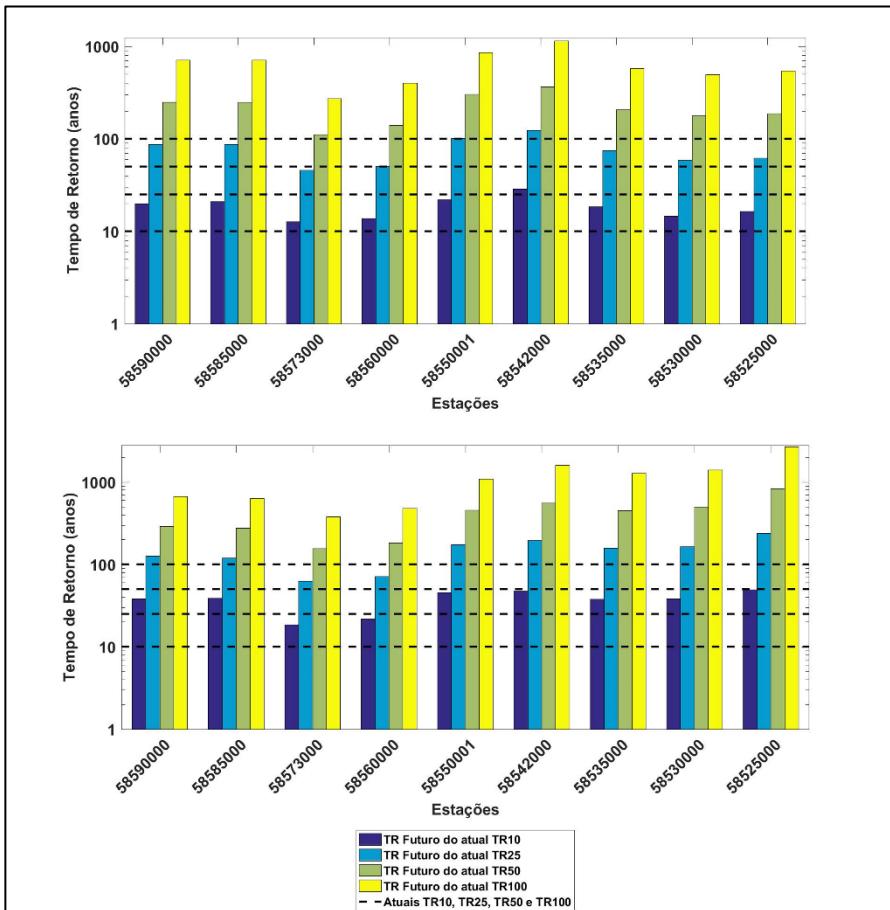


Figura 3.63 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Preto.

3.5.6.2. Vazões Mínimas

Também foi estudado o impacto das mudanças climáticas nas vazões de referência para cenários futuros, com o objetivo de fornecer subsídios aos órgãos gestores e aos CBHs para a tomada de decisão e planejamento dos recursos hídricos da BHPS. A Tabela 3.15 mostra a mediana de alteração percentual dos 19 modelos para o curto e para o longo prazo, a vazão atual de referência e as vazões de referência futuradas.

A sub-Bacia do Rio Preto foi avaliada em 9 locais com estações fluviométricas. Os resultados mostraram reduções das vazões mínimas de referência de -10% no curto prazo e de -7% no longo prazo. A vazão média de longo período apresentou uma redução no curto prazo e um aumento para o longo prazo. De maneira geral, os resultados indicam a diminuição da disponibilidade hídrica na região.

Tabela 3.15 - Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Rio Preto.

Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m ³ /s)	Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m ³ /s)
Q_{mlt}						Q₉₅					
58590000	-3,6	6,5	82,2	79,3	87,5	58590000	-7,8	-3,3	26,9	24,8	26
58585000	-2,2	6,4	79,4	77,7	84,5	58585000	-6,8	-2,8	25,7	24	25
58573000	-2	6,4	4,7	4,6	5	58573000	-6,8	-2,6	1,3	1,2	1,2
58560000	-4,5	4,5	2,7	2,6	2,8	58560000	-8,5	-6,8	0,6	0,5	0,5
58550001	-3,8	5,4	55,3	53,2	58,3	58550001	-10,1	-10	18,3	16,5	16,5
58542000	-1	7	11,7	11,6	12,5	58542000	-7,4	-0,9	3,4	3,2	3,4
58535000	-0,8	7,5	16,7	16,6	18	58535000	-10,2	-2,8	4,9	4,4	4,7
58530000	-2,2	7	12,6	12,3	13,5	58530000	-10,6	-4,9	3,7	3,3	3,5
58525000	-2,4	7,1	5,1	5	5,5	58525000	-11,8	-5,1	1,4	1,2	1,3
Q₉₀						Q_{7,10}					
58590000	-6,7	-3,7	30,6	28,6	29,5	58590000	-6,8	-7,1	20,8	19,4	19,3
58585000	-6,5	-3,9	29,3	27,4	28,2	58585000	-11,1	-7	19,5	17,3	18,1
58573000	-6,5	-3,8	1,7	1,6	1,6	58573000	-11,8	-7,2	0,8	0,7	0,8
58560000	-9,5	-8,9	0,8	0,7	0,7	58560000	-14,6	-16	0,3	0,2	0,2
58550001	-9,4	-9	20,6	18,7	18,8	58550001	-22,1	-17,3	14,4	11,2	11,9
58542000	-6,6	-2,2	4	3,8	4	58542000	-11,6	-2,2	2	1,8	2
58535000	-5,7	-2,9	5,7	5,3	5,5	58535000	-11,1	-10,5	3,8	3,3	3,4
58530000	-8,3	-4,8	4,2	3,9	4	58530000	-11	-14,2	2,8	2,5	2,4
58525000	-8	-5	1,6	1,5	1,5	58525000	-12,3	-13,7	1,1	1	1

3.6. SUB-BACIA DO RIO PARAIBUNA

A sub-bacia do Rio Paraibuna está localizada na parte média da BHPS, ao norte do rio Paraíba do Sul, sendo que quase toda a sub-bacia encontra-se no estado de Minas Gerais, com uma pequena porção no Rio de Janeiro. O rio Paraibuna é o principal rio desta sub-bacia, cujos principais afluentes são o rio do Peixe, rio do Cágado e rio Preto. Além disso, o rio Paraibuna deságua na porção média do rio Paraíba do Sul. A cabeceira do rio Paraibuna encontra-se a uma altitude de 1.000 metros e sua foz a 300 metros. A sub-bacia possui uma média pluviométrica anual de 1.473 mm, sendo a região mais próxima ao exutório a área com menor precipitação; enquanto a região que recebe a maior quantidade de chuva localiza-se próximo à cabeceira do rio do Peixe. A sub-bacia do Rio Paraibuna conta com algumas interferências hidráulicas, dentre essas estruturas, a de maior relevância é a UHE Picada, localizada no rio do Peixe. Esta usina funciona em regime de operação a fio d'água, portanto não regulariza as vazões no rio. Apesar disso, observou-se a interferência do reservatório nas vazões mínimas, sendo assim, foi tratada como condição de contorno no estudo desenvolvido.

A gestão de recursos hídricos tem como unidade territorial a bacia hidrográfica. No entanto, a área de atuação dos Comitês de Bacia

Hidrográfica poderá ser, também, a sub-bacia hidrográfica de tributário do curso de água principal da bacia, ou de tributário desse tributário ou, ainda, um grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas. Além disso, a área de atuação de CBHs estaduais deverá respeitar os limites geográficos dos estados que compõem a bacia hidrográfica do rio federal. Dessa forma, as sub-bacias apresentadas no estudo podem ter seus limites geográficos diferentes das áreas de atuação dos Comitês, conforme observado na Figura 3.64.

Na sub-bacia do Rio Paraibuna estão presentes os seguintes CBHs: Preto e Paraibuna e Médio Paraíba do Sul. O CBH Médio Paraíba do Sul ocupa na sub-bacia a região correspondente ao estado do Rio de Janeiro, enquanto a maior parte da área da sub-bacia é ocupada pelo CBH Preto e Paraibuna, no estado de Minas Gerais.

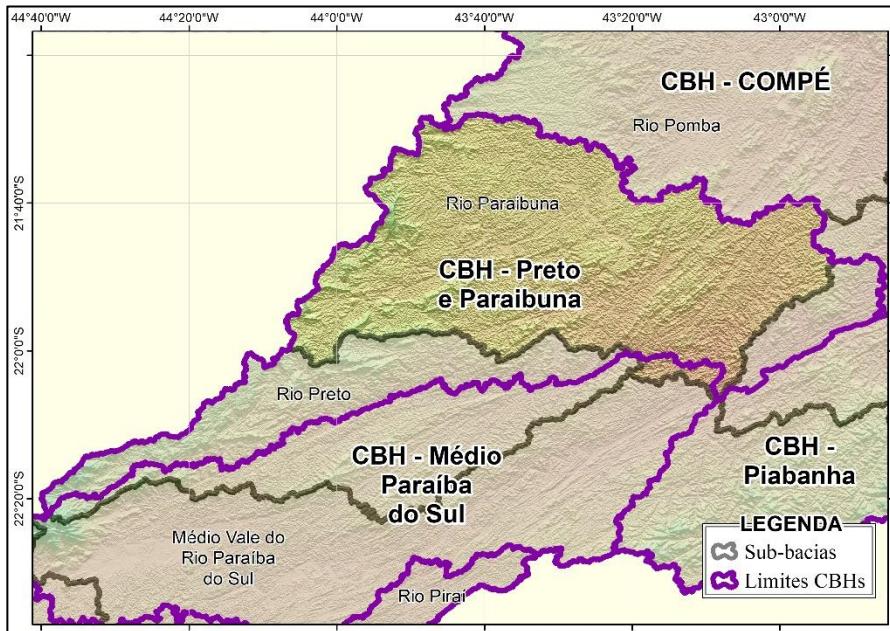


Figura 3.64 - Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Rio Paraibuna.

3.6.1. Dados Pluviométricos

Na etapa de levantamento de dados pluviométricos realizada para o EDH-PS, foram identificadas 85 estações pluviométricas na área da sub-bacia do Rio Paraibuna e suas adjacências, das quais apenas 28 possuíam algum registro de precipitação ao longo do seu período de operação. Contudo, após tratamento e consistência das

séries históricas, permaneceram 21 estações no banco de dados consistido, o qual subsidiou as demais etapas do presente estudo. Todas as estações podem ser visualizadas na Figura 3.65.

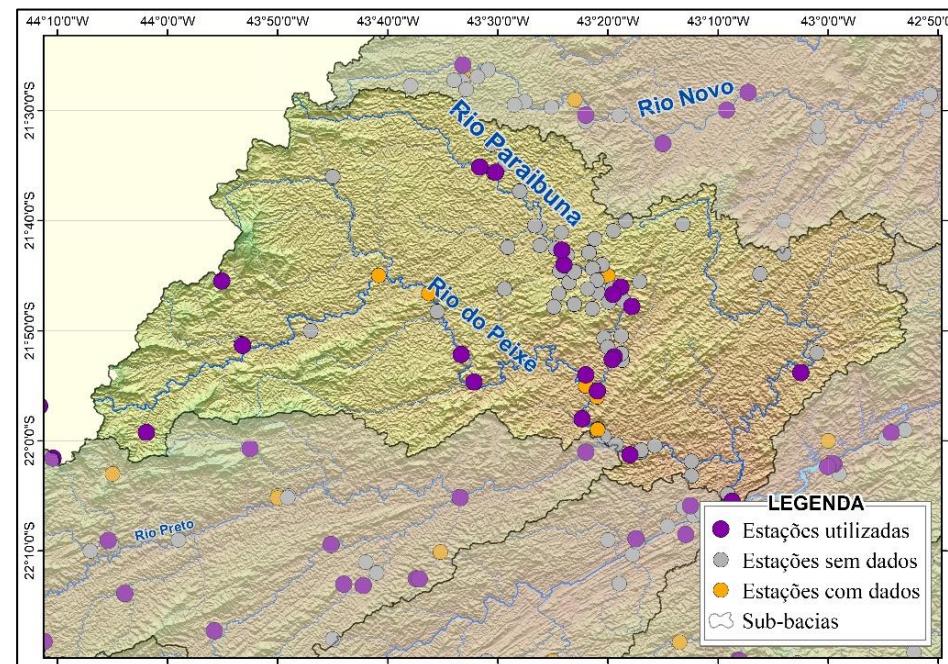


Figura 3.65 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Rio Paraibuna.

3.6.2. Dados Fluviométricos

Na fase de levantamento de dados fluviométricos do presente estudo, foram inventariadas 69 estações fluviométricas na área da

sub-bacia do Rio Paraibuna, porém somente 34 delas possuíam algum dado de vazão. Já na etapa de consistência dos dados hidrológicos, foram removidas do banco de dados oficial estações cujas séries eram muito curtas, apresentavam muitas falhas, ou algum tipo de inconsistência que pudesse comprometer o estudo de disponibilidade hídrica; assim, restaram 13 estações com boa qualidade de dados nesta sub-bacia, para serem utilizadas nas etapas seguintes do EDH-PS. As informações como código, nome, nome do rio, nome do município, localização e área de drenagem de cada estação podem ser visualizadas no Quadro 3.6. A distribuição espacial das estações pode ser observada na Figura 3.66.

Quadro 3.6 – Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Paraibuna.

Estação	Nome	Nome do rio	Nome do município	Latitude	Longitude	AD (Km ²)
19095	PICADA	RIO DO PEIXE	JUIZ DE FORA	-21,88	-43,54	1.724
58512080	UHE PICADA JUSANTE	RIO DO PEIXE	JUIZ DE FORA	-21,91	-43,54	1.750
58620000	UHE ILHA DOS POMBOS FAZENDA PIRACEMA	RIO PARAÍBUNA	TRÊS RIOS	-22,09	-43,15	8.560
58612000	UHE SIMPLÍCIO RIO PARAIBUNA	RIO PARAÍBUNA	CHIADOR	-22,09	-43,15	8.561
58480501	PCH MARIMELOS MONTANTE 1	RIO PARAÍBUNA	JUIZ DE FORA	-21,78	-43,33	1.015
58520000	SOBRAL	RIO PARAÍBUNA	BELMIRO BRAGA	-21,97	-43,37	3.640
58516500	FAZENDA SANTO ANTÔNIO	RIO DO PEIXE	JUIZ DE FORA	-21,86	-43,44	2.240
58491000	MATIAS BARBOSA	RIO PARAÍBUNA	MATIAS BARBOSA	-21,87	-43,32	1.210
58517000	UHE SOBRAGI MONTANTE 2	RIO PARAÍBUNA	MATIAS BARBOSA	-21,88	-43,33	1.261
58512000	TORRÉOES	RIO DO PEIXE	JUIZ DE FORA	-21,87	-43,56	1.720
58500000	USINA BRUMADO	RIO BRUMADO	LIMA DUARTE	-21,85	-43,89	144
58610000	ESTEVÃO PINTO	RIO CAGADO	MAR DE ESPANHA	-21,90	-43,04	783
58480500	JUIZ DE FORA - JUSANTE	RIO PARAÍBUNA	JUIZ DE FORA	-21,78	-43,33	969

Fonte: ANA (2023).

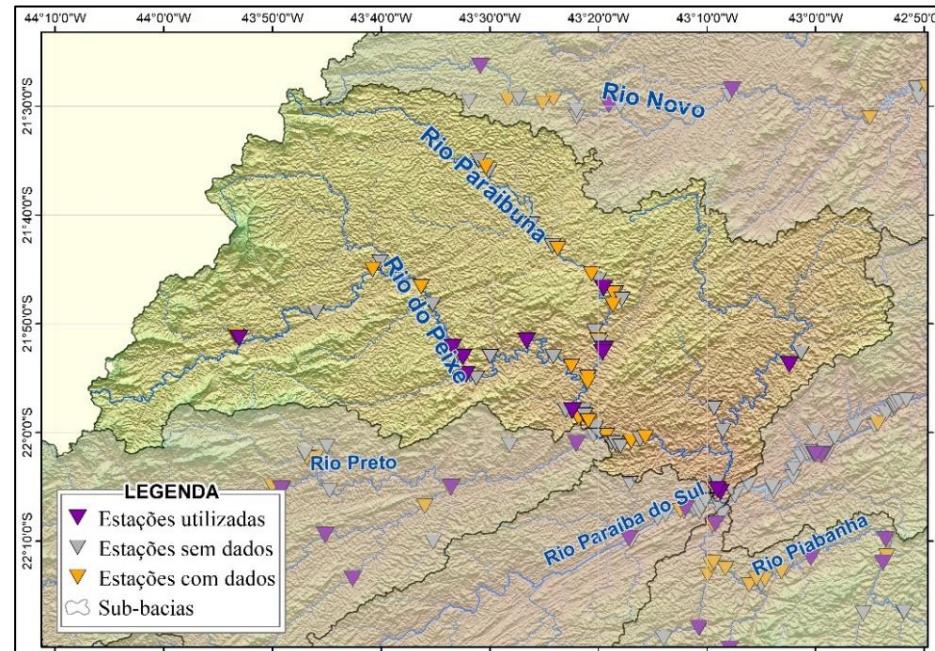


Figura 3.66 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Paraibuna.

3.6.3. Renaturalização de vazões

Buscando entender o quanto de água disponível em um rio ainda pode ser usada, foram calculadas as séries de vazões renaturalizadas, por meio da soma das séries de usos consuntivos totais com as séries observadas nas estações fluviométricas. O objetivo é conhecer a vazão natural dos rios, auxiliando na gestão

dos recursos hídricos. Para isso, são apresentadas as séries de usos consuntivos específicos anuais e sazonais para a sub-bacia (Figura 3.67) e os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{mlt} após a renaturalização da série de vazões (Figura 3.68).

Em relação aos gráficos da série de vazões específicas dos usos consuntivos (Figura 3.67), observa-se que na análise anual que existem estações com um comportamento relativamente estável ao longo dos anos e estações com uma leve tendência de aumento dos usos nos últimos anos analisados. Já na análise sazonal, percebeu-se uma leve tendência de aumento no uso consuntivo no período mais seco do ano em relação ao período mais úmido.

Em seguida, a Figura 3.68 mostra os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{mlt} após a renaturalização da série de vazões. Ou seja, indica quanto a devolução do uso consuntivo para o hidrograma implica em alteração da vazão de referência avaliada. Observa-se que as porcentagens de aumento variaram de 0,15% a 2,22% para a Q_{mlt} e de 0,39% a 5,81% para a Q_{95} . Ao longo do rio principal, mais próximo às regiões de cabeceira a oeste, estão localizadas as estações com as menores taxas de aumento. Em complemento, as maiores taxas de aumento estão localizadas no principal tributário à norte do rio principal.

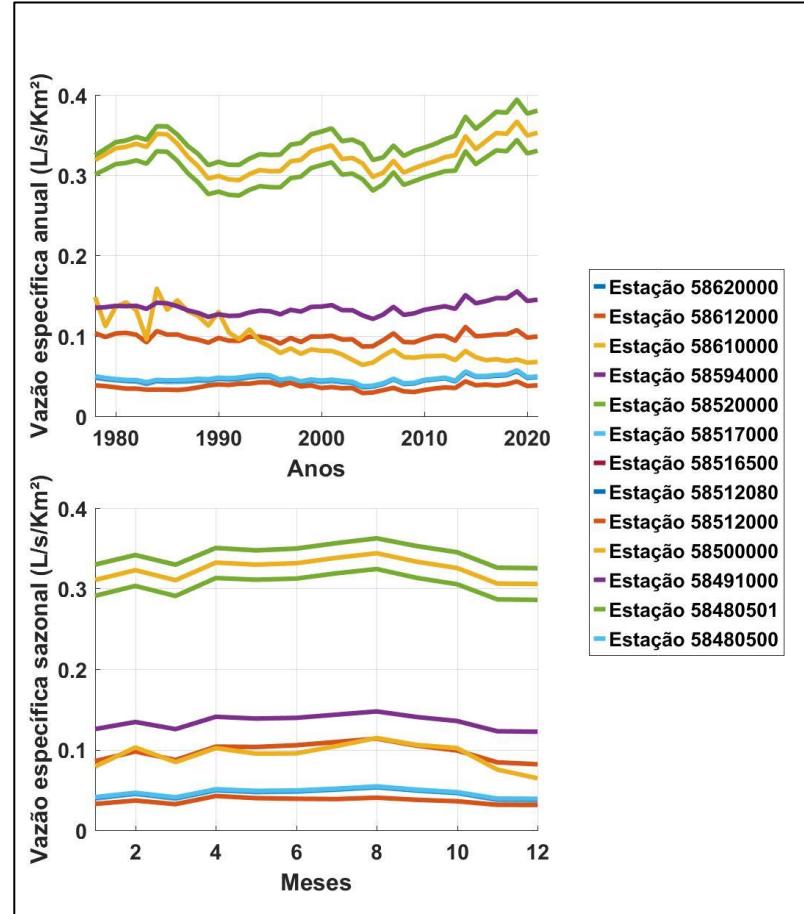


Figura 3.67 – Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Rio Paraibuna.

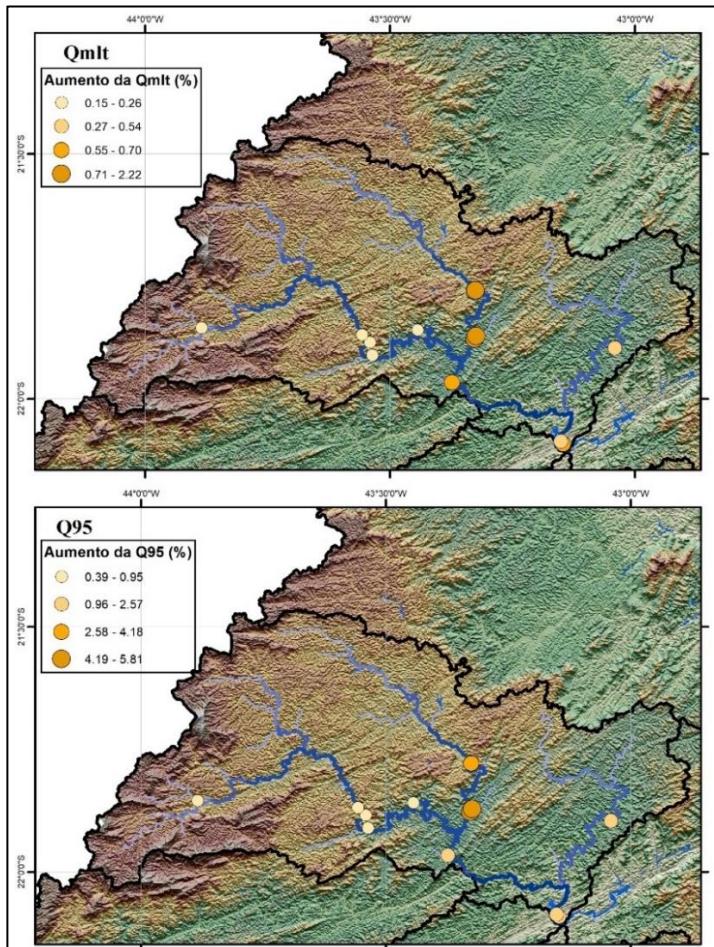


Figura 3.68 – Resultados da alteração da vazão Q_{m1t} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a sub-bacia do Rio Paraibuna após a renaturalização.

3.6.4. Estacionariedade das Séries

A análise da estacionariedade das séries de vazões busca entender, ao longo do período analisado, se ocorre uma estabilidade dos dados (comportamento estacionário), uma redução dos valores (tendência negativa) ou um aumento dos valores (tendência positiva). A Figura 3.69 mostra a análise da estacionariedade das estações fluviométricas (no primeiro gráfico) e das estações pluviométricas (no segundo gráfico).

Nas estações fluviométricas foram avaliados os seguintes índices: vazão média anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada em 5 dias consecutivos, vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos e vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos no período úmido (entre os meses de dezembro a fevereiro). Para as estações pluviométricas foram avaliados os seguintes índices: precipitação total anual, número de dias com precipitação no ano, precipitação diária igual ou superior a 50 mm no ano e precipitação diária máxima em 5 dias consecutivos no ano.

Nas estações fluviométricas, 2 índices indicaram predominância da estacionariedade nas estações, o restante apresentou predominância de tendência negativa. Para as estações pluviométricas, ocorre o predomínio da estacionariedade em 3

índices, e no índice do número de dias com precipitação ao ano metade das estações indicam tendência positiva e metade indicam a estacionariedade. Somente uma estação indicou tendência negativa nos resultados.

Dessa forma, a maioria das estações fluviométricas indicam uma diminuição das vazões máximas e mínimas na sub-bacia. Já para os dados pluviométricos, os resultados apontam, de maneira geral, que não ocorreram grandes alterações nas taxas de precipitação ao longo das séries históricas analisadas. Somente o índice do número de dias com precipitação no ano mostra que metade das estações indicam aumento no número de dias.

3.6.5. Disponibilidade Hídrica

3.6.5.1. Calibração do modelo

Na Tabela 3.16 podem ser visualizados os valores dos indicadores estatísticos e dos erros percentuais obtidos a partir da calibração do Modelo Hidrológico MGB em cada estação fluviométrica da sub-bacia do Rio Paraibuna. Os resultados obtidos na calibração estão dentro da margem considerada satisfatória para modelos hidrológicos. Na metodologia, é detalhado o significado de cada um dos indicadores utilizados.

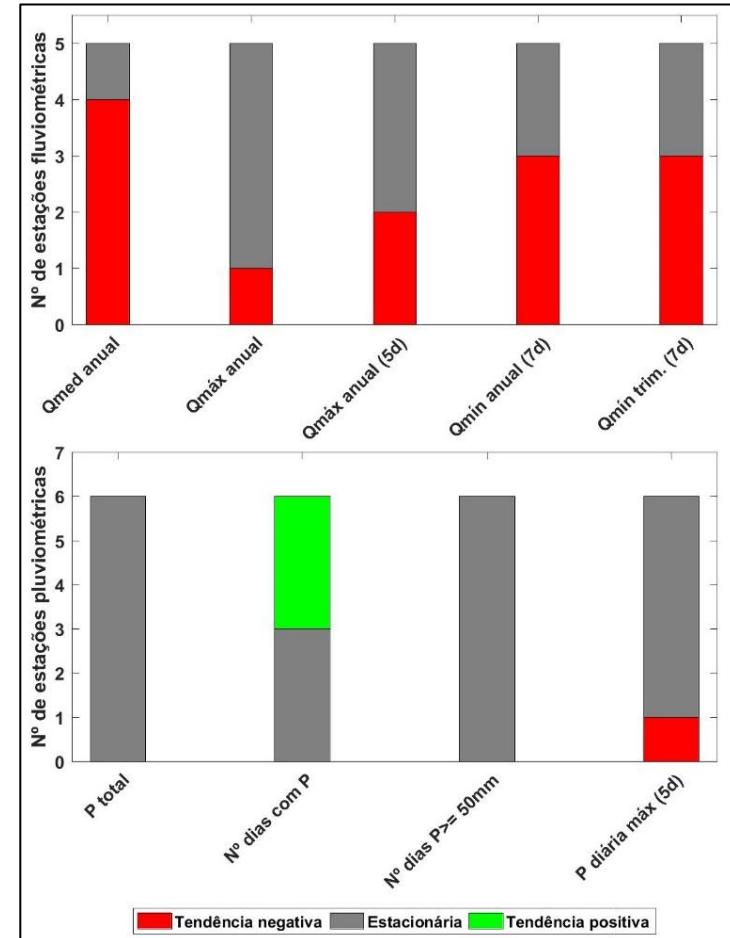


Figura 3.69- Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Paraibuna.

Destaca-se que, na presente sub-bacia, o menor erro médio foi observado na vazão $Q_{7,10}$, de 1,2%, enquanto o maior erro médio ocorreu na vazão $Q_{m\text{lt}}$, com 3%. Em relação aos indicadores estatísticos, o Nash-Sutcliffe e o Nash-Sutcliffe Logarítmico médios da sub-bacia foram iguais a 0,8, o que indica que os resultados foram muito bons. Os resultados de calibração mostrado para cada estação podem ser verificados com maior nível de detalhe no Produto 4 do presente estudo.

Tabela 3.16 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Rio Paraibuna.

Estação	Área de drenagem (km ²)	Tamnho da Série (anos)	Nash-Sutcliffe	Nash-Sutcliffe Logarítmico	Erro de Volume (%)	Erro de Q_{95} (%)	Erro de Q_{90} (%)	Erro de $Q_{m\text{lt}}$ (%)	Erro de $Q_{7,10}$ (%)
58480501	972	1,6	0,7	0,8	-11,7	-6,9	-5,1	-11,7	-
58612000	8561	4,4	0,8	0,9	15,3	6,5	5,7	15,3	-
58480500	972	42,7	1	1	0	0	0	0	0
58491000	1.109	4,8	0,6	0,7	-11,8	4,6	4	-11,8	-
58500000	142	29,8	0,5	0,6	3,6	5,6	0,2	3,6	4,8
58512000	1.717	26,3	0,6	0,6	8,1	-1,5	-0,6	8,1	9,8
58512080	1.748	15,3	0,8	0,9	17,9	2,6	10,7	17,9	-
58516500	2.238	43	0,7	0,8	5,9	-3	-3,3	5,9	-2,7
58517000	1.220	4,3	0,6	0,8	-1,7	12,9	11,4	-1,7	-
58520000	3.634	43	0,7	0,8	8,6	2,5	1,9	8,6	-3,2
58610000	784	42,9	1	1	0	0	0,1	0	0
58620000	8.548	36,1	0,8	0,8	4,6	9,3	2,4	4,6	-
19095	1.724	15,5	1	1	0	0	0	0	0

3.6.5.2. Resultados das Vazões de Referência

Conhecer as vazões de referência é essencial para realizar a gestão responsável dos recursos hídricos, já que elas representam a quantidade de água disponível nos rios. A disponibilidade das vazões de referência na sub-bacia do Rio Paraibuna é apresentada na Figura 3.72, onde são mostradas a vazão de longo termo " $Q_{m\text{lt}}$ ", a vazão que é superada ou igualada em 90% do tempo na série histórica " Q_{90} ", a vazão superada ou igualada em 95% do tempo " Q_{95} " e a vazão de 7 dias consecutivos com tempo de retorno de 10 anos, " $Q_{7,10}$ ". Já o diagrama unifilar, apresentado pela Figura 3.71, mostra com detalhes o comportamento do rio principal e dos seus afluentes, como a ocorrência de hidrelétricas e transposição na sub-bacia. Ainda, na Figura 3.70 é possível observar o mapa de vazões específicas ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) da $Q_{m\text{lt}}$ e Q_{95} .

Também são apresentadas as entregas de vazão ao longo dos rios que compõem a sub-bacia, proporcionando uma visão geral e completa dos recursos hídricos. Ao longo do rio principal ocorre um aumento das vazões, devido à contribuição dos seus afluentes, onde observa-se que o rio Preto apresenta os maiores valores de contribuição ao rio Paraibuna, seguido pelo rio do Peixe e pelo rio do Cágado. No exutório da sub-bacia, onde o rio Paraibuna contribui para o rio Paraíba do Sul, a vazão $Q_{m\text{lt}}$ é de 183,3 m^3/s , a vazão Q_{95} é de 67,0 m^3/s , a vazão Q_{90} é de 75,7 m^3/s e a vazão $Q_{7,10}$

é de 52,5 m³/s. Um dos reservatórios presentes na sub-bacia é o Picada, que foi representado no modelo hidrológico com condição de contorno devido ao seu impacto observado nas vazões mínimas.

Por fim, também são apresentados os resultados de vazão de referência na sub-bacia no formato de *Boxplot* para a vazão anual e mensais (Figura 3.73). Os resultados permitem identificar a sazonalidade das vazões de referência na bacia. Devido ao desproporcional número de trechos de pequena área de drenagem na base de resultados, o gráfico somente mostrou resultados de trechos com área de drenagem acima de 200km².

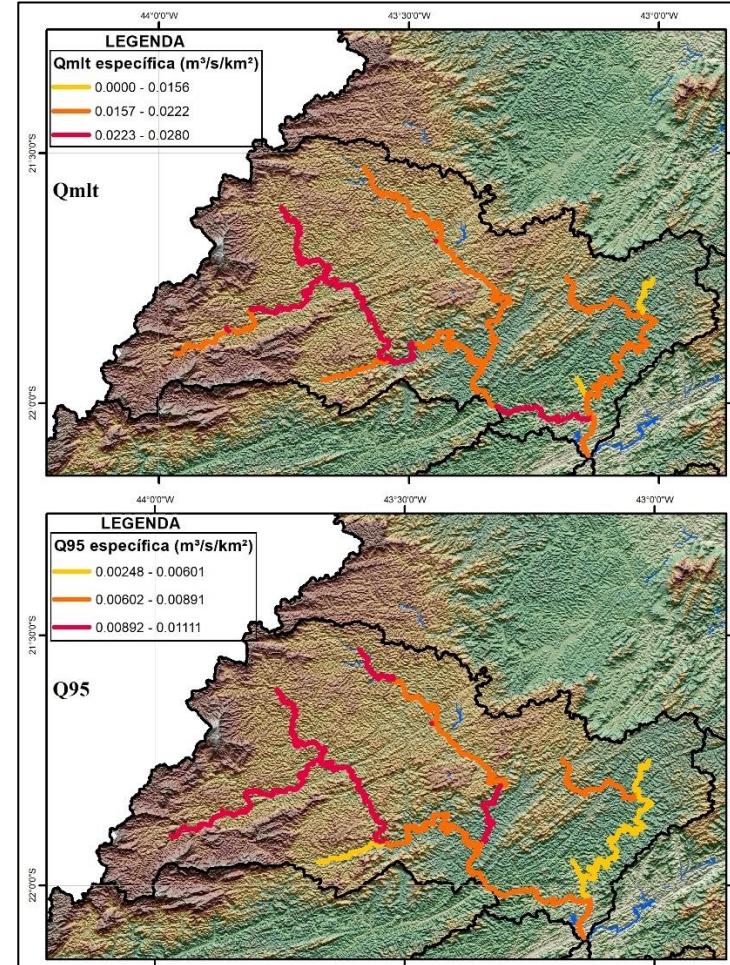


Figura 3.70 - Resultados das vazões específicas (m³/s/km²) de referência anuais Q_{mlt} e Q₉₅.

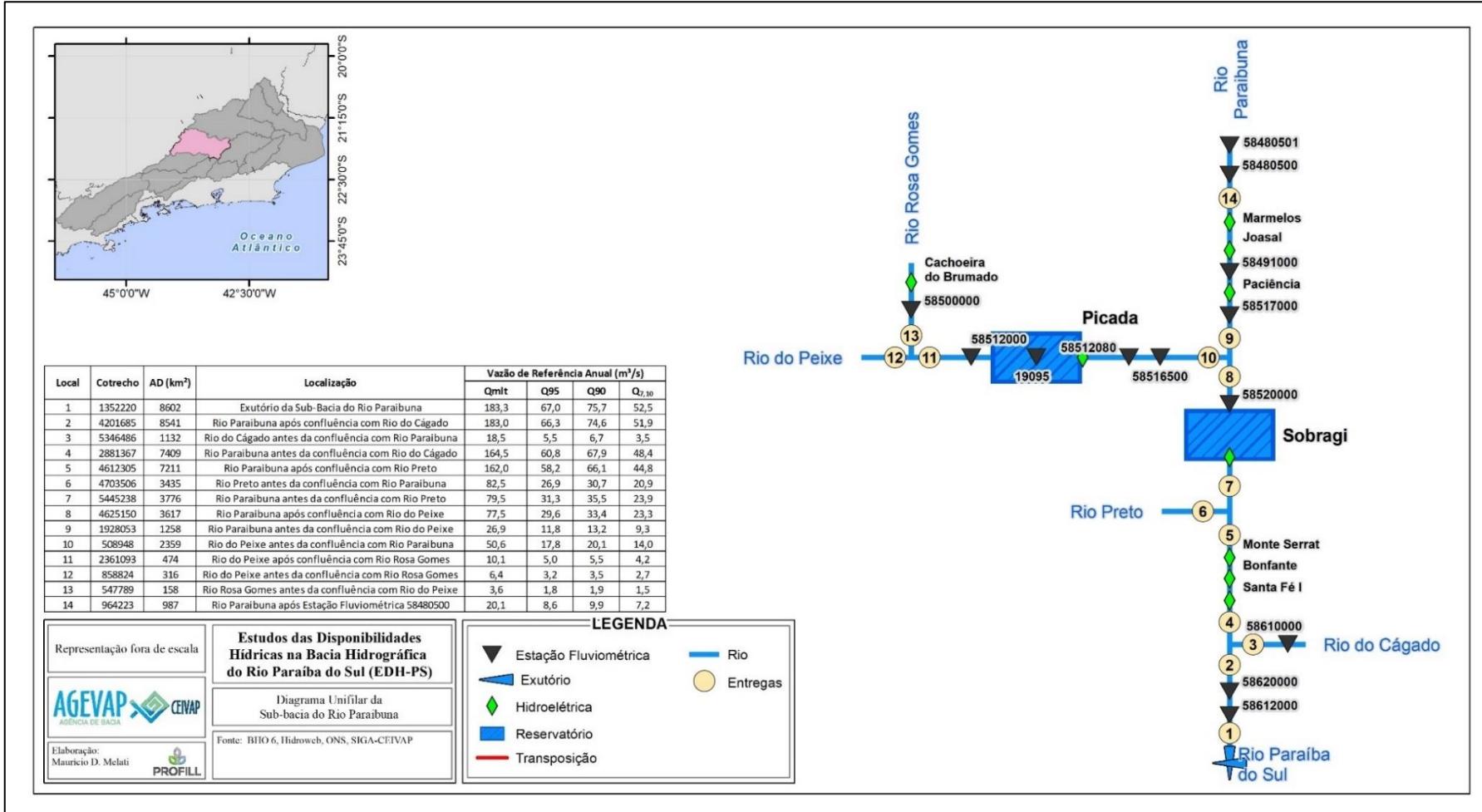


Figura 3.71 - Vazões de entrega (m³/s) da sub-bacia do Rio Paraibuna.

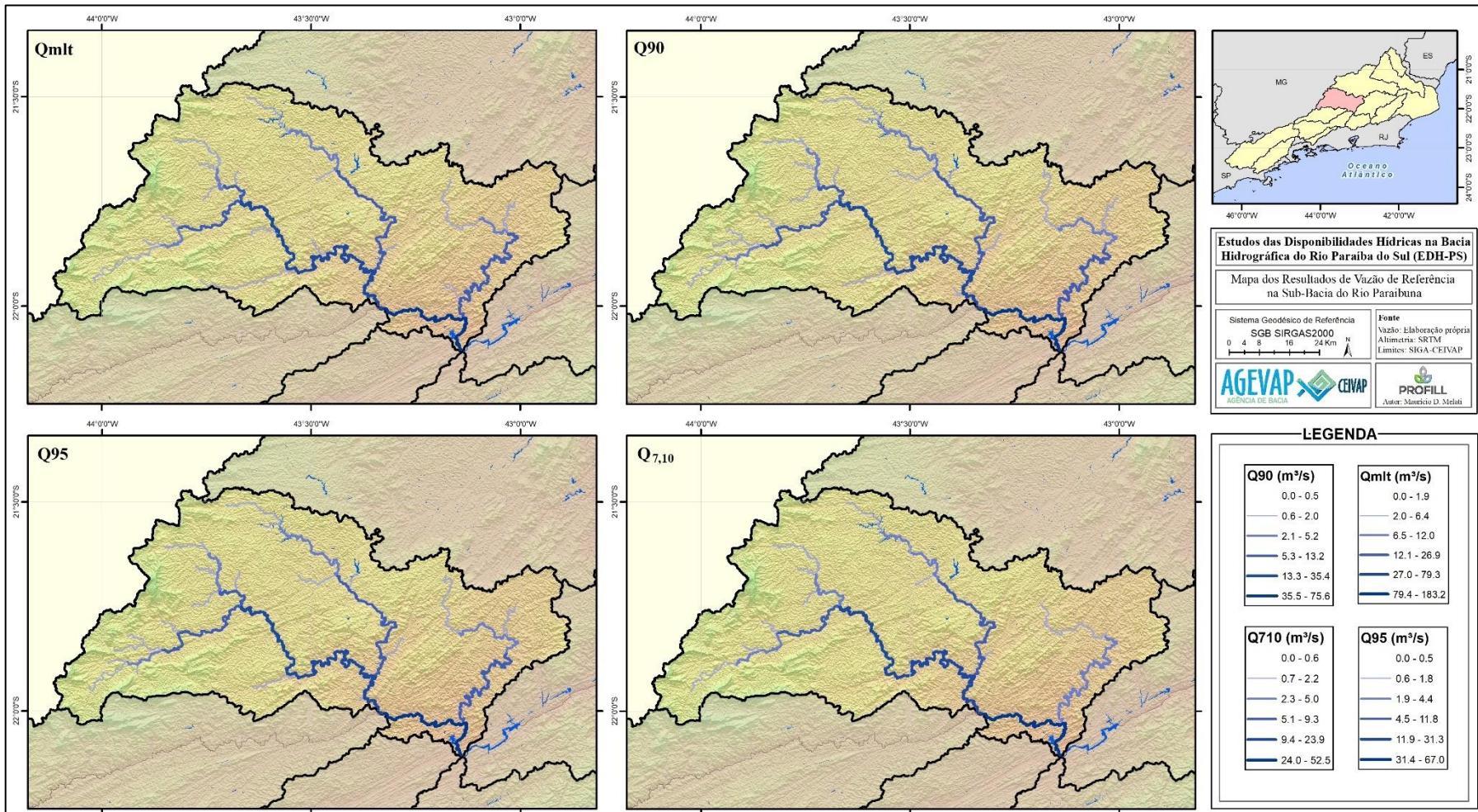


Figura 3.72 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{milt}, Q₉₀, Q₉₅ e Q_{7,10} na sub-bacia do Rio Paraibuna.



Figura 3.73 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($\text{L/s}/\text{km}^2$) de referência anual e mensais Q_{milt} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Paraibuna.

3.6.5.3. Período Crítico

Entre os anos de 2015 e 2021 a BHPS passou pelas anomalias negativas mais intensas em suas vazões médias desde 1960 (período máximo avaliado no estudo), ocasionando na diminuição das vazões por longos períodos. A Figura 3.74 mostra as reduções de vazão verificadas no período crítico considerando as diferenças entre os anos hidrológicos de 1978-2020 e 2014-2020, nas vazões de referência $Q_{m\text{lt}}$ (primeiro mapa) e Q_{95} (segundo mapa) anuais. A sub-bacia do Rio Paraibuna apresentou reduções que variaram até 36 m^3/s na vazão $Q_{m\text{lt}}$, e 10,8 m^3/s na vazão Q_{95} , indicando uma tendência de aumento das reduções de montante para jusante na sub-bacia.

3.6.6. Cenário de Mudanças Climáticas

3.6.6.1. Vazões máximas

O cálculo de vazões máximas, considerando diferentes tempos de retorno, é essencial para o dimensionamento eficiente de sistemas hidráulicos, garantindo a resiliência e a segurança necessárias diante de variabilidades climáticas e condições extremas. O cálculo das vazões máximas ($Q_{\text{máx}}$) para os tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos foi realizado nas minibacias de localização das estações fluviométricas selecionadas na área de estudo, apresentadas no Produto 4.

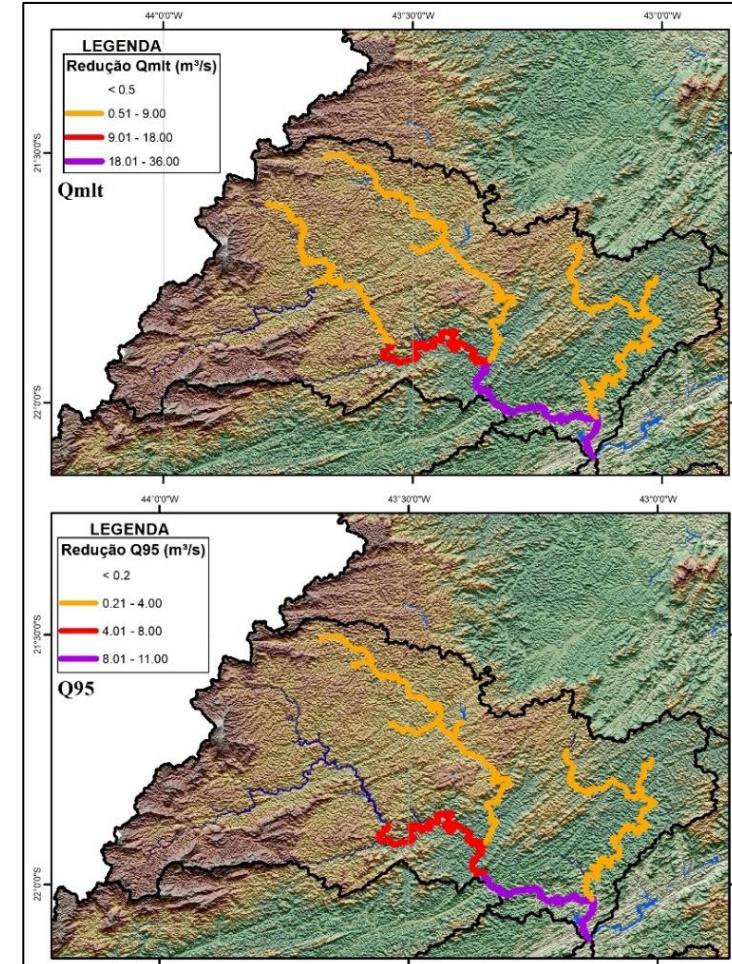


Figura 3.74 - Resultados espaciais da redução das vazões $Q_{m\text{lt}}$ e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-Bacia do Rio Paraibuna.

A sub-bacia do Rio Paraibuna foi avaliada em 12 estações fluviométricas, localizadas nos rios Paraibuna e Peixe. Os resultados mostraram alterações médias entre todos os TRs de 10% no curto prazo e 28% no longo prazo. Destaca-se que a bacia apresentou estações com alterações médias no curto prazo negativas, indicando a diminuição das vazões. Observou-se no longo prazo que a estação localizada mais na cabeceira da bacia, em uma região de maior altitude, mostrou alterações de aumento de vazão máxima mais acentuadas em relação às outras estações.

Isso significa que as vazões máximas tendem a aumentar na sub-bacia no curto prazo e no longo prazo. Para o longo prazo esperam-se aumentos mais significativos, enquanto para o curto prazo os aumentos esperados são de menor magnitude.

Dessa forma, torna-se essencial efetivar a gestão de recursos hídricos, o planejamento urbano e o dimensionamento de sistemas hidráulicos considerando as consequências que o aumento das vazões pode trazer, em especial para o longo prazo. Entre essas consequências estão inundações mais severas e intensas, ampliação das manchas de inundaçao urbana, danos a infraestrutura das cidades, entre outros.

A Tabela 3.17 apresenta os fatores de alteração para o curto e longo prazo, as máximas vazões renaturalizadas ou simuladas no P4 e as suas projeções para o curto e longo prazo. Em complemento, a Figura 3.75 apresenta os resultados de alteração dos TRs considerando as vazões futuras em cenários de mudança climática para o curto e para o longo prazo.

Tabela 3.17 - Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Rio Paraibuna.

Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)	Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)
TR 10											
58620000	10,2	28,5	1375,1	1515,4	1767,1	58620000	14,8	28,6	1871,8	2148,8	2407,1
58612000	10,2	28,5	1375,1	1515,4	1767,1	58612000	14,8	28,6	1871,8	2148,8	2407,1
58610000	18,9	36,8	109,2	129,8	149,4	58610000	25,4	40,1	142,2	178,3	199,2
58594000	5,3	26	1236,9	1302,5	1558,5	58594000	12,5	26,5	1692,1	1903,6	2140,5
58520000	6,2	28	427,9	454,4	547,7	58520000	11,8	26,6	544,8	609,1	689,7
58517000	4,4	21,8	231	241,2	281,4	58517000	11,4	25,1	316,4	352,4	395,8
58516500	-1,3	27,6	323,4	319,2	412,6	58516500	3	23,7	426,1	438,9	527,1
58512080	-1,4	27,4	410,6	404,9	523,1	58512080	3,4	25,3	588,4	608,4	737,3
58512000	4,5	28,6	278,5	291	358,2	58512000	9,3	27,9	371	405,5	474,5
58500000	7,6	30,9	22,4	24,1	29,3	58500000	19,3	35,7	29,8	35,6	40,5
58491000	3,9	21,5	208,8	216,9	253,7	58491000	10	24	287,3	316	356,2
58480501	2,7	21,2	176,2	181	213,6	58480501	9,2	23,7	231,8	253,1	286,7
58480500	2,7	21,2	176,2	181	213,6	58480500	9,2	23,7	231,8	253,1	286,7
19095	3,9	28,3	319,7	332,2	410,2	19095	9,3	27,9	442,5	483,7	566
TR 25											
58620000	13,3	29,3	1660,3	1881,1	2146,7	58620000	16,3	28,9	2081,7	2421	2683,3
58612000	13,3	29,3	1660,3	1881,1	2146,7	58612000	16,3	28,9	2081,7	2421	2683,3
58610000	23,2	37,5	128,1	157,9	176,2	58610000	27,1	42,2	156,1	198,5	222
58594000	11,1	26,8	1498,2	1664,5	1899,8	58594000	13,6	25,2	1884,5	2140,8	2359,4
58520000	9,7	27,6	495	543	631,6	58520000	13,4	25,7	594,2	673,9	747
58517000	10,3	24	280	308,9	347,2	58517000	12,2	26,1	352,4	395,4	444,4
58516500	1,4	25,1	382,3	387,7	478,3	58516500	4,9	23,4	469,5	492,5	579,4
58512080	1,7	26,3	512,7	521,4	647,5	58512080	4,8	24,5	663,6	695,5	826,2
58512000	7,9	29,3	331,6	357,8	428,8	58512000	10,4	26,5	410,1	452,7	518,8
58500000	15,1	33,7	26,6	30,7	35,6	58500000	22,6	37,9	33	40,4	45,5
58491000	9,2	23,1	253,8	277,2	312,5	58491000	10,6	24,7	320,4	354,4	399,6
58480501	8,4	22,8	208,1	225,6	255,6	58480501	9,8	24,4	255,3	280,3	317,6
58480500	8,4	22,8	208,1	225,6	255,6	58480500	9,8	24,4	255,3	280,3	317,6
19095	7,8	29,5	390,2	420,7	505,4	19095	10,4	26,5	494,5	545,9	625,5

** Nas estações sem vazão máxima renaturalizada calculada foram utilizados os dados de vazão máxima simulada no P4.

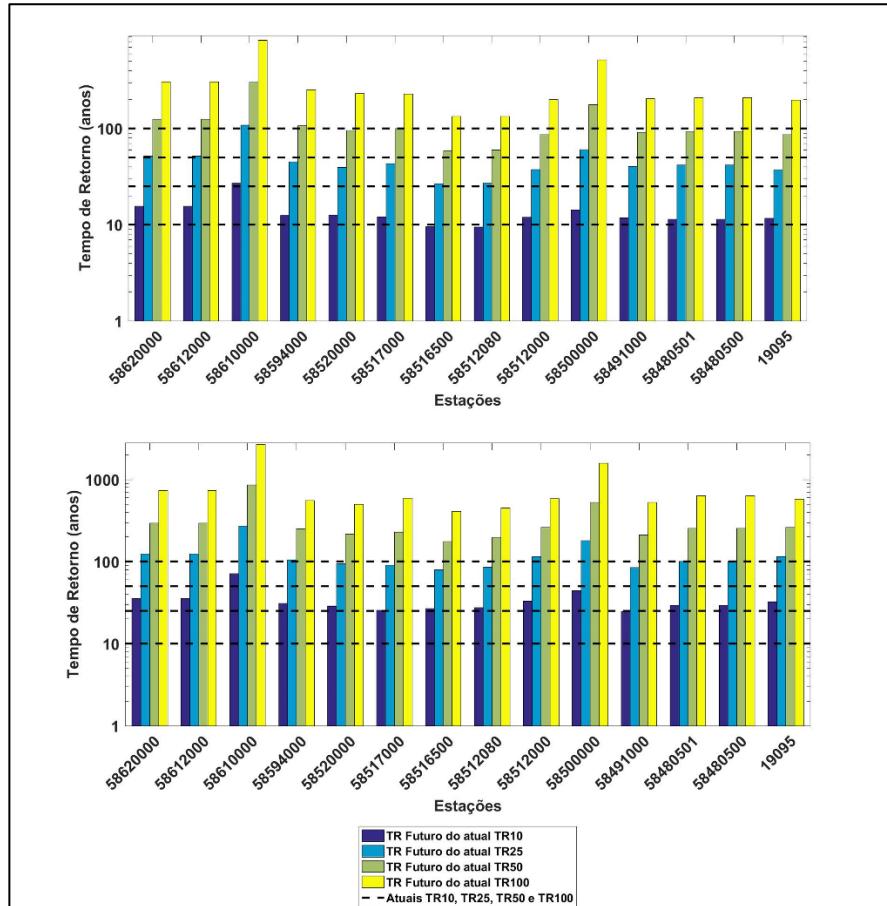


Figura 3.75 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Paraibuna.

3.6.6.2. Vazões Mínimas

Também foi estudado o impacto das mudanças climáticas nas vazões de referência para cenários futuros, com o objetivo de fornecer subsídios aos órgãos gestores e aos CBHs para a tomada de decisão e planejamento dos recursos hídricos da BHPS. A Tabela 3.18 mostra a mediana de alteração percentual dos 19 modelos para o curto e para o longo prazo, a vazão atual de referência e as vazões de referência futuradas.

A sub-bacia do Rio Paraibuna foi avaliada em 12 estações fluviométricas, localizadas nos rios Paraibuna e Peixe. Os resultados mostram a redução média das vazões referência em -7% no curto prazo e -5% no longo prazo. A vazão média de longo período apresentou resultados de diminuição no curto prazo e de aumento no longo prazo. Os resultados mostram a diminuição das vazões de referência médias para o curto e para o longo prazo, indicando redução na disponibilidade hídrica.

Tabela 3.18 - Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Rio Paraibuna.

Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m³/s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m³/s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m³/s)	Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m³/s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m³/s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m³/s)
Q_{mlt}											
58620000	-4	6,7	183,2	175,8	195,5	58620000	-7,6	-2,9	67	61,9	65,1
58612000	-4	6,7	183,2	175,9	195,5	58612000	-7,6	-2,9	67	61,9	65,1
58610000	-5,8	5	13,9	13,1	14,6	58610000	-5	-4,4	4,5	4,3	4,3
58520000	-1,8	6,7	77,5	76,1	82,6	58520000	-9,3	-7,4	30,2	27,4	28
58517000	-4,6	6,5	26,2	25	27,9	58517000	-6,5	-6,1	11,3	10,5	10,6
58516500	-6,9	3,4	49	45,6	50,7	58516500	-4,3	-4,4	17,2	16,4	16,4
58512080	-3	7	40,3	39,1	43,2	58512080	-5,9	-5,7	15,9	15	15
58512000	-3	6,8	39,5	38,3	42,2	58512000	-6	-5,9	15,8	14,8	14,8
58500000	-3,2	6,5	3,2	3,1	3,4	58500000	-5,8	-6	1,6	1,5	1,5
58491000	-2,5	6,1	23,8	23,2	25,3	58491000	-4,7	-2,2	10,3	9,9	10,1
58480501	-6,8	3,3	20	18,6	20,6	58480501	-4,3	-4,1	8,6	8,2	8,2
58480500	-6,8	3,2	20	18,6	20,6	58480500	-4,3	-4,1	8,6	8,2	8,2
19095	-3,1	7	39,9	38,6	42,7	19095	-8,4	-2,5	15,8	14,4	15,4
Q_{90}											
58620000	-6,9	-3,5	75,6	70,4	73	58620000	-7,7	-7,2	52,5	48,4	48,7
58612000	-6,9	-3,5	75,6	70,4	73	58612000	-7,7	-7,2	52,5	48,4	48,7
58610000	-5,6	-3,1	5,4	5,1	5,3	58610000	-5,7	-6,3	2,7	2,6	2,5
58520000	-7,5	-3,2	34,3	31,7	33,2	58520000	-13,3	-10,9	23,3	20,2	20,7
58517000	-6,3	-3	12,7	11,9	12,3	58517000	-6	-5,2	9,1	8,5	8,6
58516500	-5,4	-1,8	19,5	18,4	19,1	58516500	-6,2	-6,2	13,4	12,6	12,6
58512080	-7,3	-4,2	17,9	16,6	17,2	58512080	-6	-7,8	12,6	11,8	11,6
58512000	-7	-3,4	17,7	16,5	17,1	58512000	-5,8	-8,2	12,5	11,8	11,5
58500000	-7,1	-2,4	1,7	1,6	1,7	58500000	-6,4	-7,1	1,3	1,2	1,2
58491000	-5,6	-0,1	11,7	11	11,6	58491000	-6,7	-4,7	8,3	7,7	7,9
58480501	-5,4	-1,8	9,9	9,3	9,7	58480501	-6,5	-6,5	7,1	6,7	6,7
58480500	-5,2	-1,6	9,9	9,3	9,7	58480500	-6,7	-6,8	7,1	6,7	6,7
19095	-7,1	-3,1	17,7	16,5	17,2	19095	-5,6	-7,2	12,4	11,7	11,5
$Q_{7,10}$											

3.7. SUB-BACIA DO RIO PIABANHA

A sub-bacia do Rio Piabanhá está localizada na parte média da BHPS, ao sul do rio Paraíba do Sul, sendo que toda a sub-bacia está compreendida no estado do Rio de Janeiro. O rio Piabanhá é o rio principal desta sub-bacia cujos principais contribuintes são o rio Preto e o rio Fagundes. Além disso, o rio Piabanhá deságua rio Paraíba do Sul na região do Médio Vale. A cabeceira do rio Piabanhá encontra-se a uma altitude de 900 metros e sua foz a 260 metros. A sub-bacia do Rio Piabanhá possui uma média pluviométrica anual de 1.523 mm, sendo a região mais próxima ao exutório a área com menor precipitação; enquanto a região que recebe a maior quantidade de chuva localiza-se ao sul da sub-bacia. A sub-bacia do Rio Piabanhá não possui interferências hidráulicas relevantes, como transposições, reservatórios e grandes hidrelétricas. Há, entretanto, alguns aproveitamentos hidrelétricos de menor escala.

A gestão de recursos hídricos tem como unidade territorial a bacia hidrográfica. No entanto, a área de atuação dos Comitês de Bacia Hidrográfica poderá ser, também, a sub-bacia hidrográfica de tributário do curso de água principal da bacia, ou de tributário desse tributário ou, ainda, um grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas. Além disso, a área de atuação de CBHs estaduais deverá respeitar os limites geográficos dos estados que compõem a bacia

hidrográfica do rio federal. Dessa forma, as sub-bacias apresentadas no estudo podem ter seus limites geográficos diferentes das áreas de atuação dos Comitês, conforme observado na Figura 3.76. Na sub-bacia do Rio Piabanhá está presente o CBH de mesmo nome da sub-bacia.

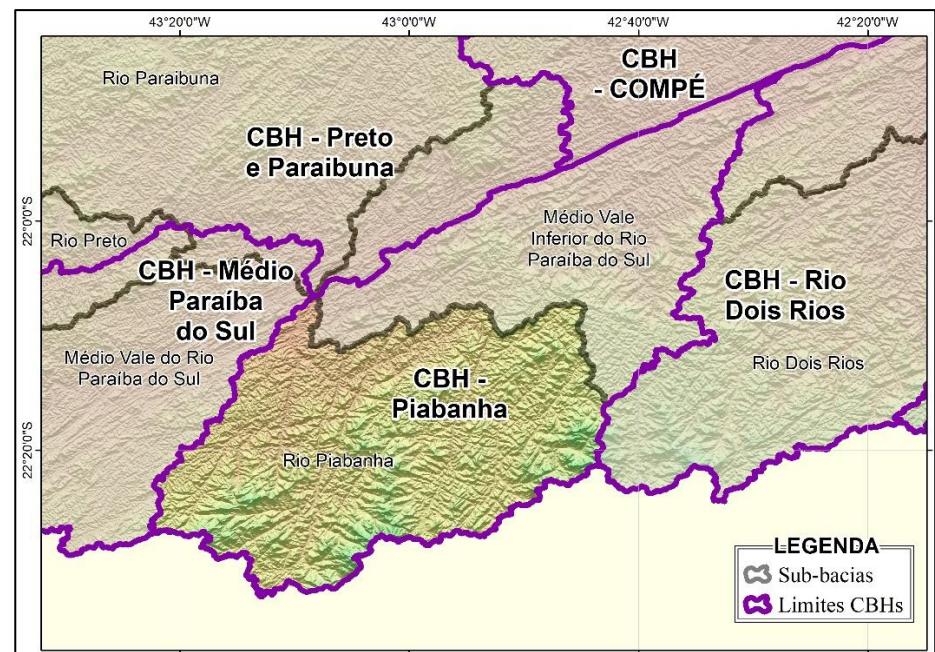


Figura 3.76 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Rio Piabanhá.

3.7.1. Dados Pluviométricos

Na etapa de levantamento de dados pluviométricos realizada para o EDH-PS, foram identificadas 152 estações pluviométricas na área da sub-bacia do Rio Piabanhá e suas adjacências, das quais apenas 66 possuíam algum registro de precipitação ao longo do seu período de operação. Contudo, após tratamento e consistência das séries históricas, permaneceram 37 estações no banco de dados consistido, o qual subsidiou as demais etapas do presente estudo. Todas as estações podem ser visualizadas na Figura 3.77.

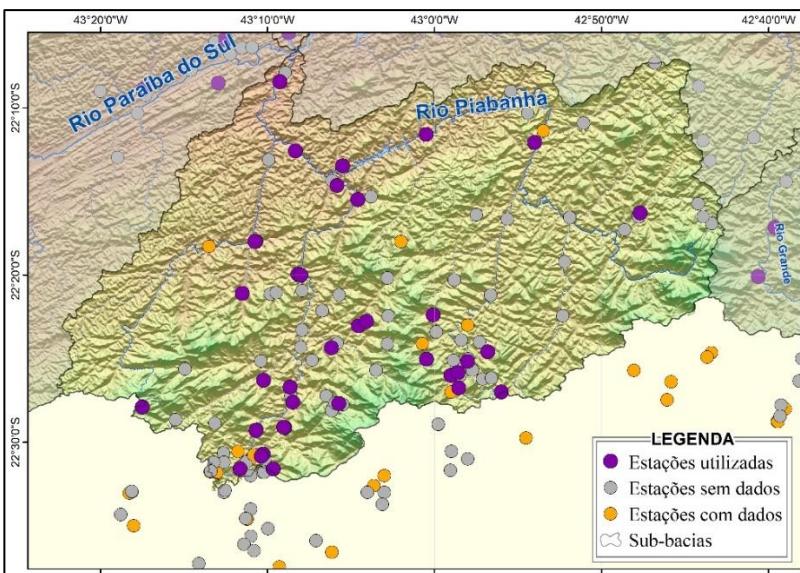


Figura 3.77 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Rio Piabanhá.

3.7.2. Dados Fluviométricos

Na fase de levantamento de dados fluviométricos do presente estudo, foram inventariadas 62 estações fluviométricas na área da sub-bacia do Rio Piabanhá, porém somente 18 delas possuíam algum dado de vazão. Já na etapa de consistência dos dados hidrológicos, foram removidas do banco de dados oficial estações cujas séries eram muito curtas, apresentavam muitas falhas, ou algum tipo de inconsistência que pudesse comprometer o estudo de disponibilidade hídrica; assim, restaram 6 estações com boa qualidade de dados nesta sub-bacia, para serem utilizadas nas etapas seguintes do EDH-PS. As informações como código, nome, nome do rio, nome do município, localização e área de drenagem de cada estação podem ser visualizadas no Quadro 3.7. A distribuição espacial das estações pode ser observada na Figura 3.78.

Quadro 3.7 – Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Piabanhá.

Estação	Nome	Nome do rio	Nome do município	Latitude	Longitude	AD (Km ²)
58421100	PCH POÇO FUNDO JUSANTE	RIO PRETO	SÃO JOSÉ DO VALE DO RIO PRETO	-22,16	-42,89	815
58420000	FAZENDA SOBRADINHO	RIO PRETO	TERESÓPOLIS	-22,20	-42,90	719
58405000	PEDRO DO RIO	RIO PIABANHA	PETRÓPOLIS	-22,33	-43,13	435
58440000	UHE SIMPLÍCIO MOURA BRASIL	RIO PIABANHA	TRÉS RIOS	-22,14	-43,15	2.055
58425000	MORELI (PARADA MORELI)	RIO PRETO	PETRÓPOLIS	-22,19	-43,01	930
58434000	FAGUNDES	RIO FAGUNDES	PETRÓPOLIS	-22,30	-43,18	275

Fonte: ANA (2023).

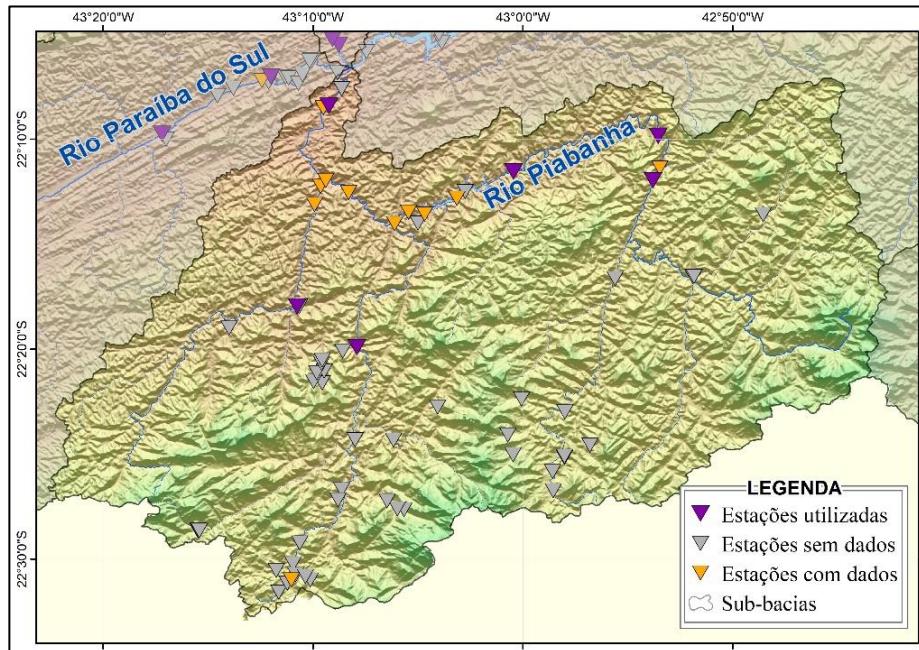


Figura 3.78 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Piabanhá.

3.7.3. Renaturalização de vazões

Buscando entender o quanto de água disponível em um rio ainda pode ser usada, foram calculadas as séries de vazões renaturalizadas, através da soma das séries de usos consuntivos totais com as séries observadas nas estações fluviométricas. O objetivo é conhecer a vazão natural dos rios, auxiliando na gestão

dos recursos hídricos. Para isso são apresentadas as séries de usos consuntivos específicos anuais e sazonais para a sub-bacia (Figura 3.79) e os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões (Figura 3.80).

Em relação aos gráficos da série de vazões específicas dos usos consuntivos (Figura 3.79), observa-se que na análise anual boa parte das estações apresentaram comportamento relativamente semelhante, com variação dos valores de vazão dos usos consuntivos ao longo dos anos. Já na análise sazonal, percebeu-se uma tendência de aumento no uso consuntivo no período mais seco do ano em relação ao período mais úmido.

Em seguida, a Figura 3.80 mostra os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões. Ou seja, indica quanto a devolução do uso consuntivo para o hidrograma implica em alteração da vazão de referência avaliada.

Observa-se que as porcentagens de aumento variaram de 1,05% a 2,79% para a Q_{m1t} e de 2,51% a 13,87% para a Q_{95} . De maneira geral, as estações localizadas na região de cabeceira a oeste da bacia, nos rios tributários, apresentaram as menores taxas de aumento, enquanto as estações próximas ao exutório, no rio principal, apresentaram as maiores taxas de aumento.

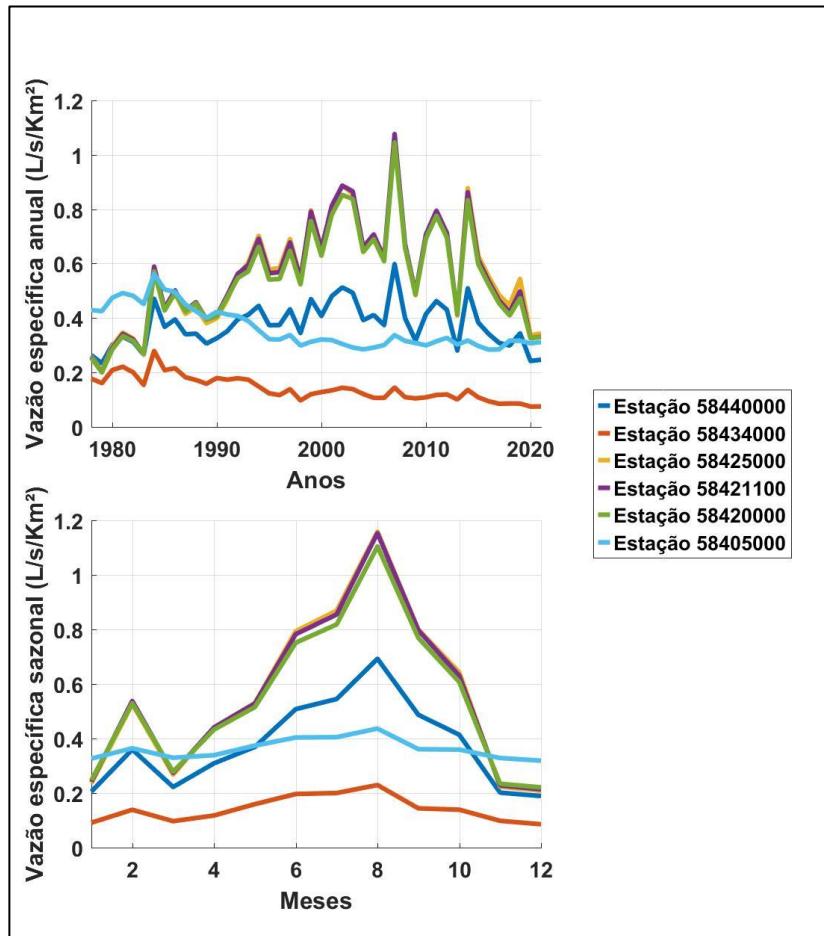


Figura 3.79 – Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Rio Piabanga.

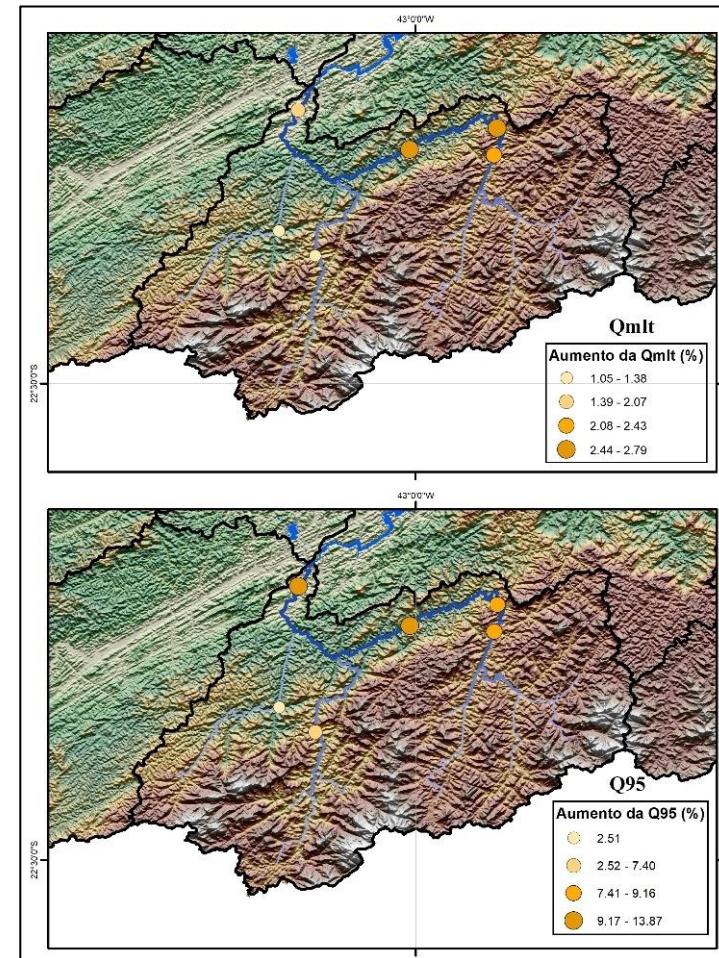


Figura 3.80 – Resultados da alteração da vazão Q_{m1t} (primeiro mapa) e da vazão Q₉₅ (segundo mapa) para a sub-bacia do Rio Piabanga após a renaturalização.

3.7.4. Estacionariedade das Séries

A análise da estacionariedade das séries de vazões busca entender, ao longo do período analisado, se ocorre uma estabilidade dos dados (comportamento estacionário), uma redução dos valores (tendência negativa) ou um aumento dos valores (tendência positiva). A Figura 3.57 mostra a análise da estacionariedade das estações fluviométricas (no primeiro gráfico) e das estações pluviométricas (no segundo gráfico).

Nas estações fluviométricas foram avaliados os seguintes índices: vazão média anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada em 5 dias consecutivos, vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos e vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos no período úmido (entre os meses de dezembro a fevereiro). Para as estações pluviométricas foram avaliados os seguintes índices: precipitação total anual, número de dias com precipitação no ano, precipitação diária igual ou superior a 50 mm no ano e precipitação diária máxima em 5 dias consecutivos no ano.

Para as estações fluviométricas, 4 índices indicaram predominância da estacionariedade nas estações, enquanto 1 índice apresentou metade das estações com tendência negativa e metade estacionária, com somente uma estação indicando tendência positiva nos

resultados. Para as estações pluviométricas, 3 índices indicaram predomínio da estacionariedade nas estações. Em complemento, no índice do número de dias com precipitação ao ano, o resultado abrangeu as três possibilidades, com estações indicando tendência positiva, tendência negativa e estacionariedade.

Dessa forma, de maneira geral, grande parte das estações fluviométricas indicam que não ocorreram grandes alterações nos valores de vazão na sub-bacia. Somente a vazão máxima anual em 5 dias consecutivos mostrou uma tendência de redução dos valores de vazão em metade das estações analisadas. Os dados pluviométricos indicam que não ocorreram grandes alterações nos valores de precipitação na sub-bacia.

3.7.5. Disponibilidade Hídrica

3.7.5.1. Calibração do modelo

Na Tabela 3.19 podem ser visualizados os valores dos indicadores estatísticos e dos erros percentuais obtidos a partir da calibração do modelo hidrológico MGB em cada estação fluviométrica da sub-bacia do Rio Piabanga. Os resultados obtidos na calibração estão dentro da margem considerada satisfatória para modelos hidrológicos. Na metodologia, é detalhado o significado de cada um dos indicadores utilizados.

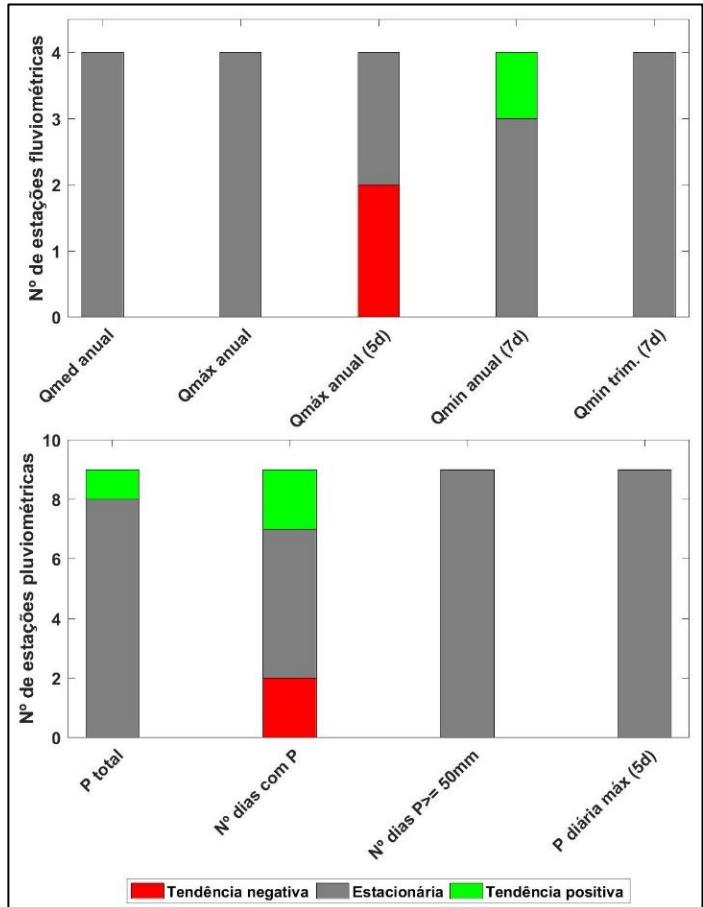


Figura 3.81 - Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Piabanga.

Destaca-se que, na presente sub-bacia, o menor erro médio foi observado na vazão $Q_{7,10}$, de -0,1%, enquanto o maior erro médio ocorreu na vazão Q_{95} , com -1,7%. Em relação aos indicadores estatísticos, o Nash-Sutcliffe e o Nash-Sutcliffe Logarítmico médios da sub-bacia foram iguais a 0,97, respectivamente, o que indica que os resultados foram muito bons. Os resultados de calibração mostrado para cada estação podem ser verificados com maior nível de detalhe no Produto 4 do presente estudo.

Tabela 3.19 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Rio Piabanga.

Estação	Área de drenagem (km^2)	Tamanho da Série (anos)	Nash-Sutcliffe	Nash-Sutcliffe Logarítmico	Volume (%)	Erro de Q_{95} (%)	Erro de Q_{30} (%)	Erro de Q_{m1t} (%)	Erro de $Q_{7,10}$ (%)
58421100	815	2,6	0,8	0,8	4,9	-10,4	-8,2	4,9	-
58405000	433	42,8	1	1	0	0	0	0	-0,1
58420000	721	41,5	1	1	0	0	0,1	0	0
58425000	926	43	1	1	0	0,1	0	0	0
58434000	275	41,2	1	1	-0,1	0	0,2	-0,1	-0,3
58440000	2.055	38,1	1	1	0	0	0	0	0

3.7.5.2. Resultados das Vazões de Referência

Conhecer as vazões de referência é essencial para realizar a gestão responsável dos recursos hídricos, já que elas representam a quantidade de água disponível nos rios. A disponibilidade das vazões de referência na sub-bacia do Rio Piabanga é apresentada na Figura 3.84, onde são mostradas a vazão de longo termo “ Q_{m1t} ”, a vazão que é superada ou igualada em 90% do tempo na série

histórica "Q90", a vazão superada ou igualada em 95% do tempo "Q₉₅" e a vazão de 7 dias consecutivos com tempo de retorno de 10 anos, "Q_{7,10}". Ainda, na Figura 3.82 é possível observar o mapa de vazões específicas ($m^3/s/km^2$) da Q_{m_{lt}} e Q₉₅.

Já o diagrama unifilar, apresentado pela Figura 3.83, mostra com detalhes o comportamento do rio principal e dos seus afluentes, como a ocorrência de hidrelétricas e transposição na sub-bacia. Também são apresentadas as entregas de vazão ao longo dos rios que compõem a sub-bacia, proporcionando uma visão geral e completa dos recursos hídricos. Ao longo do rio principal ocorre um aumento das vazões, devido à contribuição dos seus afluentes, onde observa-se que o rio Preto apresenta os maiores valores de contribuição ao rio Piabanha, seguido pelo rio Fagundes. No exutório da sub-bacia, onde o rio Piabanha contribui para o rio Paraíba do Sul, a vazão Q_{m_{lt}} é de 39,1 m^3/s , a vazão Q₉₅ é de 12,6 m^3/s , a vazão Q₉₀ é de 14,4 m^3/s e a vazão Q_{7,10} é de 9,5 m^3/s .

Por fim, também são apresentados os resultados de vazão de referência na sub-bacia no formato de Boxplot para a vazão anual e mensais (Figura 3.85). Os resultados permitem identificar a sazonalidade das vazões de referência na bacia. Devido ao desproporcional número de trechos de pequena área de drenagem na base de resultados, o gráfico somente mostrou resultados de trechos com área de drenagem acima de 200km².

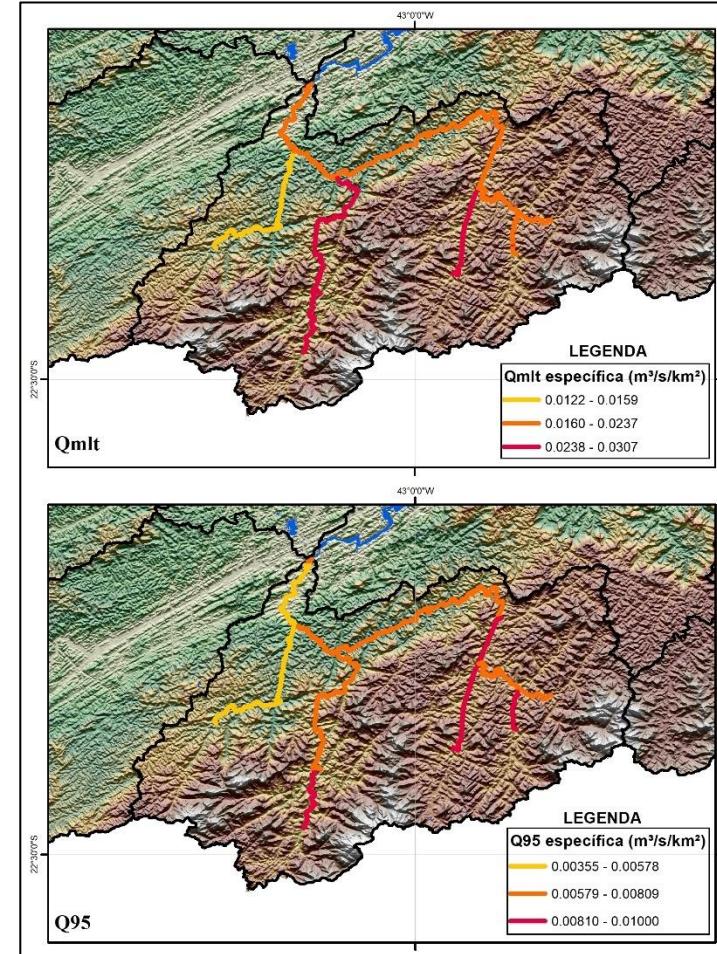


Figura 3.82 - Resultados das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) de referência anuais Q_{m_{lt}} e Q₉₅.

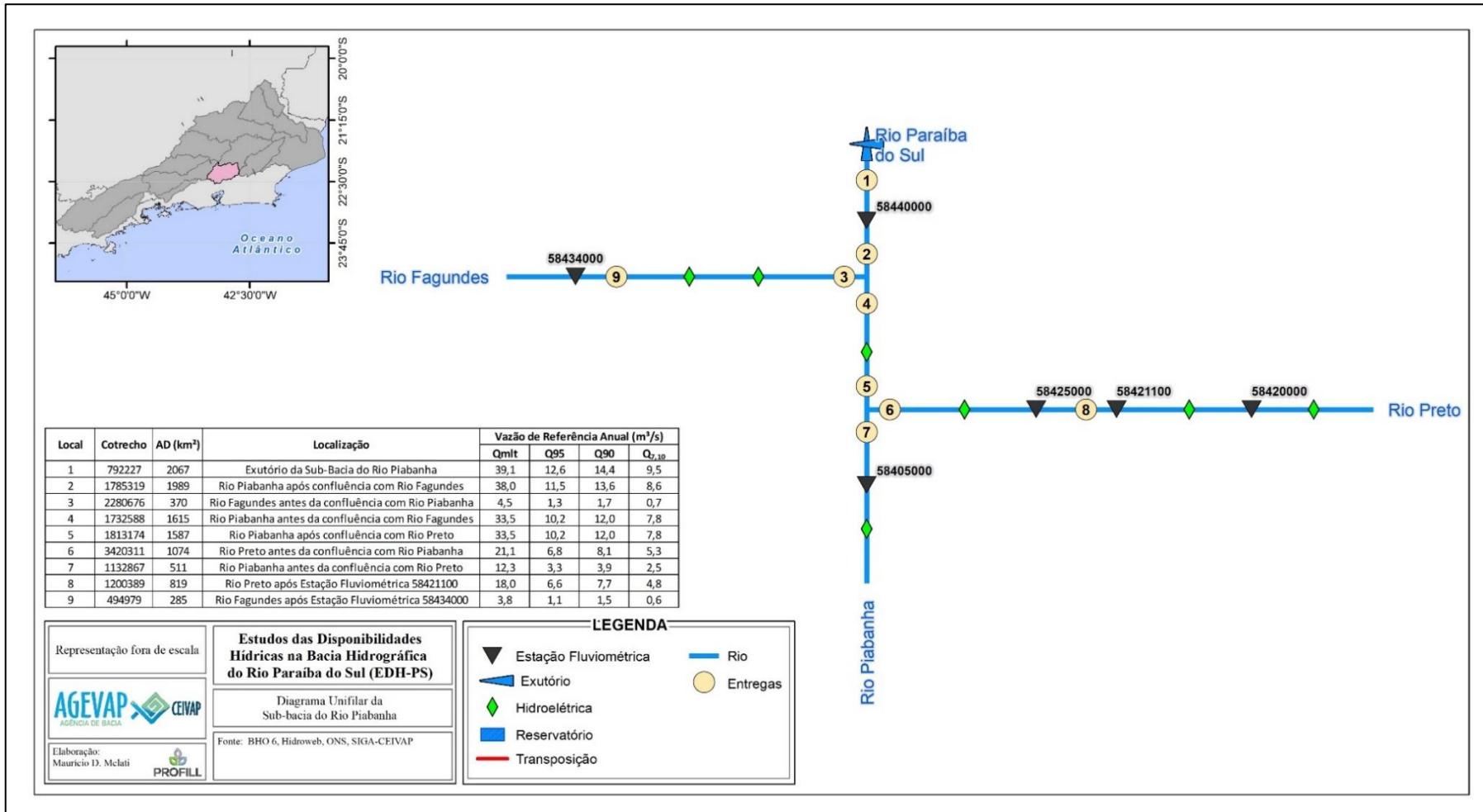


Figura 3.83 - Vazões de entrega (m^3/s) da sub-bacia do Rio Piabanga.

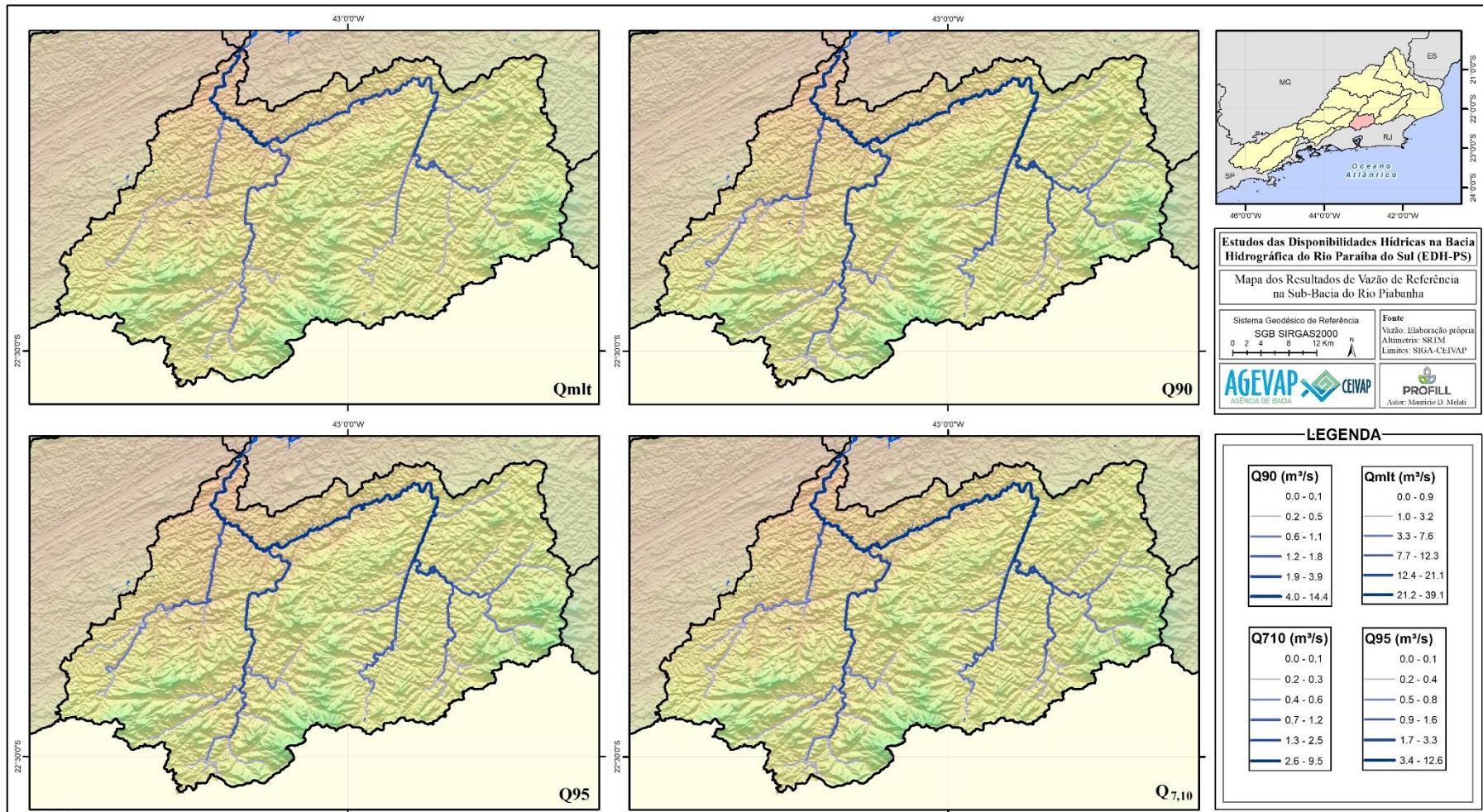


Figura 3.84 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{mlt}, Q₉₀, Q₉₅ e Q_{7,10} na sub-bacia do Rio Piabanha.



Figura 3.85 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{m1t} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Piabanha.

3.7.5.3. Período Crítico

Entre os anos de 2015 e 2021 a BHPS passou pelas anomalias negativas mais intensas em suas vazões médias desde 1960 (período máximo avaliado no estudo), ocasionando na diminuição das vazões por longos períodos. A Figura 3.86 mostra as reduções de vazão verificadas no período crítico considerando as diferenças entre os anos hidrológicos de 1978-2020 e 2014-2020, nas vazões de referência $Q_{m\text{lt}}$ (primeiro mapa) e Q_{95} (segundo mapa) anuais. A sub-bacia do Rio Piabanha apresentou reduções que variaram até 8,2 m^3/s na vazão $Q_{m\text{lt}}$, e 2,75 m^3/s na vazão Q_{95} .

3.7.6. Cenário de Mudanças Climáticas

3.7.6.1. Vazões máximas

O cálculo de vazões máximas, considerando diferentes tempos de retorno, é essencial para o dimensionamento eficiente de sistemas hidráulicos, garantindo a resiliência e a segurança necessárias diante de variabilidades climáticas e condições extremas. O cálculo das vazões máximas ($Q_{\text{máx}}$) para os tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos foi realizado nas minibacias de localização das estações fluviométricas selecionadas na área de estudo, apresentadas no Produto 4.

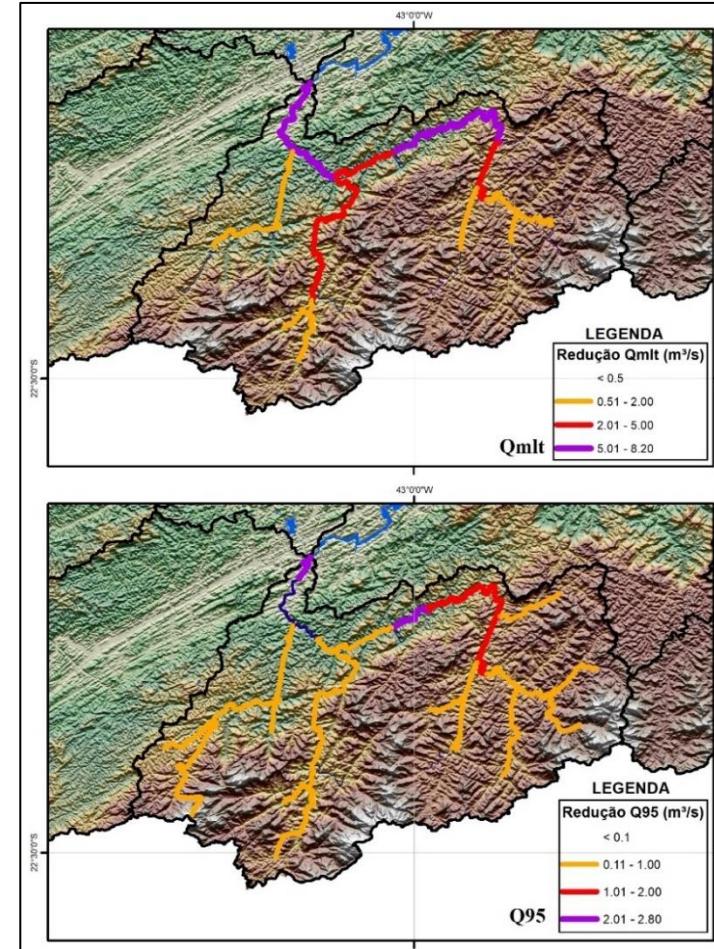


Figura 3.86 - Resultados espaciais da redução das vazões $Q_{m\text{lt}}$ e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-Bacia do Rio Piabanha.

A sub-bacia do Rio Piabanha foi avaliada em 6 locais com estações fluviométricas. Os resultados mostraram alterações médias entre todos os TRs de 17% no curto prazo e 33% no longo prazo. Destaca-se que a sub-bacia apresenta um comportamento médio de alteração variando em até 30% no curto prazo. Já no longo prazo as estações de cabeceira apresentam maiores alteração, no intervalo de 30% a 40%.

Isso significa que as vazões máximas tendem a aumentar na sub-bacia de maneira significativa, tanto no curto prazo quanto no longo prazo. Dessa forma, torna-se extremamente necessário efetivar a gestão de recursos hídricos, o planejamento urbano e o dimensionamento de sistemas hidráulicos considerando as consequências que o aumento das vazões pode trazer. Entre essas consequências estão inundações mais severas e intensas, ampliação das manchas de inundaçao urbana, danos a infraestrutura das cidades, entre outros.

A Tabela 3.20 apresenta os fatores de alteração para o curto e longo prazo, as máximas vazões renaturalizadas ou simuladas no P4 e as suas projeções para o curto e longo prazo. Em complemento, a Figura 3.87 apresenta os resultados de alteração dos TRs considerando as vazões futuras em cenários de mudança climática para o curto e para o longo prazo.

Tabela 3.20 - Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Rio Piabanha.

Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)
TR 10					
58440000	12,7	28,3	452,1	509,5	580
58434000	14,4	36,3	85,5	97,8	116,6
58425000	15,3	29,9	236,7	272,9	307,5
58421100	14,3	30,4	205,6	235	268,1
58420000	13,2	29,9	238,3	269,8	309,6
58405000	12,7	29,4	152,3	171,7	197,1
TR 25					
58440000	15,3	28,2	550,4	634,7	705,7
58434000	14,8	38,8	110,6	126,9	153,5
58425000	19,7	31,9	288	344,7	379,8
58421100	18,8	32,9	248,9	295,7	330,8
58420000	18,3	33,4	285,8	338,1	381,3
58405000	16,6	32	178,4	208	235,5
TR 50					
58440000	16,8	28,8	623,4	728,1	803
58434000	14	39,4	129,2	147,2	180,1
58425000	21,1	31,9	326	394,8	430
58421100	20,1	33	281	337,5	373,7
58420000	20,5	34,6	321	386,8	432,1
58405000	18,4	33,5	197,8	234,2	264
TR 100					
58440000	16,6	29,3	695,8	811,4	899,7
58434000	15	39,7	147,6	169,7	206,2
58425000	22,2	32	363,8	444,5	480,2
58421100	21,5	33,5	312,9	380,1	417,7
58420000	21,7	34,9	356	433,2	480,2
58405000	19,8	34,7	217	260	292,3

** Nas estações sem vazão máxima renaturalizada calculada foram utilizados os dados de vazão máxima simulada no P4.

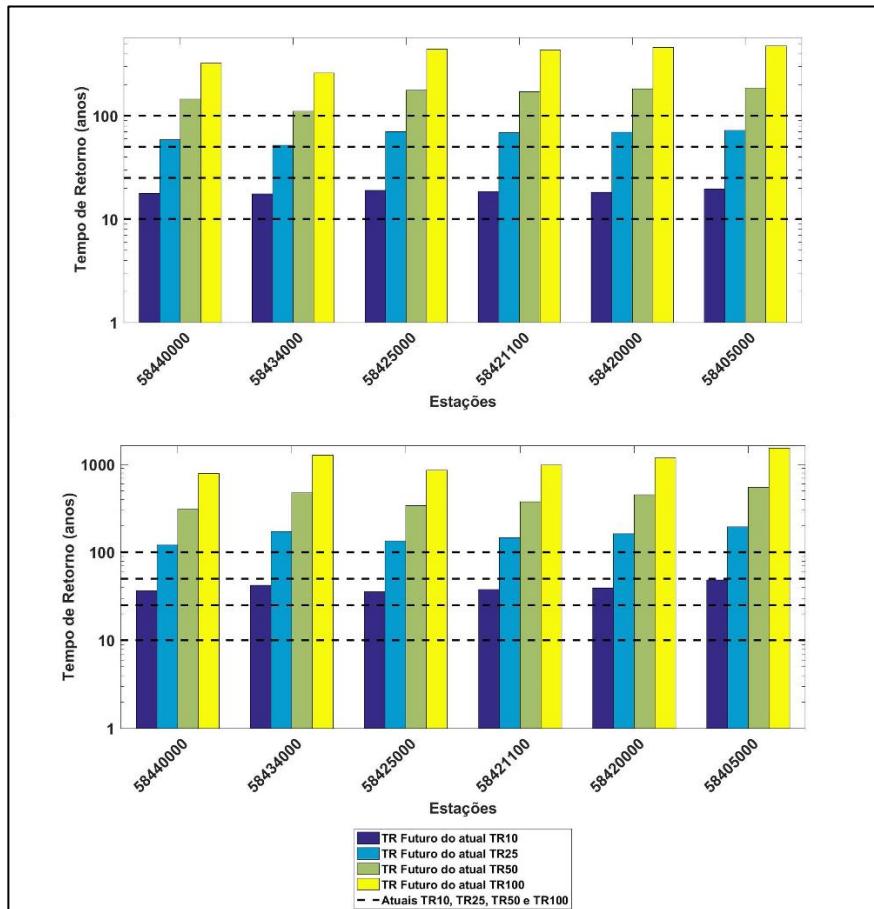


Figura 3.87 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Piabanha.

3.7.6.2. Vazões Mínimas

Também foi estudado o impacto das mudanças climáticas nas vazões de referência para cenários futuros, com o objetivo de fornecer subsídios aos órgãos gestores e aos CBHs para a tomada de decisão e planejamento dos recursos hídricos da BHPS. A Tabela 3.21 mostra a mediana de alteração percentual dos 19 modelos para o curto e para o longo prazo, a vazão atual de referência e as vazões de referência futuradas.

A sub-bacia do Rio Piabanha foi avaliada em 6 locais com estações fluviométricas. Os resultados mostraram reduções médias nas vazões de referência em -6% no curto prazo e -1% no longo prazo. Observa-se que a redução terá maior intensidade no curto prazo. A vazão média de longo período apresentou uma redução no curto prazo e um aumento no longo prazo.

Tabela 3.21 - Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Rio Piabanha.

Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m ³ /s)
Q_{mlt}					
58440000	-6,8	3,2	38,4	35,8	39,6
58434000	-2,9	9,3	3,7	3,6	4,1
58425000	-3,7	6,7	19,1	18,4	20,4
58421100	-2,6	8,2	18	17,5	19,5
58420000	-2,5	8,1	16,4	16	17,8
58405000	-2,3	8	11,3	11	12,2
Q₉₀					
58440000	-5,2	-1,6	13,6	12,9	13,4
58434000	-4,8	-1,8	1,5	1,5	1,5
58425000	-6,5	-3,8	8	7,5	7,7
58421100	-4,8	0,7	7,7	7,3	7,7
58420000	-4,8	0,7	7,2	6,8	7,2
58405000	-4,7	0,7	3,7	3,5	3,7
Q₉₅					
58440000	-4,3	-4,1	11,5	11	11
58434000	-6,3	0,3	1,1	1,1	1,1
58425000	-7	-2,6	6,8	6,3	6,6
58421100	-6,2	1,9	6,6	6,1	6,7
58420000	-6,2	1,8	6,3	5,9	6,4
58405000	-6,3	1,7	3,2	3	3,3
Q_{7,10}					
58440000	-6,7	-6,8	8,6	8	8
58434000	-8,3	-2,6	0,6	0,6	0,6
58425000	-12,6	-10	4,9	4,3	4,4
58421100	-5,2	1	4,8	4,6	4,9
58420000	-5,4	0,8	4,7	4,5	4,8
58405000	-5,6	0,8	2,5	2,3	2,5

3.8. SUB-BACIA DO MÉDIO VALE INFERIOR DO RIO PARAÍBA DO SUL

A sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul está localizada na porção média da BHPS, a nordeste da sub-bacia do Médio Vale, sendo que ao norte do rio Paraíba do Sul, a sub-bacia está situada no estado de Minas Gerais, enquanto a metade sul fica em solo fluminense. O rio principal desta sub-bacia é o rio Paraíba do Sul, o qual recebe contribuições significativas, ao longo do trecho compreendido na área do Médio Vale Inferior, do rio Paquequer e do rio Pirapetinga. O início da sub-bacia ocorre na confluência entre o rio Paraibuna e o rio Paraíba do Sul, e seu exutório ocorre na confluência com o rio Pomba. Um dos pontos mais altos na região das cabeceiras dos afluentes do rio Paraíba do Sul na sub-bacia do Médio Vale Inferior encontra-se a cerca 1.000 metros, e próximo ao exutório da sub-bacia a altitude é de aproximadamente 70 metros. A sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul possui uma média pluviométrica anual de 1.255 mm, sendo a região mais próxima ao exutório a área com menor precipitação; enquanto a região que recebe a maior quantidade de chuva localiza-se ao sul da sub-bacia, próximo à cabeceira do rio Paquequer.

A sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul conta com algumas interferências hidráulicas. Dentre essas estruturas, as de

maior relevância são o Reservatório Furnas, a UHE Simplício e a UHE Ilha dos Pombos, todas localizadas no rio Paraíba do Sul. A UHE Furnas atua regularizando as vazões do rio Paraíba do Sul e enviando por meio de tuneis águas para a UHE Simplício, que funciona em regime de operação a fio d'água. Alguns quilômetros a jusante a água da UHE Simplício retorna ao rio Paraíba do Sul. Mais a jusante está a UHE Ilha dos Pombos, que também opera a fio d'água.

A gestão de recursos hídricos tem como unidade territorial a bacia hidrográfica. No entanto, a área de atuação dos Comitês de Bacia Hidrográfica poderá ser, também, a sub-bacia hidrográfica de tributário do curso de água principal da bacia, ou de tributário desse tributário ou, ainda, um grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas. Além disso, a área de atuação de CBHs estaduais deverá respeitar os limites geográficos dos estados que compõem a bacia hidrográfica do rio federal. Dessa forma, as sub-bacias apresentadas no estudo podem ter seus limites geográficos diferentes das áreas de atuação dos Comitês, conforme observado na Figura 3.88.

Na sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul estão presentes os seguintes CBHs: Preto e Paraibuna, COMPÉ, Baixo Paraíba do Sul, Dois Rios e Piabanha. A divisão entre os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro é feita através do rio Paraíba do Sul. Dessa forma, os comitês localizados na margem direita do rio (CBHs

Rio Dois Rios e Piabanha) estão no estado do Rio de Janeiro, enquanto os comitês da margem direita (COMPÉ, Preto e Paraibuna) estão localizados no estado de Minas Gerais. Perto do exutório da sub-bacia está localizado o comitê do Baixo Paraíba do Sul, também localizado no estado do Rio de Janeiro.



Figura 3.88 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.

3.8.1. Dados Pluviométricos

Na etapa de levantamento de dados pluviométricos realizada para o EDH-PS, foram identificadas 41 estações pluviométricas na área da sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul e suas adjacências, das quais apenas 18 possuíam algum registro de precipitação ao longo do seu período de operação. Contudo, após tratamento e consistência das séries históricas, permaneceram 11 estações no banco de dados consistido, o qual subsidiou as demais etapas do presente estudo. Todas as estações podem ser visualizadas na Figura 3.89.

3.8.2. Dados Fluviométricos

Na fase de levantamento de dados fluviométricos do presente estudo, foram inventariadas 95 estações fluviométricas na área da sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul, porém somente 15 delas possuíam algum dado de vazão. Já na etapa de consistência dos dados hidrológicos, foram removidas do banco de dados oficial estações cujas séries eram muito curtas, apresentavam muitas falhas, ou algum tipo de inconsistência que pudesse comprometer o estudo de disponibilidade hídrica; assim, restaram 9 estações com boa qualidade de dados nesta sub-bacia, para serem utilizadas nas etapas seguintes do EDH-PS. As informações como código, nome, nome do rio, nome do município, localização e área

de drenagem de cada estação podem ser visualizadas no Quadro 3.8. A distribuição espacial das estações pode ser observada na Figura 3.90.

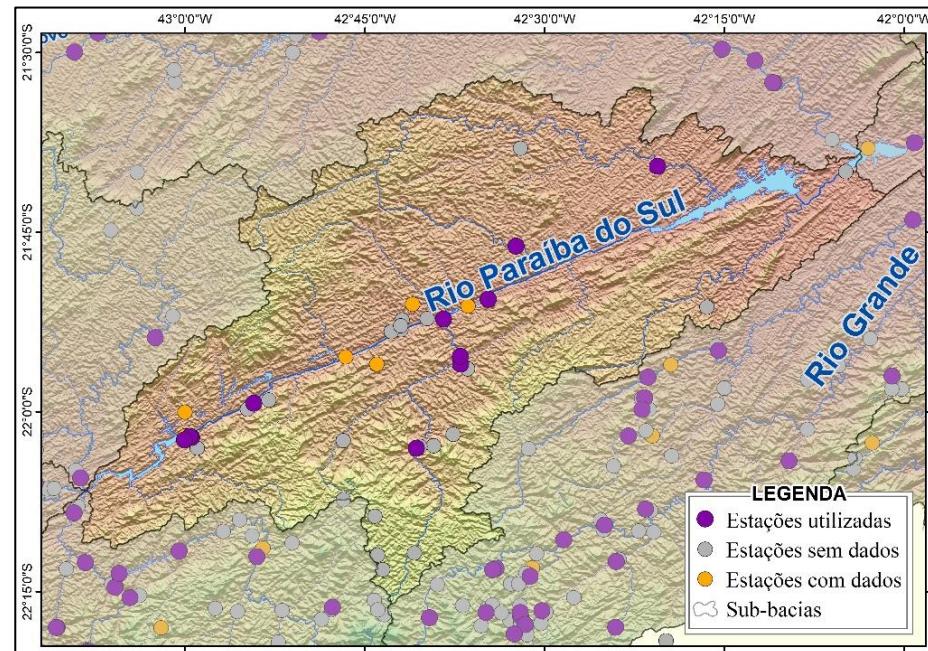


Figura 3.89 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.

Quadro 3.8 – Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.

Estação	Nome	Nome do Rio	Nome do município	Latitude	Longitude	AD (Km ²)
19140	ANTA	RIO PARAÍBA DO SUL	CHIADOR	-22.03	-43.00	30.573
58630030	UHE SIMPLÍCIO ANTA JUSANTE	RIO PARAÍBA DO SUL	SAPUCAIA	-22.03	-42.99	30.573
58651980	UHE ILHA DOS POMBOS	RIO PARAÍBA DO SUL	CARMO	-21.85	-42.60	34.300
19097	ILHA DOS POMBOS	RIO PARAÍBA DO SUL	CARMO	-21.85	-42.61	32.253
58648001	PAQUEQUER	RIO PAQUEQUER	CARMO	-21.88	-42.63	762
58630002	ANTA	RIO PARAÍBA DO SUL	SAPUCAIA	-22.04	-42.99	32.700
58658000	VOLTA GRANDE	RIO ANGÚ	VOLTA GRANDE	-21.77	-42.54	348
58670002	FAZENDA DA BARRA (PIRAPETINGA)	RIO PIRAPETINGA	PIRAPETINGA	-21.66	-42.34	590
58645000	SUMIDOURO	RIO PAQUEQUER	SUMIDOURO	-22.05	-42.68	294

Fonte: ANA (2023).

3.8.3. Renaturalização de vazões

Buscando entender o quanto de água disponível em um rio ainda pode ser usada, foram calculadas as séries de vazões renaturalizadas, através da soma das séries de usos consuntivos totais com as séries observadas nas estações fluviométricas. O objetivo é conhecer a vazão natural dos rios, auxiliando na gestão dos recursos hídricos. Para isso são apresentadas as séries de usos consuntivos específicos anuais e sazonais para a sub-bacia (Figura

3.91) e os percentuais de alteração das vazões de referência Q₉₅ e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões (Figura 3.92).

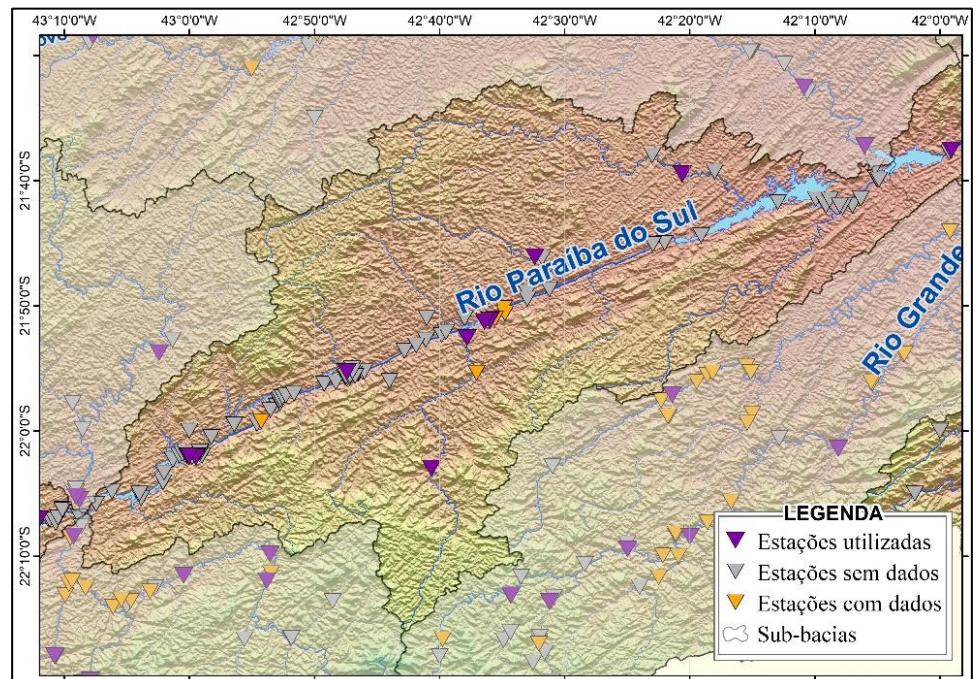


Figura 3.90 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.

Em relação aos gráficos da série de vazões específicas dos usos consuntivos (Figura 3.91), observa-se que na análise anual existem estações com tendência de aumento nos usos, e estações com

comportamento mais constante ao longo dos anos. Na análise sazonal foi percebida uma tendência de aumento no uso consuntivo no período mais seco do ano em relação ao período mais úmido, sendo essa tendência mais expressiva em algumas estações e menos expressiva em outras.

Em seguida, a Figura 3.92 mostra os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões. Ou seja, indica quanto a devolução do uso consuntivo para o hidrograma implica em alteração da vazão de referência avaliada. Observa-se que as porcentagens de aumento variaram de 0,88% a 6,96% para a Q_{m1t} e de 2,18% a 32,68% para a Q_{95} . De maneira geral, as duas estações localizadas em um dos tributários do rio principal apresentaram as maiores taxas de aumento, enquanto nas outras estações as taxas de alteração foram mais baixas.

3.8.4. Estacionariedade das Séries

A análise da estacionariedade das séries de vazões busca entender, ao longo do período analisado, se ocorre uma estabilidade dos dados (comportamento estacionário), uma redução dos valores (tendência negativa) ou um aumento dos valores (tendência positiva). A Figura 3.93 mostra a análise da estacionariedade das estações fluviométricas (no primeiro gráfico) e das estações pluviométricas (no segundo gráfico).

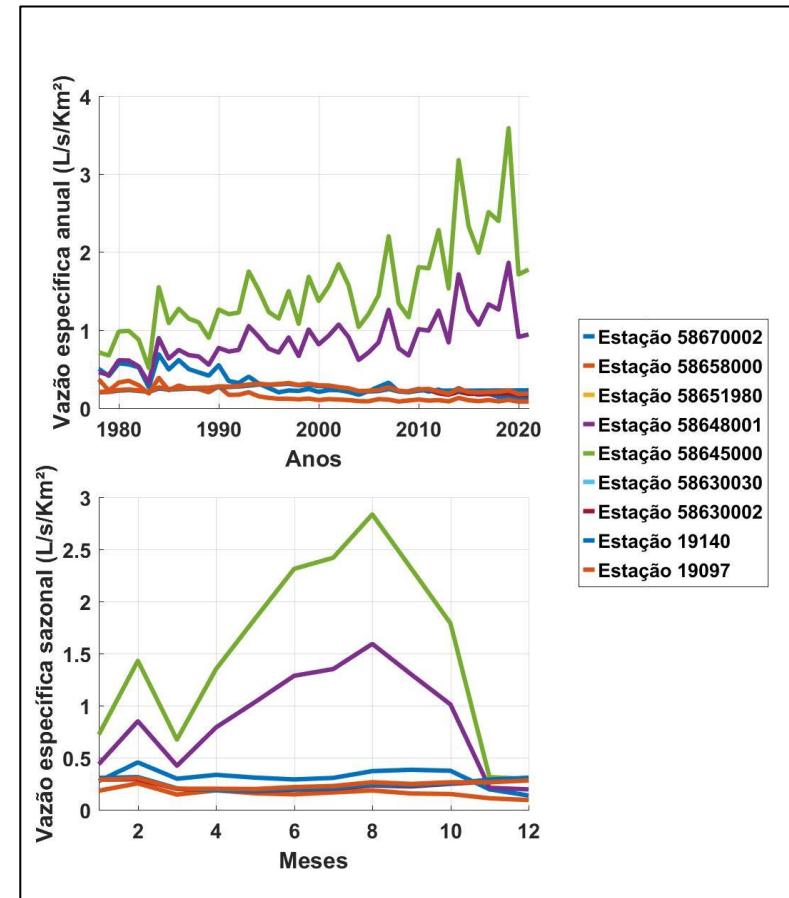


Figura 3.91 – Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.

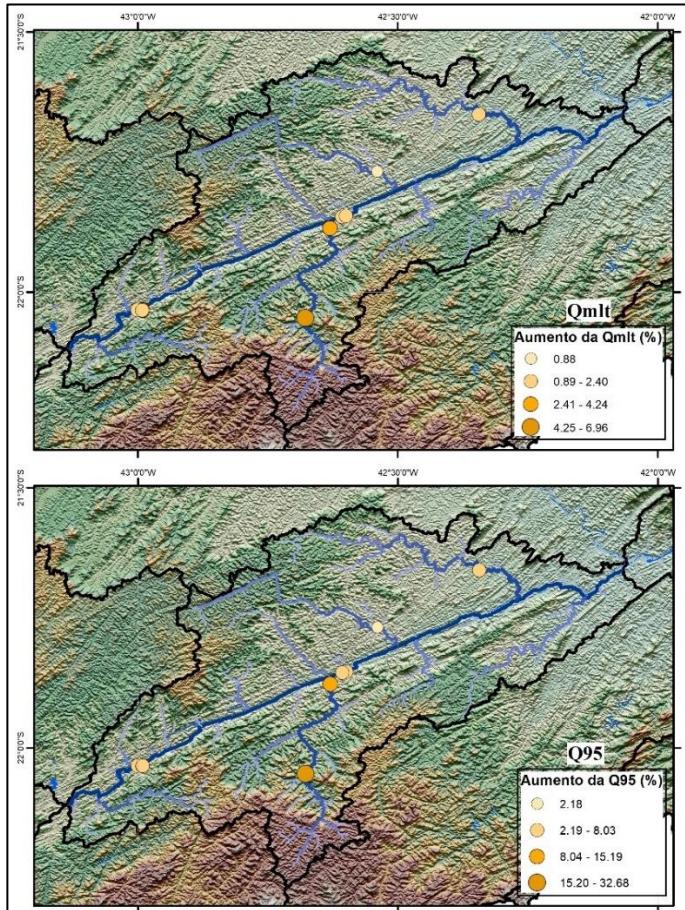


Figura 3.92 – Resultados da alteração da vazão Q_{mIt} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul após a renaturalização.

Nas estações fluviométricas foram avaliados os seguintes índices: vazão média anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada em 5 dias consecutivos, vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos e vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos no período úmido (entre os meses de dezembro a fevereiro). Para as estações pluviométricas foram avaliados os seguintes índices: precipitação total anual, número de dias com precipitação no ano, precipitação diária igual ou superior a 50 mm no ano e precipitação diária máxima em 5 dias consecutivos no ano. Nos resultados das estações fluviométricas, observou-se que todos os índices apresentaram predominância de estações indicando a estacionariedade dos dados.

No restante das estações ocorreu tendência negativa e somente em uma estação ocorreu tendência positiva. Para as estações pluviométricas ocorre a predominância da estacionariedade, com uma estação indicando a tendência negativa, em todos os índices avaliados.

Dessa forma, a maior parte das estações fluviométricas e pluviométricas indicam que não ocorreram grandes alterações nos valores de vazão e precipitação da sub-bacia.

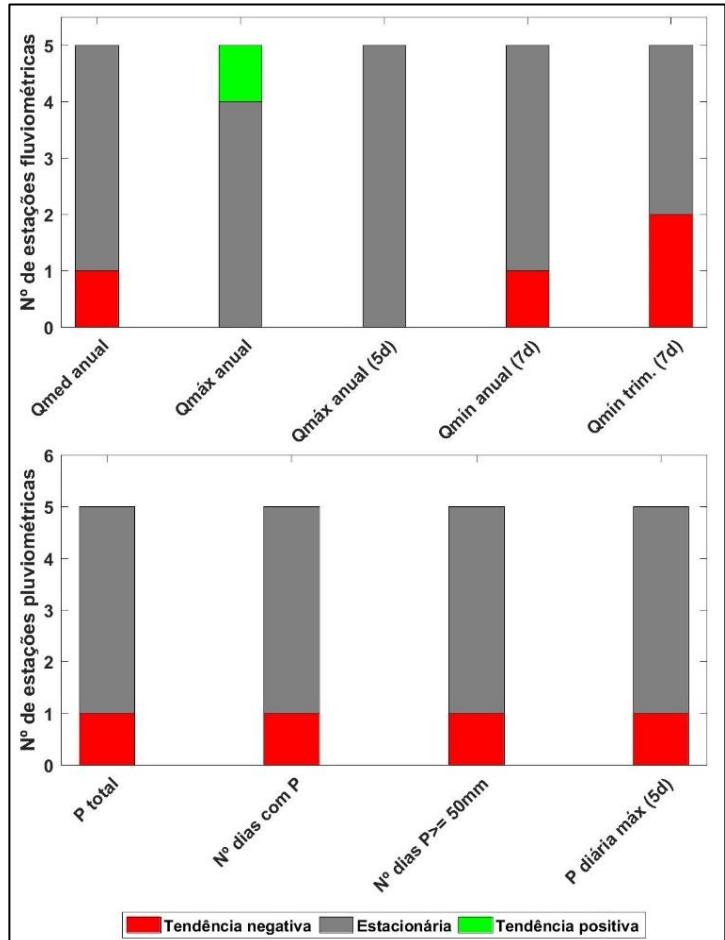


Figura 3.93- Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Dois Rios.

3.8.5. Disponibilidade Hídrica

3.8.5.1. Calibração do modelo

Na Tabela 3.22 podem ser visualizados os valores dos indicadores estatísticos e dos erros percentuais obtidos a partir da calibração do modelo hidrológico MGB em cada estação fluviométrica da sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul. Os resultados obtidos na calibração estão dentro da margem considerada satisfatória para modelos hidrológicos. Na metodologia, é detalhado o significado de cada um dos indicadores utilizados. Destaca-se que, na presente sub-bacia, o menor erro médio foi observado na vazão $Q_{7,10}$, de 0,23%, enquanto o maior erro médio ocorreu na vazão Q_{90} , com -1,7%. Em relação aos indicadores estatísticos, o Nash-Sutcliffe e o Nash-Sutcliffe Logarítmico médios da sub-bacia foram iguais a 0,9, o que indica que os resultados foram muito bons. Os resultados de calibração mostrado para cada estação podem ser verificados com maior nível de detalhe no Produto 4 do presente estudo.

Tabela 3.22 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.

Estação	drenagem (km ²)	Área de drenagem (km ²)	Tamanho da Série (anos)	Nash-Sutcliffe	Nash-Sutcliffe Logarítmico	Erro de Volume (%)	Erro de Q ₉₅ (%)	Erro de Q ₉₀ (%)	Erro de Q _{milt} (%)	Erro de Q _{7,10} (%)
58630030	30.573	4,4	1	1	-3,3	1,8	1,1	-3,3	-	-
58651980	32.253	20,2	0,9	0,9	-3,4	-3,2	-3,9	-3,4	-	-
58630002	30.573	43	1	1	0	0	0	0	0	0
58645000	290	42,7	1	1	-0,1	0,1	0,1	-0,1	0,1	
58648001	756	30,3	0,6	0,6	0,2	-9,2	-9,1	0,2	-2,4	
58658000	285	39,8	1	1	-0,1	0,2	-0,1	-0,1	0,1	
58670002	598	42,8	1	1	-0,6	0	0	-0,6	0	
19140	30.573	43	1	1	0	3,6	2,8	0	3,9	
19097	32.253	26,2	0,9	0,9	-5,2	-3,2	-6,3	-5,2	-0,2	

3.8.5.2. Resultados das Vazões de Referência

Conhecer as vazões de referência é essencial para realizar a gestão responsável dos recursos hídricos, já que elas representam a quantidade de água disponível nos rios. A disponibilidade das vazões de referência na sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul é apresentada na Figura 3.96, onde são mostradas a vazão de longo termo "Q_{milt}", a vazão que é superada ou igualada em 90% do tempo na série histórica "Q₉₀", a vazão superada ou igualada em 95% do tempo "Q₉₅" e a vazão de 7 dias consecutivos com tempo de retorno de 10 anos, "Q_{7,10}". Ainda, na Figura 3.94 é

possível observar o mapa de vazões específicas (m³/s/km²) da Q_{milt} e Q₉₅.

Já o diagrama unifilar, apresentado pela Figura 3.95, mostra com detalhes o comportamento do rio principal e dos seus afluentes, como a ocorrência de hidrelétricas e transposição na sub-bacia. Também são apresentadas as entregas de vazão ao longo dos rios que compõem a sub-bacia, proporcionando uma visão geral e completa dos recursos hídricos. A sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul recebe contribuições de montante, da sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, que está a montante do Reservatório de Furnas. Na sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul ocorre à contribuição de alguns afluentes, sendo os principais o rio Paquequer, seguido pelo rio Pirapetinga e o rio Angu. No exutório da sub-bacia a vazão Q_{milt} é de 435,2 m³/s, a vazão Q₉₅ é de 169,06 m³/s, a vazão Q₉₀ é de 190,4 m³/s e a vazão Q_{7,10} é de 136,7 m³/s.

Por fim, também são apresentados os resultados de vazão de referência na sub-bacia no formato de *Boxplot* para a vazão anual e mensais (Figura 3.97). Os resultados permitem identificar a sazonalidade das vazões de referência na bacia. Devido ao desproporcional número de trechos de pequena área de drenagem na base de resultados, o gráfico somente mostrou resultados de trechos com área de drenagem acima de 200km².

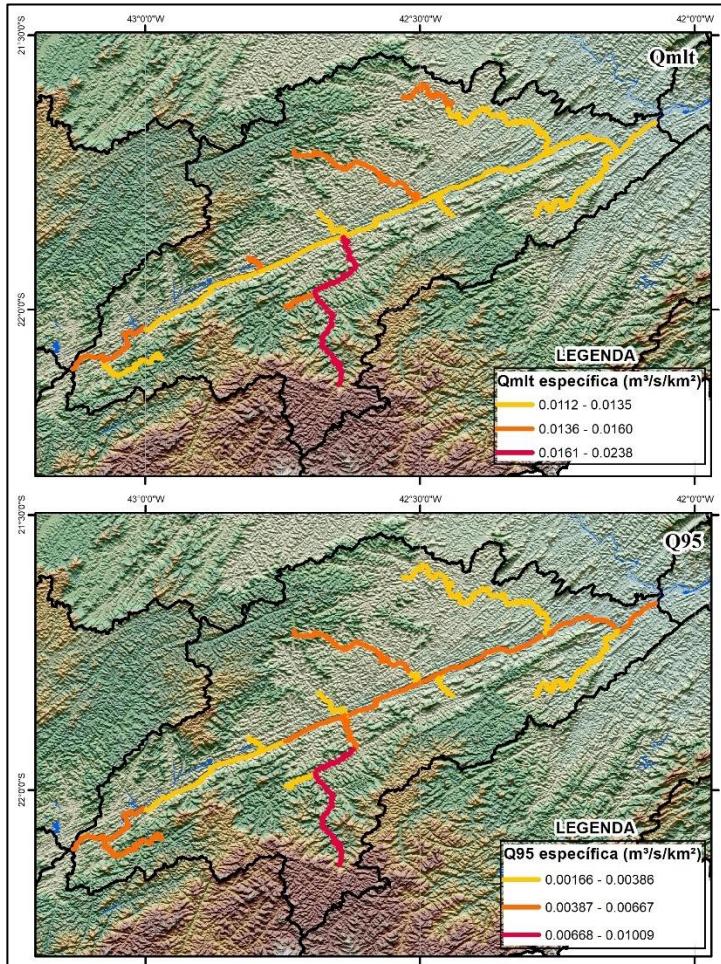


Figura 3.94 - Resultados das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) de referência anuais
Q_{m1t} e Q₉₅.

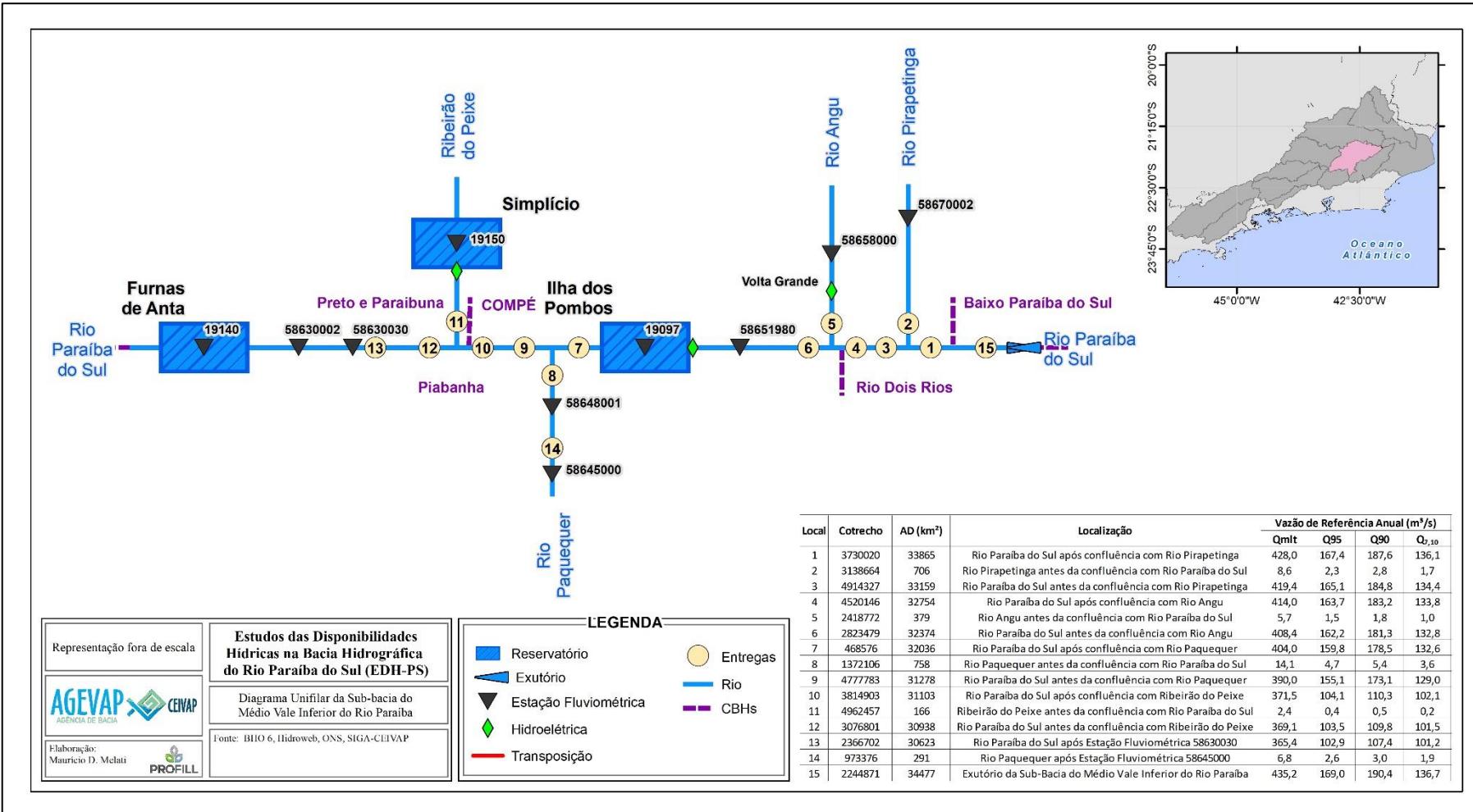


Figura 3.95 - Vazões de entrega (m^3/s) da sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.

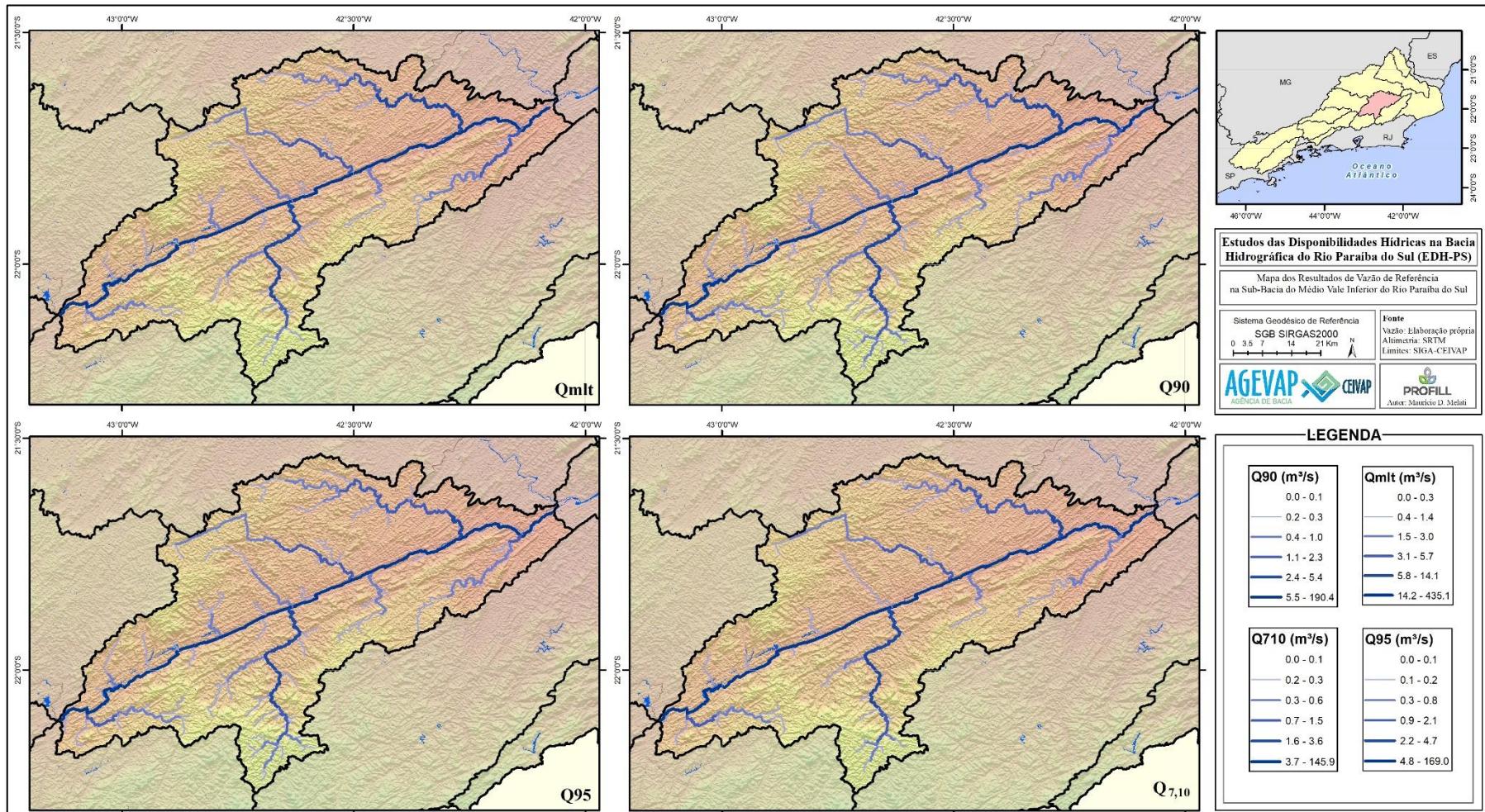


Figura 3.96 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{m_{lt}}, Q₉₀, Q₉₅ e Q_{7,10} na sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.



Figura 3.97 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{m1t} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.

3.8.5.3. Período Crítico

Entre os anos de 2015 e 2021 a BHPS passou pelas anomalias negativas mais intensas em suas vazões médias desde 1960 (período máximo avaliado no estudo), ocasionando na diminuição das vazões por longos períodos. A Figura 3.98 mostra as reduções de vazão verificadas no período crítico considerando as diferenças entre os anos hidrológicos de 1978-2020 e 2014-2020, nas vazões de referência Q_{m1t} (primeiro mapa) e Q_{95} (segundo mapa) anuais. A sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul apresentou reduções que variaram até $223 \text{ m}^3/\text{s}$ na vazão Q_{m1t} , e $43 \text{ m}^3/\text{s}$ na vazão Q_{95} .

3.8.5.4. Impacto das Transposições na Disponibilidade

A sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul estende-se desde o Reservatório Furnas, a montante, até a confluência com o rio da Pomba. Na Figura 3.99 são apresentadas as variações espaciais percentuais de vazão Q_{m1t} e Q_{95} na região caso os volumes transpostos fossem mantidos na BHPS. Ou seja, caso o volume médio regularizado fosse direcionado para a defluência dos reservatórios, para jusante no rio Paraíba do Sul.

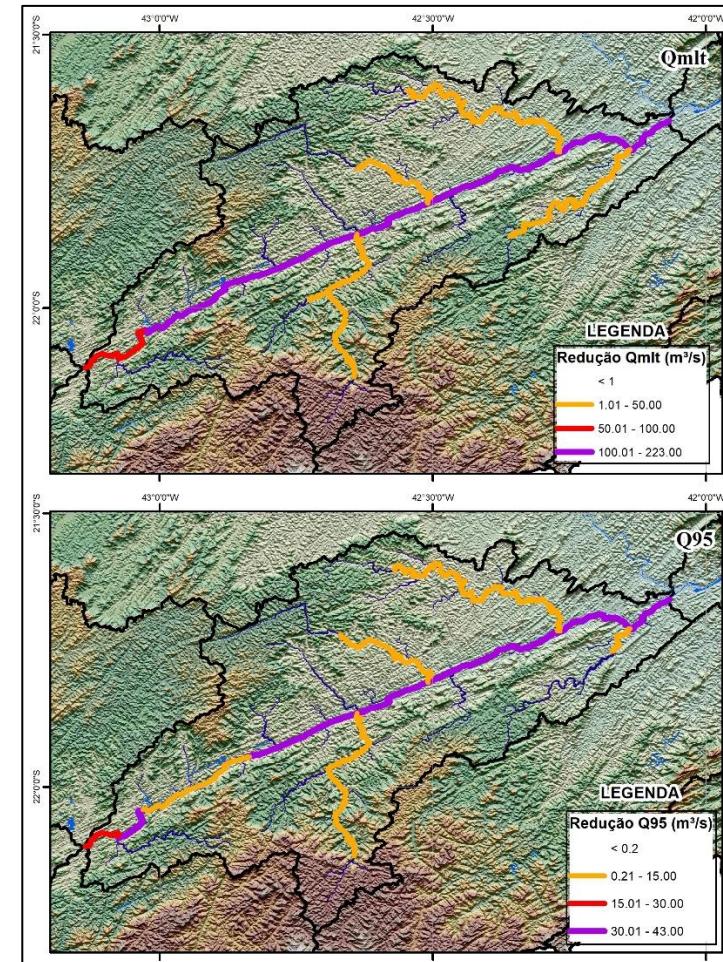


Figura 3.98 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{m1t} e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-Bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.

As porcentagens de alteração observadas nas vazões de referência seguem o padrão de diminuição observado na sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul após o trecho onde ocorre a transposição para o rio Guandu, onde estão as maiores porcentagens. Nos trechos mais a montante do Médio Vale Inferior, as alterações são da ordem de 30,4 a 34% no caso da $Q_{m\text{lt}}$ e da ordem de 72,1 a 124,8% no caso da Q_{95} . As porcentagens de alteração diminuem gradativamente em direção ao exutório da sub-bacia, em ambas as vazões de referência, chegando a porcentagens de 28,3 a 28,8% ($Q_{m\text{lt}}$) e 67,8 a 68,9% (Q_{95}).

3.8.6. Cenário de Mudanças Climáticas

3.8.6.1. Vazões máximas

O cálculo de vazões máximas, considerando diferentes tempos de retorno, é essencial para o dimensionamento eficiente de sistemas hidráulicos, garantindo a resiliência e a segurança necessárias diante de variabilidades climáticas e condições extremas. O cálculo das vazões máximas ($Q_{\text{máx}}$) para os tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos foi realizado nas minibacias de localização das estações fluviométricas selecionadas na área de estudo, apresentadas no Produto 4.

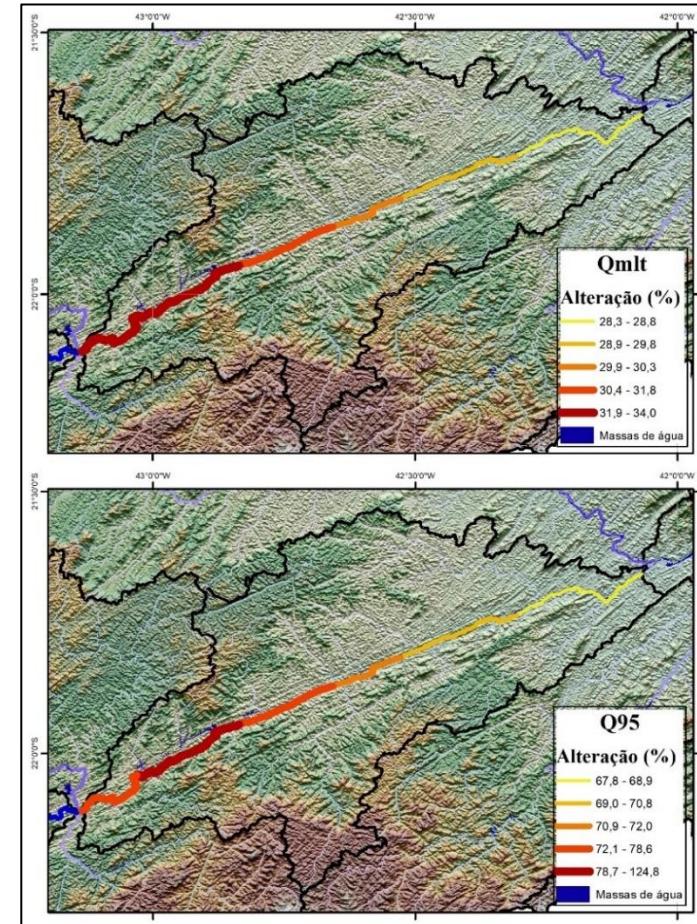


Figura 3.99 - Resultados espaciais do aumento (%) das vazões $Q_{m\text{lt}}$ e Q_{95} anual mantendo os volumes das transposições na BHPS e propagando para jusante na sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.

A sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul teve oito estações avaliadas, tanto no rio principal como nos pequenos tributários. Os resultados mostraram alterações médias entre todos os TRs de 18% no curto prazo e 30% no longo prazo. No curto prazo as estações do rio principal apresentaram alterações no mesmo intervalo, variando de 15% até 30%, para os TRs de 25, 50 e 100 anos. Para o TR de 10 anos as variações foram menores, em até 15%.

No longo prazo as estações localizadas no rio principal apresentaram alterações de vazão máxima dentro do intervalo de 15% a 30%, sendo observadas alterações percentuais maiores nas estações dos tributários. Isso significa que as vazões máximas tendem a aumentar na sub-bacia de maneira significativa, em especial para as estações localizadas ao longo do rio principal no curto prazo e ao longo dos tributários no longo prazo.

Dessa forma, torna-se essencial efetivar a gestão de recursos hídricos, o planejamento urbano e o dimensionamento de sistemas hidráulicos considerando as consequências que o aumento das vazões pode trazer. Entre essas consequências estão inundações mais severas e intensas, ampliação das manchas de inundaçõa urbana, danos a infraestrutura das cidades, entre outros.

A Figura 3.80 apresenta os fatores de alteração para o curto e longo prazo, as máximas vazões renaturalizadas ou simuladas no P4 e as

suas projeções para o curto e longo prazo. Em complemento, a Figura 3.100 apresenta os resultados de alteração dos TRs considerando as vazões futuras em cenários de mudança climática para o curto e para o longo prazo.

Tabela 3.23 - Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.

Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)	
TR 10											
58670002	16,7	39,2	260,4	303,9	362,5	58670002	21,5	41,2	366,9	445,8	518
58658000	5,8	21,5	148,3	156,9	180,2	58658000	12,7	19	222,9	251,2	265,2
58651980	14,2	26,7	2293,4	2619	2905,7	58651980	21,1	24,5	2972,8	3600,1	3701,2
58648001	14,9	35,4	165,4	190	223,9	58648001	22	38,6	239,2	291,8	331,6
58645000	14,6	33,6	136,9	156,9	183	58645000	20,5	36,1	209,7	252,7	285,4
58630030	13,1	28	2176,7	2461,8	2786,1	58630030	19	27,9	2798,2	3329,9	3578,9
58630002	13,1	28	2176,7	2461,8	2786,1	58630002	19	27,9	2798,2	3329,9	3578,9
19140	13,1	28	2171,1	2455,6	2779,1	19140	19	27,9	2785,8	3315,1	3563
19097	14,1	26,7	2296,5	2620,3	2909,7	19097	20,9	24,4	2977,1	3599,3	3703,5
TR 25											
58670002	19,4	40,5	321,5	383,9	451,7	58670002	23,8	42,4	411,9	509,9	586,6
58658000	9,5	19,2	191,1	209,3	227,8	58658000	15,4	18,9	254,4	293,5	302,4
58651980	20,3	27,1	2683,5	3228,2	3410,7	58651980	22,7	24	3260,1	4000,1	4042,5
58648001	20,4	38,7	207,8	250,2	288,2	58648001	23,8	39,1	270,4	334,8	376,2
58645000	18,8	34,7	178,7	212,3	240,8	58645000	21,8	37,2	240,5	292,9	330
58630030	18,1	29,3	2533,5	2992,1	3275,8	58630030	21,2	28,5	3061	3709,9	3933,4
58630002	18,1	29,3	2533,5	2992,1	3275,8	58630002	21,2	28,5	3061	3709,9	3933,4
19140	18,1	29,3	2524	2980,8	3263,5	19140	21,2	28,5	3045,6	3691,3	3913,6
19097	20,2	27	2687,2	3230,1	3412,8	19097	22,5	23,7	3264,8	3999,4	4038,6

** Nas estações sem vazão máxima renaturalizada calculada foram utilizados os dados de vazão máxima simulada no P4.

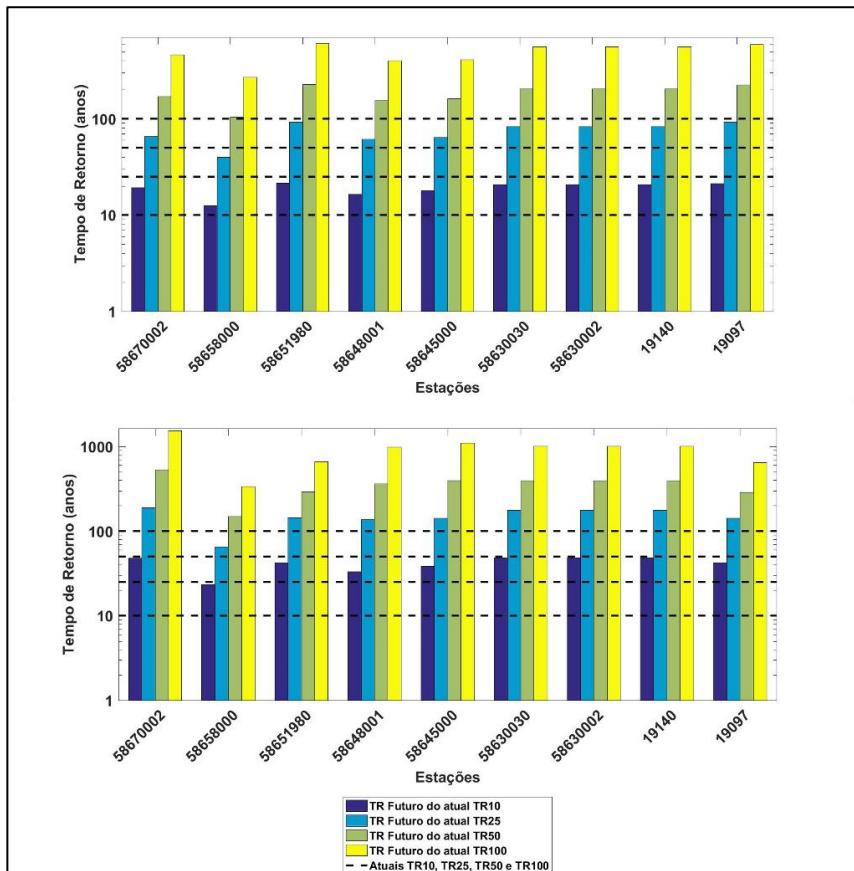


Figura 3.100 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.

3.8.6.2. Vazões Mínimas

Também foi estudado o impacto das mudanças climáticas nas vazões de referência para cenários futuros, com o objetivo de fornecer subsídios aos órgãos gestores e aos CBHs para a tomada de decisão e planejamento dos recursos hídricos da BHPS. A Tabela 3.24 mostra a mediana de alteração percentual dos 19 modelos para o curto e para o longo prazo, a vazão atual de referência e as vazões de referência futuradas.

A sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul teve diversas estações avaliadas, tanto no rio principal como nos pequenos tributários. Os resultados mostram uma redução média de -8% no curto prazo e -3% no longo prazo na disponibilidade de vazões mínimas da sub-bacia. A vazão média de longo termo apresentou uma redução no curto prazo e um aumento no longo prazo. Destaca-se que as estações apresentaram uma média de redução em -9% nas vazões com permanência em 95% do tempo no curto prazo.

Tabela 3.24 – Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.

Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m ³ /s)	Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m ³ /s)
Q_{mlt}											
58670002	2,4	9,6	7,5	7,7	8,2	58670002	-9,8	1,3	1,8	1,6	1,8
58658000	-2	7,8	5	4,9	5,4	58658000	-9,4	1,6	1,3	1,2	1,3
58651980	-3,1	7	406,5	393,9	434,8	58651980	-8,4	-2,4	161,4	147,8	157,5
58648001	-4,4	6	14	13,4	14,8	58648001	-8,8	-0,7	4,7	4,3	4,7
58645000	-4,1	5,9	6,8	6,5	7,2	58645000	-6,7	-0,2	2,6	2,4	2,6
58630030	-3,4	6,9	365,4	353	390,6	58630030	-8,6	-3	102,9	94,1	99,8
58630002	-3,4	6,9	365,4	353	390,6	58630002	-8,6	-3	102,9	94,1	99,8
19140	-3,1	3,6	365,3	354	378,4	19140	-12,5	-5,7	102,9	90	97
19097	-1,8	6	406,5	399,3	430,8	19097	-6,2	-3,1	161,4	151,4	156,5
Q₉₀											
58670002	-8,1	-3,5	2,4	2,2	2,3	58670002	-7,1	-6,9	1,2	1,2	1,2
58658000	-8,6	-2	1,6	1,5	1,6	58658000	-12,5	-8,6	0,9	0,8	0,9
58651980	-7,1	-3,1	180,4	167,6	174,9	58651980	-5,6	-7,2	132,7	125,2	123,1
58648001	-7,5	-2,7	5,3	4,9	5,2	58648001	-9,1	-2,7	3,6	3,2	3,5
58645000	-6,1	-1,4	3	2,8	3	58645000	-5,6	0,5	1,9	1,8	1,9
58630030	-7	-3	107,4	99,9	104,1	58630030	-5,5	-6,8	101,2	95,6	94,3
58630002	-7	-3	107,4	99,9	104,1	58630002	-5,5	-6,8	101,2	95,6	94,3
19140	-9,2	-4,9	107,4	97,5	102,1	19140	-10,3	-6,7	101,1	90,7	94,4
19097	-1,8	0,9	180,4	177,1	182	19097	-6,7	0	132,7	123,8	132,7
Q₉₅											
Q_{7,10}											

3.9. SUB-BACIA DO RIO POMBA

A sub-bacia do Rio Pomba está localizada na porção norte da BHPS, sendo que a maior parte da sua área está compreendida no estado de Minas Gerais, porém uma porção ao sul da sub-bacia, próximo ao seu exutório, situa-se no Rio de Janeiro. O rio Pomba é o rio principal desta sub-bacia e recebe contribuições significativas do rio Xopotó e do rio Novo. Além disso, o rio Pomba deságua no rio Paraíba do Sul em uma parte mais baixa da BHPS, já na sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul. A cabeceira do rio Pomba encontra-se a uma altitude de 700 metros e sua foz a 60 metros. A sub-bacia possui uma média pluviométrica anual de 1.390 mm, sendo a região mais próxima ao exutório a área com menor precipitação; enquanto a região que recebe a maior quantidade de chuva é a cabeceira do rio Pomba. A sub-bacia conta com diversas interferências hidráulicas, dentre essas estruturas, a de maior relevância é a UHE Barra do Braúna, localizada no rio Pomba. Esta usina funciona em regime de operação a fio d'água, portanto, não regulariza de forma significativa as vazões.

A gestão de recursos hídricos tem como unidade territorial a bacia hidrográfica. No entanto, a área de atuação dos Comitês de Bacia Hidrográfica poderá ser, também, a sub-bacia hidrográfica de tributário do curso de água principal da bacia, ou de tributário desse

tributário ou, ainda, um grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas. Além disso, a área de atuação de CBHs estaduais deverá respeitar os limites geográficos dos estados que compõem a bacia hidrográfica do rio federal. Dessa forma, as sub-bacias apresentadas no estudo podem ter seus limites geográficos diferentes das áreas de atuação dos Comitês, conforme observado na Figura 3.101. Na sub-bacia do Rio Pomba estão presentes os seguintes CBHs: COMPÉ e Baixo Paraíba do Sul. O COMPÉ está presente na maior parte da área da sub-bacia, e o CBH Baixo Paraíba do Sul corta a sub-bacia nos limites entre os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, em uma área menor.

3.9.1. Dados Pluviométricos

Na etapa de levantamento de dados pluviométricos realizada para o EDH-PS, foram identificadas 117 estações pluviométricas na área da sub-bacia do Rio Pomba e suas adjacências, das quais apenas 32 possuíam algum registro de precipitação ao longo do seu período de operação. Contudo, após tratamento e consistência das séries históricas, permaneceram 24 estações no banco de dados consistido, o qual subsidiou as demais etapas do presente estudo. Todas as estações podem ser visualizadas na Figura 3.102.

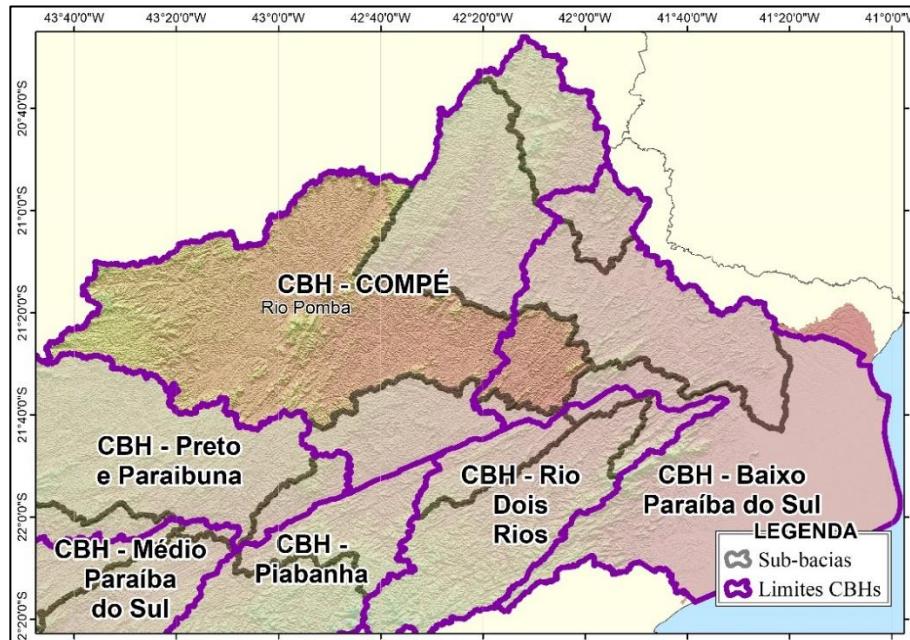


Figura 3.101 - Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Rio Pomba.

3.9.2. Dados Fluirométricos

Na fase de levantamento de dados fluirométricos do presente estudo, foram inventariadas 103 estações fluirométricas na área da sub-bacia do Rio Pomba, porém somente 41 delas possuíam algum dado de vazão. Já na etapa de consistência dos dados hidrológicos, foram removidas do banco de dados oficial estações cujas séries

eram muito curtas, apresentavam muitas falhas, ou algum tipo de inconsistência que pudesse comprometer o estudo de disponibilidade hídrica; assim, restaram 15 estações com boa qualidade de dados nesta sub-bacia, para serem utilizadas nas etapas seguintes do EDH-PS. A distribuição espacial das estações pode ser observada na Figura 3.103. As informações como código, nome, nome do rio, nome do município, localização e área de drenagem de cada estação podem ser visualizadas no Quadro 2.2.

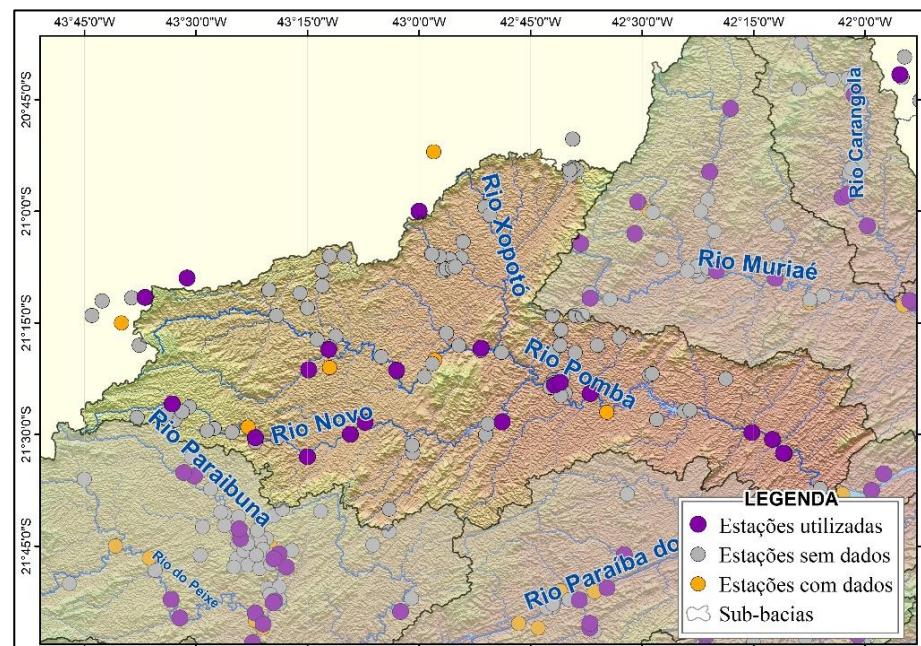


Figura 3.102 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Rio Pomba.

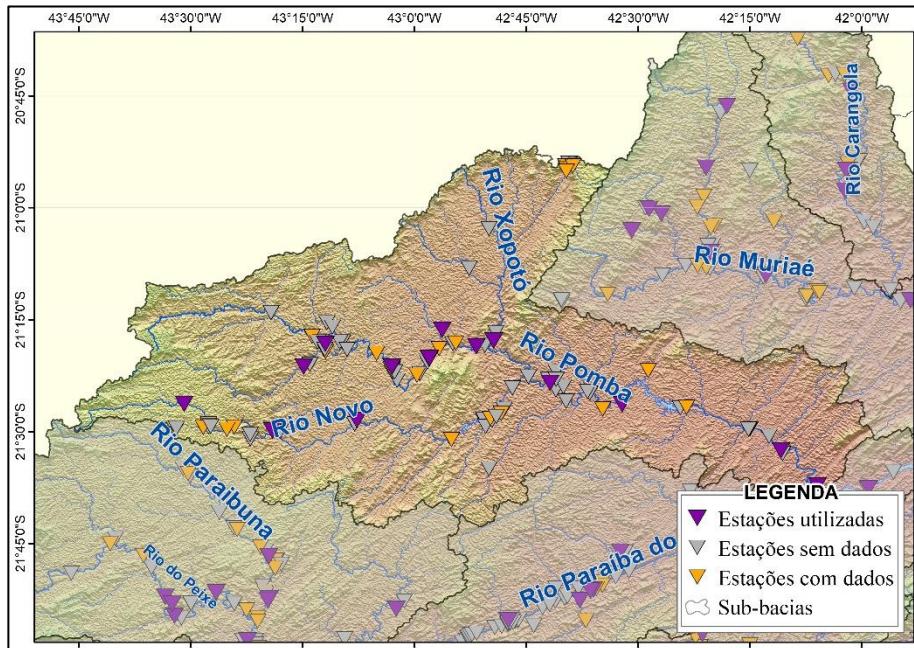


Figura 3.103 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Pomba.

3.9.3. Renaturalização de vazões

Buscando entender o quanto de água disponível em um rio ainda pode ser usada, foram calculadas as séries de vazões renaturalizadas, através da soma das séries de usos consuntivos totais com as séries observadas nas estações fluviométricas. O objetivo é conhecer a vazão natural dos rios, auxiliando na gestão

dos recursos hídricos. Para isso são apresentadas as séries de usos consuntivos específicos anuais e sazonais para a sub-bacia (Figura 3.104) e os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões (Figura 3.105).

Quadro 3.9 - Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Pomba.

Estação	Nome	Nome do rio	Nome do município	Latitude	Longitude	AD (Km ²)
58731000	PCH IVAN BOTELHO II JUSANTE.	RIO POMBA	GUARANI	-21,34	-42,97	1.790
58735000	ASTOLFO DUTRA	RIO POMBA	ASTOLFO DUTRA	-21,31	-42,86	2.350
58788050	VALE DO POMBA	RIO POMBA	CATAGUASES	-21,44	-42,54	6.859
58790000	SANTO ANTÔNIO DE PÁDUA	RIO POMBA	SANTO ANTÔNIO DE PÁDUA	-21,54	-42,18	8.210
58770000	CATAGUASES	RIO POMBA	CATAGUASES	-21,39	-42,70	5.880
58792100	APERIBÉ	RIO POMBA	APERIBÉ	-21,62	-42,10	8.530
58755000	RIO NOVO	RIO NOVO	RIO NOVO	-21,47	-43,13	835
58731700	PCH IVAN BOTELHO I RIO PARAOPÉBA	RIO PARAOPÉBA	ASTOLFO DUTRA	-21,27	-42,94	347
58750000	PIAU	RIO PIAU	PIAU	-21,50	-43,32	490
58731300	PCH ZÉ TUNIN MONTANTE	RIO POMBA	GUARANI	-21,34	-42,97	1.810
58730001	GUARANI	RIO POMBA	GUARANI	-21,36	-43,05	1.650
58753080	PCH ANNA MARIA MONTANTE	RIO PINHO	SANTOS DUMONT	-21,44	-43,51	95,7
58710000	USINA ITUERÉ	RIO POMBA	RIO POMBA	-21,31	-43,20	784
58720000	TABULEIRO	RIO FORMOSO	TABULEIRO	-21,35	-43,25	322
58736000	BARRA DO XOPOTÓ	RIO XOPOTÓ	ASTOLFO DUTRA	-21,30	-42,82	1.280

Fonte: ANA (2023).

Em relação aos gráficos da série de vazões específicas dos usos consuntivos (Figura 3.104), observa-se na análise anual que a sub-bacia apresenta, de maneira geral, dois grupos de estações com comportamentos semelhantes entre si, sendo um grupo de estações com usos mais baixos e que variam pouco ao longo dos anos, e o outro grupo de estações com usos de grande variação ao longo dos anos. Já na análise sazonal, percebeu-se uma tendência de aumento no uso consuntivo no período mais seco em relação ao período mais úmido.

Em seguida, a Figura 3.105 mostra os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões. Ou seja, indica quanto a devolução do uso consuntivo para o hidrograma implica em alteração da vazão de referência avaliada. Observa-se que as porcentagens de aumento variaram de 0,22% a 4,02% para a Q_{m1t} e de 0,56% a 53,17% para a Q_{95} . As estações localizadas nas regiões de cabeceira e no oeste da sub-bacia apresentaram as menores taxas de aumento e as maiores taxas de aumento foram em estações localizadas no rio principal em sua porção leste, próximo ao exutório e em dois tributários localizados ao norte da bacia.

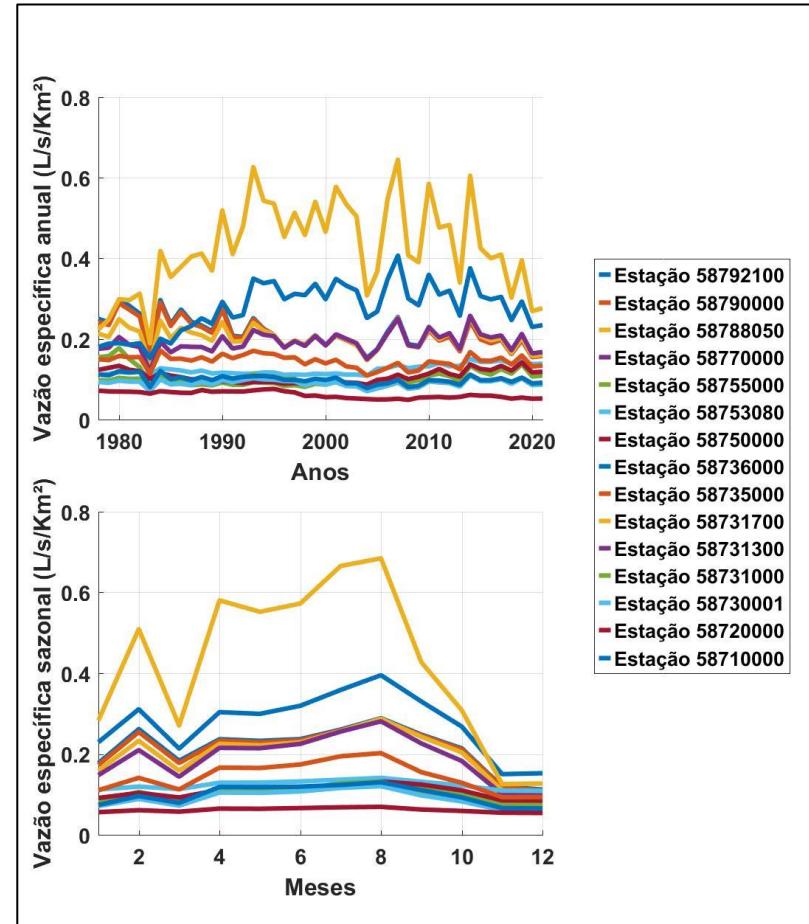


Figura 3.104 - Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Rio Pomba.

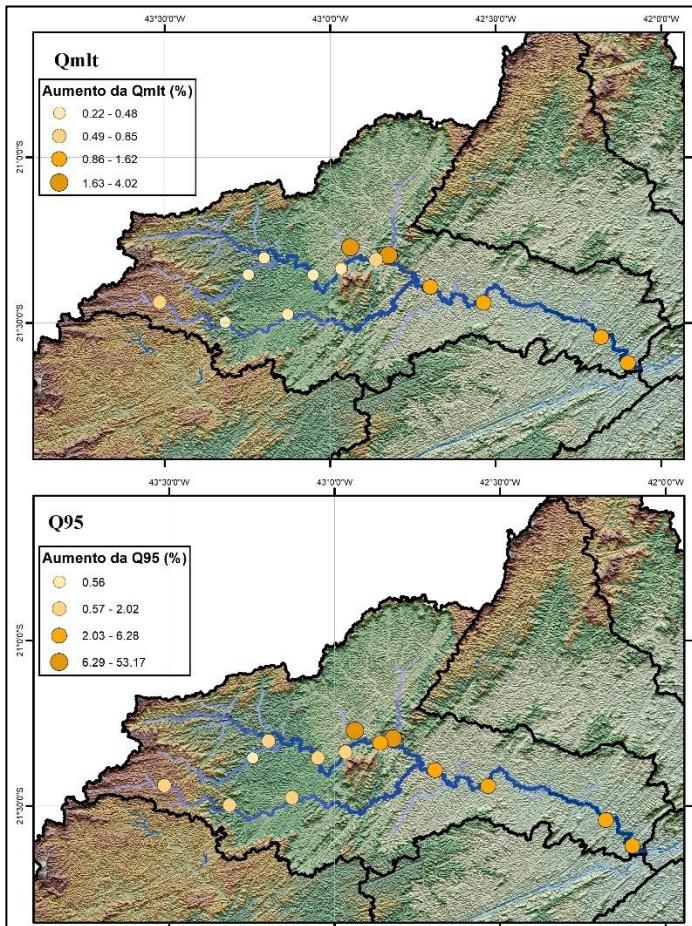


Figura 3.105 – Resultados da alteração da vazão Q_{mlt} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a sub-bacia do Rio Pomba após a renaturalização.

3.9.4. Estacionariedade das Séries

A análise da estacionariedade das séries de vazões busca entender, ao longo do período analisado, se ocorre uma estabilidade dos dados (comportamento estacionário), uma redução dos valores (tendência negativa) ou um aumento dos valores (tendência positiva). A Figura 3.106 mostra a análise da estacionariedade das estações fluviométricas (no primeiro gráfico) e das estações pluviométricas (no segundo gráfico).

Nas estações fluviométricas foram avaliados os seguintes índices: vazão média anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada em 5 dias consecutivos, vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos e vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos no período úmido (entre os meses de dezembro a fevereiro). Para as estações pluviométricas foram avaliados os seguintes índices: precipitação total anual, número de dias com precipitação no ano, precipitação diária igual ou superior a 50 mm no ano e precipitação diária máxima em 5 dias consecutivos no ano.

Analizando os índices das estações fluviométricas, 3 deles apresentaram predominância de estações com comportamento estacionário, enquanto somente 1 índice apresentou tendência negativa e nenhuma estação apresentou tendência positiva nos

resultados. Grande parte das estações pluviométricas indicaram a ocorrência de estacionariedade em três dos quatro índices. Em complemento, no índice do número de dias com precipitação ao ano, o resultado abrangeu as três possibilidades, com estações indicando tendência positiva, tendência negativa e estacionariedade.

Dessa forma, grande parte das estações fluviométricas indicam que não ocorreram grandes alterações nos valores das vazões média e máxima da sub-bacia. Entretanto, nas vazões mínimas ocorre uma tendência de diminuição dos valores de vazão. As estações pluviométricas indicam que não ocorreram grandes alterações nos valores de precipitação na sub-bacia.

3.9.5. Disponibilidade Hídrica

3.9.5.1. Calibração do modelo

Na Tabela 3.25 podem ser visualizados os valores dos indicadores estatísticos e dos erros percentuais obtidos a partir da calibração do modelo hidrológico MGB em cada estação fluviométrica da sub-bacia do Rio Pomba. Os resultados obtidos na calibração estão dentro da margem considerada satisfatória para modelos hidrológicos. Na metodologia, é detalhado o significado de cada um dos indicadores utilizados.

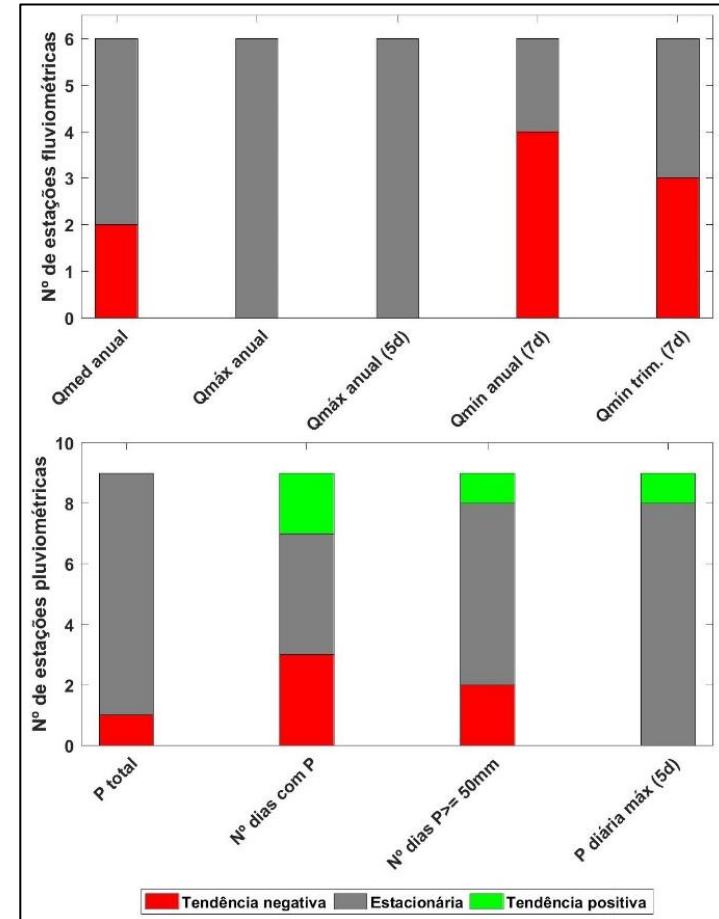


Figura 3.106 - Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Pomba.

Destaca-se que, na presente sub-bacia, o menor erro médio foi observado na vazão Q_{95} , de -0,86%, enquanto o maior erro médio ocorreu na vazão $Q_{7,10}$, com 1,6%. Em relação aos indicadores estatísticos, o Nash-Sutcliffe e o Nash-Sutcliffe Logarítmico médios da sub-bacia foram iguais a 0,8, o que indica que os resultados foram muito bons. Os resultados de calibração mostrado para cada estação podem ser verificados com maior nível de detalhe no Produto 4 do presente estudo.

3.9.5.2. Resultados das Vazões de Referência

Conhecer as vazões de referência é essencial para realizar a gestão responsável dos recursos hídricos, já que elas representam a quantidade de água disponível nos rios. A disponibilidade das vazões de referência na sub-bacia do Rio Pomba é apresentada na Figura 3.109, onde são mostradas a vazão de longo termo “ Q_{milt} ”, a vazão que é superada ou igualada em 90% do tempo na série histórica “ Q_{90} ”, a vazão superada ou igualada em 95% do tempo “ Q_{95} ” e a vazão de 7 dias consecutivos com tempo de retorno de 10 anos, “ $Q_{7,10}$ ”. Ainda, na Figura 3.107 é possível observar o mapa de vazões específicas ($m^3/s/km^2$) da Q_{milt} e Q_{95} .

Tabela 3.25 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Rio Pomba.

Estação	Área de drenagem (km^2)	Tamanho da Série (anos)	Nash-Sutcliffe	Nash-Sutcliffe Logarítmico	Erro de Volume (%)	Erro de Q_{90} (%)	Erro de Q_{95} (%)	Erro de Q_{milt} (%)	Erro de $Q_{7,10}$ (%)
58731700	347	5,4	0,6	0,6	-3,9	-4,8	1,5	-3,9	-
58710000	784	40,8	1	1	0	0	0	0	0
58720000	318	40,7	1	1	-0,1	-0,2	0	-0,1	0,1
58730001	1.641	43	1	1	0	0	0	0	0
58731000	1.781	9,1	0,8	0,8	-2,3	-0,1	-3,9	-2,3	-
58731300	1.782	6,7	0,3	0,6	8,9	4,2	8,8	8,9	-
58735000	2.330	43	0,7	0,8	7	9,8	6,1	7	1,2
58736000	1.281	31,4	1	1	-0,8	0,8	0,1	-0,8	2,3
58750000	488	29,5	0,5	0,7	1,5	2	0,5	1,5	-0,8
58753080	217	6,7	1	1	0	0,2	0,2	0	-
58755000	805	42,7	0,6	0,6	-0,3	-16,4	-15,5	-0,3	7,1
58770000	5.878	42,5	0,7	0,8	1,1	-4,8	-10,7	1,1	-1,1
58788050	6.859	11,5	0,7	0,6	-3,7	-8,8	-10,8	-3,7	-
58790000	8.219	23,8	0,7	0,7	-0,5	-4,7	-10,3	-0,5	5,8
58792100	8.541	5,5	0,7	0,7	8	10	10,7	8	-

Já o diagrama unifilar, apresentado pela Figura 3.108, mostra com detalhes o comportamento do rio principal e dos seus afluentes, como a ocorrência de hidrelétricas e transposição na sub-bacia. Também são apresentadas as entregas de vazão ao longo dos rios que compõem a sub-bacia, proporcionando uma visão geral e completa dos recursos hídricos.

Ao longo do rio principal ocorre um aumento das vazões, devido à contribuição dos seus afluentes, onde observa-se que o rio Novo apresenta os maiores valores de contribuição ao rio Pomba, seguido pelo rio Xopotó, rio Formoso, rio Paraopeba e o ribeirão São João, em termos de Q_{m1t} . No exutório da sub-bacia, onde o rio Pomba tem confluência para o rio Paraíba do Sul, a vazão Q_{m1t} é de $124,9 \text{ m}^3/\text{s}$, a vazão Q_{95} é de $35,3 \text{ m}^3/\text{s}$, a vazão Q_{90} é de $42,1 \text{ m}^3/\text{s}$ e a vazão $Q_{7,10}$ é de $25,4 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por fim, também são apresentados os resultados de vazão de referência na sub-bacia no formato de *Boxplot* para a vazão anual e mensais (Figura 3.109). Os resultados permitem identificar a sazonalidade das vazões de referência na bacia. Devido ao desproporcional número de trechos de pequena área de drenagem na base de resultados, o gráfico somente mostrou resultados de trechos com área de drenagem acima de 200km^2 .

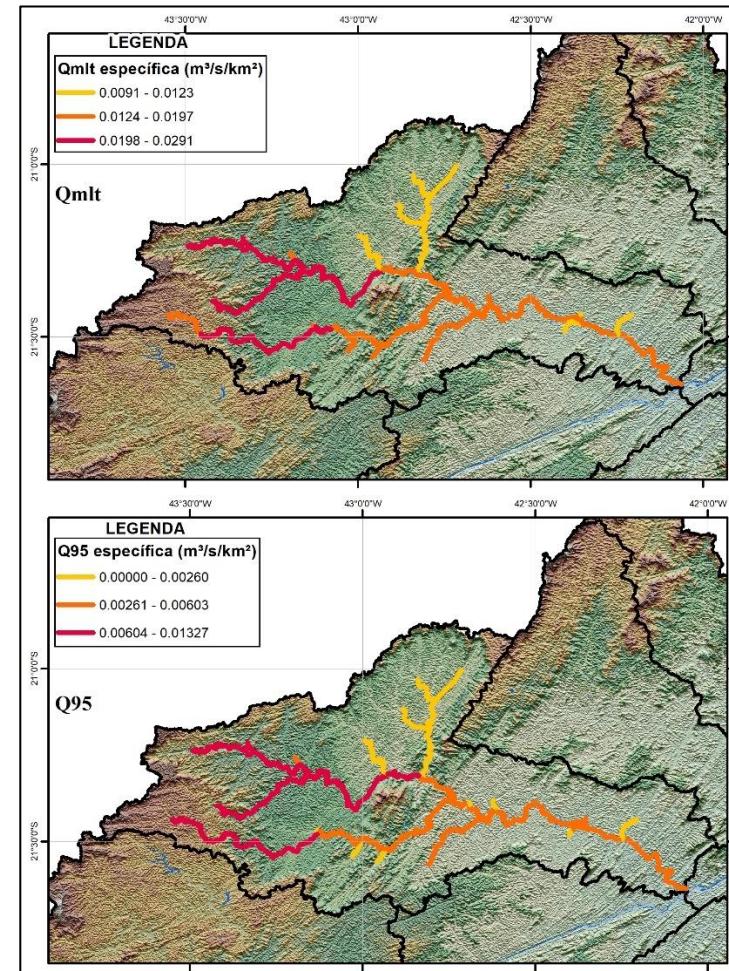


Figura 3.107 - Resultados das vazões específicas ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) de referência anuais Q_{m1t} e Q_{95} .

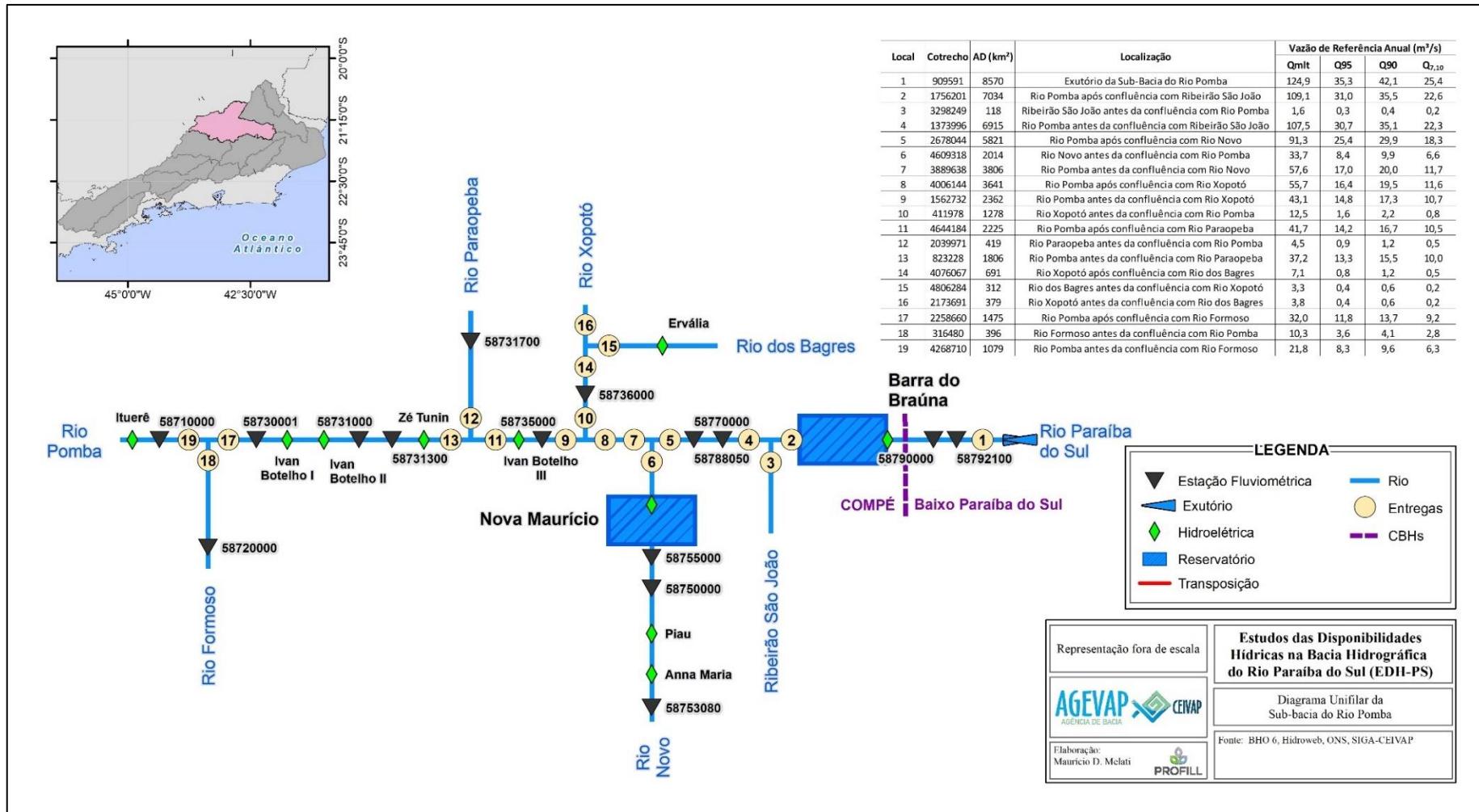


Figura 3.108 - Vazões de entrega (m³/s) da sub-bacia do Rio Pomba.

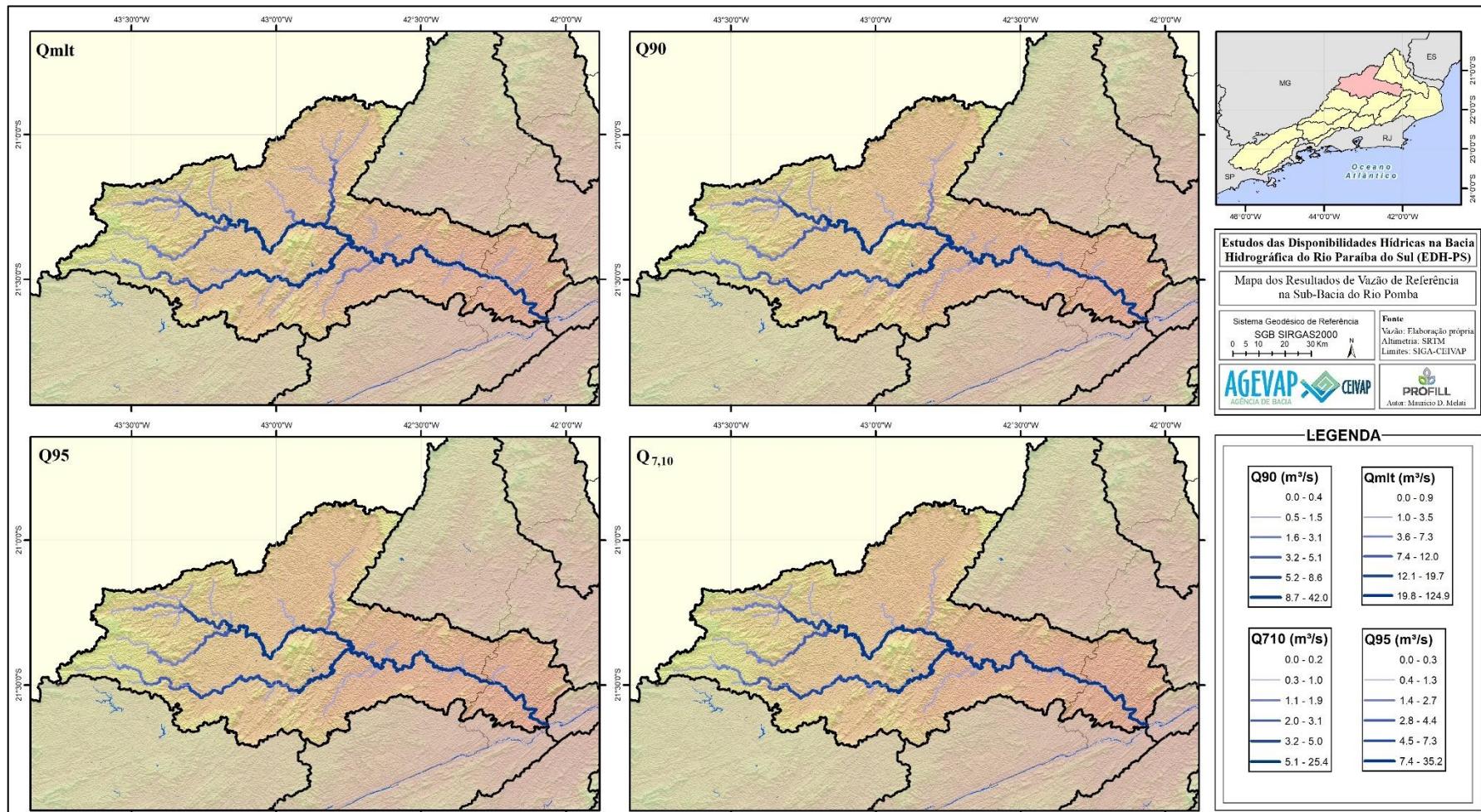


Figura 3.109 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{mlt}, Q₉₀, Q₉₅ e Q_{7,10} na sub-bacia do Rio Pomba.



Figura 3.110 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{m10} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Pomba.

3.9.5.3. Período Crítico

Entre os anos de 2015 e 2021 a BHPS passou pelas anomalias negativas mais intensas em suas vazões médias desde 1960 (período máximo avaliado no estudo), ocasionando na diminuição das vazões por longos períodos. A Figura 3.111 mostra as reduções de vazão verificadas no período crítico considerando as diferenças entre os anos hidrológicos de 1978-2020 e 2014-2020, nas vazões de referência Q_{m1t} (primeiro mapa) e Q_{95} (segundo mapa) anuais. A sub-bacia do Rio Pomba apresentou reduções que variaram até 29 m³/s na vazão Q_{m1t} , e 7,4 m³/s na vazão Q_{95} , indicando uma tendência de diminuição de ambas as vazões de maneira crescente ao longo do rio principal.

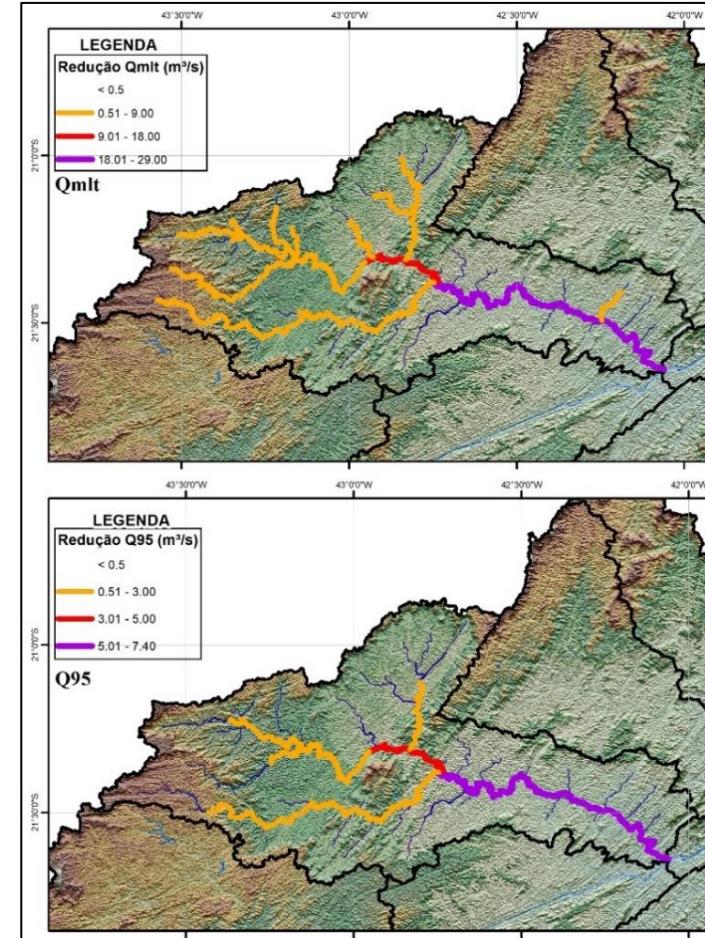


Figura 3.111 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{m1t} e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-bacia do Rio Pomba.

3.9.6. Cenário de Mudanças Climáticas

3.9.6.1. Vazões Máximas

O cálculo de vazões máximas, considerando diferentes tempos de retorno, é essencial para o dimensionamento eficiente de sistemas hidráulicos, garantindo a resiliência e a segurança necessárias diante de variabilidades climáticas e condições extremas. O cálculo das vazões máximas ($Q_{máx}$) para os tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos foi realizado nas minibacias de localização das estações fluviométricas selecionadas na área de estudo, apresentadas no Produto 4.

A sub-bacia do Rio Pomba foi avaliada em 14 locais com estações fluviométricas, cuja maioria localiza-se ao longo do rio da Pomba. Os resultados mostraram alterações médias entre todos os TRs de 8% no curto prazo e 31% no longo prazo. Algumas estações apresentaram variações negativas de vazão para o curto prazo, indicando a redução nos valores de vazão. No longo prazo as alterações médias da bacia foram mais altas nas estações de cabeceira da sub-bacia, com destaque para o TR de 100 anos, com várias estações no intervalo de 40% a 50% de aumento de vazões máximas.

Isso significa que as vazões máximas tendem a aumentar na sub-bacia de maneira significativa, em especial para as estações localizadas na região de cabeceira no longo prazo. Dessa forma, torna-se essencial efetivar a gestão de recursos hídricos, o planejamento urbano e o dimensionamento de sistemas hidráulicos considerando as consequências que o aumento das vazões pode trazer, em especial para o longo prazo. Entre essas consequências estão inundações mais severas e intensas, ampliação das manchas de inundaçao urbana, danos a infraestrutura das cidades, entre outros.

A Tabela 3.26 apresenta os fatores de alteração para o curto e longo prazo, as máximas vazões renaturalizadas ou simuladas no P4 e as suas projeções para o curto e longo prazo. Em complemento, a Figura 3.112 apresenta os resultados de alteração dos TRs considerando as vazões futuras em cenários de mudança climática para o curto e para o longo prazo.

Tabela 3.26 – Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Rio Pomba.

Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)	Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)
TR 10											
58792100	-2	21,9	1336,7	1310	1629,4	58792100	-0,9	21,5	1835,7	1819,1	2230,3
58790000	-1	21,6	1292	1279,1	1571,1	58790000	0,7	22,9	1780,4	1792,9	2188,2
58788050	-0,3	20,6	1175	1171,5	1417	58788050	0,9	21,3	1619,2	1633,8	1964,1
58770000	-2,6	21,1	933,6	909,3	1130,6	58770000	0,2	24,3	1272,3	1274,8	1581,4
58755000	6,6	26,3	154,2	164,4	194,8	58755000	13,7	29,2	206,2	234,4	266,3
58753080	-0,8	20,9	44,3	43,9	53,5	58753080	-0,6	21,1	60,2	59,8	72,9
58750000	0,1	26,2	122	122,1	153,9	58750000	6,7	30,4	168,2	179,5	219,4
58735000	12,2	38,3	401,2	450,2	554,9	58735000	19,2	44,2	547,9	653,1	790,1
58731700	-1,7	22,9	48,8	48	60	58731700	1,5	22,3	67,9	68,9	83,1
58731300	11	37,7	409,3	454,3	563,6	58731300	18,1	43,1	572,6	676,2	819,4
58731000	11	37,7	409,3	454,3	563,6	58731000	18,1	43,1	572,6	676,2	819,4
58730001	6,2	36,6	302	320,7	412,5	58730001	16,2	40	400,9	465,8	561,2
58720000	8,9	32,9	163,3	177,8	217	58720000	15,1	35	234,2	269,6	316,2
58710000	6,5	39,7	213,4	227,3	298,1	58710000	16,6	39,6	296,6	345,9	414,1
TR 25											
58792100	-0,5	21,6	1623,2	1615	1973,8	58792100	-1,5	21,3	2046,6	2015,9	2482,5
58790000	0,4	21,9	1572,4	1578,7	1916,8	58790000	1,2	23,6	1986,9	2010,8	2455,9
58788050	0,5	21	1430	1437,2	1730,3	58788050	1,4	21,6	1807	1832,3	2197,3
58770000	-0,5	23,5	1128	1122,4	1393,1	58770000	1	24,7	1415,5	1429,6	1765,1
58755000	11,6	29,2	184	205,4	237,8	58755000	14,9	28,6	228,1	262,1	293,3
58753080	-0,9	20	53,4	52,9	64,1	58753080	0,6	21,3	66,9	67,3	81,2
58750000	5	29,2	148,5	156	191,9	58750000	8,1	31,3	187,8	203	246,6
58735000	17,5	43,7	485,4	570,4	697,6	58735000	20,5	44,5	610	735	881,4
58731700	0	22,7	59,8	59,8	73,4	58731700	1,4	21,9	76	77	92,6
58731300	16,3	41,8	503	585	713,3	58731300	19,4	43,1	641,6	766,1	918,2
58731000	16,3	41,8	503	585	713,3	58731000	19,4	43,1	641,6	766,1	918,2
58730001	12,2	38,3	358,8	402,5	496,2	58730001	19,4	41,4	442,7	528,6	626
58720000	12,9	34,7	204	230,3	274,8	58720000	16,9	35	264,2	308,9	356,7
58710000	12,9	38,6	261,2	294,9	362	58710000	19,1	40,6	331,8	395,2	466,5

** Nas estações sem vazão máxima renaturalizada calculada foram utilizados os dados de vazão máxima simulada no P4.

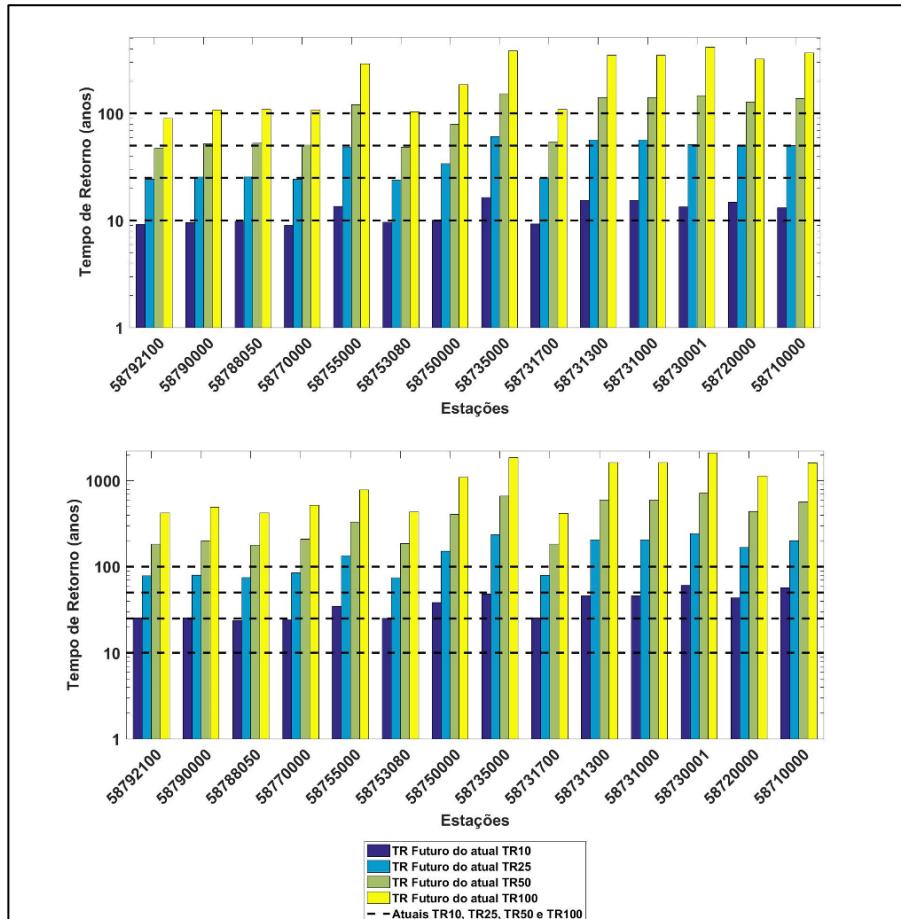


Figura 3.112 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Pomba.

3.9.6.2. Vazões Mínimas

Também foi estudado o impacto das mudanças climáticas nas vazões de referência para cenários futuros, com o objetivo de fornecer subsídios aos órgãos gestores e aos CBHs para a tomada de decisão e planejamento dos recursos hídricos da BHPS. A Tabela 3.27 mostra a mediana de alteração percentual dos 19 modelos para o curto e para o longo prazo, a vazão atual de referência e as vazões de referência futuradas.

A sub-bacia do Rio Pomba foi avaliada em 14 locais com estações fluviométricas, cuja maioria localiza-se ao longo do rio da Pomba. Os resultados mostram reduções médias nas vazões mínimas de referência no curto prazo, com -11%, e no longo prazo, com -8%. As reduções serão mais significativas no período curto, porém se manterão no período longo, em menor intensidade. Destaca-se a homogeneidade nos resultados das taxas de diminuição, impactando todas as vazões de referência.

Tabela 3.27 – Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Rio Pomba.

Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m³/s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m³/s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m³/s)	Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m³/s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m³/s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m³/s)
			Q _{mlt}						Q ₉₅		
58792100	-8,3	5,4	124,6	114,3	131,3	58792100	-8,8	-6,3	35	31,9	32,8
58790000	-8,6	5,3	121,5	111,1	127,9	58790000	-8,4	-7	34	31,1	31,6
58788050	-9,8	5,1	106,6	96,2	112,1	58788050	-8,6	-7	30,4	27,8	28,3
58770000	-10,5	4,9	91,7	82,1	96,2	58770000	-8,6	-6,9	26,5	24,2	24,7
58755000	-6	4	17	16	17,7	58755000	-6,8	-2,5	5,2	4,9	5,1
58753080	-7,8	3,2	4,2	3,9	4,3	58753080	-5,7	-5,4	1,7	1,6	1,6
58750000	-6,4	3	11,3	10,6	11,6	58750000	-6,4	-3,2	4,4	4,1	4,2
58735000	-6,6	5,3	42,9	40,1	45,2	58735000	-6,5	-5,1	14,8	13,8	14
58731700	-10,9	3,1	3,8	3,3	3,9	58731700	-11,9	-15,8	0,8	0,7	0,6
58731300	-6	5,6	37	34,8	39	58731300	-6,2	-3,9	13,2	12,4	12,7
58731000	-6	5,6	37	34,8	39	58731000	-6,2	-3,9	13,2	12,4	12,7
58730001	-5,8	5,7	34	32	35,9	58730001	-5,7	-3,5	12,8	12,1	12,3
58720000	-4,1	5	8,5	8,2	9	58720000	-5,4	-3,2	3,1	3	3
58710000	-5,4	5,9	16,9	16	17,9	58710000	-5,7	-1,7	6,5	6,1	6,4
			Q ₉₀						Q _{7,10}		
58792100	-10,1	-6,1	41,6	37,4	39,1	58792100	-10,5	-10,8	25,2	22,5	22,5
58790000	-10,7	-6,3	40	35,7	37,5	58790000	-10,2	-9,8	24,5	22	22,1
58788050	-10,4	-6,6	35	31,3	32,7	58788050	-9	-9,6	22,2	20,2	20,1
58770000	-10,5	-7,3	30,3	27,2	28,1	58770000	-9,1	-10,7	19,2	17,4	17,1
58755000	-7,5	-4,1	6,1	5,7	5,9	58755000	-8,1	-5	4	3,7	3,8
58753080	-6,6	-2,6	1,9	1,8	1,8	58753080	-8,8	-8,9	1,3	1,2	1,2
58750000	-6,8	-3,6	5,1	4,7	4,9	58750000	-6,8	-3,7	3,3	3,1	3,2
58735000	-9,3	-4,7	17,2	15,6	16,4	58735000	-45,6	-46,4	0,8	0,4	0,4
58731700	-12,6	-11,7	1	0,9	0,9	58731700	-8	-6,7	10,7	9,9	10
58731300	-8,3	-4,4	15,4	14,2	14,8	58731300	-17,6	-26,1	0,4	0,4	0,3
58731000	-8,3	-4,4	15,4	14,2	14,8	58731000	-7,8	-5,1	10	9,2	9,5
58720000	-6,1	-2,2	3,7	3,4	3,6	58720000	-7,8	-4,5	9,8	9,1	9,4
58710000	-5,7	-3,2	7,6	7,2	7,4	58710000	-4,8	-5,6	2,6	2,4	2,4

3.10. SUB-BACIA DO RIO DOIS RIOS

A sub-bacia do Rio Dois Rios está localizada em uma porção mais à leste da BHPS, porém ao sul do rio Paraíba do Sul, sendo que a sub-bacia fica integralmente situada no estado do Rio de Janeiro. O rio Dois Rios é o rio principal desta sub-bacia, o qual surge da confluência do rio Grande com o rio Negro. Além disso, o rio Dois Rios deságua rio Paraíba do Sul na sub-bacia do Baixo Vale. A cabeceira do rio Grande encontra-se a uma altitude de 800 metros e na foz da sub-bacia a altitude é de aproximadamente 35 metros. A sub-bacia do Rio Dois Rios possui uma média pluviométrica anual de 1.354 mm, sendo a região mais próxima ao exutório a área com menor precipitação; enquanto a região que recebe a maior quantidade de chuva localiza-se próximo à cabeceira do rio Grande. A sub-bacia do Rio Dois Rios não possui interferências hidráulicas relevantes, como transposições, reservatórios e grandes hidrelétricas. Há, entretanto, alguns aproveitamentos hidrelétricos de menor escala com pouca influência nos estudos desenvolvidos.

A gestão de recursos hídricos tem como unidade territorial a bacia hidrográfica. No entanto, a área de atuação dos Comitês de Bacia Hidrográfica poderá ser, também, a sub-bacia hidrográfica de tributário do curso de água principal da bacia, ou de tributário desse tributário ou, ainda, um grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas

contíguas. Além disso, a área de atuação de CBHs estaduais deverá respeitar os limites geográficos dos estados que compõem a bacia hidrográfica do rio federal. Dessa forma, as sub-bacias apresentadas no estudo podem ter seus limites geográficos diferentes das áreas de atuação dos Comitês, conforme observado na Figura 3.136. Na sub-bacia do Rio Dois Rios está presente o CBH de mesmo nome da sub-bacia.

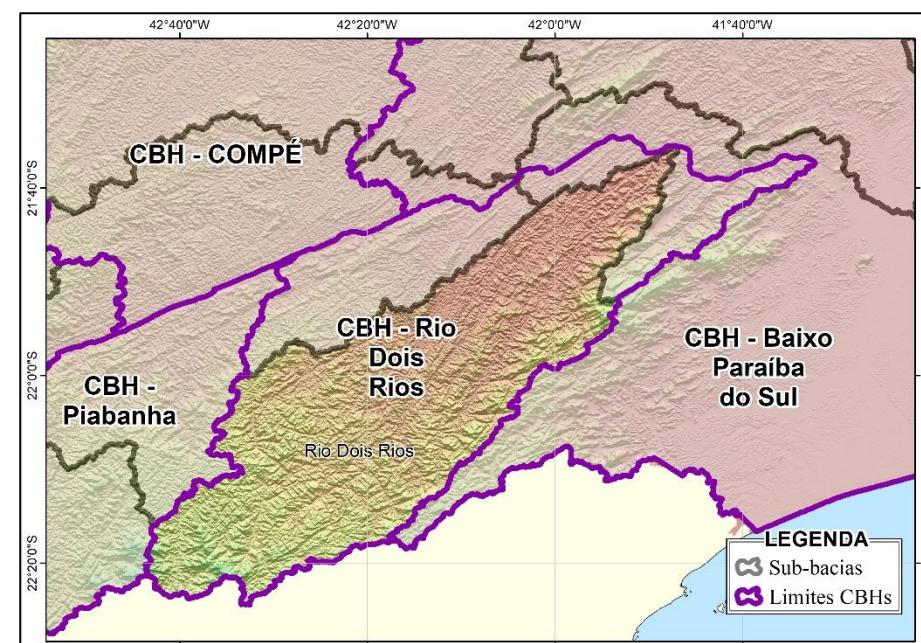


Figura 3.113 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Rio Dois Rios.

3.10.1. Dados Pluviométricos

Na etapa de levantamento de dados pluviométricos realizada para o EDH-PS, foram identificadas 107 estações pluviométricas na área da sub-bacia do Rio Dois Rios e suas adjacências, das quais apenas 46 possuíam algum registro de precipitação ao longo do seu período de operação. Contudo, após tratamento e consistência das séries históricas, permaneceram 35 estações no banco de dados consistido, o qual subsidiou as demais etapas do presente estudo. Todas as estações podem ser visualizadas na Figura 3.114.

3.10.2. Dados Fluviométricos

Na fase de levantamento de dados fluviométricos do presente estudo, foram inventariadas 57 estações fluviométricas na área da sub-bacia do Rio Dois Rios, porém somente 36 delas possuíam algum dado de vazão. Já na etapa de consistência dos dados hidrológicos, foram removidas do banco de dados oficial estações cujas séries eram muito curtas, apresentavam muitas falhas, ou algum tipo de inconsistência que pudesse comprometer o estudo de disponibilidade hídrica; assim, restaram 9 estações com boa qualidade de dados nesta sub-bacia, para serem utilizadas nas etapas seguintes do EDH-PS. As informações como código, nome, nome do rio, nome do município, localização e área de drenagem de cada estação podem ser visualizadas no Quadro 3.10. A

distribuição espacial das estações pode ser observada na Figura 3.115.

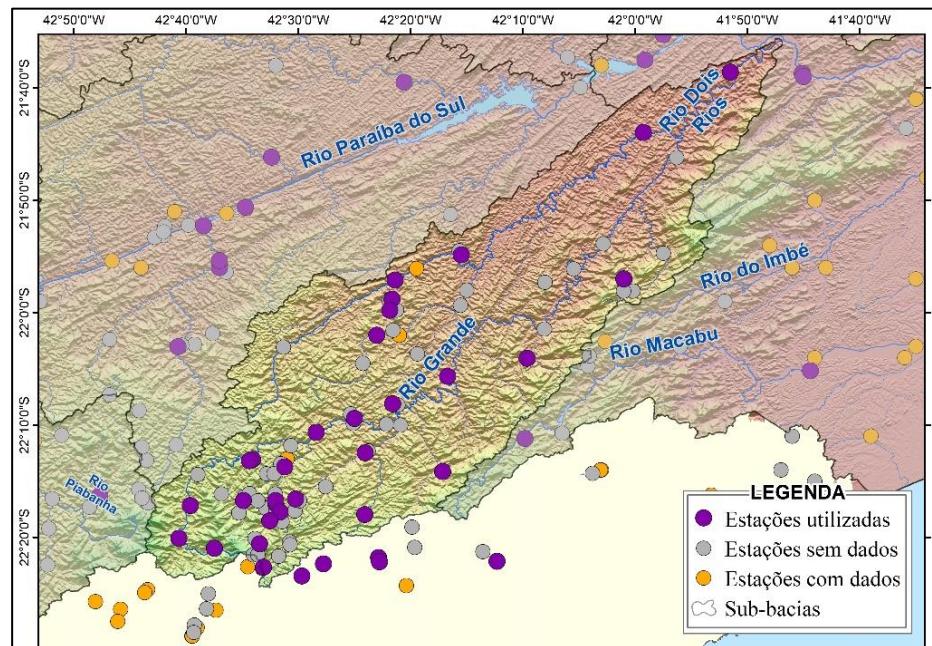


Figura 3.114 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Rio Dois Rios.

Quadro 3.10 – Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Dois Rios.

Estação	Nome	Nome do Rio	Nome do município	Latitud e	Longitude	AD (Km ²)
58850000	PIMENTEL	RIO GRANDE	SÃO FIDÉLIS	-21,77	-41,94	1.810
58846000	MANUEL DE MORAIS	RIO GRANDE	SANTA MARIA MADALENA	-22,02	-42,13	1.370
58870000	BARRA DO RIO NEGRO	RIO NEGRO	ITAOCARA	-21,73	-41,95	1.120
58874000	DOIS RIOS	RIO DOIS RIOS	SÃO FIDÉLIS	-21,64	-41,86	3.120
58829000	PONTE BERSOT	RIO GRANDE	BOM JARDIM	-22,14	-42,33	963
58827000	BOM JARDIM	RIO GRANDE	BOM JARDIM	-22,16	-42,42	553
58857000	ALDEIA	RIO NEGRO	CANTAGALO	-21,95	-42,36	350
58826000	CONSELHEIRO PAULINO	RIO BENGALA	NOVA FRIBURGO	-22,23	-42,52	170
58825000	PONTE ESTRADA DONA MARIANA	RIO GRANDE	NOVA FRIBURGO	-22,22	-42,57	234

Fonte: ANA (2023).

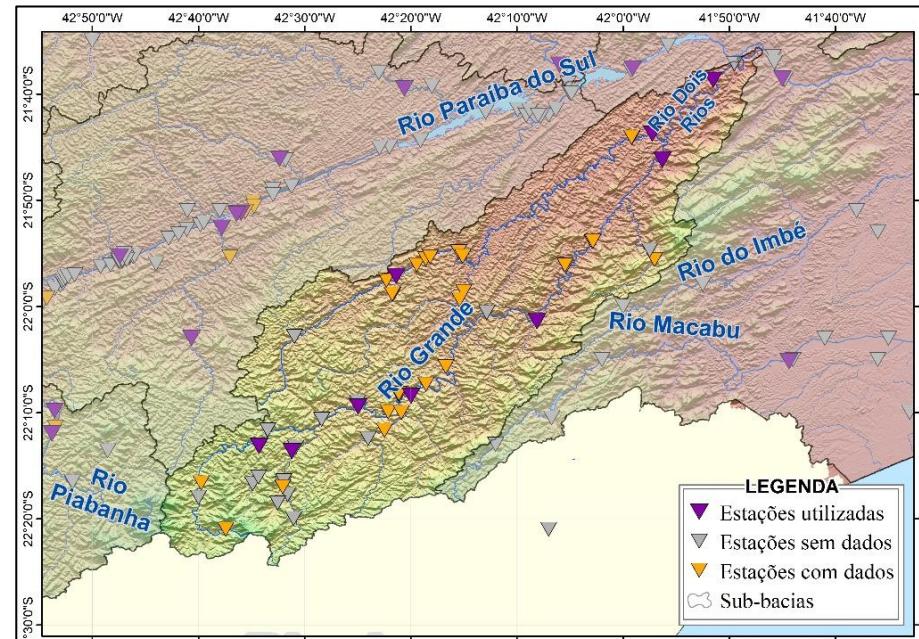


Figura 3.115 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Dois Rios.

3.10.3. Renaturalização de vazões

Buscando entender o quanto de água disponível em um rio ainda pode ser usada, foram calculadas as séries de vazões renaturalizadas, através da soma das séries de usos consuntivos totais com as séries observadas nas estações fluviométricas. O objetivo é conhecer a vazão natural dos rios, auxiliando na gestão dos recursos hídricos. Para isso são apresentadas as séries de usos

consutivos específicos anuais e sazonais para a sub-bacia (Figura 3.116) e os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões (Figura 3.117).

Em relação aos gráficos da série de vazões específicas dos usos consutivos (Figura 3.116), observa-se na análise anual um comportamento semelhante das estações, com variações nos usos consutivos ao longo dos anos. Na análise sazonal, de maneira geral, percebeu-se a predominância do aumento no uso consutivo no período seco em relação ao período úmido nas estações.

Em seguida, a Figura 3.117 mostra os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões. Ou seja, indica quanto a devolução do uso consutivo para o hidrograma implica em alteração da vazão de referência avaliada. Observa-se que as porcentagens de aumento variaram de 1,31% a 2,41% para a Q_{m1t} e de 6,38% a 10,22% para a Q_{95} . Na sub-bacia observou-se que ocorrem os maiores valores de aumento na foz da sub-bacia e em algumas estações de cabeceira.

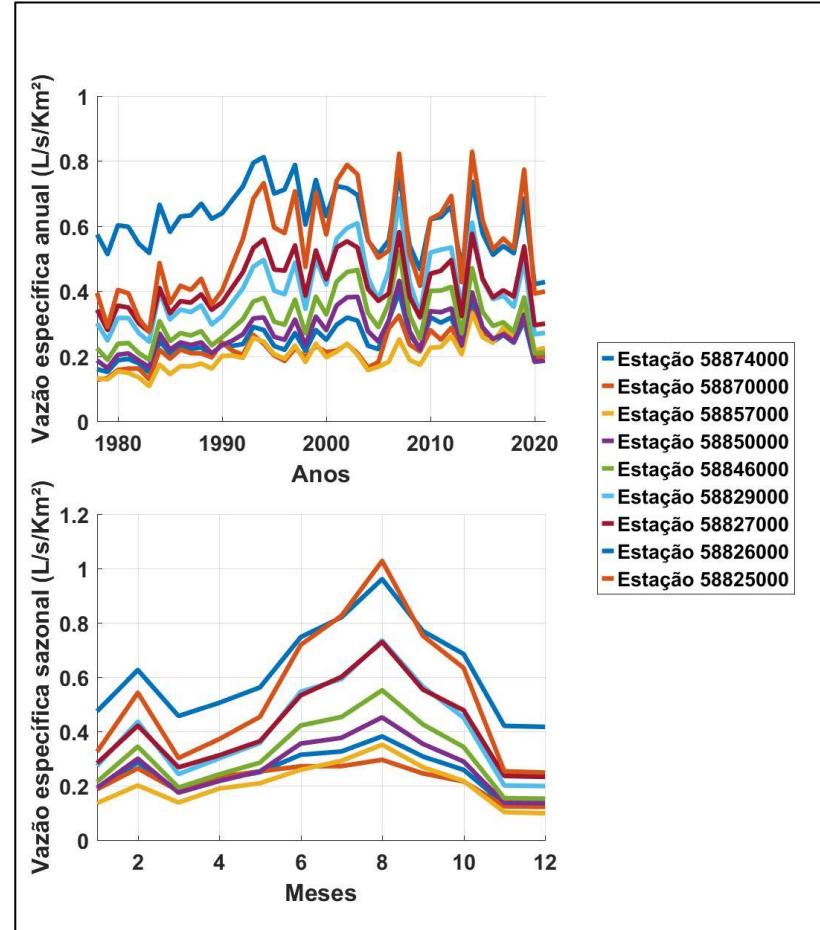


Figura 3.116 - Resultados da série de usos consutivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Rio Dois Rios.

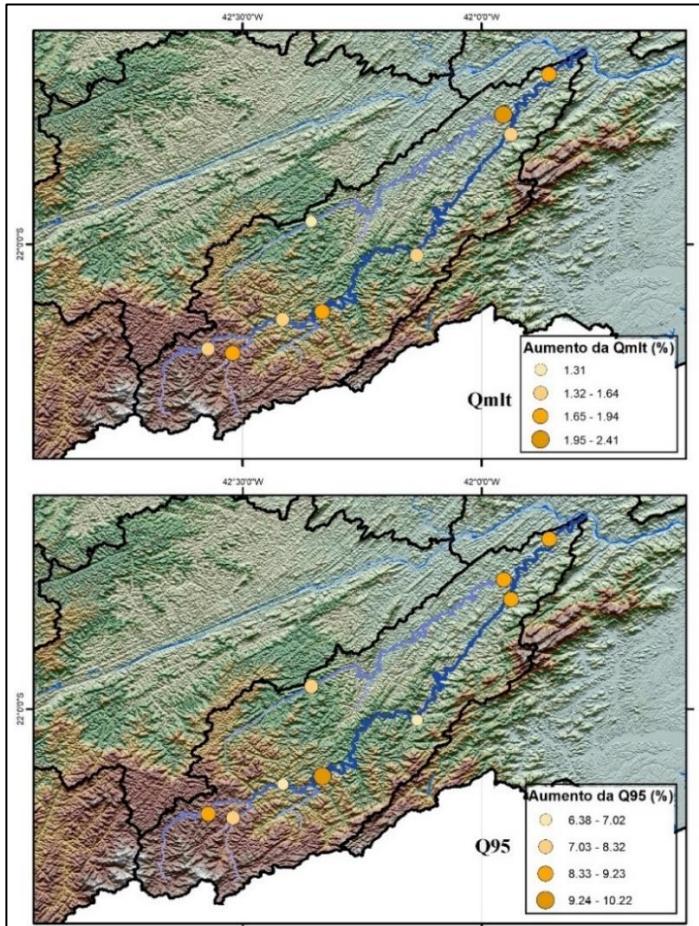


Figura 3.117 – Resultados da alteração da vazão Q_{mlt} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a sub-bacia do Rio Dois Rios após a renaturalização.

3.10.4. Estacionariedade das Séries

A análise da estacionariedade das séries de vazões busca entender, ao longo do período analisado, se ocorre uma estabilidade dos dados (comportamento estacionário), uma redução dos valores (tendência negativa) ou um aumento dos valores (tendência positiva). A Figura 3.118 mostra a análise da estacionariedade das estações fluviométricas (no primeiro gráfico) e das estações pluviométricas (no segundo gráfico).

Nas estações fluviométricas foram avaliados os seguintes índices: vazão média anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada em 5 dias consecutivos, vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos e vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos no período úmido (entre os meses de dezembro a fevereiro). Para as estações pluviométricas foram avaliados os seguintes índices: precipitação total anual, número de dias com precipitação no ano, precipitação diária igual ou superior a 50 mm no ano e precipitação diária máxima em 5 dias consecutivos no ano.

Para as estações fluviométricas, em 4 índices a maior parte das estações indicaram a estacionariedade, enquanto em 1 índice os resultados ficaram divididos com estações indicando estacionariedade, tendência negativa e tendência positiva. Nas

estações pluviométricas em todos os índices a maior parte das estações indicam a estacionariedade, com algumas estações indicando tendência negativa, e raras estações indicando comportamento de tendência positiva dos resultados. Dessa forma, grande parte das estações fluviométricas e pluviométricas indicam que não ocorreram grandes alterações nos valores de vazão e precipitação da sub-bacia.

3.10.5. Disponibilidade Hídrica

3.10.5.1. Calibração do modelo

Na Tabela 3.28 podem ser visualizados os valores dos indicadores estatísticos e dos erros percentuais obtidos a partir da calibração do modelo hidrológico MGB em cada estação fluviométrica da sub-bacia do Rio Dois Rios. Os resultados obtidos na calibração estão dentro da margem considerada satisfatória para modelos hidrológicos. Na metodologia, é detalhado o significado de cada um dos indicadores utilizados.

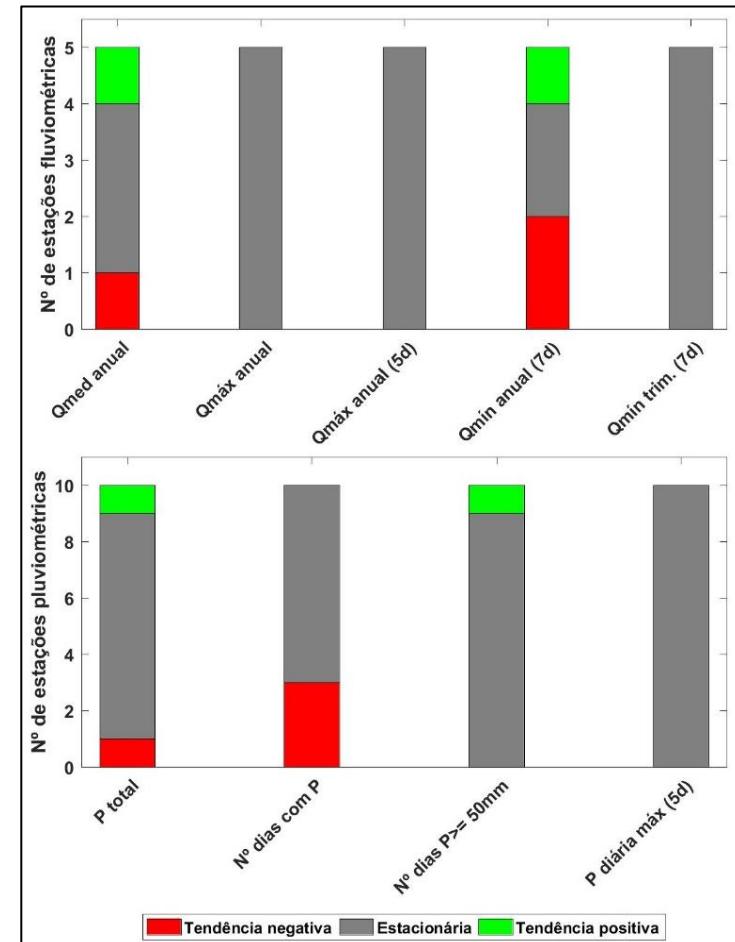


Figura 3.118- Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Dois Rios.

Destaca-se que, na presente sub-bacia, o menor erro médio foi observado na vazão Q_{mlt} , de -1,1%, enquanto o maior erro médio ocorreu na vazão $Q_{7,10}$, com 4,4%. Em relação aos indicadores estatísticos, o Nash-Sutcliffe e o Nash-Sutcliffe Logarítmico médios da sub-bacia foram, respectivamente 0,7 e 0,8, o que indica que os resultados foram bons. Os resultados de calibração mostrado para cada estação podem ser verificados com maior nível de detalhe no Produto 4 do presente estudo.

Tabela 3.28 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Rio Dois Rios.

Estação	Área de drenagem (km ²)	Série (anos)	Tamanho da Nash-Sutcliffe	Nash-Sutcliffe Logarítmico	Erro de Volume (%)	Erro de (%)	Erro de Q ₉₀ (%)	Erro de Q _{mlt} (%)	Erro de Q _{7,10} (%)
58825000	235	43	1	1	-0,3	0,2	-0,1	-0,3	0,1
58826000	170	40,1	0,4	0,4	-7,1	-4,4	-5,7	-7,1	-2,9
58827000	556	43	0,7	0,8	5,5	-1	-1,5	5,5	5,9
58829000	950	7,6	0,7	0,9	3,6	-2	-0,8	3,6	-
58846000	1.376	43	0,8	0,8	-3,5	-5,8	-4,9	-3,5	6,1
58850000	1.817	43	0,8	0,8	-3	1,6	-1,8	-3	10,7
58857000	347	35	0,6	0,7	1,1	-0,7	0,3	1,1	1,9
58870000	1.122	42,8	0,7	0,8	-1,7	-9,2	-8,1	-1,7	12
58874000	3.122	43	0,7	0,8	-4,8	-0,7	-1,3	-4,8	1,9

3.10.5.2. Resultados das Vazões de Referência

Conhecer as vazões de referência é essencial para realizar a gestão responsável dos recursos hídricos, já que elas representam a quantidade de água disponível nos rios. A disponibilidade das vazões de referência na sub-bacia do Rio Dois Rios é apresentada na Figura 3.121, onde são mostradas a vazão de longo termo " Q_{mlt} ", a vazão que é superada ou igualada em 90% do tempo na série histórica " Q_{90} ", a vazão superada ou igualada em 95% do tempo " Q_{95} " e a vazão de 7 dias consecutivos com tempo de retorno de 10 anos, " $Q_{7,10}$ ". Ainda, na Figura 3.119 é possível observar o mapa de vazões específicas (m³/s/km²) da Q_{mlt} e Q_{95} .

Já o diagrama unifilar, apresentado pela Figura 3.120, mostra com detalhes o comportamento do rio principal e dos seus afluentes, como a ocorrência de hidrelétricas e transposição na sub-bacia. Também são apresentadas as entregas de vazão ao longo dos rios que compõem a sub-bacia, proporcionando uma visão geral e completa dos recursos hídricos.

Na sub-bacia do Rio Dois Rios, o rio Grande se encontra com o rio Negro, formando o rio Dois Rios. O rio Grande conta com 2 principais afluentes, sendo o rio Bengala o que mais contribui, seguido pelo ribeirão São José. Já o rio Negro conta somente com o rio Macuco como afluente. No exutório da sub-bacia, que que

desagua para o rio Paraíba do Sul, a vazão Q_{mlt} é de $40,7 \text{ m}^3/\text{s}$, a vazão Q_{95} é de $13,2 \text{ m}^3/\text{s}$, a vazão Q_{90} é de $15,2 \text{ m}^3/\text{s}$ e a vazão $Q_{7,10}$ é de $9,8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por fim, também são apresentados os resultados de vazão de referência na sub-bacia no formato de *Boxplot* para a vazão anual e mensais (Figura 3.122). Os resultados permitem identificar a sazonalidade das vazões de referência na bacia. Devido ao desproporcional número de trechos de pequena área de drenagem na base de resultados, o gráfico somente mostrou resultados de trechos com área de drenagem acima de 200km^2 .

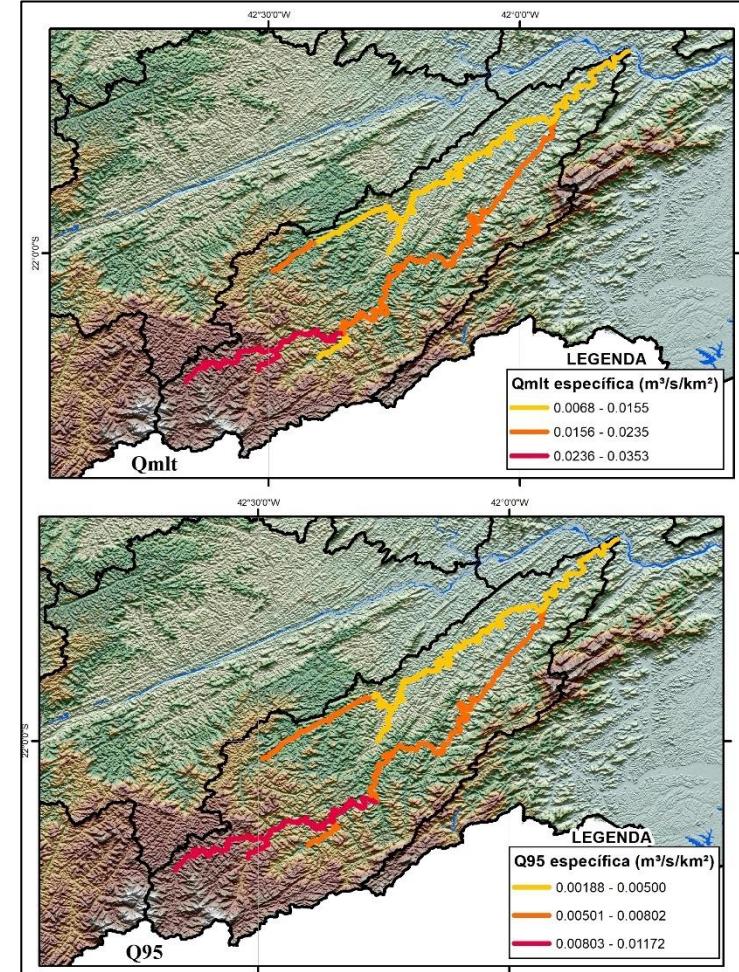


Figura 3.119 - Resultados das vazões específicas ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) de referência anuais Q_{mlt} e Q_{95} .

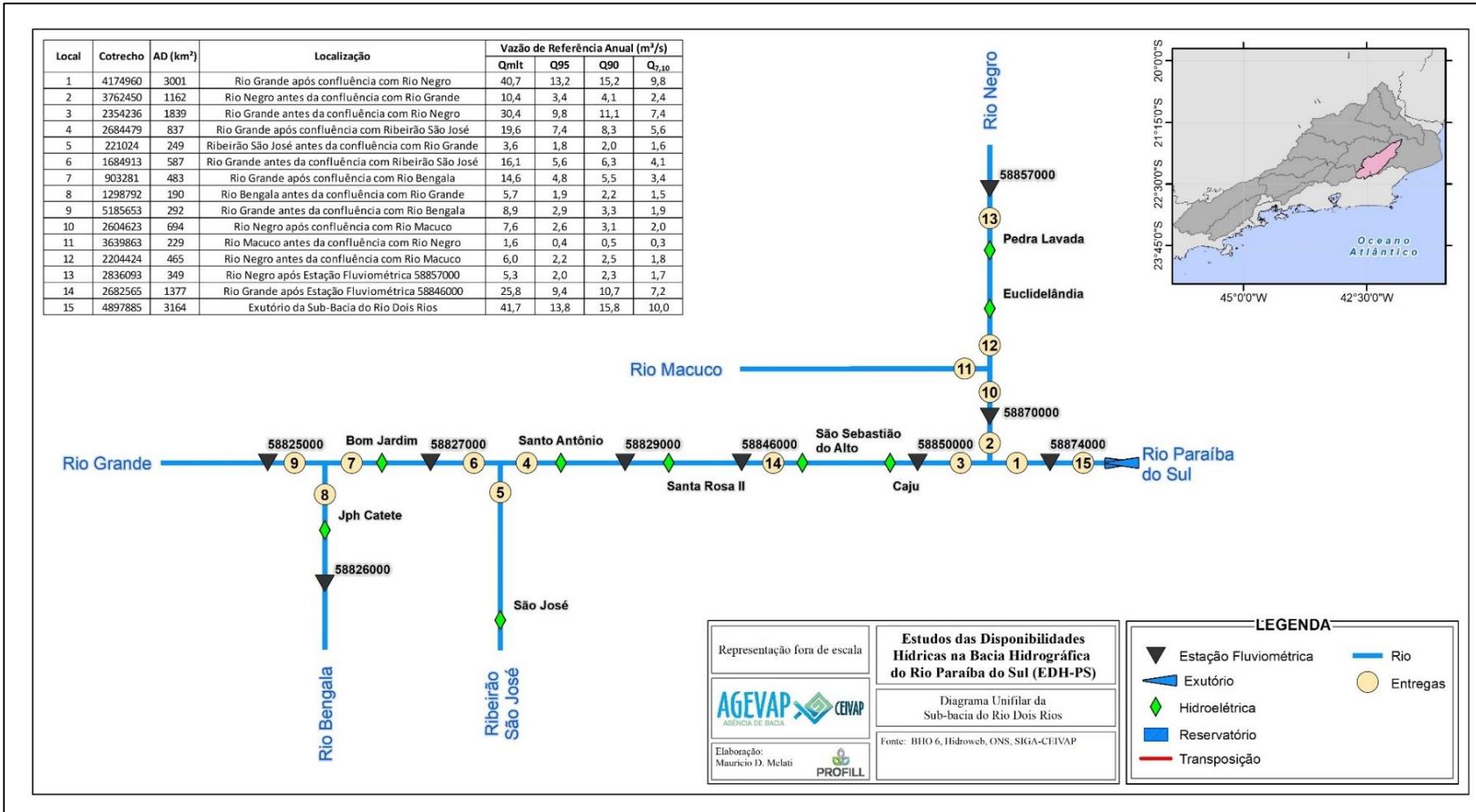


Figura 3.120 - Vazões de entrega (m³/s) da sub-bacia do Rio Dois Rios.

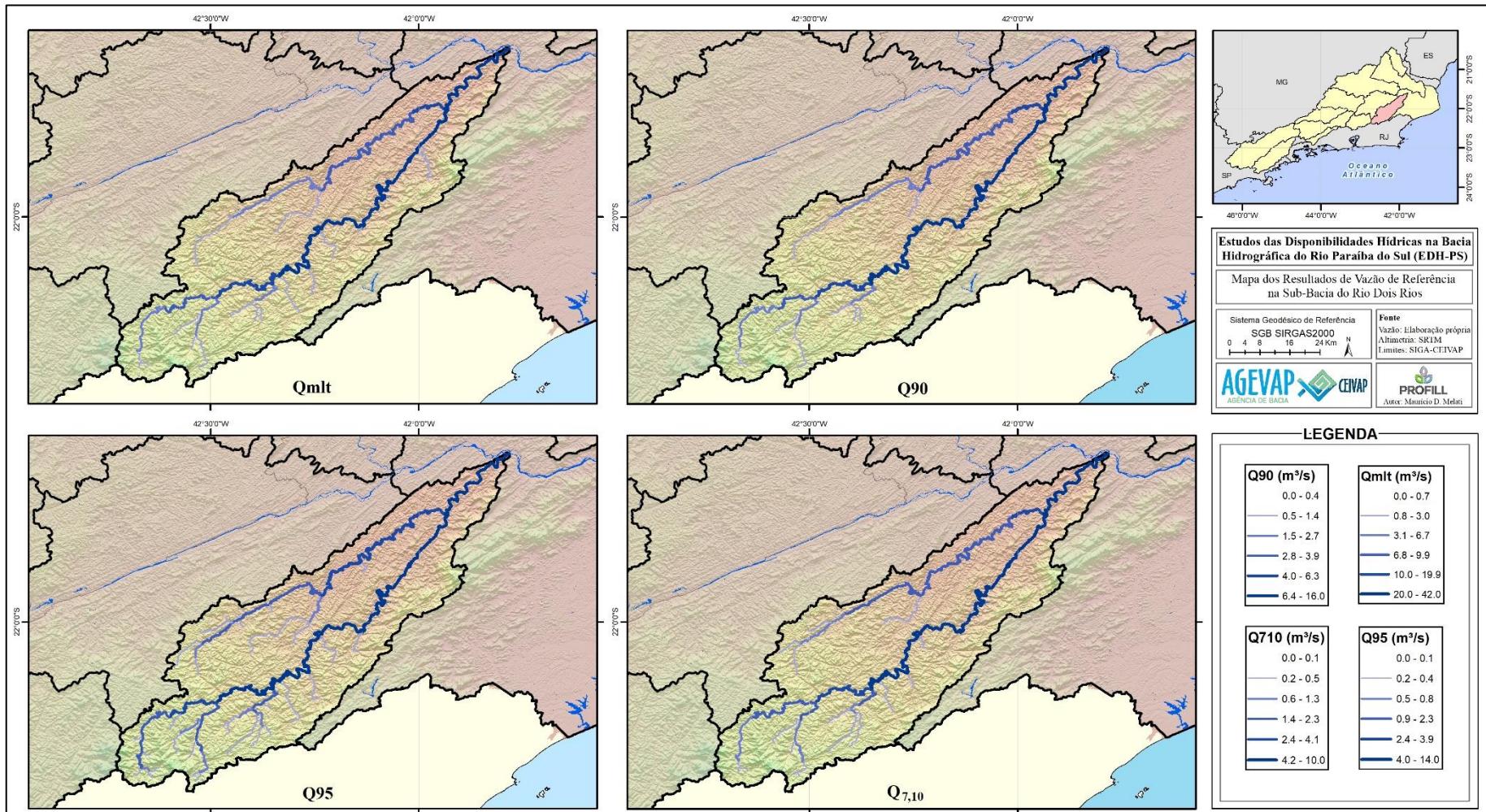


Figura 3.121 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{milt}, Q₉₀, Q₉₅ e Q_{7,10} na sub-bacia do Rio Dois Rios.



Figura 3.122 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($\text{L/s}/\text{km}^2$) de referência anual e mensais Q_{m1t} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Dois Rios.

3.10.5.3. Período Crítico

Entre os anos de 2015 e 2021 a BHPS passou pelas anomalias negativas mais intensas em suas vazões médias desde 1960 (período máximo avaliado no estudo), ocasionando na diminuição das vazões por longos períodos. A Figura 3.123 mostra as reduções de vazão verificadas no período crítico considerando as diferenças entre os anos hidrológicos de 1978-2020 e 2014-2020, nas vazões de referência $Q_{m\text{lt}}$ (primeiro mapa) e Q_{95} (segundo mapa) anuais. A sub-bacia do Rio Dois Rios apresentou reduções que variaram até 6,9 m^3/s na vazão $Q_{m\text{lt}}$, e 3 m^3/s na vazão Q_{95} . Ao longo do rio Grande a redução das vazões ocorre de maneira crescente, para ambas as vazões, que se encontram com o rio Negro, formando o rio Dois Rios, gerando as maiores reduções de vazão da sub-bacia, em seu exutório.

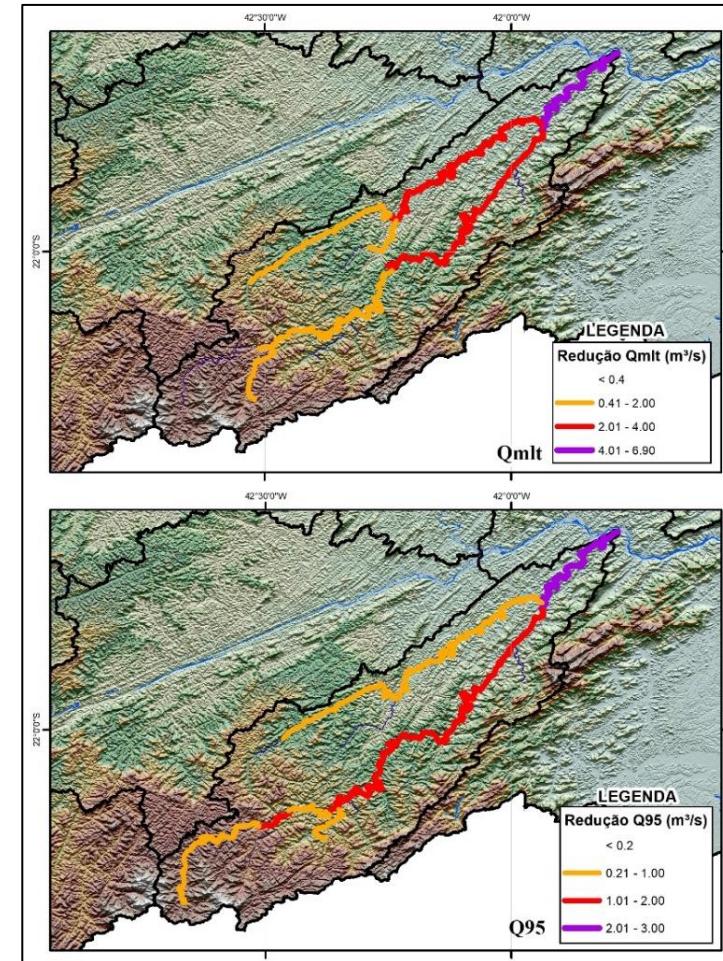


Figura 3.123 - Resultados espaciais da redução das vazões $Q_{m\text{lt}}$ e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-Bacia do Rio Preto.

3.10.6. Cenário de Mudanças Climáticas

3.10.6.1. Vazões máximas

O cálculo de vazões máximas, considerando diferentes tempos de retorno, é essencial para o dimensionamento eficiente de sistemas hidráulicos, garantindo a resiliência e a segurança necessárias diante de variabilidades climáticas e condições extremas. O cálculo das vazões máximas ($Q_{máx}$) para os tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos foi realizado nas minibacias de localização das estações fluviométricas selecionadas na área de estudo, apresentadas no Produto 4.

A sub-bacia do Rio Dois Rios, afluente do rio Paraíba do Sul, apresentou um total de nove estações avaliadas. Os resultados indicaram uma tendência de maiores alterações na parte de menor altitude da região. A sub-bacia apresentou alterações médias entre todos os TRs de 18% no curto prazo e 43% no longo prazo. No curto prazo as estações apresentaram taxas de alteração variando, em sua maioria, entre 15% até 30%.

Destacam-se as estações de cabeceira da sub-bacia, que apresentaram variações superiores a 50% em todos os TRs no longo prazo. Isso significa que as vazões máximas tendem a aumentar na sub-bacia de maneira significativa, tanto no curto prazo quanto no

longo prazo. Em especial, o aumento poderá ser mais significativo para as estações localizadas na cabeceira da sub-bacia, no longo prazo.

Dessa forma, torna-se essencial efetivar a gestão de recursos hídricos, o planejamento urbano e o dimensionamento de sistemas hidráulicos considerando as consequências que o aumento das vazões pode trazer. Entre essas consequências estão inundações mais severas e intensas, ampliação das manchas de inundaçao urbana, danos a infraestrutura das cidades, entre outros.

A Tabela 3.29 apresenta os fatores de alteração para o curto e longo prazo, as máximas vazões renaturalizadas ou simuladas no P4 e as suas projeções para o curto e longo prazo. Em complemento, a Figura 3.124 apresenta os resultados de alteração dos TRs considerando as vazões futuras em cenários de mudança climática para o curto e para o longo prazo.

Tabela 3.29 - Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Rio Dois Rios.

Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)	Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)
TR 10											
58874000	11,8	33,4	913,2	1021	1218,2	58874000	18,6	37,5	1419	1682,9	1951,1
58870000	12,5	28,7	150,5	169,3	193,7	58870000	20,2	30,5	214,3	257,6	279,7
58857000	15,9	31,8	101,6	117,8	133,9	58857000	22,4	32	151,6	185,6	200,1
58850000	10,4	29,2	383,7	423,6	495,8	58850000	18,4	34,5	540,2	639,6	726,6
58846000	8,5	33,9	328,3	356,2	439,6	58846000	18,4	38,6	457,7	541,9	634,4
58829000	12	46	238,3	266,9	347,9	58829000	18,9	49,2	340,1	404,4	507,5
58827000	14,6	53,7	141,2	161,8	217	58827000	22	60,9	186,5	227,5	300,1
58826000	15,8	61,2	115,3	133,6	185,9	58826000	18,8	64,4	167,7	199,3	275,7
58825000	11,9	42,5	144,4	161,6	205,8	58825000	16,8	43,3	212,3	247,9	304,2
TR 25											
58874000	15,8	35,6	1203,6	1393,7	1632	58874000	20,5	38,7	1632,8	1967,5	2264,6
58870000	17,7	29,5	187,1	220,3	242,3	58870000	22,1	31,2	241,3	294,6	316,5
58857000	19,9	31,6	130,3	156,2	171,5	58857000	24,6	32,5	172,7	215,2	228,9
58850000	16,1	33,2	473,6	549,8	630,8	58850000	21,3	36,7	606,4	735,6	829
58846000	16,6	38,2	402,6	469,5	556,4	58846000	19,8	39	512,4	613,9	712,3
58829000	15,9	48,4	296,8	343,9	440,4	58829000	19,3	49,8	383,2	457,2	574
58827000	19,6	59,9	167,2	200	267,4	58827000	22,6	61,7	205,7	252,2	332,6
58826000	18,2	63,9	145,4	171,9	238,3	58826000	19,2	64,8	189,9	226,3	312,9
58825000	15,1	43	183,4	211,1	262,2	58825000	18,1	43,5	241	284,6	345,8

** Nas estações sem vazão máxima renaturalizada calculada foram utilizados os dados de vazão máxima simulada no P4.

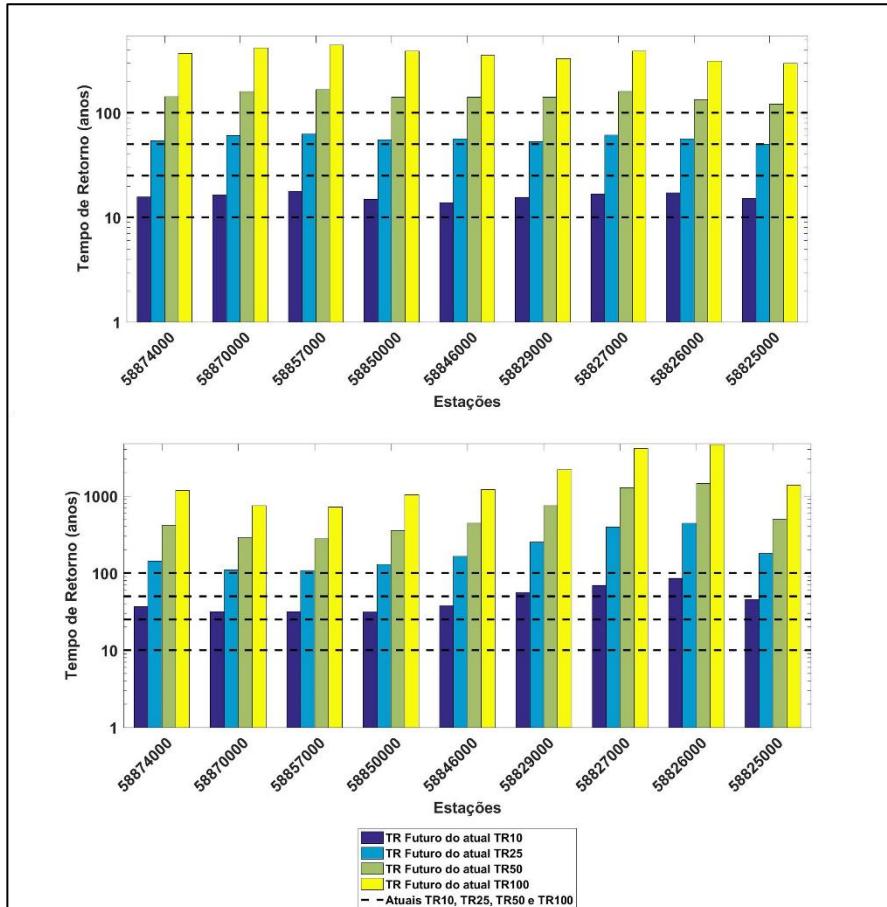


Figura 3.124 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Dois Rios.

3.10.6.2. Vazões Mínimas

Também foi estudado o impacto das mudanças climáticas nas vazões de referência para cenários futuros, com o objetivo de fornecer subsídios aos órgãos gestores e aos CBHs para a tomada de decisão e planejamento dos recursos hídricos da BHPS. A Tabela 3.30 mostra a mediana de alteração percentual dos 19 modelos para o curto e para o longo prazo, a vazão atual de referência e as vazões de referência futuradas.

A sub-bacia do Rio Dois Rios, afluente do rio Paraíba do Sul, apresentou um total de nove estações avaliadas. Os resultados mostram a redução média das vazões mínimas no curto prazo em -8% e no longo prazo em -7%. As reduções indicam que a sub-bacia apresentará a redução nos seus valores de vazão mínima de maneira semelhante tanto no curto quanto no longo prazo, levando à diminuição da disponibilidade hídrica na bacia. A vazão média de longo período mostrou alteração negativa no curto prazo e positiva no longo prazo.

Tabela 3.30 - Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Rio Dois Rios.

Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m ³ /s)	Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m ³ /s)
Q_{mlt}											
58874000	-5,6	5,7	41,6	39,3	43,9	58874000	-7,8	-4,5	13,8	12,7	13,2
58870000	-4	6,6	10,1	9,7	10,8	58870000	-3,8	-5,8	3,4	3,2	3,2
58857000	-1,9	6,2	5,3	5,2	5,6	58857000	-2,3	1,3	2	1,9	2
58850000	-6,2	4,6	30,2	28,3	31,6	58850000	-8,7	-4,8	9,8	8,9	9,3
58846000	-5,9	3,5	25,8	24,2	26,7	58846000	-8,9	-4,8	9,4	8,6	9
58829000	-5	3,1	21,3	20,2	21,9	58829000	-8,2	-5,4	8,1	7,5	7,7
58827000	-3,6	3,2	15,5	14,9	16	58827000	-6,2	-9,1	5,2	4,9	4,8
58826000	-3,5	2,5	5,4	5,2	5,5	58826000	-6	-10,8	1,8	1,7	1,6
58825000	-2,9	2,6	8	7,8	8,2	58825000	-6,9	-8,7	2,5	2,4	2,3
Q₉₀											
58874000	-8,5	-4,8	15,8	14,5	15,1	58874000	-13,5	-9,5	10	8,6	9
58870000	-4,6	-7,4	4	3,8	3,7	58870000	-4	-9,7	2,4	2,3	2,2
58857000	-3,9	-3	2,3	2,2	2,2	58857000	-0,8	-2,7	1,6	1,6	1,6
58850000	-6,6	-7,4	11,1	10,3	10,2	58850000	-16,6	-10,7	7,3	6,1	6,6
58846000	-6,7	-7,2	10,7	10	9,9	58846000	-16,4	-10,5	7,2	6	6,5
58829000	-5,7	-8,1	9,1	8,6	8,3	58829000	-13,5	-9,1	6,4	5,5	5,8
58827000	-6,8	-9,4	5,9	5,5	5,4	58827000	-10,2	-9,1	3,8	3,4	3,4
58826000	-5,9	-8,6	2,1	2	1,9	58826000	-8,5	-9,3	1,4	1,3	1,3
58825000	-5,6	-8,8	2,9	2,7	2,6	58825000	-5,6	-8,1	1,6	1,5	1,5
Q₉₅											
Q_{7,10}											

3.11. SUB-BACIA DO RIO MURIAÉ

A sub-bacia do Rio Muriaé está localizada na parte nordeste da BHPS, em uma região de altitudes mais baixas em relação às porções localizadas mais a oeste da bacia, sendo que a sub-bacia se encontra dividida entre os estados de Minas Gerais e do Rio de Janeiro. O rio Muriaé é o principal curso d'água desta sub-bacia, cujos principais afluentes são o rio Glória e o rio Carangola. Além disso, o rio Muriaé deságua na região do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul. A cabeceira do rio Muriaé encontra-se a uma altitude de 800 metros e sua foz a 10 metros. A sub-bacia possui uma média pluviométrica anual de 1.200 mm, sendo a região mais próxima ao exutório a área com menor precipitação; enquanto a região que recebe a maior quantidade de chuva localiza-se próximo à cabeceira do rio Muriaé. A sub-bacia do Rio Muriaé não possui interferências hidráulicas relevantes, como transposições, reservatórios e grandes hidrelétricas. Há, entretanto, alguns aproveitamentos hidrelétricos de menor escala com pouca influência nos estudos desenvolvidos.

A gestão de recursos hídricos tem como unidade territorial a bacia hidrográfica. No entanto, a área de atuação dos Comitês de Bacia Hidrográfica poderá ser, também, a sub-bacia hidrográfica de tributário do curso de água principal da bacia, ou de tributário desse tributário ou, ainda, um grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas

contíguas. Além disso, a área de atuação de CBHs estaduais deverá respeitar os limites geográficos dos estados que compõem a bacia hidrográfica do rio federal. Dessa forma, as sub-bacias apresentadas no estudo podem ter seus limites geográficos diferentes das áreas de atuação dos Comitês, conforme observado na Figura 3.125.

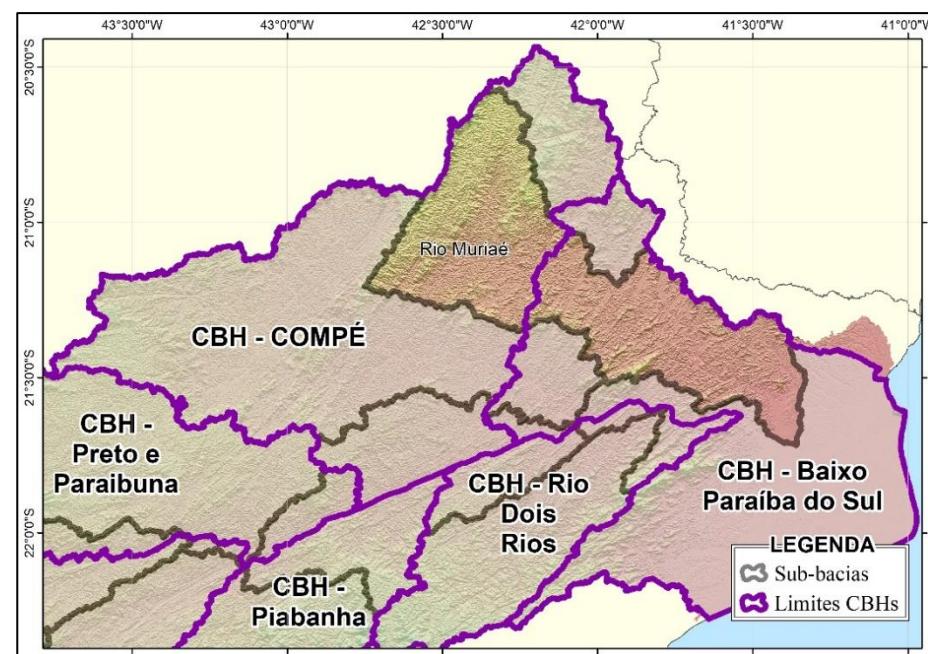


Figura 3.125 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Rio Muriaé.

Na sub-bacia do Rio Muriaé estão presentes os seguintes CBHs: COMPÉ e Baixo Paraíba do Sul. A divisão dos comitês dentro da sub-bacia é delimitada pelos limites entre os estados de Minas Gerais (onde está localizado o CBH COMPÉ) e Rio de Janeiro (onde está localizado o CBH Baixo Paraíba do Sul).

3.11.1. Dados Pluviométricos

Na etapa de levantamento de dados pluviométricos realizada para o EDH-PS, foram identificadas 57 estações pluviométricas na área da sub-bacia do Rio Muriaé e suas adjacências, das quais apenas 23 possuíam algum registro de precipitação ao longo do seu período de operação. Contudo, após tratamento e consistência das séries históricas, permaneceram 18 estações no banco de dados consistido, o qual subsidiou as demais etapas do presente estudo. Todas as estações podem ser visualizadas na Figura 3.126.

3.11.2. Dados Fluviométricos

Na fase de levantamento de dados fluviométricos do presente estudo, foram inventariadas 51 estações fluviométricas na área da sub-bacia do Rio Muriaé, porém somente 21 delas possuíam algum dado de vazão. Já na etapa de consistência dos dados hidrológicos, foram removidas do banco de dados oficial estações cujas séries eram muito curtas, apresentavam muitas falhas, ou algum tipo de

inconsistência que pudesse comprometer o estudo de disponibilidade hídrica; assim, restaram 9 estações com boa qualidade de dados nesta sub-bacia, para serem utilizadas nas etapas seguintes do EDH-PS. As informações como código, nome, nome do rio, nome do município, localização e área de drenagem de cada estação podem ser visualizadas no Quadro 3.11. A distribuição espacial das estações pode ser observada na Figura 3.127.

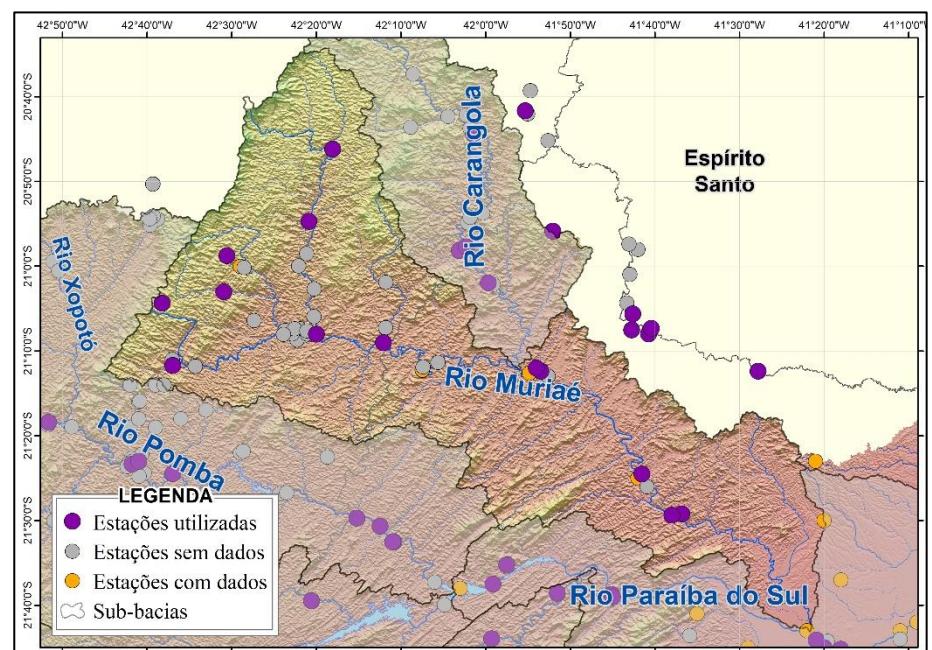


Figura 3.126 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Rio Muriaé.

Quadro 3.11– Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Muriaé.

Estação	Nome	Nome do Rio	Nome do município	Latitude	Longitude	AD (Km ²)
58940000	ITAPERUNA	RIO MURIAÉ	ITAPERUNA	-21,21	-41,89	5.800
58918180	PCH ORMEO J. BOTELHO JUSANTE	RIO GLÓRIA	MURIAÉ	-21,10	-42,34	1.050
58920000	PATROCÍNIO DO MURIAÉ	RIO MURIAÉ	PATROCÍNIO DO MURIAÉ	-21,15	-42,21	2.660
58917000	JUSSARA	RIO GLÓRIA	MIRADOURO	-20,91	-42,35	744
58916000	BICUIBA	RIO GLÓRIA	SÃO FRANCISCO DO GLÓRIA	-20,77	-42,30	393
58912080	PCH CORONEL DOMICIANO MONTANTE	RIO SEM PEIXE/FUMAÇA	ROSÁRIO DA LIMEIRA	-21,00	-42,48	175
58912090	PCH CORONEL DOMICIANO BARRAMENTO	RIO SEM PEIXE/FUMAÇA	ROSÁRIO DA LIMEIRA	-21,01	-42,45	197
58910000	FAZENDA UMBAÚBAS	RIO PRETO	MURIAÉ	-21,05	-42,51	151
58960000	CARDOSO MOREIRA	RIO MURIAÉ	CARDOSO MOREIRA	-21,49	-41,61	7.210

Fonte: ANA (2023).

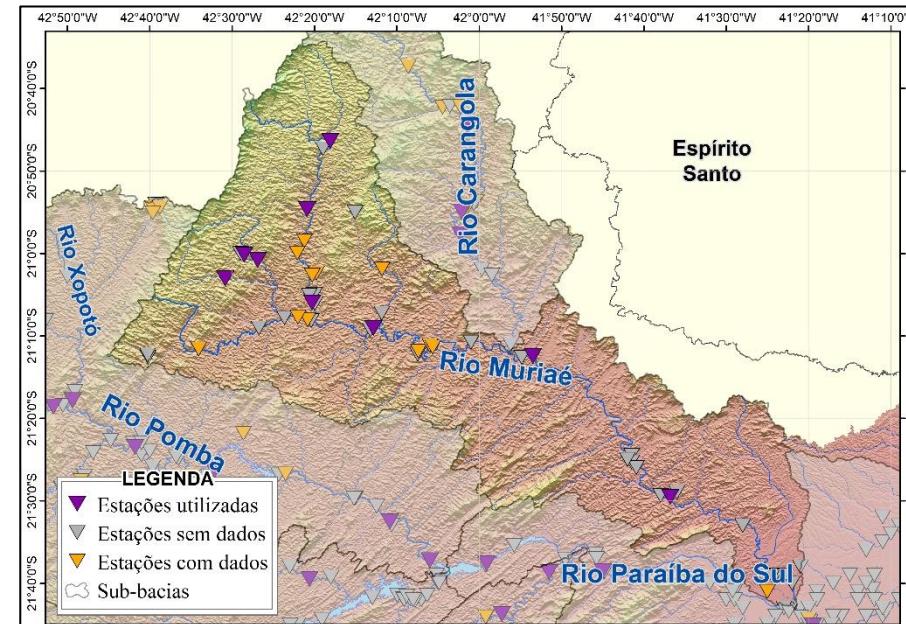


Figura 3.127 – Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Muriaé.

3.11.3. Renaturalização de vazões

Buscando entender o quanto de água disponível em um rio ainda pode ser usada, foram calculadas as séries de vazões renaturalizadas, através da soma das séries de usos consuntivos totais com as séries observadas nas estações fluviométricas. O objetivo é conhecer a vazão natural dos rios, auxiliando na gestão dos recursos hídricos.

Para isso, são apresentadas as séries de usos consuntivos específicos anuais e sazonais para a sub-bacia (Figura 3.128) e os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões (Figura 3.129).

Em relação aos gráficos da série de vazões específicas dos usos consuntivos (Figura 3.128), observa-se que a partir do ano 2000, aproximadamente, ocorre uma estabilização dos valores das vazões específicas ao longo do período de análise restante. Já na análise sazonal, percebeu-se que ocorre uma tendência de redução dos usos entre os meses de novembro e dezembro.

Em seguida, a Figura 3.129 mostra os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões. Ou seja, indica quanto a devolução do uso consuntivo para o hidrograma implica em alteração da vazão de referência avaliada. As porcentagens de aumento variaram de 0,29% a 1,75% para a Q_{m1t} e de 0,81% a 9,94% para a Q_{95} . Observa-se que ocorre o aumento das taxas de variação indo das regiões de cabeceira para o rio principal, em direção ao exutório da sub-bacia.

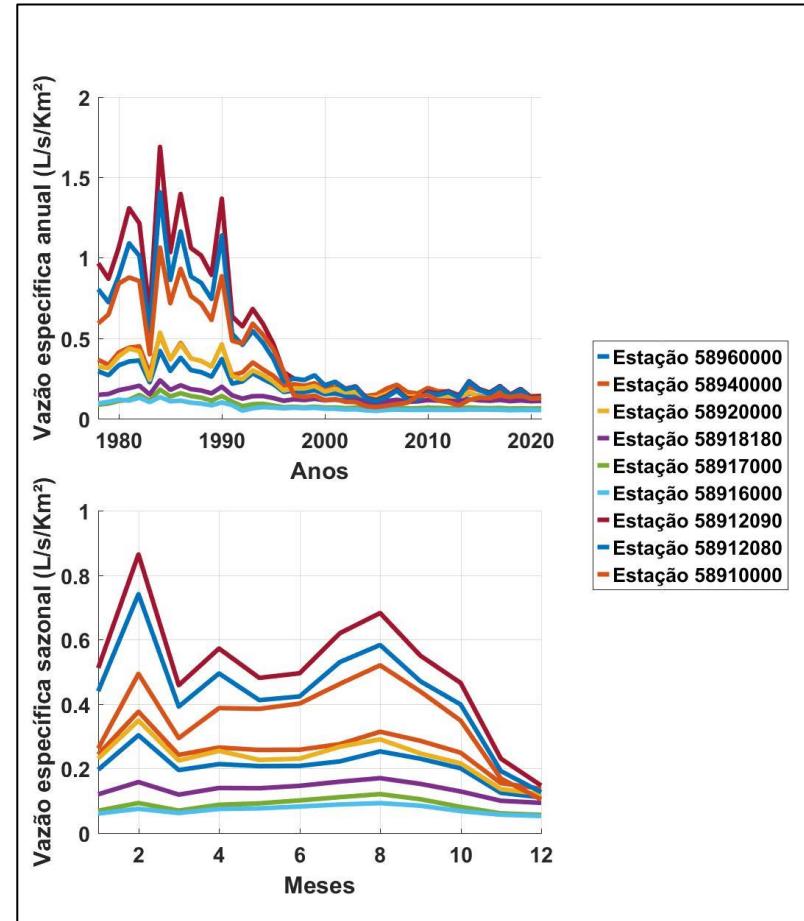


Figura 3.128 – Resultados da série de usos consuntivos específicos anuais (primeiro gráfico) e sazonais médios (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Rio Muriaé.

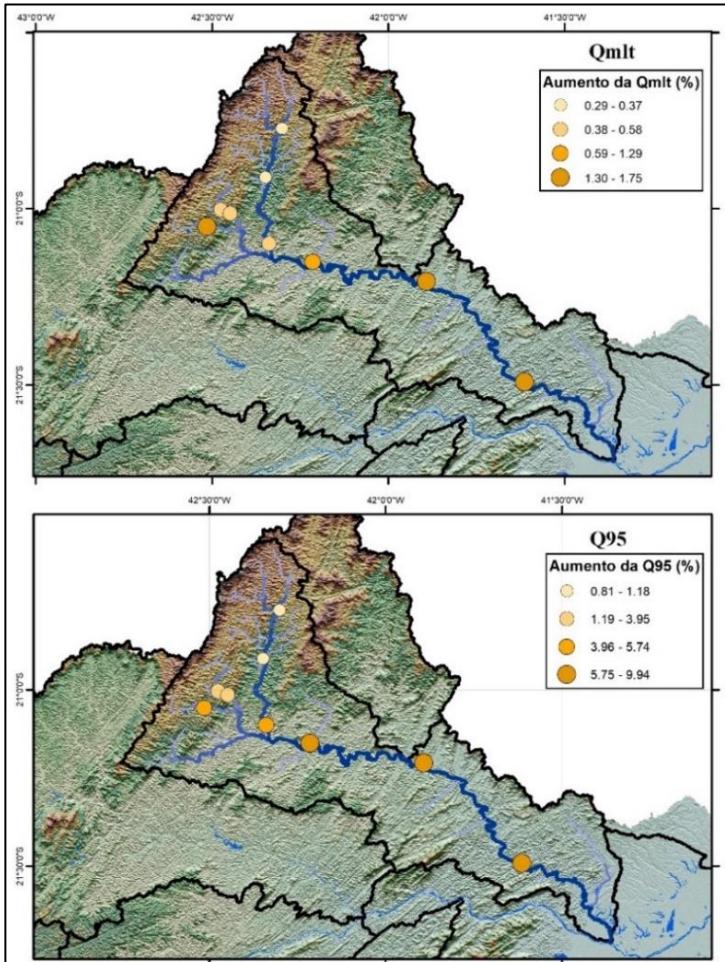


Figura 3.129 – Resultados da alteração da vazão Q_{m1t} (primeiro mapa) e da vazão Q_{95} (segundo mapa) para a sub-bacia do Rio Muriaé após a renaturalização.

3.11.4. Estacionariedade das Séries

A análise da estacionariedade das séries de vazões busca entender, ao longo do período analisado, se ocorre uma estabilidade dos dados (comportamento estacionário), uma redução dos valores (tendência negativa) ou um aumento dos valores (tendência positiva). A Figura 3.130 mostra a análise da estacionariedade das estações fluviométricas (no primeiro gráfico) e das estações pluviométricas (no segundo gráfico).

Nas estações fluviométricas foram avaliados os seguintes índices: vazão média anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada em 5 dias consecutivos, vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos e vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos no período úmido (entre os meses de dezembro a fevereiro). Para as estações pluviométricas foram avaliados os seguintes índices: precipitação total anual, número de dias com precipitação no ano, precipitação diária igual ou superior a 50 mm no ano e precipitação diária máxima em 5 dias consecutivos no ano.

Nas estações fluviométricas, 3 índices indicaram predominância da estacionariedade, enquanto 1 índice indica a predominância de tendência negativa e 1 índice apresenta metade das séries com comportamento estacionário e metade das estações com tendência

negativa. A maior parte das estações pluviométricas indicam a estacionariedade em todos os índices, com a presença de estações indicando tendência positiva também. Observa-se somente uma estação com tendência negativa nos resultados.

Dessa forma, grande parte das estações fluviométricas indicam que não ocorreram grandes alterações nos valores das vazões média e máxima. Para as vazões mínimas, grande parte das estações indicam diminuição dos valores de vazão. Já para os dados pluviométricos, os resultados apontam que não ocorreram grandes alterações nas taxas de precipitação ao longo das séries históricas analisadas, com algumas estações indicando o aumento nas taxas de precipitação.

3.11.5. Disponibilidade Hídrica

3.11.5.1. Calibração do modelo

Na Tabela 3.31 podem ser visualizados os valores dos indicadores estatísticos e dos erros percentuais obtidos a partir da calibração do modelo hidrológico MGB em cada estação fluviométrica da sub-bacia do Rio Muriaé. Os resultados obtidos na calibração estão dentro da margem considerada satisfatória para modelos hidrológicos. Na metodologia, é detalhado o significado de cada um dos indicadores utilizados.

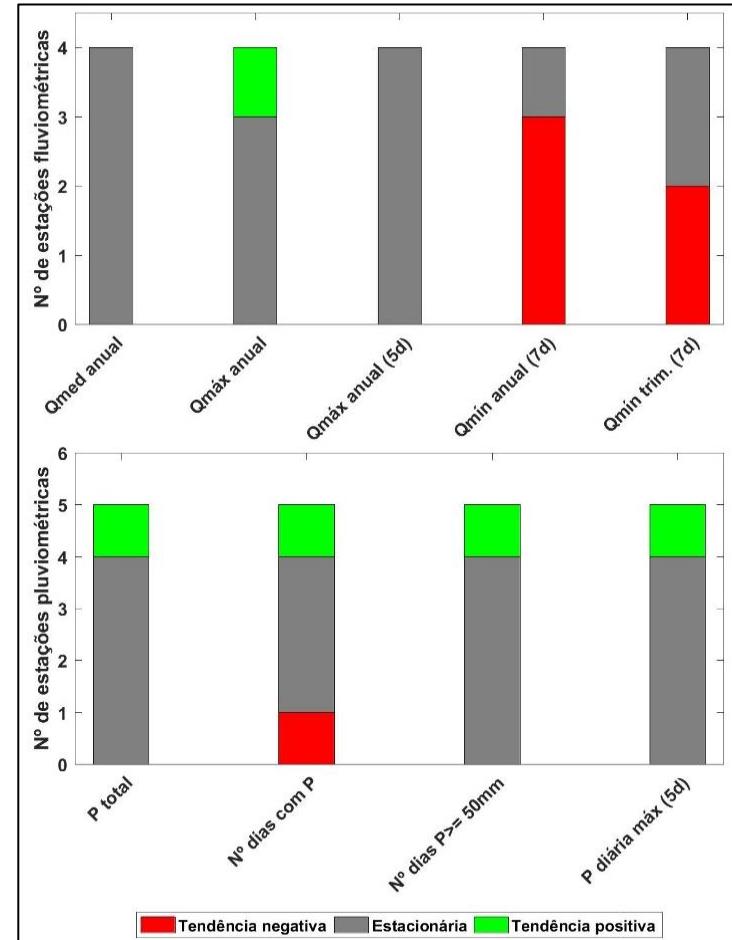


Figura 3.130- Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Muriaé.

Destaca-se que, na presente sub-bacia, o menor erro médio foi observado na vazão $Q_{m\text{lt}}$, de -1,2%, enquanto o maior erro médio ocorreu na vazão Q_{90} , com -4,4%. Em relação aos indicadores estatísticos, o Nash-Sutcliffe e o Nash-Sutcliffe Logarítmico médios da sub-bacia foram, respectivamente 0,7 e 0,8, o que indica que os resultados foram bons. Os resultados de calibração mostrado para cada estação podem ser verificados com maior nível de detalhe no Produto 4 do presente estudo.

Tabela 3.31 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Rio Muriaé.

Estação	Área de drenagem (km ²)	Tamanho da Série (anos)	Nash-Sutcliffe	Nash-Sutcliffe Logarítmico	Erro de Volume (%)	Erro de Q_{95} (%)	Erro de Q_{90} (%)	Erro de $Q_{m\text{lt}}$ (%)	Erro de $Q_{7,10}$ (%)
58912090	202	1,4	0,6	0,8	-0,1	4,5	-1,4	-0,1	-
58910000	151	42	0,5	0,7	0,8	-9,1	-12,4	0,8	-4,7
58912080	178	5,2	0,7	0,8	-12,9	0	-6,5	-12,9	-
58916000	394	40,1	0,7	0,8	-1,1	4,2	6,3	-1,1	1,2
58917000	745	41	0,7	0,8	-2,5	-9,5	-6	-2,5	1,5
58918180	1.050	2,9	0,8	0,7	-3,6	11,9	11,4	-3,6	-
58920000	2.662	43	0,8	0,8	-2,2	-11,5	-14,6	-2,2	8,1
58940000	5.802	43	0,8	0,8	-4	-12,3	-18,3	-4	10,1
58960000	7.200	43	1	1	0	0,4	0,1	0	0

3.11.5.2. Resultados das Vazões de Referência

Conhecer as vazões de referência é essencial para realizar a gestão responsável dos recursos hídricos, já que elas representam a quantidade de água disponível nos rios. A disponibilidade das vazões de referência na sub-bacia do Rio Muriaé é apresentada na Figura 3.133, onde são mostradas a vazão de longo termo " $Q_{m\text{lt}}$ ", a vazão que é superada ou igualada em 90% do tempo na série histórica " Q_{90} ", a vazão superada ou igualada em 95% do tempo " Q_{95} " e a vazão de 7 dias consecutivos com tempo de retorno de 10 anos, " $Q_{7,10}$ ". Ainda, na Figura 3.131 é possível observar o mapa de vazões específicas ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) da $Q_{m\text{lt}}$ e Q_{95} .

Já o diagrama unifilar, apresentado pela Figura 3.132, mostra com detalhes o comportamento do rio principal e dos seus afluentes, como a ocorrência de hidrelétricas e transposição na sub-bacia. Também são apresentadas as entregas de vazão ao longo dos rios que compõem a sub-bacia, proporcionando uma visão geral e completa dos recursos hídricos.

Ao longo do rio principal ocorre um aumento das vazões, devido à contribuição dos seus afluentes, onde observa-se que o rio Carangola apresenta os maiores valores de contribuição ao rio Muriaé, seguido pelo rio Glória, pelo rio Preto e pelo rio Gavião, em termo de $Q_{m\text{lt}}$. No exutório da sub-bacia, onde o rio Muriaé contribui

para o rio Paraíba do Sul, a vazão Q_{m1t} é de $101,3 \text{ m}^3/\text{s}$, a vazão Q_{95} é de $21,8 \text{ m}^3/\text{s}$, a vazão Q_{90} é de $26,7 \text{ m}^3/\text{s}$ e a vazão $Q_{7,10}$ é de $13,3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por fim, também são apresentados os resultados de vazão de referência na sub-bacia no formato de *Boxplot* para a vazão anual e mensais (Figura 3.134). Os resultados permitem identificar a sazonalidade das vazões de referência na bacia. Devido ao desproporcional número de trechos de pequena área de drenagem na base de resultados, o gráfico somente mostrou resultados de trechos com área de drenagem acima de 200km^2 .

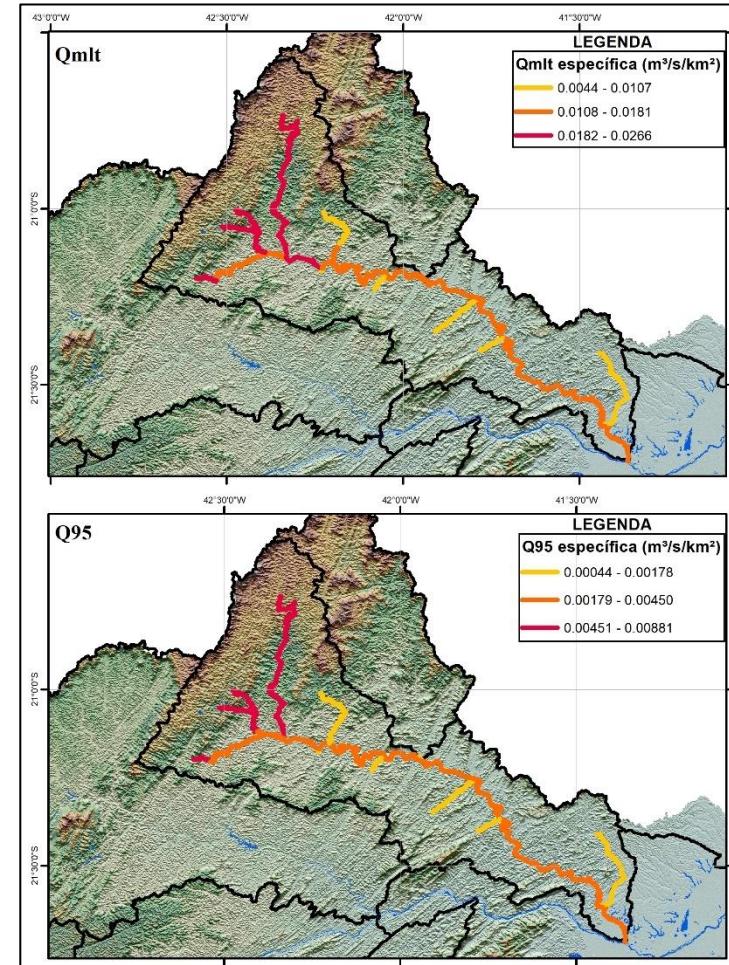


Figura 3.131 - Resultados das vazões específicas ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) de referência anuais Q_{m1t} e Q_{95} .

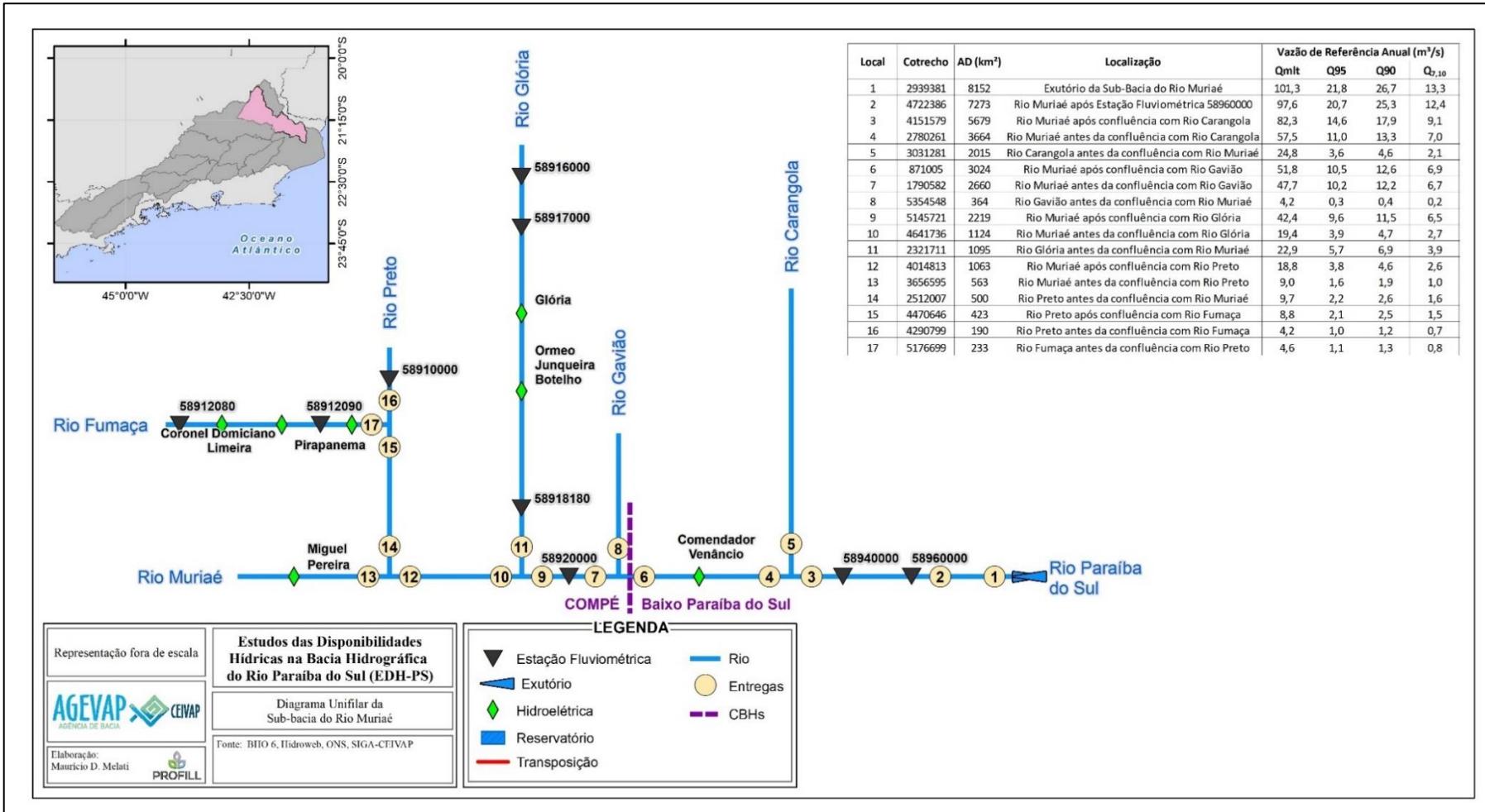


Figura 3.132 - Vazões de entrega (m³/s) da sub-bacia do Rio Muriaé.

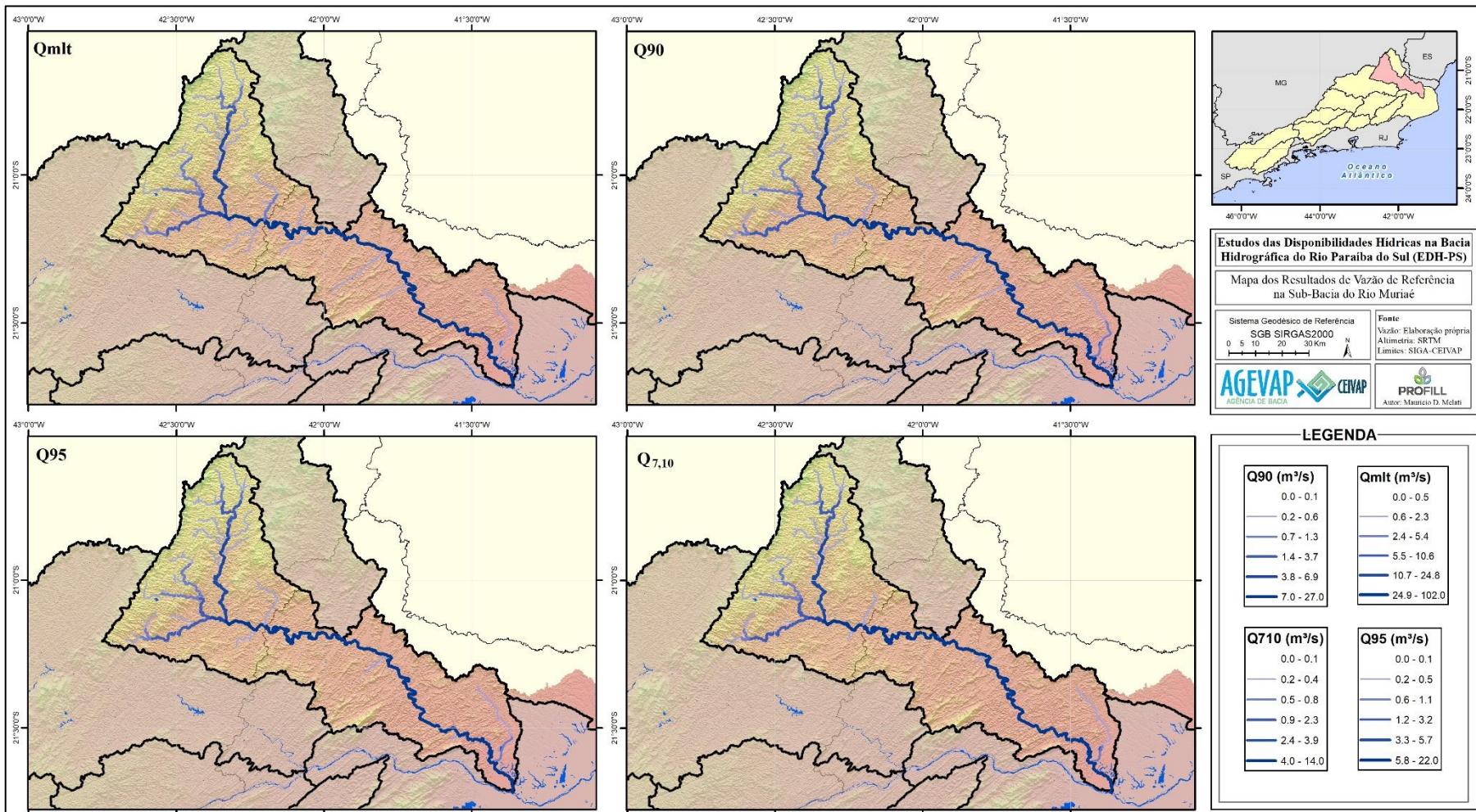


Figura 3.133 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{mlt}, Q₉₀, Q₉₅ e Q_{7,10} na sub-bacia do Rio Muriaé.

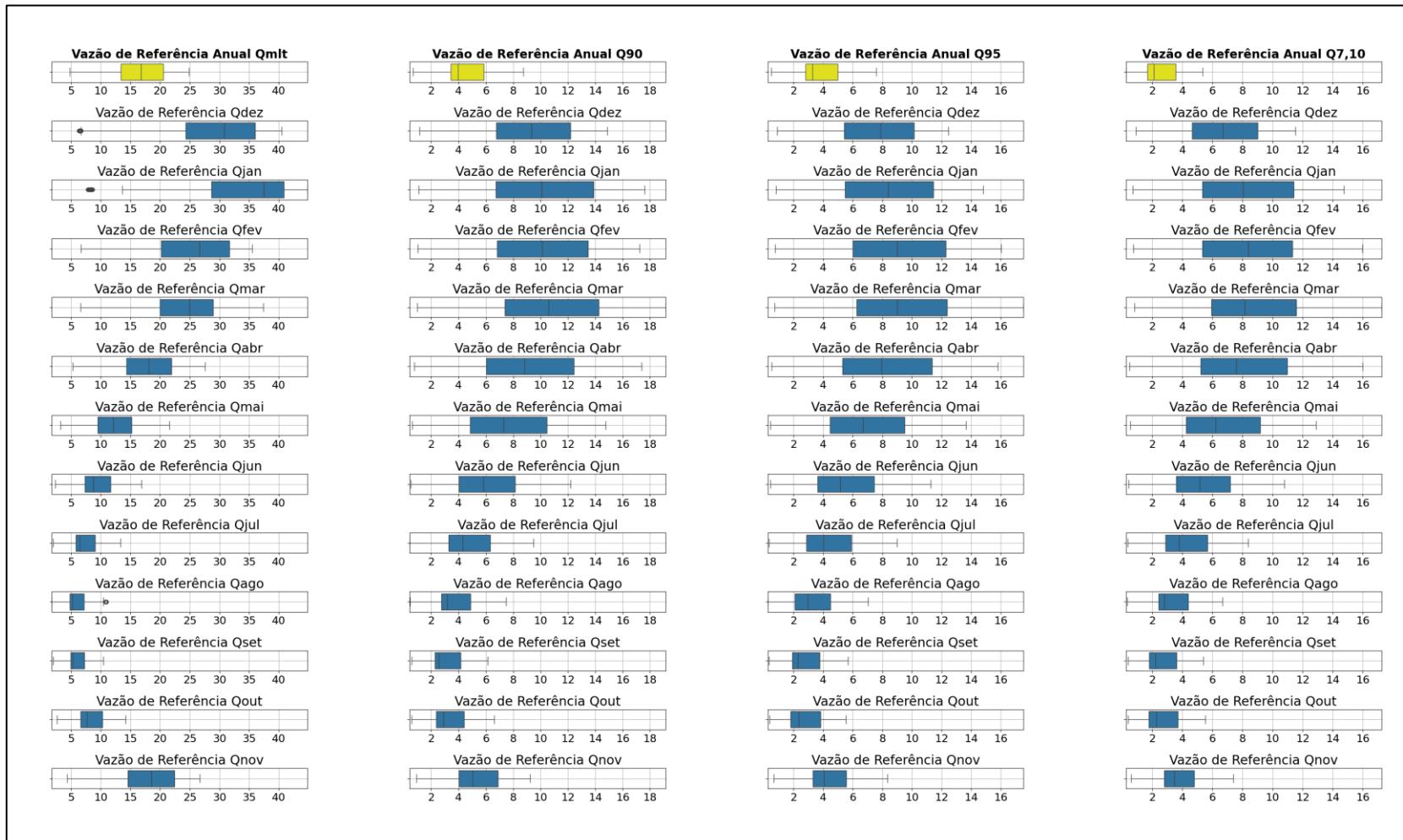


Figura 3.134 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{m1t} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Muriaé.

3.11.5.3. Período Crítico

Entre os anos de 2015 e 2021 a BHPS passou pelas anomalias negativas mais intensas em suas vazões médias desde 1960 (período máximo avaliado no estudo), ocasionando na diminuição das vazões por longos períodos. A Figura 3.135 mostra as reduções de vazão verificadas no período crítico considerando as diferenças entre os anos hidrológicos de 1978-2020 e 2014-2020, nas vazões de referência Q_{m1t} (primeiro mapa) e Q_{95} (segundo mapa) anuais. A sub-bacia do Rio Muriaé apresentou reduções que variaram até 29 m³/s na vazão Q_{m1t} , e 9,1 m³/s na vazão Q_{95} . Ocorre uma diminuição crescente das vazões ao longo do rio Muriaé, de maneira descontínua, e mais acentuada antes do exutório da sub-bacia.

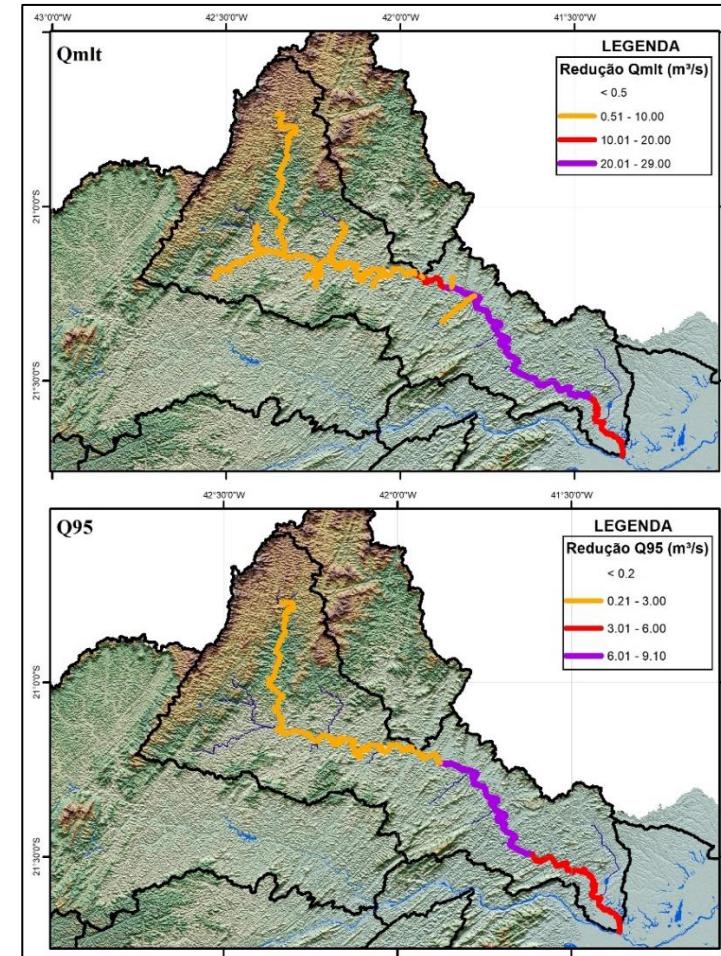


Figura 3.135 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{m1t} e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-bacia do Rio Muriaé.

3.11.6. Cenário de Mudanças Climáticas

3.11.6.1. Vazões máximas

O cálculo de vazões máximas, considerando diferentes tempos de retorno, é essencial para o dimensionamento eficiente de sistemas hidráulicos, garantindo a resiliência e a segurança necessárias diante de variabilidades climáticas e condições extremas. O cálculo das vazões máximas ($Q_{máx}$) para os tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos foi realizado nas minibacias de localização das estações fluviométricas selecionadas na área de estudo, apresentadas no Produto 4.

A sub-bacia do Rio Muriaé foi avaliada em 9 locais com estações fluviométricas. Os resultados mostraram alterações médias entre todos os TRs de 3% no curto prazo e 31% no longo prazo. As alterações no longo prazo mostraram-se homogêneas para todas as estações analisadas, com um aumento das vazões máximas para os diferentes TRs, variando no intervalo de 15% a 40%. Isso significa que as vazões máximas tendem a aumentar na sub-bacia de maneira significativa no longo prazo. No curto prazo as alterações próximas a 3% indicam que as vazões não sofrerão um aumento significativo, com algumas estações mostrando diminuição de vazões máximas.

Dessa forma, para o período longo, torna-se essencial efetivar a gestão de recursos hídricos, o planejamento urbano e o dimensionamento de sistemas hidráulicos considerando as consequências que o aumento das vazões pode trazer. Entre essas consequências estão inundações mais severas e intensas, ampliação das manchas de inundação urbana, danos a infraestrutura das cidades, entre outros.

A Tabela 3.32 apresenta os fatores de alteração para o curto e longo prazo, as máximas vazões renaturalizadas ou simuladas no P4 e as suas projeções para o curto e longo prazo. Em complemento, a Figura 3.136 apresenta os resultados de alteração dos TRs considerando as vazões futuras em cenários de mudança climática para o curto e para o longo prazo.

Tabela 3.32 – Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Rio Muriaé.

Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)	Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)
TR 10										
58960000	5,1	28,2	1097	1153	1406,4	58960000	7,8	25	1551,7	1672,7
58940000	-1,4	23,7	1071,1	1056,1	1325	58940000	0	21,6	1529,7	1529,7
58920000	3,3	29,9	566,1	584,8	735,4	58920000	7,6	35,8	796,7	857,3
58918180	1,7	30,1	215,5	219,2	280,4	58918180	4,8	31,4	295,9	310,1
58917000	1	29,2	279,9	282,7	361,6	58917000	4,6	31,9	430,1	449,9
58916000	0	23,1	106,3	106,3	130,8	58916000	6,2	29	142,9	151,8
58912090	1,4	29,9	58,4	59,2	75,9	58912090	3,1	32,3	84,2	86,9
58912080	1,2	29,4	49,1	49,7	63,5	58912080	4,8	32,4	70,5	73,8
58910000	-4,3	35,7	56	53,6	76	58910000	-3,4	40,3	82,8	80
TR 25										
58960000	6,9	25,5	1358	1451,8	1704,3	58960000	8,5	26,4	1743,9	1892,1
58940000	-0,1	22	1334,4	1333	1627,9	58940000	0,7	22,8	1723,5	1735,6
58920000	6,1	33,3	698,5	741,1	931,1	58920000	8,8	37,8	894,2	972,9
58918180	3,7	30,9	261,6	271,3	342,5	58918180	5,9	33,1	329,8	349,3
58917000	3,2	31,3	366,2	377,9	480,8	58917000	6,3	32,6	493,7	524,8
58916000	3,6	26,9	127,3	131,9	161,6	58916000	8,2	30,9	158,4	171,4
58912090	1,9	31,5	73,2	74,6	96,3	58912090	4	33	95,2	99
58912080	3,6	30,7	61,3	63,6	80,2	58912080	5,7	34,1	79,5	84
58910000	-3,7	39,8	71,4	68,7	99,8	58910000	-2,7	40,6	94,1	91,6
TR 50										
58960000	7,8	25								
58940000	0	21,6								
58920000	7,6	35,8								
58918180	4,8	31,4								
58917000	4,6	31,9								
58916000	6,2	29								
58912090	3,1	32,3								
58912080	4,8	32,4								
58910000	-3,4	40,3								
TR 100										
58960000	8,5	26,4								
58940000	0,7	22,8								
58920000	8,8	37,8								
58918180	5,9	33,1								
58917000	6,3	32,6								
58916000	8,2	30,9								
58912090	4	33								
58912080	5,7	34,1								
58910000	-2,7	40,6								

** Nas estações sem vazão máxima renaturalizada calculada foram utilizados os dados de vazão máxima simulada no P4.

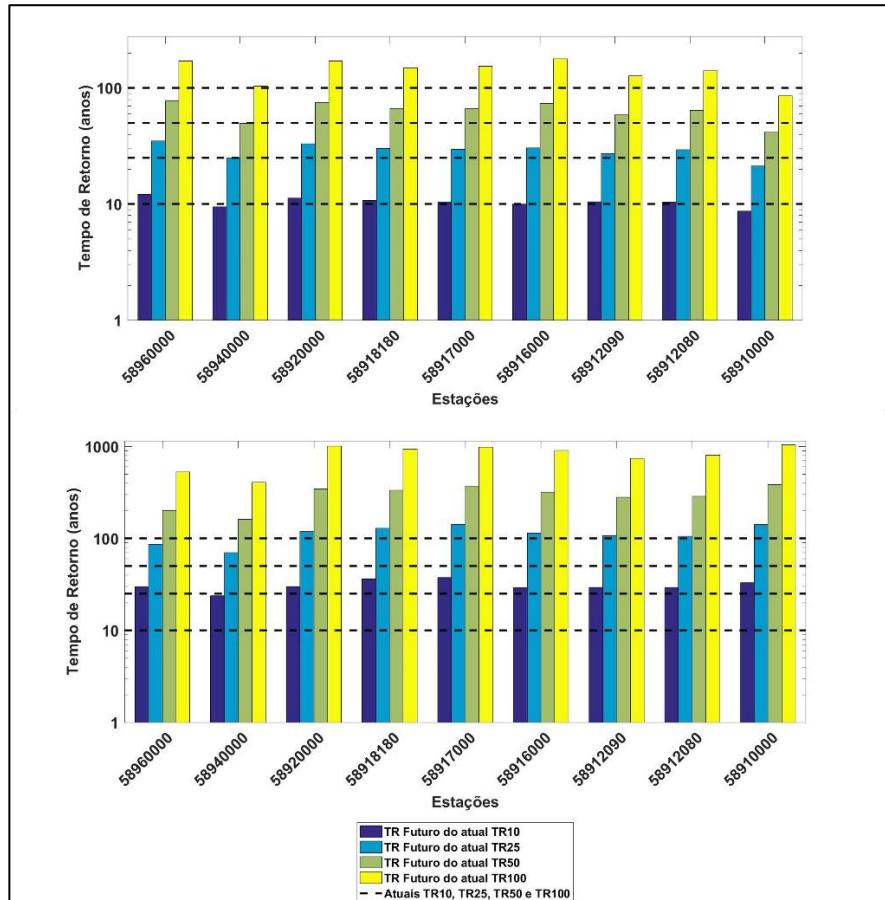


Figura 3.136 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Muriaé.

3.11.6.2. Vazões Mínimas

Também foi estudado o impacto das mudanças climáticas nas vazões de referência para cenários futuros, com o objetivo de fornecer subsídios aos órgãos gestores e aos CBHs para a tomada de decisão e planejamento dos recursos hídricos da BHPS. A Tabela 3.33 mostra a mediana de alteração percentual dos 19 modelos para o curto e para o longo prazo, a vazão atual de referência e as vazões de referência futuradas.

A sub-bacia do Rio Muriaé foi avaliada em 9 locais com estações fluviométricas. A sub-bacia apresentou as maiores médias de redução das vazões mínimas, com -10% no curto prazo e -7% no longo prazo. A vazão média de longo período mostrou alteração negativa no curto prazo e positiva no longo prazo. Destaca-se que a vazão $Q_{7,10}$ apresentou reduções médias de -13% no curto prazo e -10% no longo prazo. Os resultados apontam para uma forte redução na disponibilidade hídrica da sub-bacia, sendo necessário pensar formas de proteger os mananciais hídricos nesse cenário.

Tabela 3.33 – Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Rio Muriaé.

Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m ³ /s)						
						Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m ³ /s)
Q_{mlt}						Q₉₅					
58960000	-3,5	4	97,4	94	101,3	58960000	-11,6	-6,4	20,6	18,3	19,3
58940000	-3,4	3,7	82,8	80	85,9	58940000	-12,5	-7,3	14,9	13	13,8
58920000	-2,1	4,5	47,6	46,6	49,7	58920000	-10,6	-4,2	10,2	9,1	9,8
58918180	-2,1	2,9	22,4	22	23,1	58918180	-10,2	-2,4	5,6	5,1	5,5
58917000	-2,6	2,9	17,1	16,7	17,6	58917000	-10,6	-2,3	4,5	4	4,4
58916000	-2,8	2,7	9,7	9,5	10	58916000	-6,2	-1,4	2,9	2,8	2,9
58912090	-1,3	5,3	4,3	4,2	4,5	58912090	-6,1	-1,6	1	0,9	1
58912080	-1,2	5,4	3,7	3,7	3,9	58912080	-5,8	-1,8	0,8	0,8	0,8
58910000	-3,4	4	3,3	3,2	3,4	58910000	-9,6	-11,8	0,8	0,7	0,7
Q₉₀						Q_{7,10}					
58960000	-9,7	-10,7	25,3	22,8	22,6	58960000	-17,4	-16,8	12,4	10,3	10,4
58940000	-9,6	-11,6	18,2	16,5	16,1	58940000	-18,7	-16,8	9,2	7,5	7,6
58920000	-9	-5,5	12,2	11,1	11,5	58920000	-13,8	-10,8	6,7	5,8	6
58918180	-9,2	-4	6,8	6,2	6,5	58918180	-13,4	-10,3	3,9	3,3	3,5
58917000	-9,4	-4,5	5,2	4,7	5	58917000	-13,6	-10,1	3,1	2,7	2,8
58916000	-7,4	-2,6	3,4	3,1	3,3	58916000	-10,2	-5,6	2,1	1,9	2
58912090	-8,3	-2,5	1,2	1,1	1,2	58912090	-10,2	-6,3	0,7	0,6	0,7
58912080	-8,1	-2,3	1	0,9	1	58912080	-10	-5,8	0,6	0,5	0,6
58910000	-8,1	-12,3	0,9	0,9	0,8	58910000	-10,5	-8,3	0,6	0,5	0,5

3.12. SUB-BACIA DO RIO CARANGOLA

A sub-bacia do Rio Carangola está localizada no nordeste da BHPS, sendo que a sub-bacia fica dividida entre os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. O rio Carangola é o rio principal desta sub-bacia e não há outros rios significativos na sub-bacia, sendo que recebe contribuições de alguns ribeirões. Além disso, o rio Carangola deságua no rio Muriaé. A cabeceira do rio Carangola encontra-se a uma altitude de 1.000 metros e sua foz a 150 metros. A sub-bacia do Rio Carangola possui uma média pluviométrica anual de 1.297 mm, sendo sua região central a área com menor precipitação; enquanto a região que recebe a maior quantidade de chuva localiza-se na porção leste da sub-bacia, próximo à cabeceira do Ribeirão Inverno. A sub-bacia do Rio Carangola não possui interferências hidráulicas relevantes, como transposições, reservatórios e grandes hidrelétricas. Há, entretanto, alguns aproveitamentos hidrelétricos de menor escala com pouca influência nos estudos desenvolvidos.

A gestão de recursos hídricos tem como unidade territorial a bacia hidrográfica. No entanto, a área de atuação dos Comitês de Bacia Hidrográfica poderá ser, também, a sub-bacia hidrográfica de tributário do curso de água principal da bacia, ou de tributário desse tributário ou, ainda, um grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas. Além disso, a área de atuação de CBHs estaduais deverá

respeitar os limites geográficos dos estados que compõem a bacia hidrográfica do rio federal. Dessa forma, as sub-bacias apresentadas no estudo podem ter seus limites geográficos diferentes das áreas de atuação dos Comitês, conforme observado na Figura 3.137.

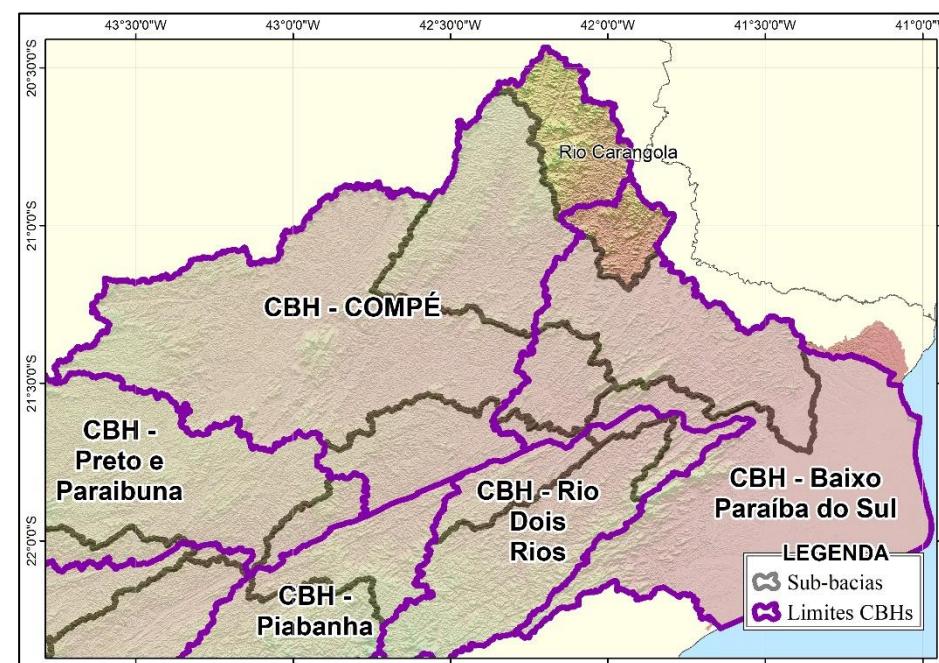


Figura 3.137 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Rio Carangola.

Na sub-bacia do Rio Carangola estão presentes os seguintes CBHs: COMPÉ e Baixo Paraíba do Sul. A divisão dos comitês dentro da sub-bacia é delimitada pelos limites entre os estados de Minas Gerais (onde está localizado o CBH COMPÉ) e Rio de Janeiro (onde está localizado o CBH Baixo Paraíba do Sul).

3.12.1. Dados Pluviométricos

Na etapa de levantamento de dados pluviométricos realizada para o EDH-PS, foram identificadas 23 estações pluviométricas na área da sub-bacia do Rio Carangola e suas adjacências, das quais apenas 7 possuíam algum registro de precipitação ao longo do seu período de operação. Contudo, após tratamento e consistência das séries históricas, permaneceram 6 estações no banco de dados consistido, o qual subsidiou as demais etapas do presente estudo. Todas as estações podem ser visualizadas na Figura 3.138.

3.12.2. Dados Fluviométricos

Na fase de levantamento de dados fluviométricos do presente estudo, foram inventariadas 16 estações fluviométricas na área da sub-bacia do Rio Carangola, porém somente 9 delas possuíam algum dado de vazão. Já na etapa de consistência dos dados hidrológicos, foram removidas do banco de dados oficial estações cujas séries eram muito curtas, apresentavam muitas falhas, ou

algum tipo de inconsistência que pudesse comprometer o estudo de disponibilidade hídrica; assim, restaram 3 estações com boa qualidade de dados nesta sub-bacia, para serem utilizadas nas etapas seguintes do EDH-PS. As informações como código, nome, nome do rio, nome do município, localização e área de drenagem de cada estação podem ser visualizadas no Quadro 3.12. A distribuição espacial das estações pode ser observada na Figura 3.139.

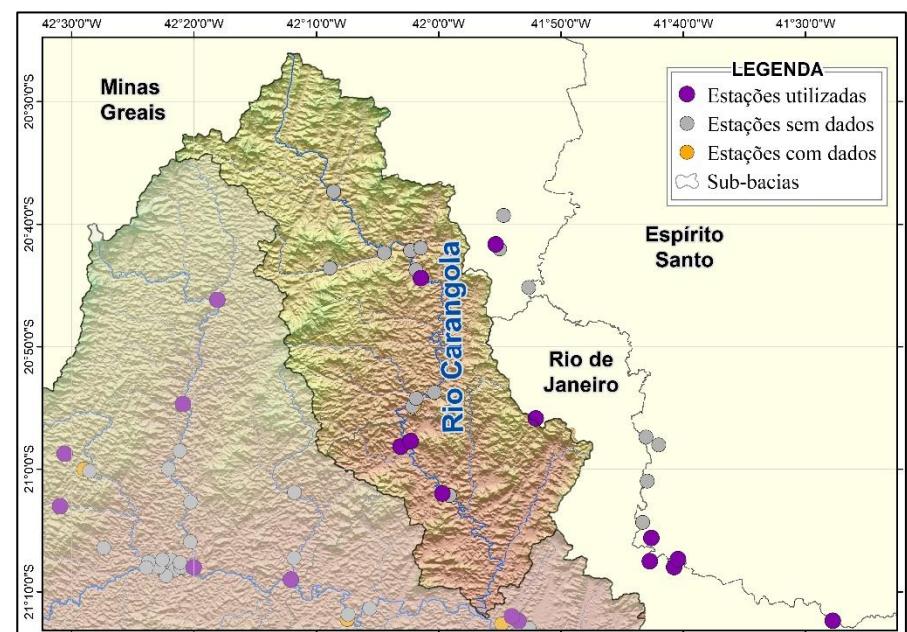


Figura 3.138 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Rio Carangola.

Quadro 3.12 – Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Carangola.

Estação	Nome	Nome do Rio	Nome do município	Latitude	Longitude	AD (Km ²)
58934000	PORCIUNCULA	RIO CARANGOLA	PORCIÚNCULA	-20,96	-42,04	1.340
58933000	PCH TOMBOS JUSANTE	RIO CARANGOLA	TOMBOS	-20,91	-42,04	1.271
58930000	CARANGOLA	RIO CARANGOLA	CARANGOLA	-20,74	-42,02	773

Fonte: ANA (2023).

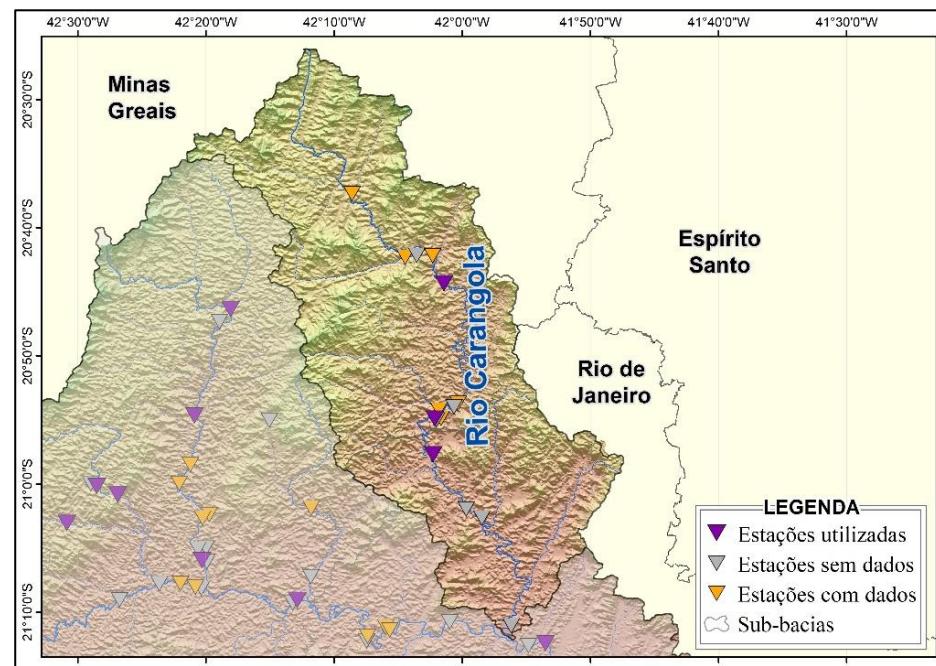


Figura 3.139 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Rio Carangola.

3.12.3. Renaturalização de vazões

Buscando entender o quanto de água disponível em um rio ainda pode ser usada, foram calculadas as séries de vazões renaturalizadas, através da soma das séries de usos consuntivos totais com as séries observadas nas estações fluviométricas. O objetivo é conhecer a vazão natural dos rios, auxiliando na gestão dos recursos hídricos. Para isso são apresentadas as séries de usos consuntivos específicos anuais e sazonais para a sub-bacia (Figura 3.140) e os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões (Figura 3.141).

Em relação aos gráficos da série de vazões específicas dos usos consuntivos (Figura 3.140), observa-se na análise anual uma tendência de redução dos usos ao longo do período de análise, em especial após o período perto do ano 2000. Já na análise sazonal, percebeu-se uma tendência de aumento no uso consuntivo nos meses do período mais seco do ano em relação ao período mais úmido.

Em seguida, a Figura 3.141 mostra os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões. Ou seja, indica quanto a devolução do uso consuntivo para o hidrograma implica em alteração da vazão de referência avaliada. Observa-se que as porcentagens de aumento variaram de 0,59% a

0,71% para a Q_{mlt} e de 2,9% a 4,43% para a Q_{95} . Na Q_{mlt} ocorre um aumento das taxas de alteração da vazão ao longo do rio principal, da região de montante para a região de jusante. Já para a vazão Q_{95} , o resultado espacial das taxas de alteração é heterogêneo ao longo do rio principal.

3.12.4. Estacionariedade das Séries

A análise da estacionariedade das séries de vazões busca entender, ao longo do período analisado, se ocorre uma estabilidade dos dados (comportamento estacionário), uma redução dos valores (tendência negativa) ou um aumento dos valores (tendência positiva). A Figura 3.142 mostra a análise da estacionariedade das estações fluviométricas (no primeiro gráfico) e das estações pluviométricas (no segundo gráfico).

Nas estações fluviométricas foram avaliados os seguintes índices: vazão média anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada em 5 dias consecutivos, vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos e vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos no período úmido (entre os meses de dezembro a fevereiro).

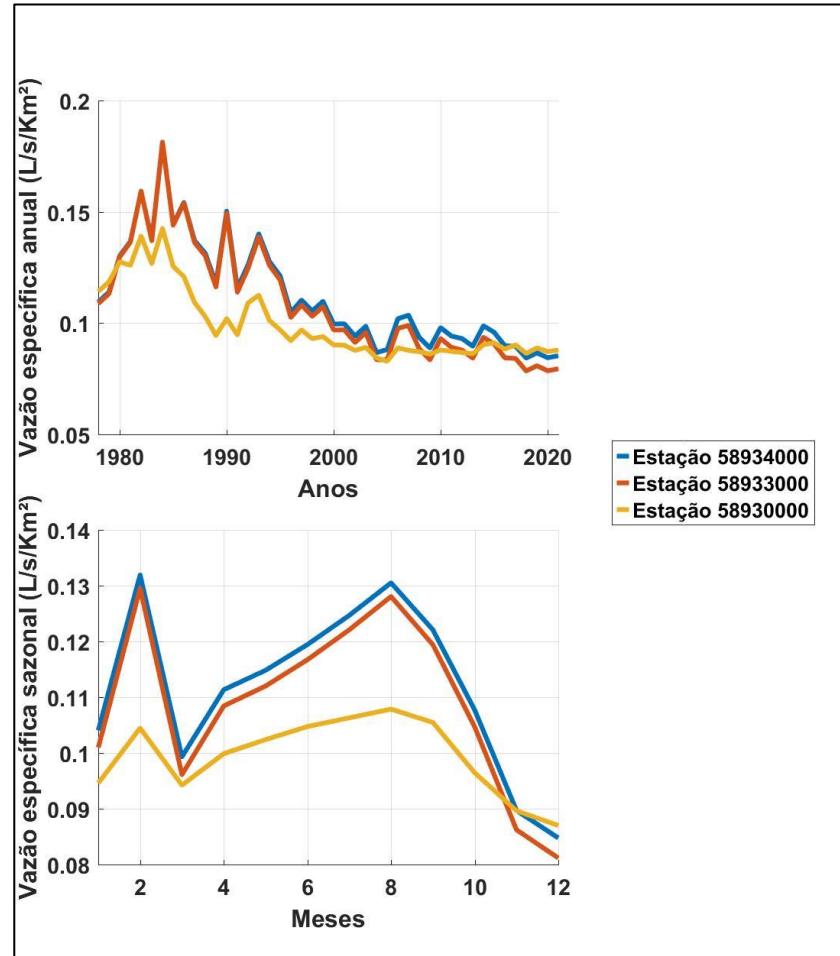


Figura 3.140 – Resultados de vazão específica média anual (primeiro gráfico) e sazonal (segundo gráfico) para as estações da sub-bacia do Rio Carangola.

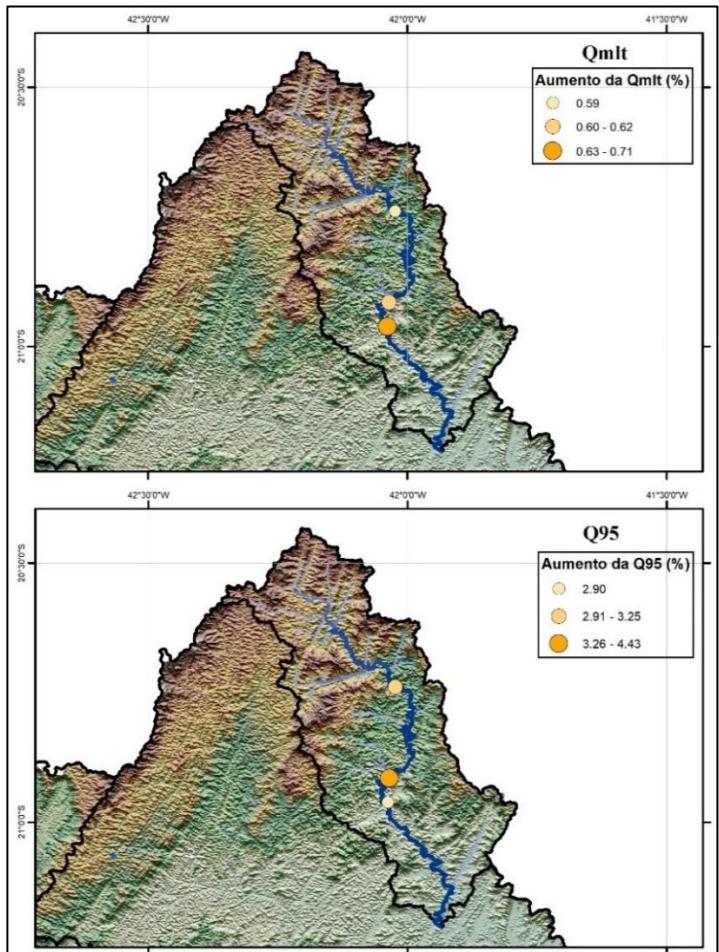


Figura 3.141 – Resultados do aumento de Q_{m1t} (primeiro mapa) e Q₉₅ (segundo mapa) para a sub-bacia do Rio Carangola.

Para as estações pluviométricas foram avaliados os seguintes índices: precipitação total anual, número de dias com precipitação no ano, precipitação diária igual ou superior a 50 mm no ano e precipitação diária máxima em 5 dias consecutivos no ano. Em todos os índices das estações fluviométricas ocorreu uma predominância de estações indicando a estacionariedade. Nas estações pluviométricas, em todos os índices analisados, metade das estações apresentou tendência positiva, sendo que em três índices a outra metade indicou a estacionariedade e em um índice a tendência negativa.

Dessa forma, grande parte das estações fluviométricas indicam que não ocorreram alterações significativas nos valores de vazão na sub-bacia. Já para os dados pluviométricos, os resultados apontam que em metade das estações, em todos os índices analisados, ocorreu um aumento nas taxas de precipitação na série histórica analisada.

3.12.5. Disponibilidade Hídrica

3.12.5.1. Calibração do modelo

Na Tabela 3.34 podem ser visualizados os valores dos indicadores estatísticos e dos erros percentuais obtidos a partir da calibração do modelo hidrológico MGB em cada estação fluviométrica da sub-bacia do Rio Carangola. Os resultados obtidos na calibração estão

dentro da margem considerada satisfatória para modelos hidrológicos. Na metodologia, é detalhado o significado de cada um dos indicadores utilizados.

Destaca-se que, na presente sub-bacia, o menor erro médio foi observado na vazão Q_{m1t} , de -0,3%, enquanto o maior erro médio ocorreu na vazão Q_{90} , com -3,6%. Em relação aos indicadores estatísticos, o Nash-Sutcliffe e o Nash-Sutcliffe Logarítmico médios da sub-bacia foram, respectivamente 0,7 e 0,8, o que indica que os resultados foram bons. Os resultados de calibração mostrado para cada estação podem ser verificados com maior nível de detalhe no Produto 4 do presente estudo.

Tabela 3.34 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Rio Carangola.

Estação	Área de drenagem (km ²)	Tamanho da Série (anos)	Nash-Sutcliffe	Nash-Sutcliffe Logarítmico	Erro de Volume (%)	Erro de Q_{95} (%)	Erro de Q_{90} (%)	Erro de Q_{m1t} (%)	Erro de $Q_{7,10}$ (%)
58933000	1.285	2,4	0,6	0,8	15,2	-7,2	2,3	15,2	-
58930000	770	43	1	1	0	0	0,1	0	0
58934000	1.317	43	0,7	0,8	-4,2	-16,7	-13,9	-4,2	6,2

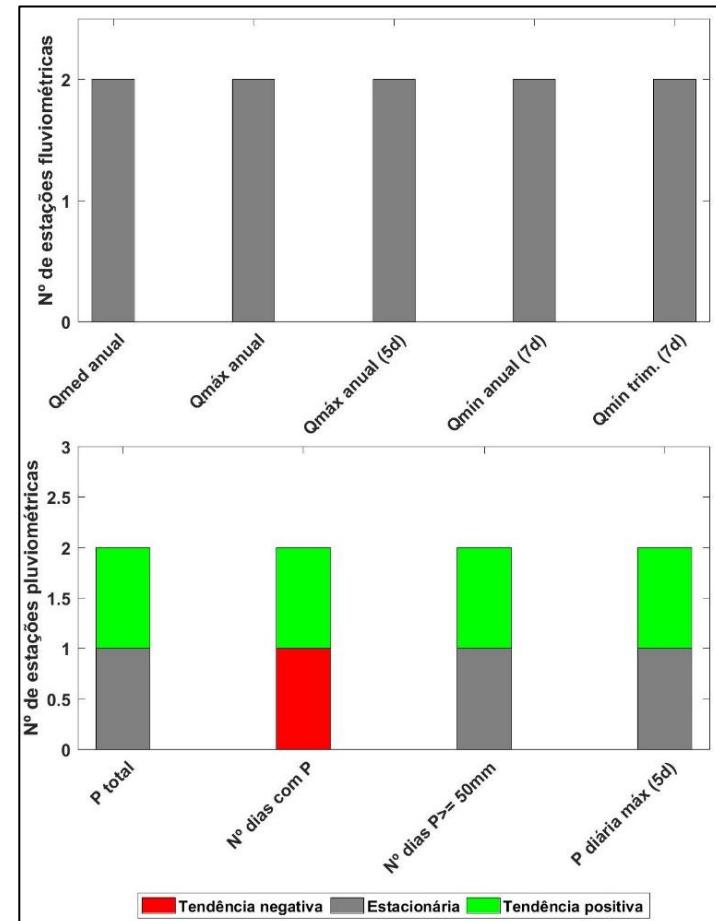


Figura 3.142- Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Carangola.

3.12.5.2. Resultados das Vazões de Referência

Conhecer as vazões de referência é essencial para realizar a gestão responsável dos recursos hídricos, já que elas representam a quantidade de água disponível nos rios. A disponibilidade das vazões de referência na sub-bacia do Rio Carangola é apresentada na Figura 3.145, onde são mostradas a vazão de longo termo "Q_{mlt}", a vazão que é superada ou igualada em 90% do tempo na série histórica "Q₉₀", a vazão superada ou igualada em 95% do tempo "Q₉₅" e a vazão de 7 dias consecutivos com tempo de retorno de 10 anos, "Q_{7,10}". Ainda, na Figura 3.143 é possível observar o mapa de vazões específicas ($m^3/s/km^2$) da Q_{mlt} e Q₉₅.

Já o diagrama unifilar, apresentado pela Figura 3.144, mostra com detalhes o comportamento do rio principal e dos seus afluentes, como a ocorrência de hidrelétricas e transposição na sub-bacia. Também são apresentadas as entregas de vazão ao longo dos rios que compõem a sub-bacia, proporcionando uma visão geral e completa dos recursos hídricos.

Ao longo do rio principal ocorre um aumento das vazões, devido à contribuição do seu afluente, o Ribeirão São João. No exutório da sub-bacia, onde o rio Carangola contribui para o rio Muriaé, a vazão Q_{mlt} é de 24,8 m^3/s , a vazão Q₉₅ é de 3,6 m^3/s , a vazão Q₉₀ é de 4,6 m^3/s e a vazão Q_{7,10} é de 2,1 m^3/s .

Por fim, também são apresentados os resultados de vazão de referência na sub-bacia no formato de *Boxplot* para a vazão anual e mensais (Figura 3.146). Os resultados permitem identificar a sazonalidade das vazões de referência na bacia. Devido ao desproporcional número de trechos de pequena área de drenagem na base de resultados, o gráfico somente mostrou resultados de trechos com área de drenagem acima de 200km².

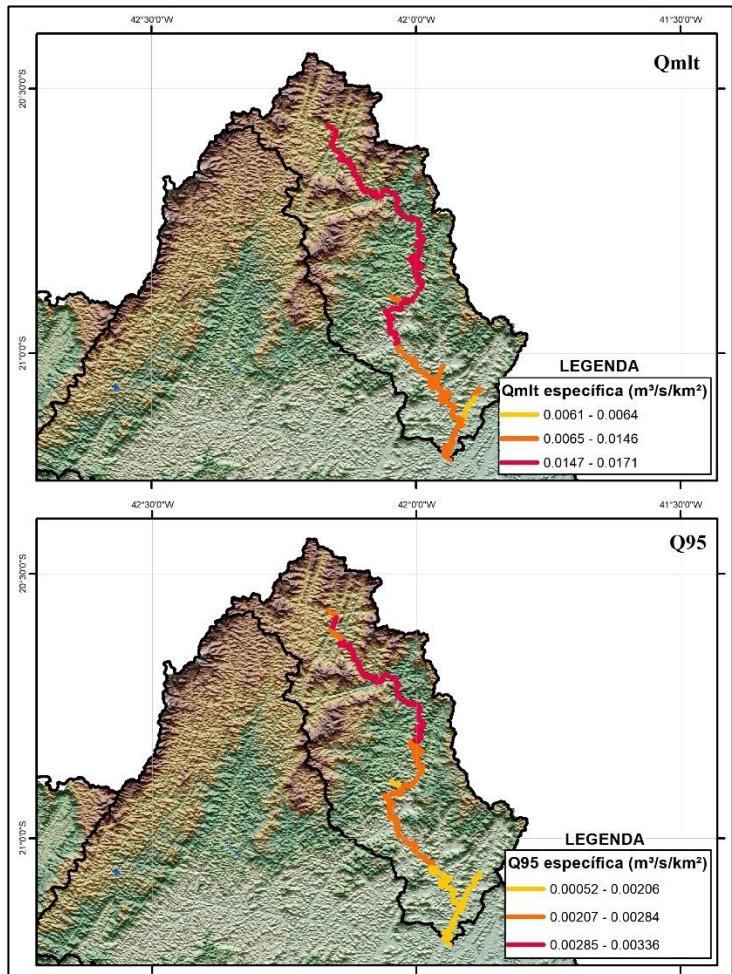


Figura 3.143 - Resultados das vazões específicas ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) de referência anuais Q_{mlt} e Q_{95} .

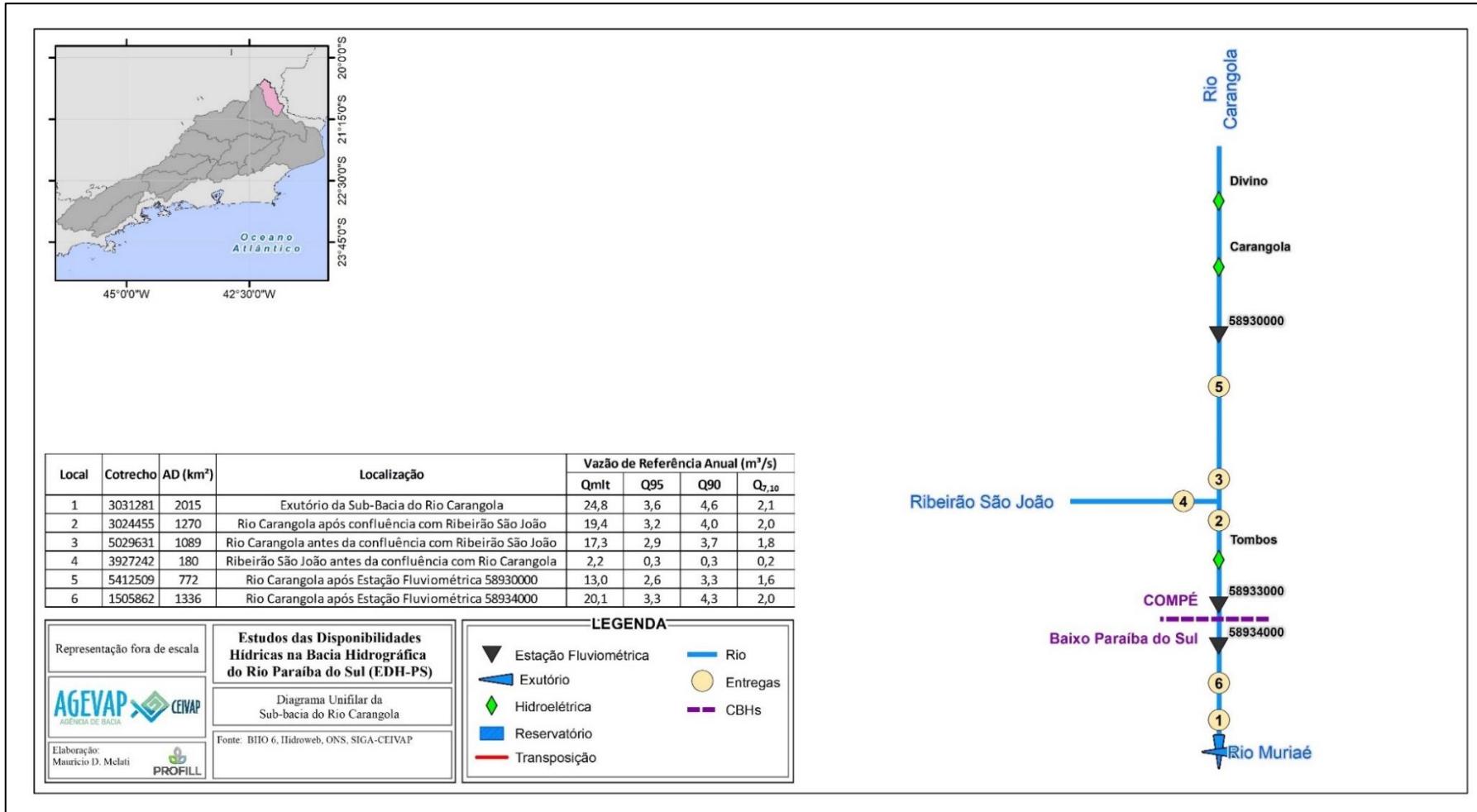


Figura 3.144 - Vazões de entrega (m³/s) da sub-bacia do Rio Carangola.

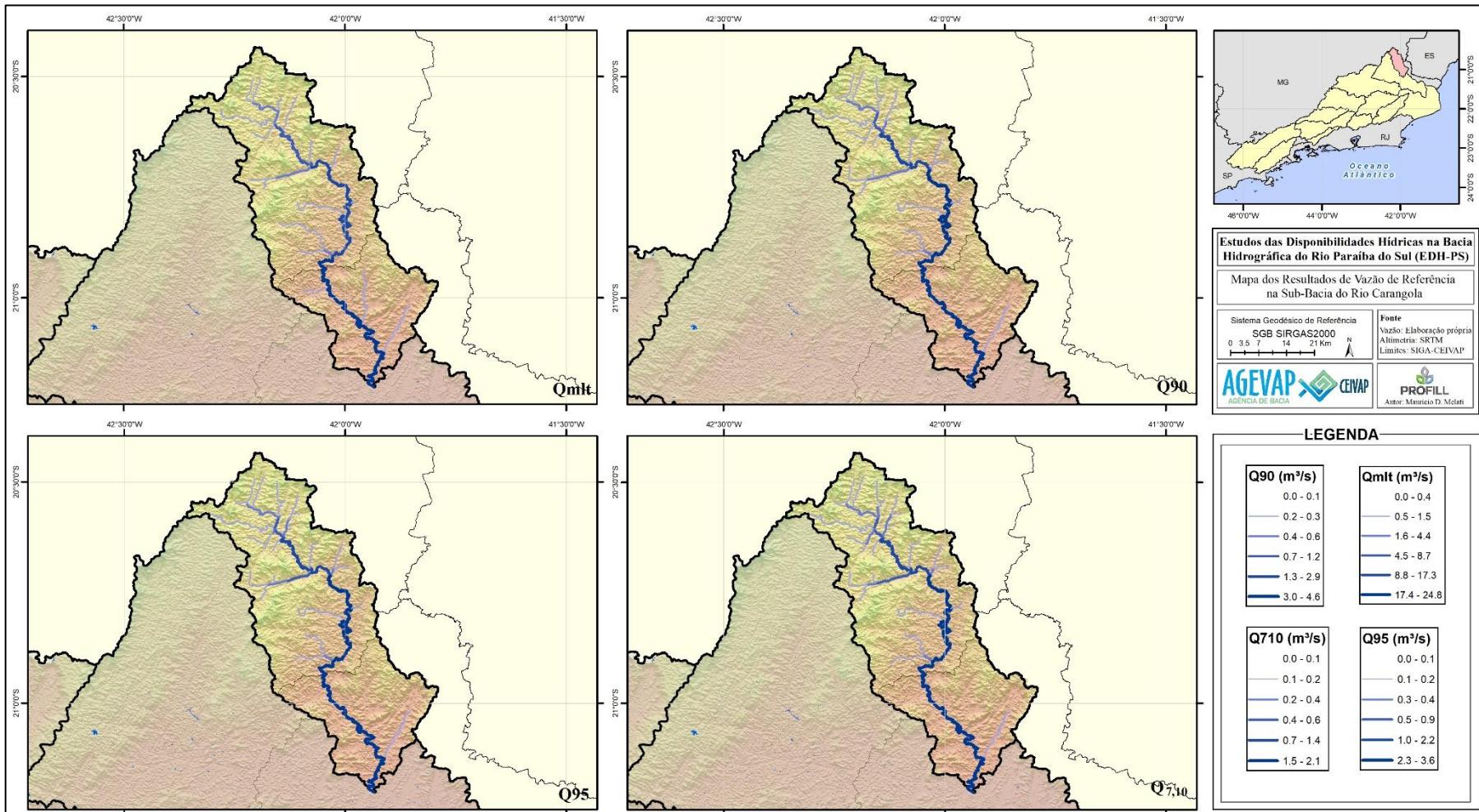


Figura 3.145 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{mlt}, Q₉₀, Q₉₅ e Q_{7,10} na sub-bacia do Rio Carangola.



Figura 3.146 – Boxplot dos resultados das vazões específicas (L/s/km^2) de referência anual e mensais Q_{m1t} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Rio Carangola.

3.12.5.3. Período Crítico

Entre os anos de 2015 e 2021 a BHPS passou pelas anomalias negativas mais intensas em suas vazões médias desde 1960 (período máximo avaliado no estudo), ocasionando na diminuição das vazões por longos períodos. A Figura 3.147 mostra as reduções de vazão verificadas no período crítico considerando as diferenças entre os anos hidrológicos de 1978-2020 e 2014-2020, nas vazões de referência Q_{m1t} (primeiro mapa) e Q_{95} (segundo mapa) anuais. A sub-bacia do Rio Carangola apresentou reduções que variaram de até $3,8 \text{ m}^3/\text{s}$ na vazão Q_{m1t} , e $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ na vazão Q_{95} . Ao longo do rio Carangola a redução das vazões ocorre de maneira crescente e são observadas as maiores reduções próximo ao exutório da sub-bacia.

3.12.6. Cenário de Mudanças Climáticas

3.12.6.1. Vazões máximas

O cálculo de vazões máximas, considerando diferentes tempos de retorno, é essencial para o dimensionamento eficiente de sistemas hidráulicos, garantindo a resiliência e a segurança necessárias diante de variabilidades climáticas e condições extremas. O cálculo das vazões máximas ($Q_{máx}$) para os tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos foi realizado nas minibacias de localização das estações fluviométricas selecionadas na área de estudo, apresentadas no Produto 4.

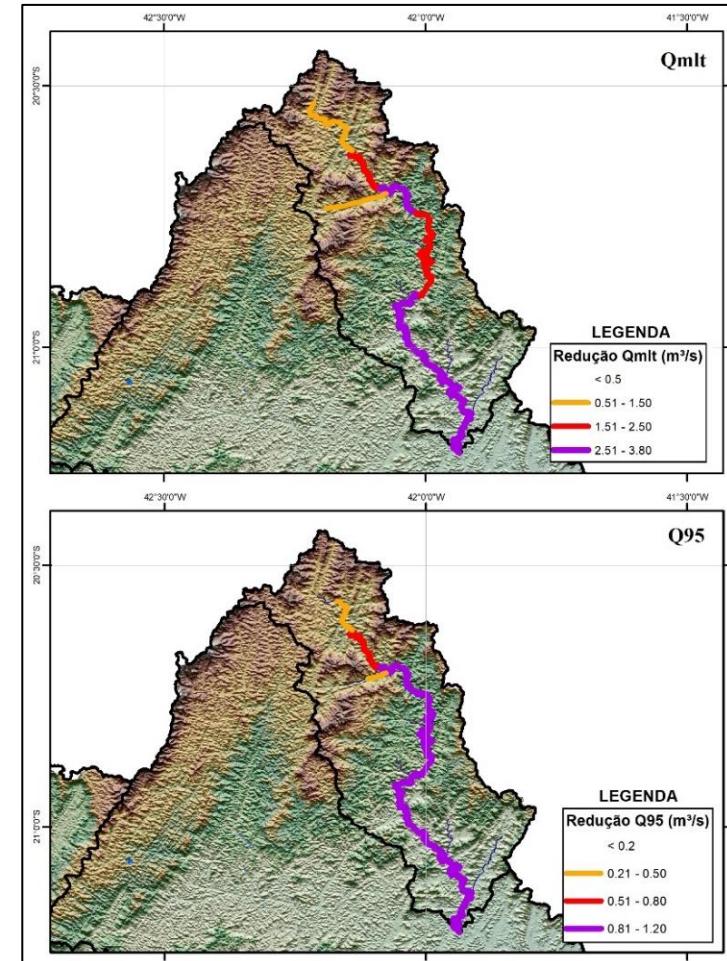


Figura 3.147 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{m1t} e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-Bacia do Rio Carangola.

A sub-bacia do Rio Carangola foi avaliada em 3 locais com estações fluviométricas. Os resultados mostraram alterações médias entre todos os TRs de -6% no curto prazo e 34% no longo prazo. No curto prazo as alterações de todas as estações foram negativas, indicando diminuição nos valores de vazões máximas da bacia. As alterações no longo prazo mostraram-se homogêneas para todas as estações analisadas, com aumento das vazões máximas para os diferentes TRs. Isso significa que as vazões máximas tendem a aumentar na sub-bacia de maneira significativa no longo prazo, enquanto no curto prazo deve ocorrer a diminuição das vazões.

Dessa forma, deve-se pensar no longo prazo para realizar a gestão de recursos hídricos, o planejamento urbano e o dimensionamento de sistemas hidráulicos considerando as consequências que o aumento das vazões pode trazer. Entre essas consequências estão inundações mais severas e intensas, ampliação das manchas de inundaçao urbana, danos a infraestrutura das cidades, entre outros.

A Tabela 3.35 apresenta os fatores de alteração para o curto e longo prazo, as máximas vazões renaturalizadas ou simuladas no P4 e as suas projeções para o curto e longo prazo. Em complemento, a Figura 3.148 apresenta os resultados de alteração dos TRs considerando as vazões futuras em cenários de mudança climática para o curto e para o longo prazo.

Tabela 3.35 – Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Rio Carangola.

Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizad a ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)
TR 10					
58934000	-7,5	28,3	512,5	474,1	657,6
58933000	-6	29,6	403,4	379,2	522,8
58930000	-8	32,6	187,9	172,9	249,2
TR 25					
58934000	-7,1	29,5	679,3	631,0	879,6
58933000	-5,4	32,2	527,7	499,2	697,6
58930000	-6,3	39	235,9	221,0	327,9
TR 50					
58934000	-7	32,1	802,9	746,7	1060,7
58933000	-5,2	34,5	619,9	587,7	833,8
58930000	-4,8	41	271,5	258,4	382,8
TR 100					
58934000	-6,9	34	925,7	861,8	1240,4
58933000	-4,9	35,3	711,4	676,6	962,6
58930000	-3,7	40,4	306,8	295,4	430,7

** Nas estações sem vazão máxima renaturalizada calculada foram utilizados os dados de vazão máxima simulada no P4.

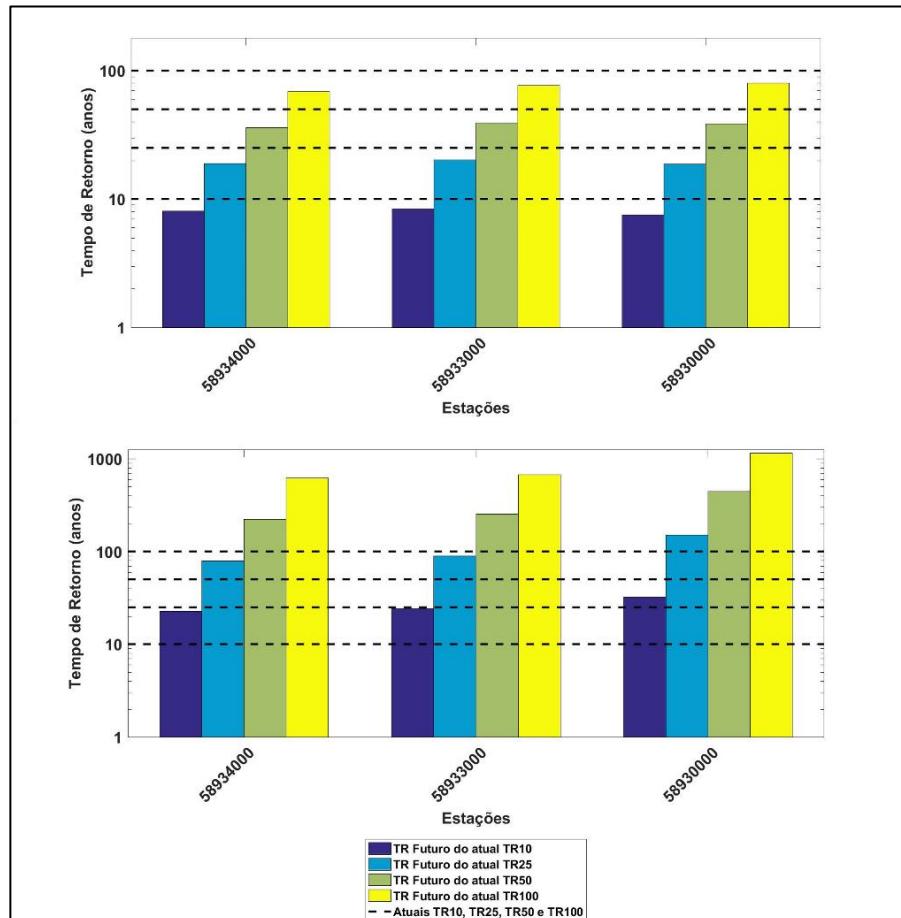


Figura 3.148 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Rio Carangola.

3.12.6.2. Vazões Mínimas

Também foi estudado o impacto das mudanças climáticas nas vazões de referência para cenários futuros, com o objetivo de fornecer subsídios aos órgãos gestores e aos CBHs para a tomada de decisão e planejamento dos recursos hídricos da BHPS. A Tabela 3.36 mostra a mediana de alteração percentual dos 19 modelos para o curto e para o longo prazo, a vazão atual de referência e as vazões de referência futuradas.

A sub-bacia do Rio Carangola foi avaliada em 3 locais com estações fluviométricas. Os resultados mostram reduções médias nas vazões de referência em -17% no curto prazo e em -19% no longo prazo. A vazão média de longo período apresentou variação positiva no curto prazo e negativa no longo prazo. Destacam-se as alterações médias da vazão $Q_{7,10}$, apresentando redução de -23% no curto prazo e de -22% no longo prazo. Salienta-se que as reduções projetadas para a sub-bacia são relevantes e podem impactar no balanço hídrico e gestão futura dos recursos hídricos.

Tabela 3.36 - Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Rio Carangola.

Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m ³ /s)
Q_{mlt}					
58934000	-4,6	2,9	19,9	18,9	20,4
58933000	-4,6	2,9	19,5	18,6	20,1
58930000	-4,8	3,1	12,9	12,3	13,3
Q_{90}					
58934000	-13,8	-18,8	4,3	3,7	3,5
58933000	-14,4	-18,8	4,1	3,5	3,3
58930000	-11,5	-14,3	3,2	2,9	2,8
Q_{95}					
58934000	-15,6	-18,9	3,3	2,8	2,7
58933000	-15,6	-18,2	3,2	2,7	2,6
58930000	-11,8	-12,2	2,5	2,2	2,2
$Q_{7,10}$					
58934000	-26,5	-26,5	2	1,5	1,5
58933000	-26,4	-26,5	2	1,5	1,5
58930000	-15,3	-14,1	1,6	1,3	1,4

3.13. SUB-BACIA DO BAIXO VALE DO RIO PARAÍBA DO SUL

A sub-bacia do baixo Vale do Rio Paraíba do Sul está localizada no extremo leste da BHPS, em sua porção mais a jusante, sendo que toda a sua área está compreendida no estado do Rio de Janeiro. O rio principal desta sub-bacia é o rio Paraíba do Sul, o qual recebe contribuições significativas, ao longo do trecho compreendido na área do Médio Vale Superior, do rio Dois Rios e do rio Muriaé. Outro rio relevante presente nesta sub-bacia é o rio Macabu, porém este não possui ligação com o rio Paraíba do Sul. A cabeceira do rio Macabu encontra-se a uma altitude de 1.200 metros e na foz do rio Paraíba do Sul a altitude é de cerca de 2 metros. A sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul possui a menor média pluviométrica anual da BHPS, com 1.056 mm, sendo próximo à foz a área com menor precipitação; enquanto a região que recebe a maior quantidade de chuva é a cabeceira do rio Macabu. Na sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul está localizada a transposição Macabu-Macaé, a qual ocorre desde os anos 50 para fins de geração de energia elétrica.

A gestão de recursos hídricos tem como unidade territorial a bacia hidrográfica. No entanto, a área de atuação dos Comitês de Bacia Hidrográfica poderá ser, também, a sub-bacia hidrográfica de

tributário do curso de água principal da bacia, ou de tributário desse tributário ou, ainda, um grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas. Além disso, a área de atuação de CBHs estaduais deverá respeitar os limites geográficos dos estados que compõem a bacia hidrográfica do rio federal. Dessa forma, as sub-bacias apresentadas no estudo podem ter seus limites geográficos diferentes das áreas de atuação dos Comitês, conforme observado na Figura 3.149.

Na sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul estão presentes os seguintes CBHs: Baixo Paraíba do Sul e Rio Dois Rios. A sub-bacia está contemplada quase totalmente pelo CBH Baixo Paraíba do Sul. O CBH Rio Dois Rios está presente próximo a sub-bacia do Rio Dois Rios, delimitado pela região da margem direita do Rio Paraíba do Sul.

3.13.1. Dados Pluviométricos

Na etapa de levantamento de dados pluviométricos realizada para o EDH-PS, foram identificadas 64 estações pluviométricas na área da sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul e suas adjacências, das quais apenas 49 possuíam algum registro de precipitação ao longo do seu período de operação. Contudo, após tratamento e consistência das séries históricas, permaneceram 14 estações no banco de dados consistido, o qual subsidiou as demais etapas do

presente estudo. Todas as estações podem ser visualizadas na Figura 3.150.

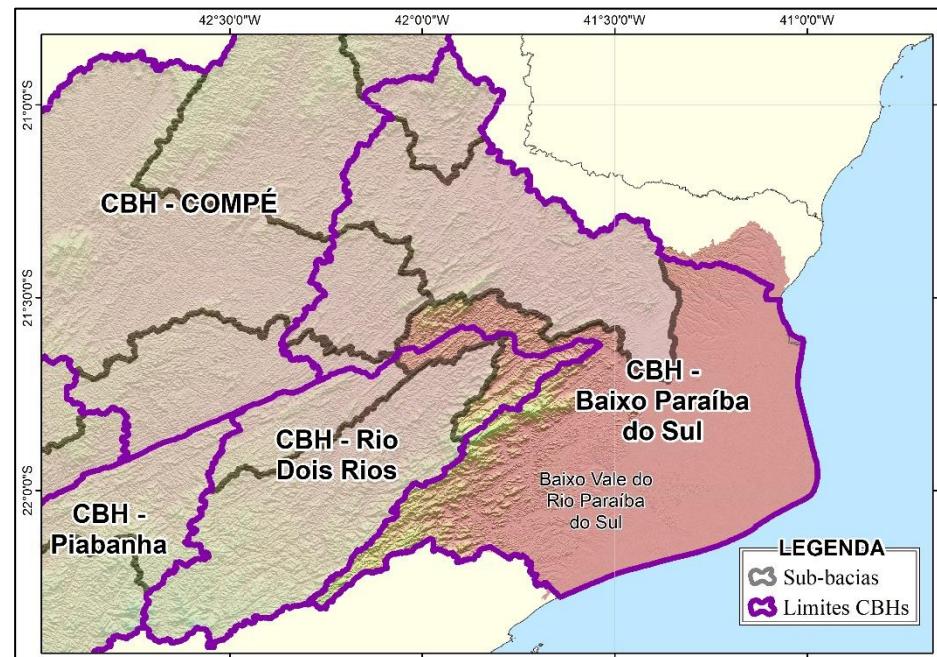


Figura 3.149 – Mapa com a localização espacial dos CBHs presentes na sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.

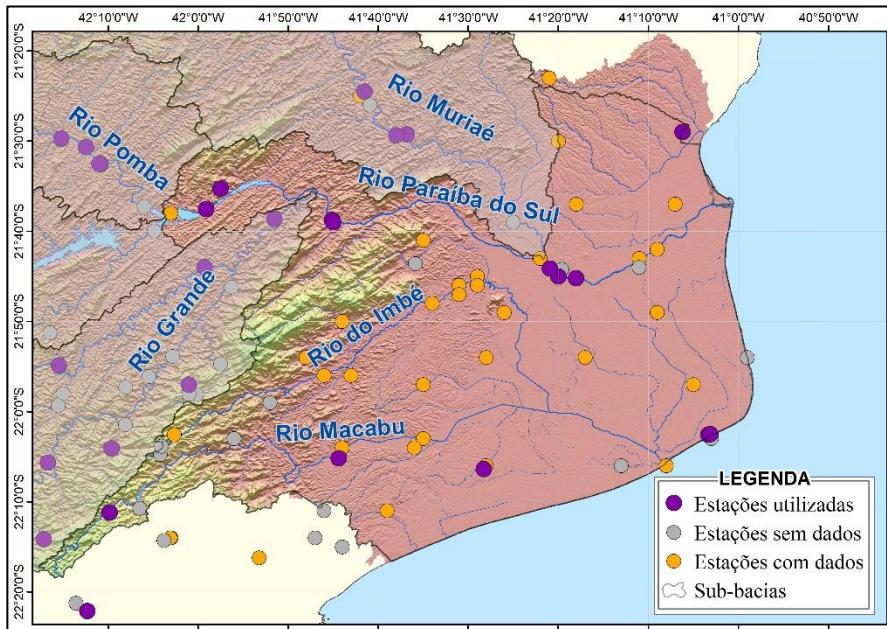


Figura 3.150 - Mapa das estações pluviométricas da sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.

3.13.2. Dados Fluviométricos

Na fase de levantamento de dados fluviométricos do presente estudo, foram inventariadas 175 estações fluviométricas na área da sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul, porém somente 5 delas possuíam algum dado de vazão.

Já na etapa de consistência dos dados hidrológicos, foram removidas do banco de dados oficial estações cujas séries eram muito curtas, apresentavam muitas falhas, ou algum tipo de inconsistência que pudesse comprometer o estudo de disponibilidade hídrica; assim, restaram 4 estações com boa qualidade de dados nesta sub-bacia, para serem utilizadas nas etapas seguintes do EDH-PS. As informações como código, nome, nome do rio, nome do município, localização e área de drenagem de cada estação podem ser visualizadas no Quadro 3.13. A distribuição espacial das estações pode ser observada na Figura 3.151.

Quadro 3.13– Informações sobre as estações fluviométricas da sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.

Estação	Nome	Nome do Rio	Nome do município	Latitude	Longitude	AD (Km ²)
59100000	MACABUZINHO	RIO MACABU	CONCEIÇÃO DE MACABU	-22,09	-41,74	630
58795000	TRÊS IRMÃOS	RIO PARAÍBA DO SUL	CAMBUCI	-21,63	-41,99	45.300
58974000	CAMPOS - PONTE MUNICIPAL	RIO PARAÍBA DO SUL	CAMPO DOS GOYTACAZES	-21,75	-41,32	55.700
58880001	SÃO FIDELIS	RIO PARAÍBA DO SUL	SÃO FIDÉLIS	-21,65	-41,75	48.900

Fonte: ANA (2023).

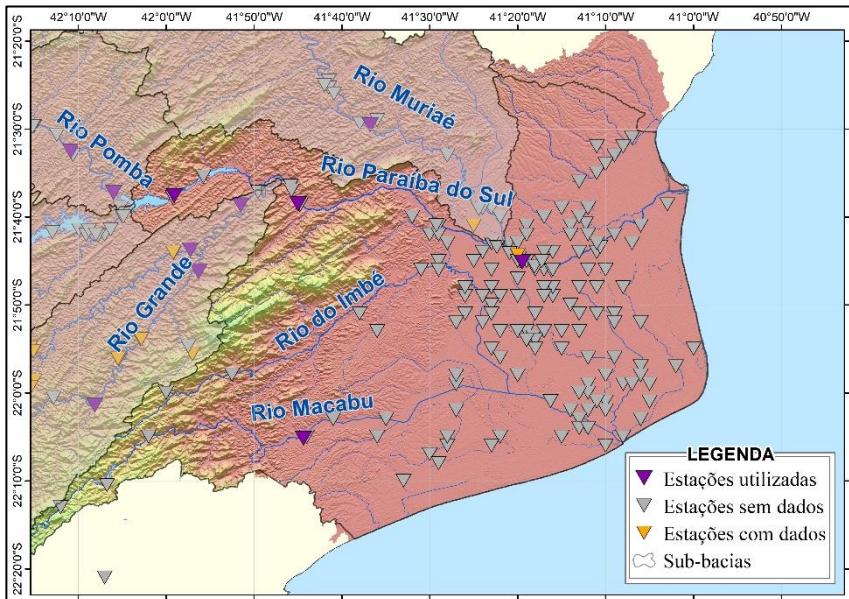


Figura 3.151 - Mapa das estações fluviométricas da sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.

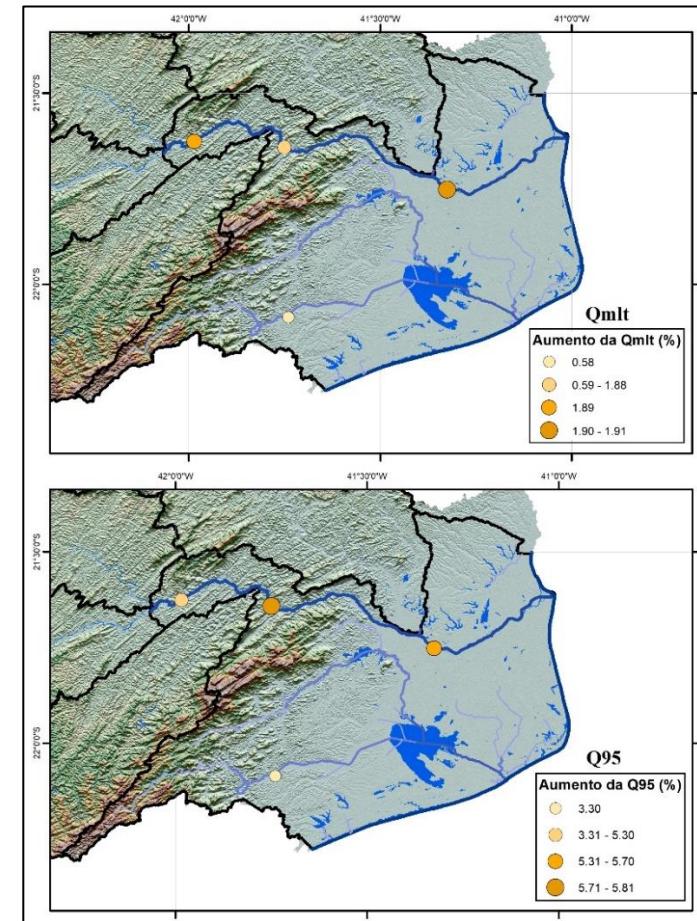
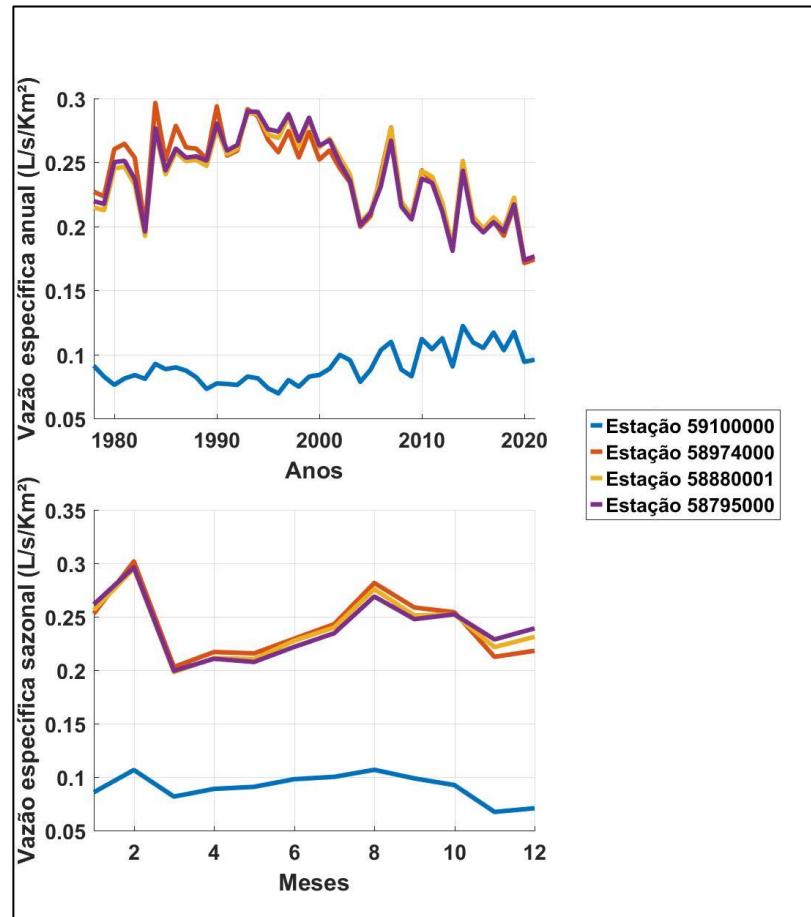
3.13.3. Renaturalização de vazões

Buscando entender o quanto de água disponível em um rio ainda pode ser usada, foram calculadas as séries de vazões renaturalizadas, através da soma das séries de usos consuntivos totais com as séries observadas nas estações fluviométricas. O objetivo é conhecer a vazão natural dos rios, auxiliando na gestão dos recursos hídricos. Para isso são apresentadas as séries de usos

consutivos específicos anuais e sazonais para a sub-bacia (Figura 3.152) e os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões (Figura 3.153).

Em relação aos gráficos da série de vazões específicas dos usos consutivos (Figura 3.152), observa-se que na análise anual a maioria das estações apresentou redução nos usos consutivos nos últimos anos, enquanto uma estação apresentou um aumento dos usos. Já na análise sazonal, percebeu-se uma tendência de aumento no uso consutivo no período mais seco do ano em relação ao período mais úmido.

Em seguida, a Figura 3.153 mostra os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{m1t} após a renaturalização da série de vazões. Ou seja, indica quanto a devolução do uso consutivo para o hidrograma implica em alteração da vazão de referência avaliada. Observa-se que as porcentagens de aumento variaram de 0,58% a 1,91% para a Q_{m1t} e de 3,3% a 5,81% para a Q_{95} . As estações mais próximas ao exutório da sub-bacia apresentaram as maiores taxas de aumento, e singularmente uma das estações da vazão Q_{m1t} apresentou uma taxa de alteração mais baixa ao longo do rio principal.



3.13.4. Estacionariedade das Séries

A análise da estacionariedade das séries de vazões busca entender, ao longo do período analisado, se ocorre uma estabilidade dos dados (comportamento estacionário), uma redução dos valores (tendência negativa) ou um aumento dos valores (tendência positiva). A Figura 3.154 mostra a análise da estacionariedade das estações fluviométricas (no primeiro gráfico) e das estações pluviométricas (no segundo gráfico).

Nas estações fluviométricas foram avaliados os seguintes índices: vazão média anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada em 5 dias consecutivos, vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos e vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos no período úmido (entre os meses de dezembro a fevereiro). Para as estações pluviométricas foram avaliados os seguintes índices: precipitação total anual, número de dias com precipitação no ano, precipitação diária igual ou superior a 50 mm no ano e precipitação diária máxima em 5 dias consecutivos no ano. Para as estações fluviométricas, 3 índices indicaram metade das estações com tendência negativa e metade indicando a estacionariedade, enquanto 2 índices indicaram predominância do comportamento estacionário. Para as estações pluviométricas ocorre a predominância da estacionariedade em 2 índices, e nos

outros 2 índices o resultado é homogêneo, com metade das estações indicando a estacionariedade, e o restante indicando tendência positiva e negativa.

Dessa forma, pelo menos metade das estações fluviométricas indicam, em todos os índices, que não ocorreram alterações significativas nos valores de vazão na sub-bacia. Para os dados pluviométricos, os resultados apontam que também não ocorreram grandes alterações nas taxas de precipitação ao longo das séries históricas analisadas.

3.13.5. Disponibilidade Hídrica

3.13.5.1. Calibração do modelo

Na Tabela 3.37 podem ser visualizados os valores dos indicadores estatísticos e dos erros percentuais obtidos a partir da calibração do modelo hidrológico MGB em cada estação fluviométrica da sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul. Os resultados obtidos na calibração estão dentro da margem considerada satisfatória para modelos hidrológicos. Na metodologia, é detalhado o significado de cada um dos indicadores utilizados.

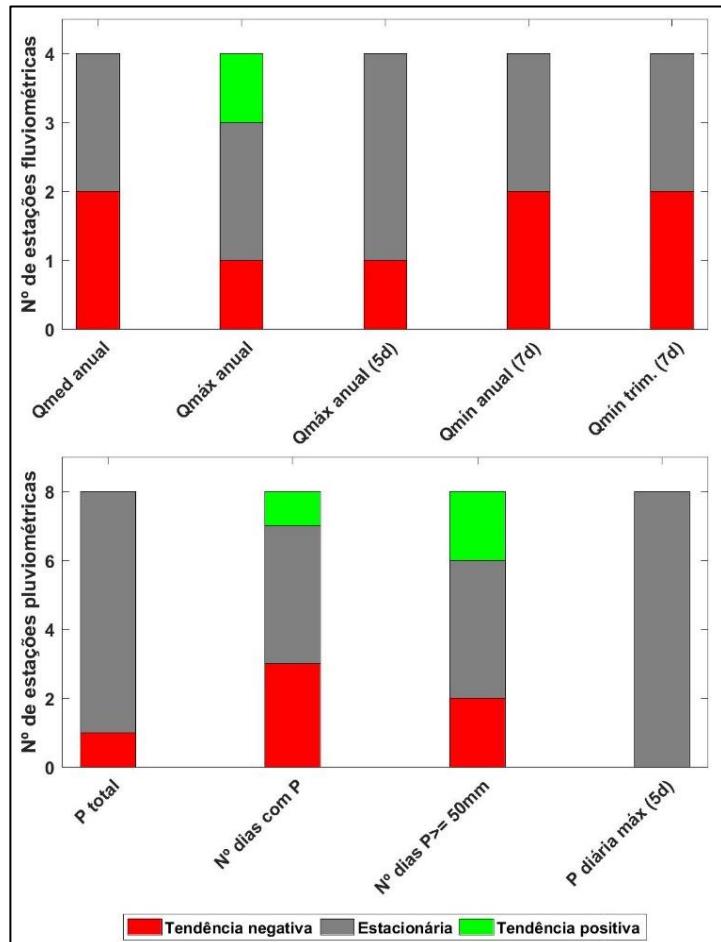


Figura 3.154- Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para a sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.

Destaca-se que, na presente sub-bacia, o menor erro médio foi observado na vazão Q_{90} , de 0%, enquanto o maior erro médio ocorreu na vazão $Q_{7,10}$, com 1,7%. Em relação aos indicadores estatísticos, o Nash-Sutcliffe e o Nash-Sutcliffe Logarítmico médios da sub-bacia foram iguais a 0,9, o que indica que os resultados foram muito bons. Os resultados de calibração mostrado para cada estação podem ser verificados com maior nível de detalhe no Produto 4 do presente estudo.

Tabela 3.37 - Resultados da calibração do Modelo Hidrológico na sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.

Estação	Área de drenagem (km ²)	Tamanho da Série (anos)	Nash-Sutcliffe	Nash-Sutcliffe Logarítmico	Erro de Volume (%)	Erro de Q_{95} (%)	Erro de Q_{90} (%)	Erro de Q_{min} (%)	Erro de $Q_{7,10}$ (%)
58795000	43.140	42,9	1	1	0	0	0	0	0
58880001	46.747	41,1	1	1	0,2	0,2	0	0,2	0,1
58974000	55.669	43	1	1	0	0	0	0	0
59100000	630	44	0,6	0,7	-6,4	1,7	0	-6,4	6,8

3.13.5.2. Resultados das Vazões de Referência

Conhecer as vazões de referência é essencial para realizar a gestão responsável dos recursos hídricos, já que elas representam a quantidade de água disponível nos rios. A disponibilidade das vazões de referência na sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul

Sul é apresentada na Figura 3.157, onde são mostradas a vazão de longo termo “ Q_{mlt} ”, a vazão que é superada ou igualada em 90% do tempo na série histórica “ Q_{90} ”, a vazão superada ou igualada em 95% do tempo “ Q_{95} ” e a vazão de 7 dias consecutivos com tempo de retorno de 10 anos, “ $Q_{7,10}$ ”. Ainda, na Figura 3.155 é possível observar o mapa de vazões específicas ($m^3/s/km^2$) da Q_{mlt} e Q_{95} .

Já o diagrama unifilar, apresentado pela Figura 3.156, mostra com detalhes o comportamento do rio principal e dos seus afluentes, como a ocorrência de hidrelétricas e transposição na sub-bacia. Também são apresentadas as entregas de vazão ao longo dos rios que compõem a sub-bacia, proporcionando uma visão geral e completa dos recursos hídricos.

Na sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba, o rio Paraíba do Sul recebe contribuições de dois rios, sendo a mais significativa vinda do rio Muriaé, seguido pelo rio Dois Rios. No exutório da sub-bacia, onde o rio Paraíba do Sul desagua no Oceano Atlântico, a vazão Q_{mlt} é de $719,3\ m^3/s$, a vazão Q_{95} é de $241,2\ m^3/s$, a vazão Q_{90} é de $284,4\ m^3/s$ e a vazão $Q_{7,10}$ é de $186,3\ m^3/s$. Na sub-bacia também está presente o rio Macabu, onde ocorre a transposição para a bacia hidrográfica dos rios Macaé e das Ostras. No exutório do rio Macabu, onde ele desagua no Oceano Atlântico, a vazão Q_{mlt} é de $40,5\ m^3/s$, a vazão Q_{95} é de $13,7\ m^3/s$, a vazão Q_{90} é de $15,3\ m^3/s$ e a vazão $Q_{7,10}$ é de $8,5\ m^3/s$.

Por fim, também são apresentados os resultados de vazão de referência na sub-bacia no formato de *Boxplot* para a vazão anual e mensais (Figura 3.158). Os resultados permitem identificar a sazonalidade das vazões de referência na bacia. Devido ao desproporcional número de trechos de pequena área de drenagem na base de resultados, o gráfico somente mostrou resultados de trechos com área de drenagem acima de $200\ km^2$.

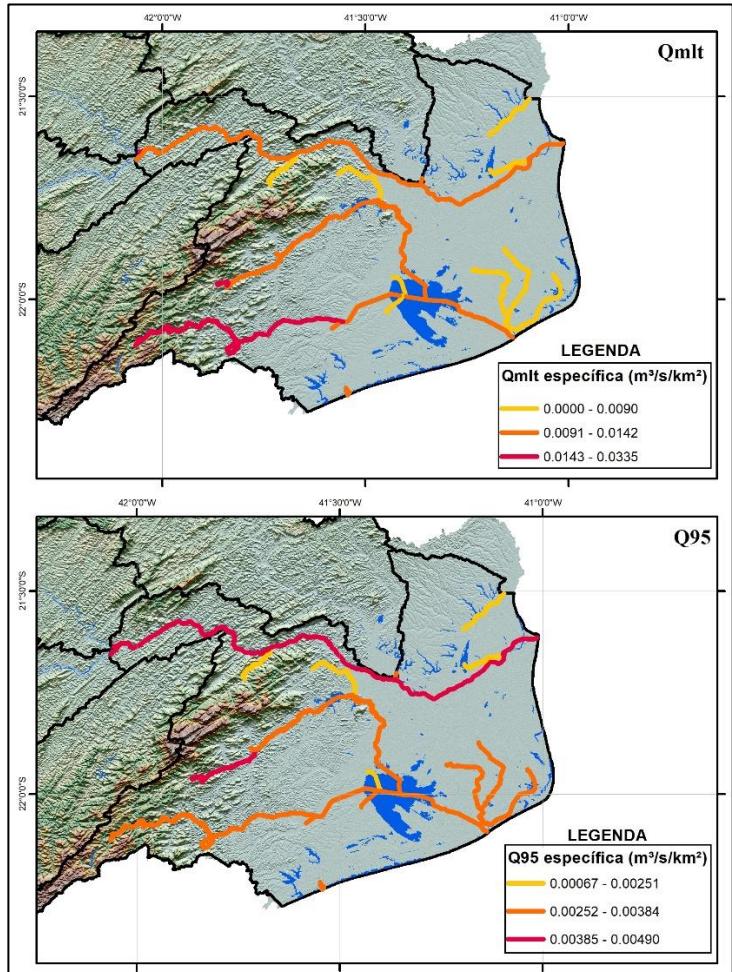


Figura 3.155 - Resultados das vazões específicas ($m^3/s/km^2$) de referência anuais Q_{m1t} e Q_{95} .

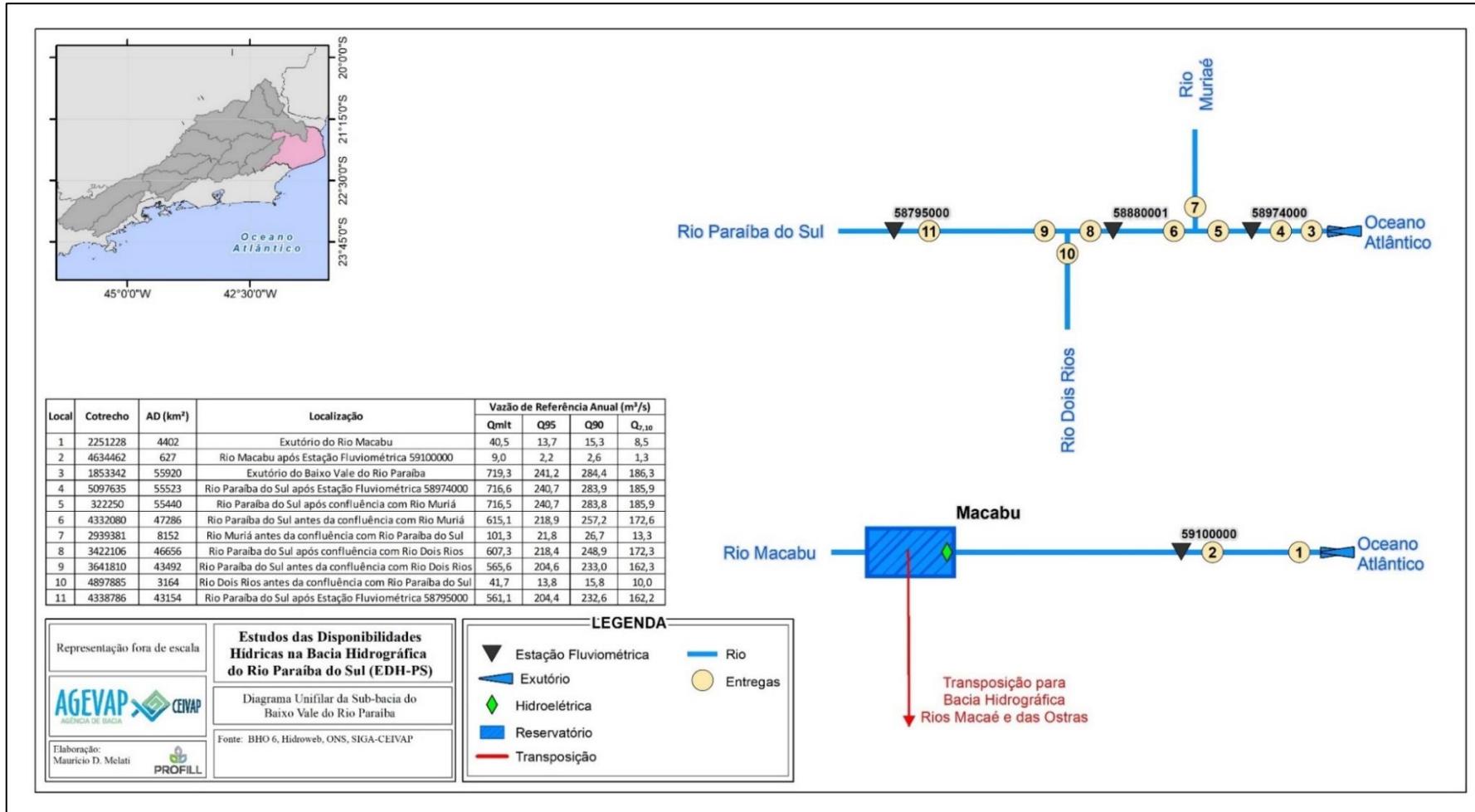


Figura 3.156 - Vazões de entrega (m³/s) da sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.

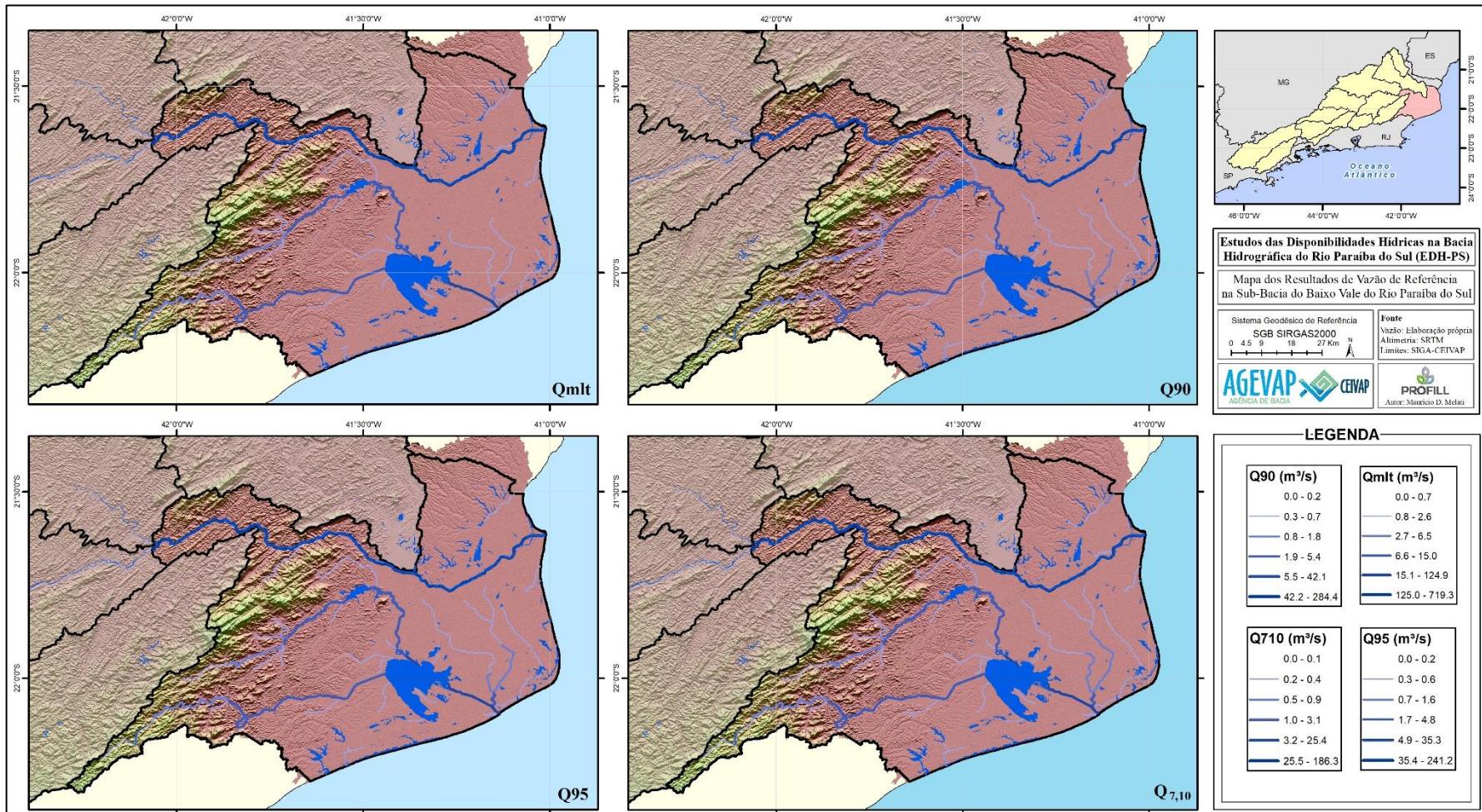


Figura 3.157 - Resultados das vazões de referência anuais Q_{m1t} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.



Figura 3.158 – Boxplot dos resultados das vazões específicas ($L/s/km^2$) de referência anual e mensais Q_{m1t} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ na sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.

3.13.5.3. Período Crítico

Entre os anos de 2015 e 2021 a BHPS passou pelas anomalias negativas mais intensas em suas vazões médias desde 1960 (período máximo avaliado no estudo), ocasionando na diminuição das vazões por longos períodos. A Figura 3.159 mostra as reduções de vazão verificadas no período crítico considerando as diferenças entre os anos hidrológicos de 1978-2020 e 2014-2020, nas vazões de referência Q_{m1t} (primeiro mapa) e Q_{95} (segundo mapa) anuais. A sub-bacia do Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul apresentou reduções que variaram até valores de $250\text{m}^3/\text{s}$ na vazão Q_{m1t} , e $68\text{m}^3/\text{s}$ na vazão Q_{95} .

3.13.5.4. Impacto das Transposições na Disponibilidade

A sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul estende-se desde a confluência do rio Pomba até a foz do rio Paraíba do Sul no Oceano Atlântico. Na Figura 3.99 são apresentadas as variações espaciais percentuais de vazão Q_{m1t} e Q_{95} na região caso os volumes transpostos fossem mantidos na BHPS. Ou seja, caso o volume médio regularizado fosse direcionado para a defluência dos reservatórios, para jusante no rio Paraíba do Sul.

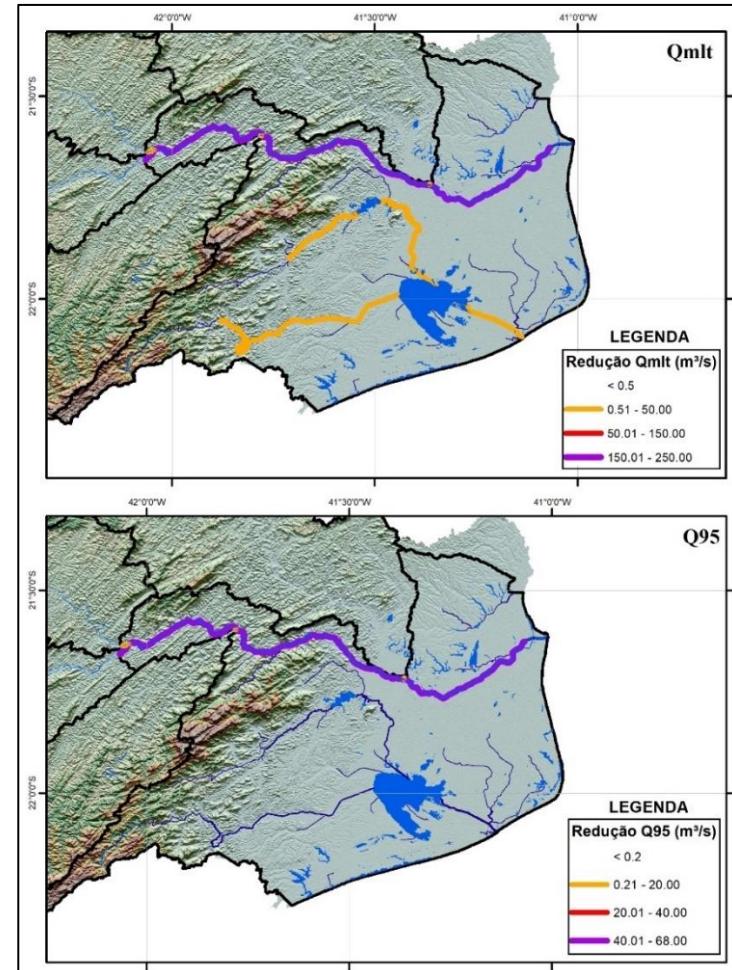


Figura 3.159 - Resultados espaciais da redução das vazões Q_{m1t} e Q_{95} no período 2014-2020 na sub-Bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.

Em ambas as vazões de referência os trechos relacionados aos setores a montante apresentam as maiores porcentagens de alteração, seguindo o padrão de diminuição observado na sub-bacia de montante. No caso da $Q_{m\text{lt}}$, as alterações nos trechos superiores do rio são da ordem de 22,0 a 28,3% e no caso da Q_{95} , de 55,5 a 67,8%. Essas porcentagens diminuem gradativamente em direção à foz do rio Paraíba do Sul, local onde atingem alterações de 17,6% ($Q_{m\text{lt}}$) e de 47,2% (Q_{95}).

3.13.6. Cenário de Mudanças Climáticas

3.13.6.1. Vazões máximas

O cálculo de vazões máximas, considerando diferentes tempos de retorno, é essencial para o dimensionamento eficiente de sistemas hidráulicos, garantindo a resiliência e a segurança necessárias diante de variabilidades climáticas e condições extremas. O cálculo das vazões máximas ($Q_{\text{máx}}$) para os tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos foi realizado nas minibacias de localização das estações fluviométricas selecionadas na área de estudo, apresentadas no Produto 4.

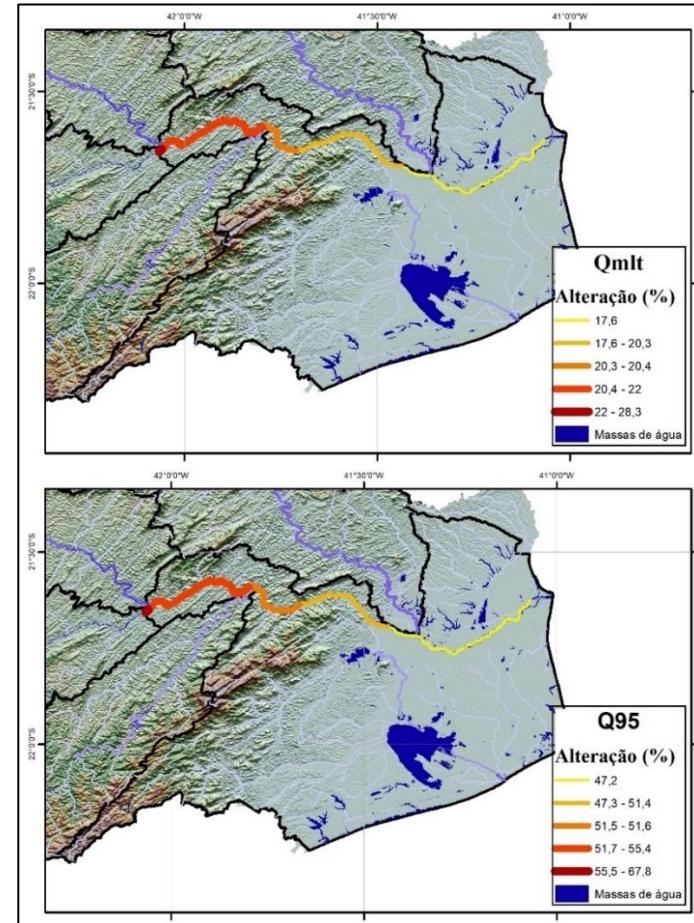


Figura 3.160 - Resultados espaciais do aumento (%) das vazões $Q_{m\text{lt}}$ e Q_{95} anual mantendo os volumes das transposições na BHPS e propagando para jusante na sub-bacia do Baixo Paraíba do Sul.

A sub-bacia do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul teve um total de três estações fluviométricas avaliadas, todas elas localizadas no rio Paraíba do Sul, e com comportamento similar em relação às alterações médias esperadas. Os resultados mostraram alterações médias entre todos os TRs de 14% no curto prazo e 28% no longo prazo. No curto prazo as três estações apresentaram alterações semelhantes ao longo dos TRs. No longo prazo a estação 58974000, localizada mais próximo a foz do rio Paraíba do Sul, em uma região de altitude mais baixa, apresentou as maiores taxas de alteração quando comparada com as demais estações, indicando o aumento das vazões máximas na região.

Isso significa que são esperados aumentos de vazão em ambos os períodos, em especial para o longo prazo, onde o aumento das vazões poderá ocorrer com maior magnitude. Dessa forma, torna-se essencial efetivar a gestão de recursos hídricos, o planejamento urbano e o dimensionamento de sistemas hidráulicos considerando as consequências que o aumento das vazões pode trazer. Entre essas consequências estão inundações mais severas e intensas, ampliação das manchas de inundaçao urbana, danos a infraestrutura das cidades, entre outros.

A Tabela 3.38 apresenta os fatores de alteração para o curto e longo prazo, as máximas vazões renaturalizadas ou simuladas no P4 e as suas projeções para o curto e longo prazo. Em complemento, a

Figura 3.161 apresenta os resultados de alteração dos TRs considerando as vazões futuras em cenários de mudança climática para o curto e para o longo prazo.

Tabela 3.38 – Resultados de vazões máximas para as estações da sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.

Estação Fluviométrica	Fator de Alteração no Curto Prazo (%)	Fator de Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Curto Prazo** (m ³ /s)	Vazão Máxima Renaturalizada ou Simulada no P4 Projetada no Longo Prazo** (m ³ /s)
TR 10					
58974000	9,6	30,1	4749,6	5205,6	6179,3
58880001	10,3	28,3	4438,4	4895,5	5694,4
58795000	10,2	29,2	3523,4	3882,8	4552,3
TR 25					
58974000	13,7	31,3	5671	6447,9	7446
58880001	13,1	25,4	5571,8	6301,7	6987
58795000	13,5	26,9	4203,2	4770,6	5333,8
TR 50					
58974000	16,2	31,4	6354,5	7383,9	8349,8
58880001	14,7	24,1	6412,6	7355,3	7958,1
58795000	15,3	25,6	4707,5	5427,7	5912,6
TR 100					
58974000	18,2	31,5	7033	8313	9248,4
58880001	15,9	24,7	7247,3	8399,6	9037,3
58795000	16,7	26,5	5208	6077,8	6588,2

** Nas estações sem vazão máxima renaturalizada calculada foram utilizados os dados de vazão máxima simulada no P4.

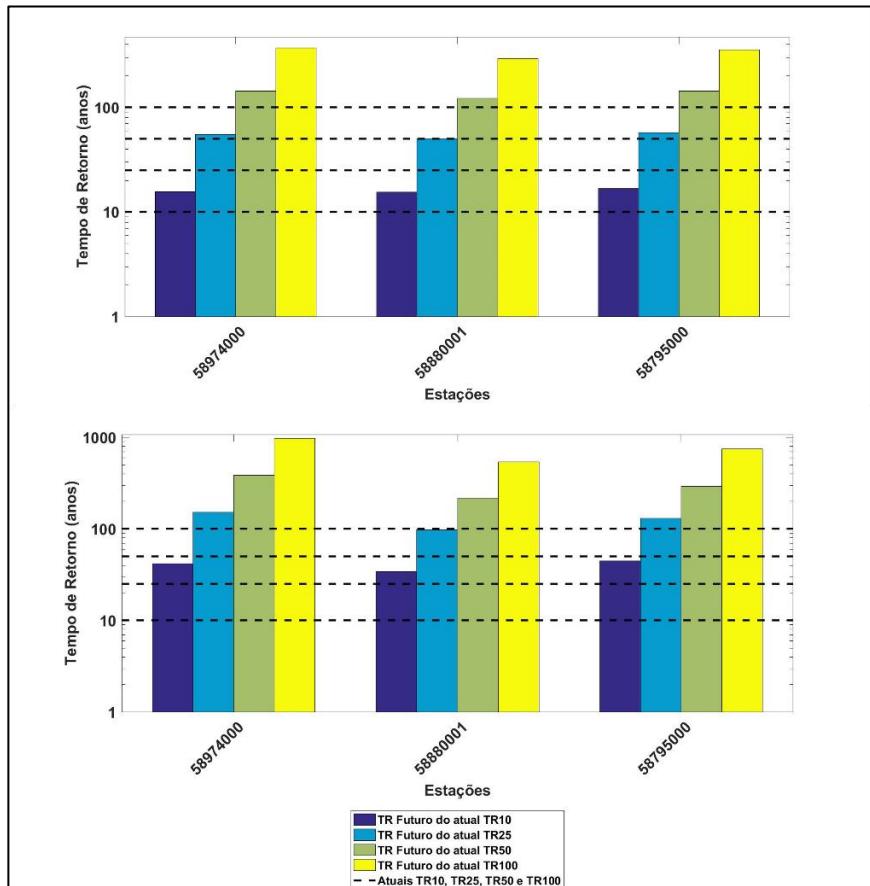


Figura 3.161 - Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo (primeiro gráfico) e no longo prazo (segundo gráfico) para a sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.

3.13.6.2. Vazões Mínimas

Também foi estudado o impacto das mudanças climáticas nas vazões de referência para cenários futuros, com o objetivo de fornecer subsídios aos órgãos gestores e aos CBHs para a tomada de decisão e planejamento dos recursos hídricos da BHPS. A Tabela 3.39 mostra a mediana de alteração percentual dos 19 modelos para o curto e para o longo prazo, a vazão atual de referência e as vazões de referência futuradas.

A sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul teve um total de três estações fluviométricas avaliadas, todas elas localizadas no rio Paraíba do Sul. Os resultados mostram alterações médias negativas na disponibilidade das vazões mínimas, sendo de -6% no curto prazo e de -3% no futuro longo. As vazões médias de longo termo apresentaram alterações negativas no curto prazo e positivas no longo prazo. Observa-se que os resultados indicam, de maneira geral, a redução das vazões mínimas de maneira mais acentuada no curto prazo, e menos acentuada no longo prazo.

Tabela 3.39 – Resultados de vazões mínimas para as estações da sub-bacia do Baixo Vale do Rio Paraíba do Sul.

Estação Fluviométrica	Alteração no Curto Prazo (%)	Alteração no Longo Prazo (%)	Vazão de Referência atual (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Curto Prazo (m ³ /s)	Vazão de Referência Futura Projetada no Longo Prazo (m ³ /s)
Q_{mlt}					
58974000	-3,5	6,8	716,6	691,4	765,4
58880001	-3	7,3	608	589,9	652,4
58795000	-2,6	7,3	561,1	546,6	602
Q_{90}					
58974000	-7,8	-3,3	283,9	261,7	274,6
58880001	-8,2	-3,8	248,9	228,5	239,4
58795000	-8	-3,9	232,6	214,1	223,6
Q_{95}					
58974000	-8,9	-2,3	240,7	219,3	235,3
58880001	-8,6	-2,7	218,5	199,7	212,6
58795000	-8,5	-2,5	204,4	186,9	199,3
$Q_{7,10}$					
58974000	-6,6	-7,4	185,9	173,7	172,3
58880001	-6,7	-6,6	172,3	160,8	161
58795000	-7,3	-6,6	162,2	150,4	151,5

4. ANÁLISE INTEGRADA DA BHPS

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (BHPS) fica situada na região sudeste do Brasil. A região é dividida em 13 sub-bacias e oito comitês (o comitê de integração CEIVAP e sete comitês afluentes), conforme foi apresentado na Figura 3.3. Os totais pluviométricos médios anuais apresentam grande variação dentro da área estudada, com índices próximos a 800mm na região da foz, valores entre 1.000 e 1.260mm nas regiões de menor altimetria no centro da bacia ao longo do rio Paraíba do Sul, e aumentando significativamente nas regiões das bordas norte e sul da bacia, atingindo valores de até 2540mm. O regime chuvas acompanha as variações do relevo da bacia, onde as maiores altitudes estão nas cabeceiras, com redução em direção ao leito principal do rio Paraíba do Sul, e com menos valores na região da foz junto ao oceano. A BHPS abastece grandes polos industriais, centros urbanos e usinas hidrelétricas, possui três grandes transposições de água para bacias adjacentes (Piraí/Guandu-RJ, Jaguari/Atibainha-SP e Macabu/São Pedro-RJ), e fornece uma parte significativa da água utilizada pelas metrópoles de São Paulo e do Rio de Janeiro, sendo assim uma bacia de grande importância para o país.

4.1. DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Na etapa de levantamento de dados pluviométricos realizada para o EDH-PS, foram identificadas 1401 estações pluviométricas na BHPS e suas adjacências, das quais apenas 775 possuíam algum registro de precipitação ao longo do seu período de operação. Contudo, após tratamento e consistência das séries históricas, permaneceram 475 estações no banco de dados consistido, o qual subsidiou as demais etapas do presente estudo. Todas as estações podem ser visualizadas na Figura 4.3.

4.2. DADOS FLUVIOMÉTRICOS

Na fase de levantamento de dados fluviométricos do presente estudo, foram inventariadas 981 estações fluviométricas na BHPS, porém somente 338 delas possuíam algum dado de vazão. Já na etapa de consistência dos dados hidrológicos, foram removidas do banco de dados oficial estações cujas séries eram muito curtas, apresentavam muitas falhas, ou algum tipo de inconsistência que pudesse comprometer o estudo de disponibilidade hídrica; assim, restaram 203 estações com boa qualidade de dados para serem utilizadas nas etapas seguintes do EDH-PS.

As informações como código, nome, nome do rio, nome do município, localização e área de drenagem de cada estação podem

ser visualizadas nos capítulos anteriores para cada sub-bacia. A distribuição espacial das estações pode ser observada na Figura 4.4.

4.3. ANO HIDROLÓGICO

Segundo os autores Collischonn e Dornelles (2013), para análise de vazões máximas e mínimas é acertada a definição do ano hidrológico em contraposição ao ano civil. Segundo o autor, a principal motivação para a definição do ano hidrológico, é que nas análises de frequência de valores máximos ou mínimos anuais é adotada a hipótese que os valores e anos sucessivos são independentes entre si.

Para a definição do ano hidrológico foram calculadas as médias mensais de vazão de longo termo para as estações selecionadas com o objetivo de estudar o seu comportamento médio ao longo dos anos. Foram escolhidas para o cálculo das vazões médias de longo termo 54 estações que apresentam séries de dados com poucas falhas, permitindo representar o comportamento da vazão ao longo dos anos. A Figura 4.1 apresenta os resultados das médias mensais específicas das estações selecionadas. Observa-se que os meses de maio a outubro representam períodos de baixa disponibilidade hídrica. Já os meses de dezembro a abril representam períodos de maior disponibilidade, com vazões mais altas.

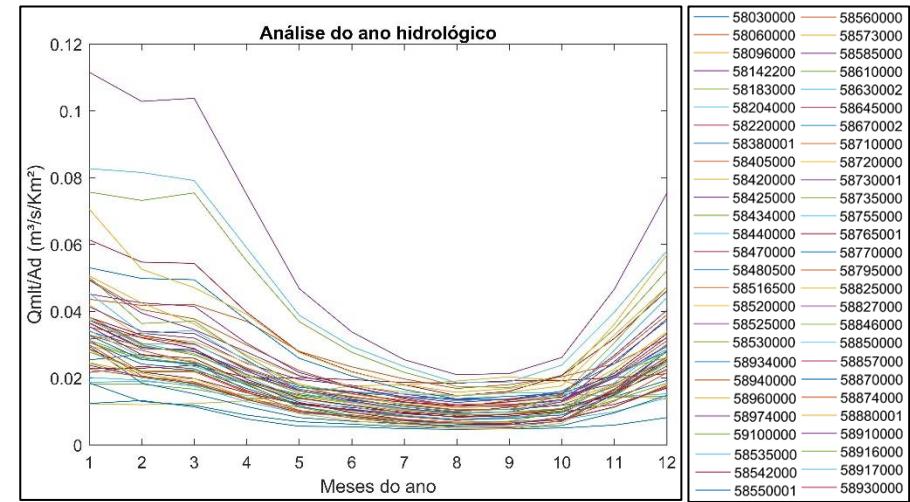


Figura 4.1 - Vazões médias específicas de longo termo com as estações que foram utilizadas na análise com dados a partir de 1978.

Já a Figura 4.2 apresenta o gráfico do tipo Boxplot com os resultados para todos os meses de cada ano. Observa-se que o período úmido se inicia no mês de dezembro. Sendo assim, para o presente estudo, o ano hidrológico foi definido como sendo dos meses de dezembro a novembro. Corrobora com a decisão as análises desenvolvidas utilizando a Q7 anual e as Q7 do trimestre novembro-janeiro, onde em alguns anos é possível perceber atraso do período chuvoso, acarretando vazões mínimas no mês de novembro.

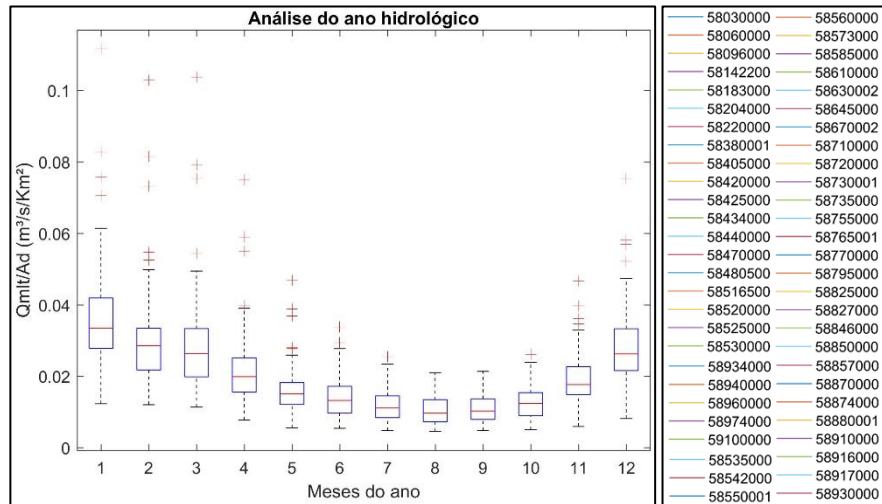


Figura 4.2 - Boxplot da análise do ano hidrológico com as estações que foram utilizadas com dados a partir de 1978.

4.4. RENATURALIZAÇÃO DE VAZÕES

Buscando entender o quanto de água disponível em um rio ainda pode ser usada, foram calculadas as séries de vazões renaturalizadas, através da soma das séries de usos consuntivos totais com as séries observadas nas estações fluviométricas. O objetivo é conhecer a vazão natural dos rios, auxiliando na gestão dos recursos hídricos. Para isso são apresentados os percentuais de alteração das vazões de referência Q_{95} e Q_{milt} após a renaturalização da série de vazões (Figura 4.5 Figura 4.6).

O mapa de aumento das vazões com permanência de 95% (Q_{95}) mostrou algumas poucas estações onde não houve aumento da Q_{95} , representadas pelos pontos na cor cinza. As estações que apresentaram os maiores valores de aumento da Q_{95} estão localizadas espacialmente próximas ao Rio Paraíba do Sul, com uma concentração em destaque na região da sub-bacia dos Rios Piabanga e Dois Rios. Já as estações com os menores valores de aumento, na faixa de 0,1% a 1,15% estão mais distribuídas espacialmente ao longo da bacia, tanto no rio principal como em afluentes, com concentração em destaque nas sub-bacias dos rios Preto, Paraibuna, Pomba (cabeceiras) e Alto Paraíba do Sul.

Em relação a Q_{milt} , observa-se que para todas as estações houve o aumento da vazão média, atingindo valores de até 19,9%. Grande parte das estações localizadas no rio principal apresentaram aumentos percentuais maiores, representadas pelas cores amarelo, laranja e vermelho, variando de 1,6% a 19,9%. As estações com menores variações de aumento, de 0% a 1,5%, estão localizadas espacialmente em regiões de cabeceira, na sua maioria. Observa-se concentração de estações com aumentos da vazão média nas sub-bacias dos rios Piabanga, Dois Rios, Médio Vale Superior do Rio Paraíba do Sul e Médio Vale Inferior do Rio Paraíba do Sul.

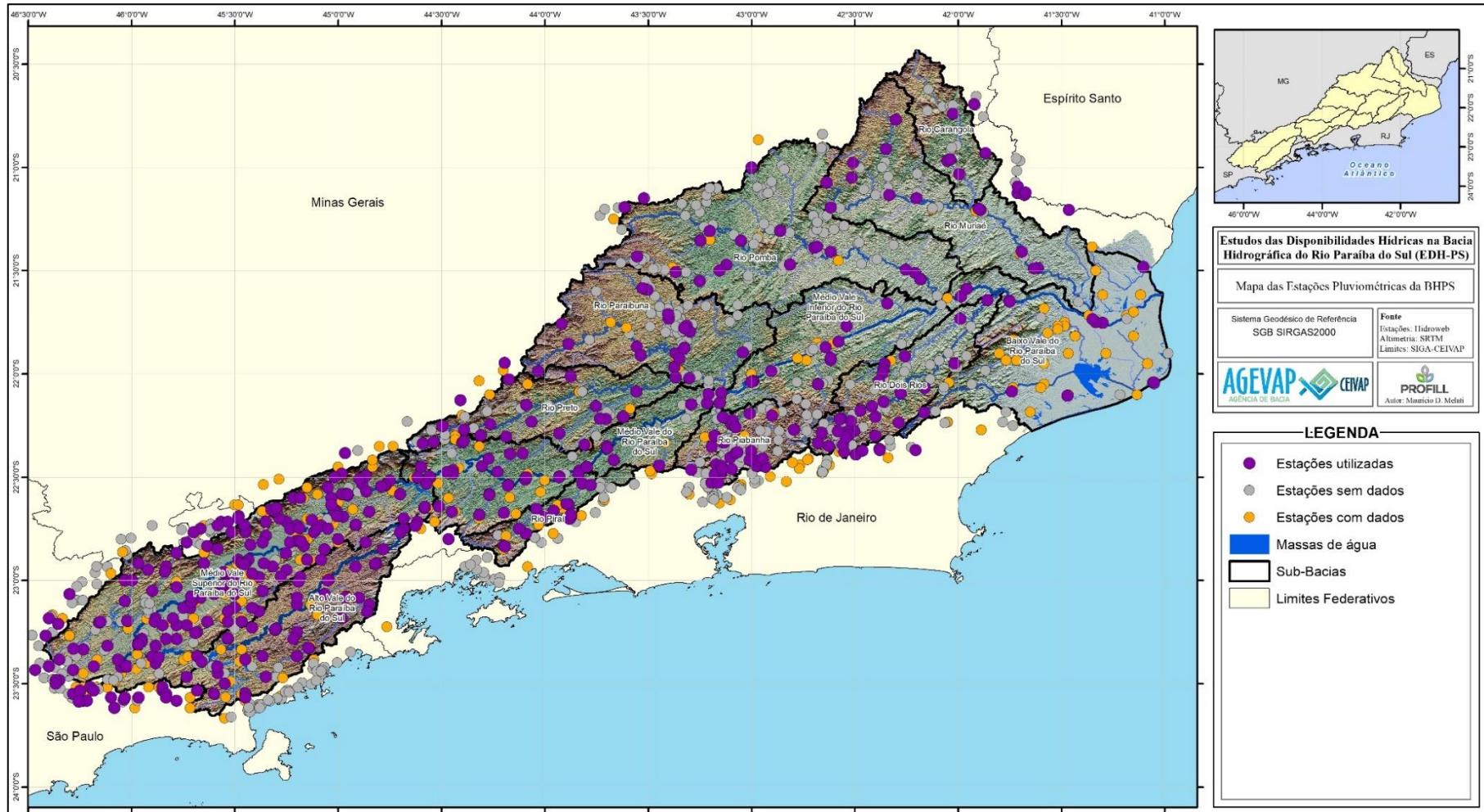


Figura 4.3 - Mapa das estações pluviométricas da BHPS.

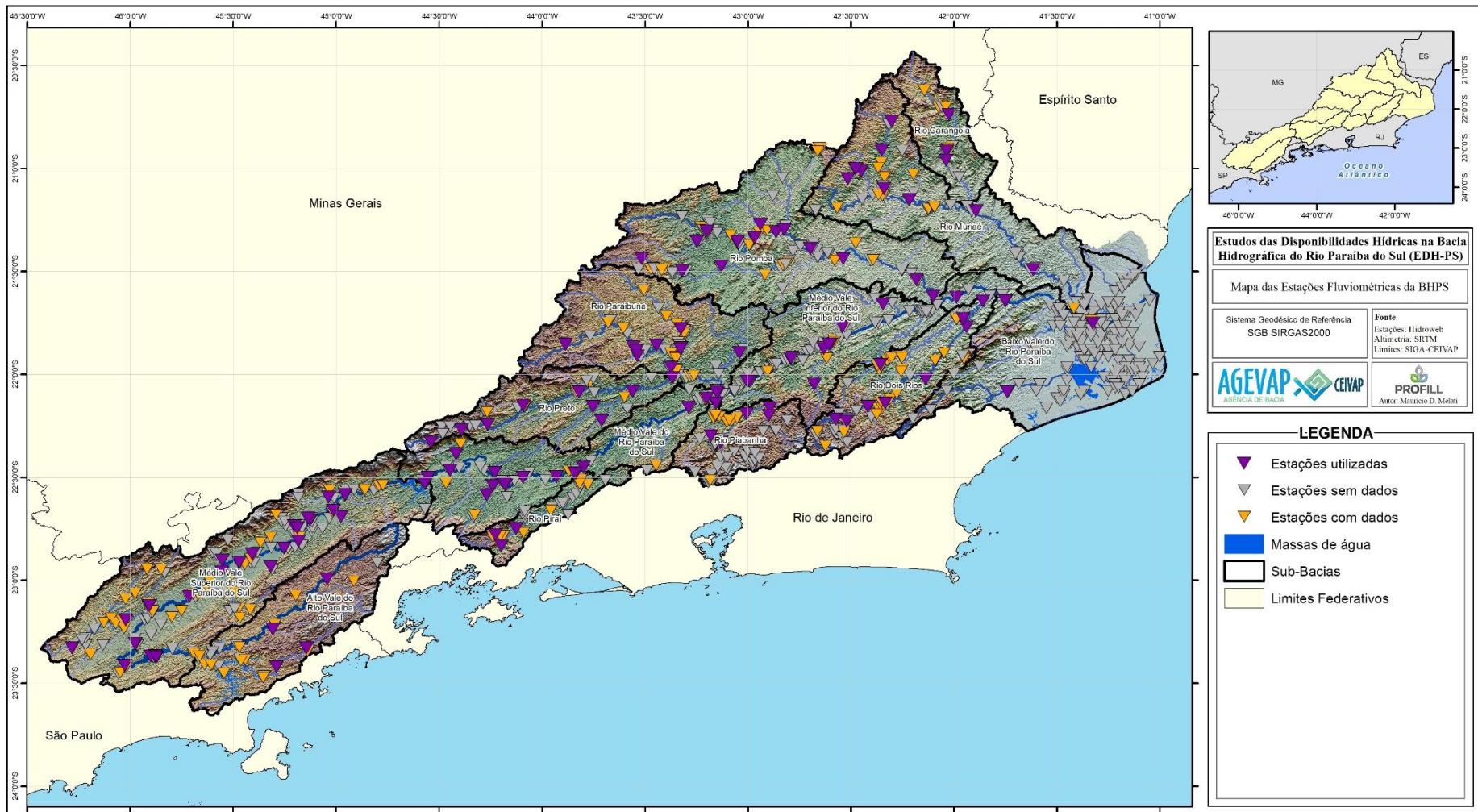


Figura 4.4 - Mapa das estações fluviométricas da BHPS.

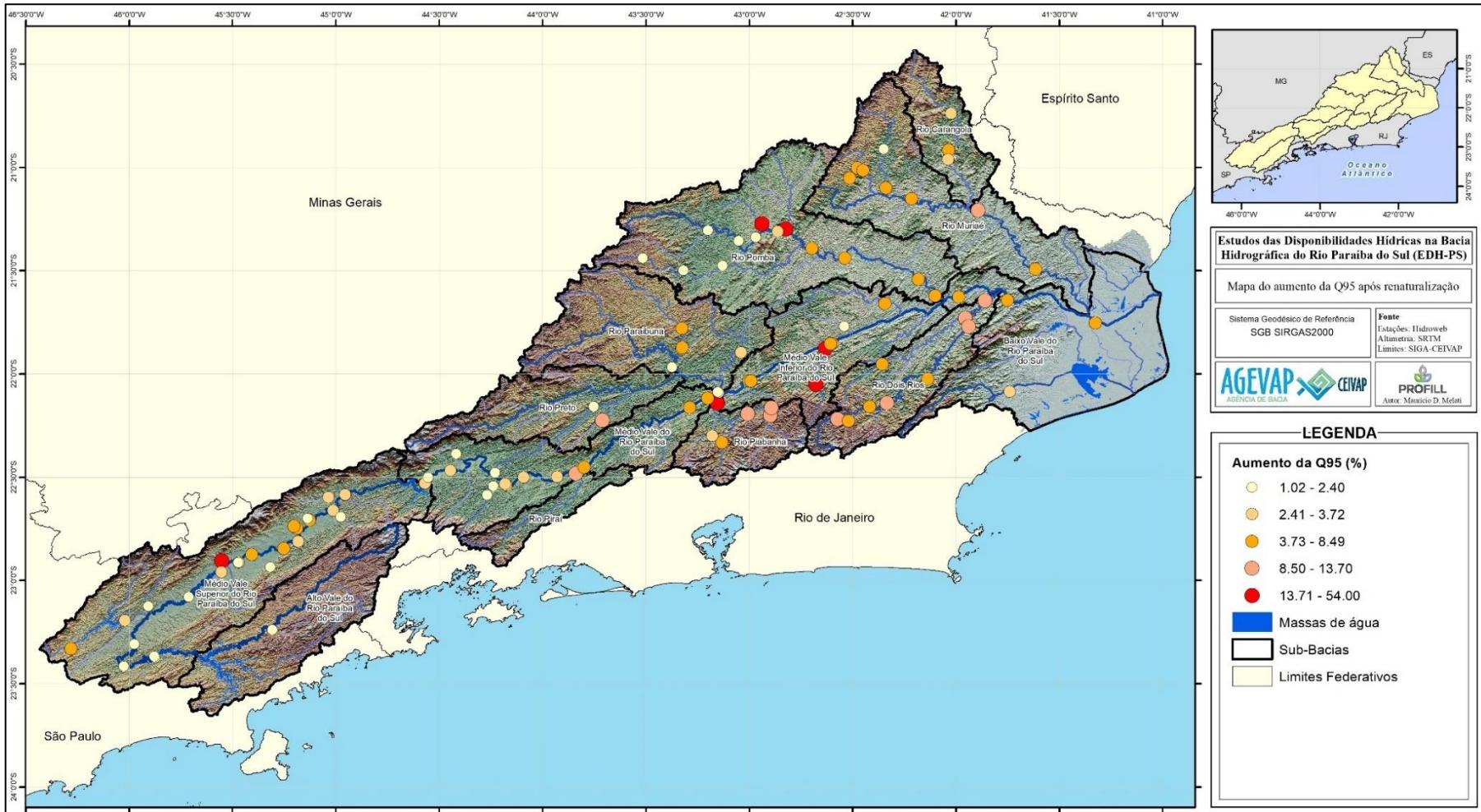


Figura 4.5 - Resultados da alteração da vazão Q₉₅ após a renaturalização.

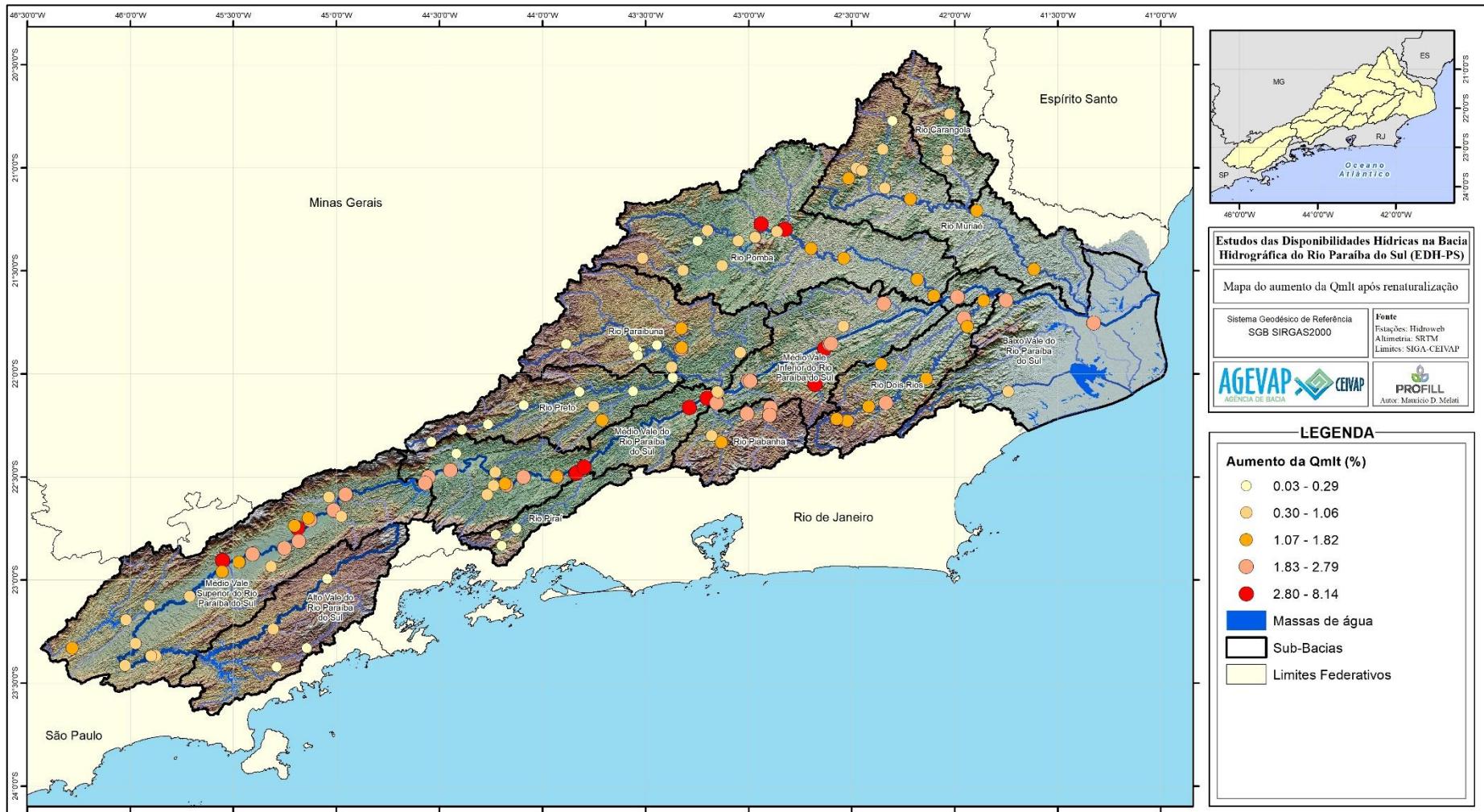


Figura 4.6 – Resultados da alteração da vazão Q_{m1t} após a renaturalização.

4.5. ESTACIONARIEDADE DAS SÉRIES

A análise da estacionariedade das séries de vazões busca entender, ao longo do período analisado, se ocorre uma estabilidade dos dados (comportamento estacionário), uma redução dos valores (tendência negativa) ou um aumento dos valores (tendência positiva). A Figura 4.7 mostra a análise da estacionariedade das estações fluviométricas (no primeiro gráfico) e das estações pluviométricas (no segundo gráfico).

Nas estações fluviométricas foram avaliados os seguintes índices: vazão média anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada, vazão máxima anual renaturalizada em 5 dias consecutivos, vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos e vazão mínima anual renaturalizada em 7 dias consecutivos no período úmido (entre os meses de dezembro a fevereiro). Para as estações pluviométricas foram avaliados os seguintes índices: precipitação total anual, número de dias com precipitação no ano, precipitação diária igual ou superior a 50 mm no ano e precipitação diária máxima em 5 dias consecutivos no ano.

Para as estações fluviométricas, de uma maneira geral, ocorre predominância de estações com comportamento estacionário. Contudo, observa-se um número considerável de estações

indicando situações de tendência negativa e mais representativa do que o número de estações com comportamento de tendência positiva. Para as estações pluviométricas ocorre a predominância da estacionariedade em todos os índices, com estações em magnitude similar para tendência positivas e negativas.

Dessa forma, verifica-se forte sinal de tendências negativas nos dados fluviométricos, o que pode ter grande influência da grande estiagem que atingiu a região na última década. Apesar disso, nos dados pluviométricos o sinal não foi tão forte, e não mostra claramente uma tendência esperada na bacia com base nos dados históricos.

4.6. DISPONIBILIDADE HÍDRICA

4.6.1. Calibração do modelo

Os resultados obtidos na calibração do modelo hidrológico MGB estão dentro da margem considerada satisfatória para modelos hidrológicos. Na metodologia, é detalhado o significado de cada um dos indicadores utilizados. Para representar de forma resumida os resultados obtidos com a calibração, a Figura 4.8 apresenta gráficos do tipo Boxplot para cada um dos estimadores estatísticos usados em cada uma das 132 estações fluviométricas.

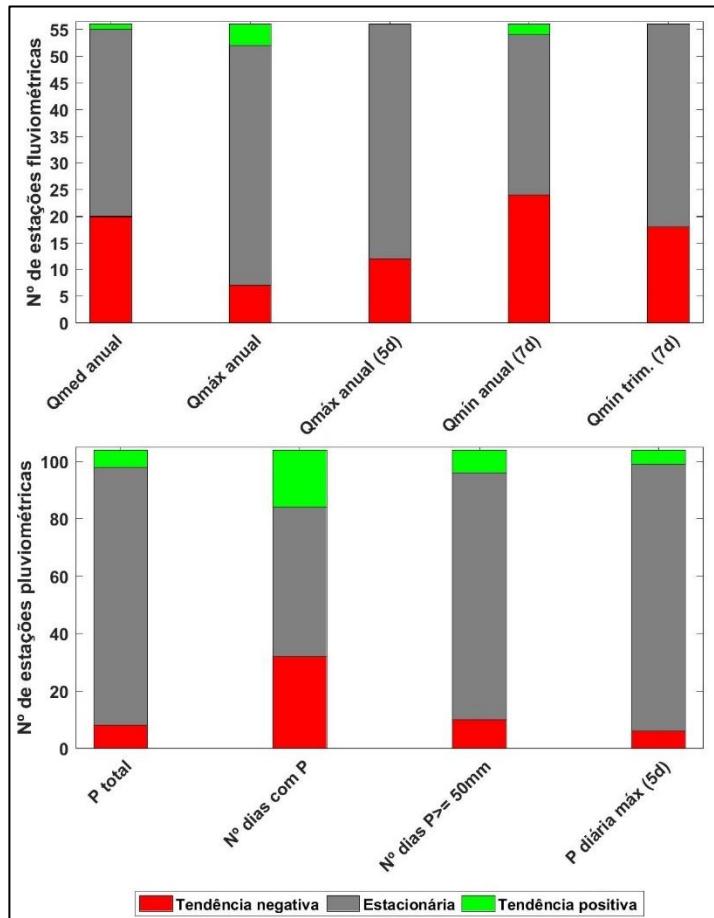


Figura 4.7- Resultados da análise da estacionariedade das estações fluviométricas (primeiro gráfico) e pluviométricas (segundo gráfico) para BHPS.

De uma maneira geral, o gráfico permite observar os baixos valores de erros associados a representação das vazões no processo de regionalização em pontos monitorados. Os resultados de calibração mostrado para cada estação podem ser verificados com maior nível de detalhe no Produto 4 do presente estudo.

4.6.2. Resultados das Vazões de Referência

Conhecer as vazões de referência é essencial para realizar a gestão responsável dos recursos hídricos, já que elas representam a quantidade de água disponível nos rios. A disponibilidade das vazões de referência na BHPS é apresentada entre a Figura 4.10 e a Figura 4.13, onde são mostradas a vazão de longo termo “ $Q_{m\text{lt}}$ ”, a vazão que é superada ou igualada em 90% do tempo na série histórica “ Q_{90} ”, a vazão superada ou igualada em 95% do tempo “ Q_{95} ” e a vazão de 7 dias consecutivos com tempo de retorno de 10 anos, “ $Q_{7,10}$ ”.

Já o diagrama unifilar, apresentado pela Figura 4.9, mostra com detalhes o comportamento do rio principal e dos seus afluentes, como a ocorrência de hidrelétricas e transposições. Também são apresentadas as entregas de vazão ao longo dos rios que compõem a bacia, proporcionando uma visão geral e completa dos recursos hídricos.

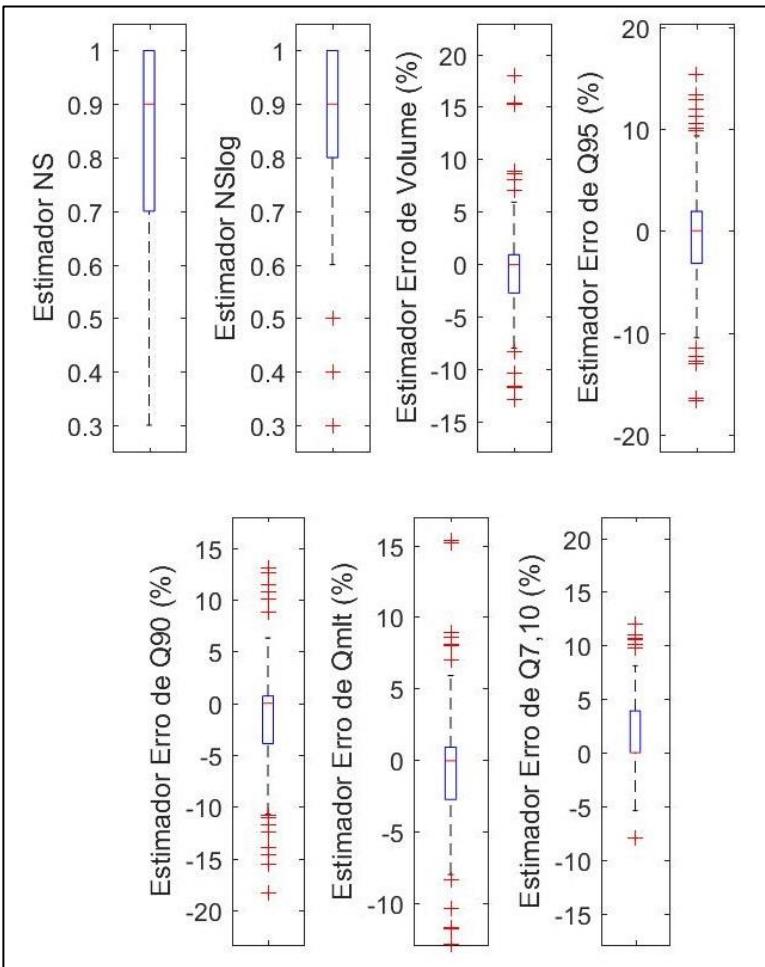


Figura 4.8- Resultados de Boxplot da calibração do modelo hidrológico para todos os indicadores estatísticos usados.

Nos resultados apresentados é possível observar o papel dos reservatórios na dinâmica hídrica da BHPS, onde verifica-se como o Reservatório do Funil (um dos reservatórios que atuam na regularização do rio Paraíba do Sul) regulariza às águas, aumentando de $79\text{m}^3/\text{s}$ para $114\text{m}^3/\text{s}$ a vazão de referência $Q_{7,10}$. Ainda, no reservatório Santa Cecília é possível perceber a grande redução das vazões de referência que ocorre devido ao sistema de reservatórios que fazem a transposição das águas do Rio Paraíba do Sul para o Rio Guandu, onde a redução da vazão $Q_{7,10}$ reduz de $150\text{m}^3/\text{s}$ para apenas $53\text{m}^3/\text{s}$. O reservatório de Furnas apresenta impacto de redução das vazões de referência devido ao sistema de dutos que levam a água até a UHE Simplício, com pequena redução na $Q_{7,10}$ de $124\text{m}^3/\text{s}$ para $101\text{m}^3/\text{s}$, contudo, essa água retorna ao Rio Paraíba do Sul alguns quilômetros a jusante do ponto do barramento.

Em relação ao papel dos principais afluentes do Rio Paraíba do Sul é possível observar como a bacia hidrográfica do Rio Paraibuna altera de forma significativa as vazões, com resultados que implicam em aproximadamente o dobro das vazões de referência após a confluência. Onde a vazão Q_{mlt} , por exemplo, passa de $191\text{m}^3/\text{s}$ para o valor de $374\text{m}^3/\text{s}$. O restante dos afluentes como os rios Jaguari, Piraí, Piabanga, Pomba, Dois Rios e Muriaé afetam de maneira menos significativa as vazões do Rio Paraíba do Sul, conforme pode ser observado na Figura 4.9.

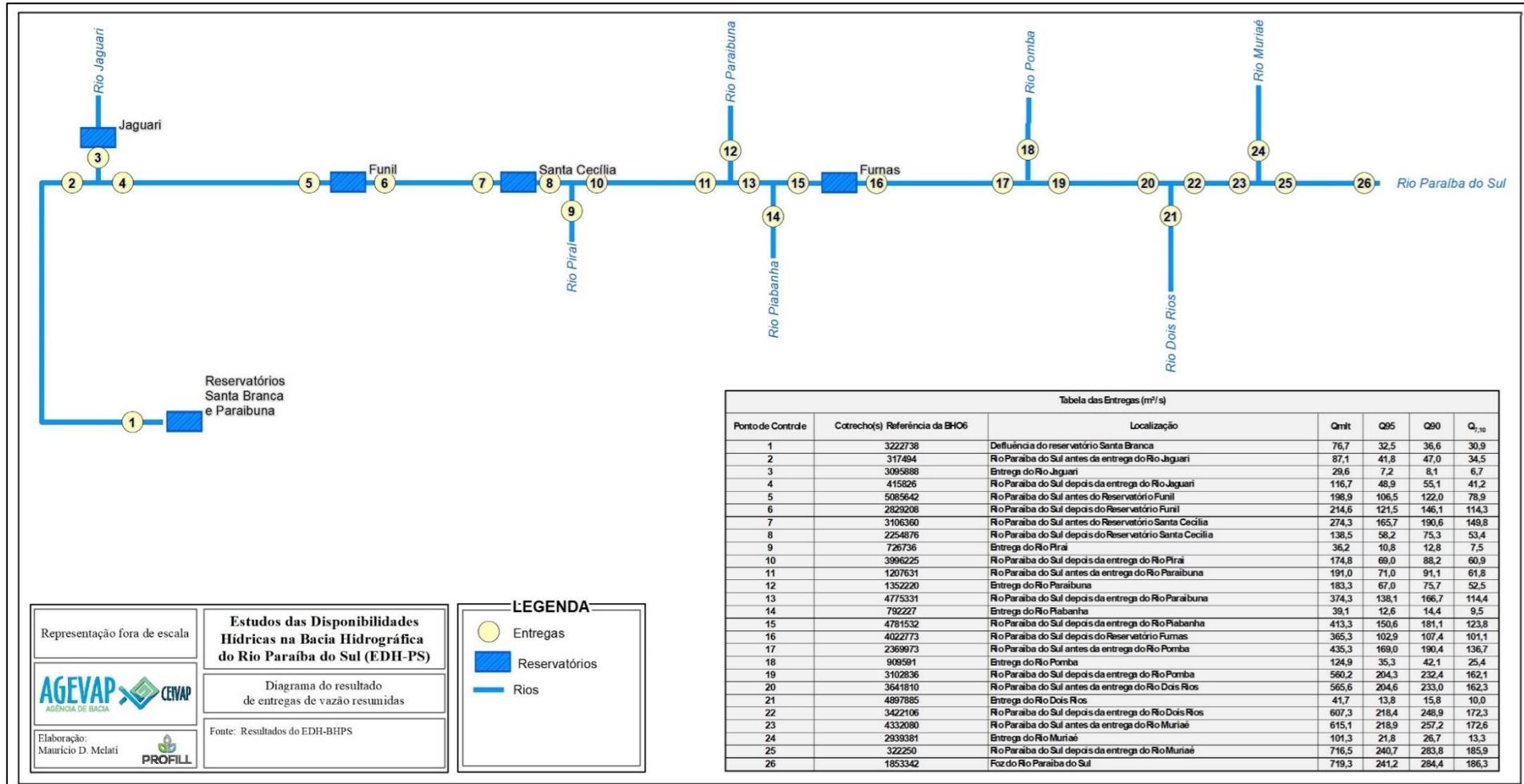


Figura 4.9 - Vazões de entrega (m³/s) em pontos importantes (m³/s) da BHPS.

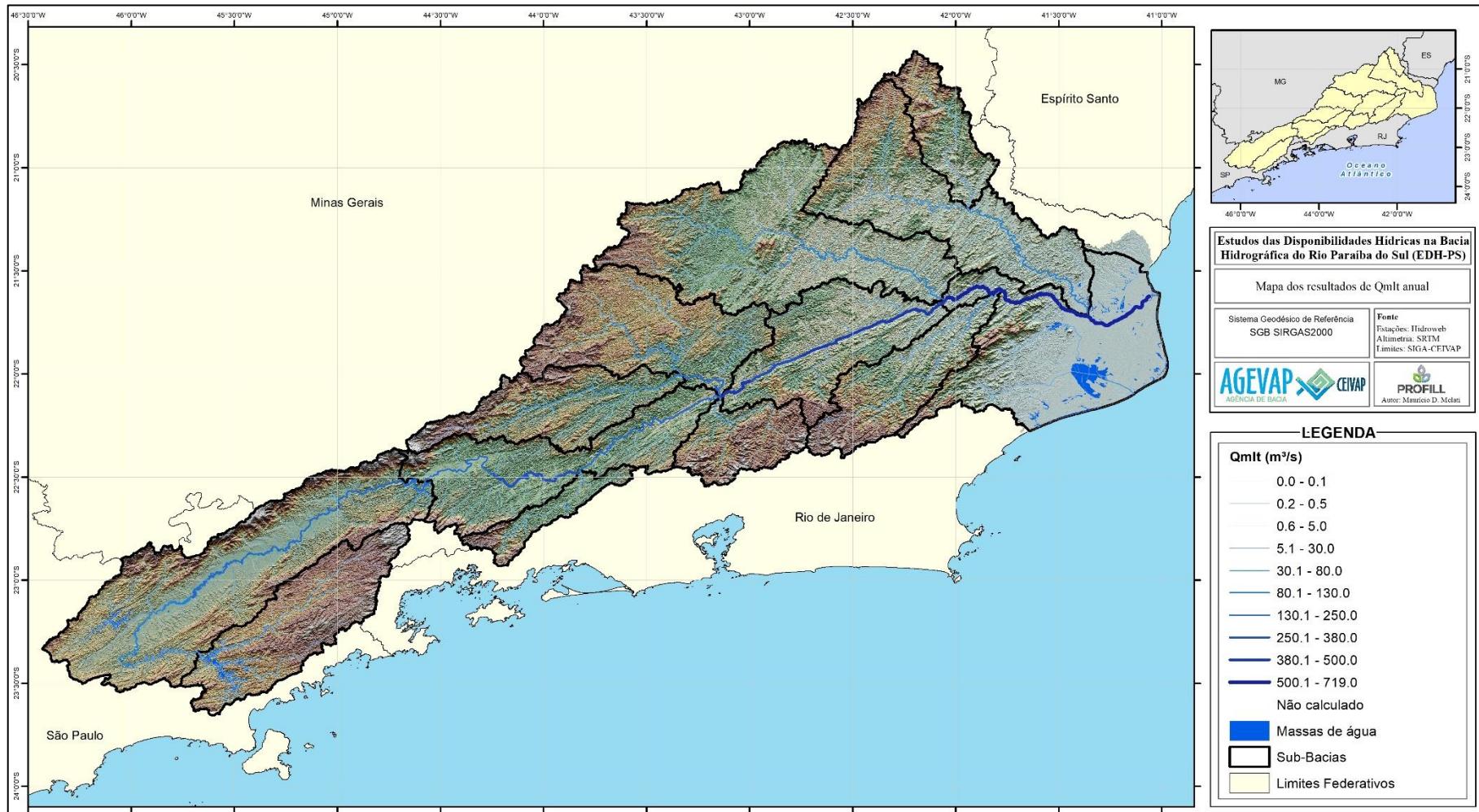


Figura 4.10 - Resultados da vazão de referência anual Q_{mlt} na BHPS.

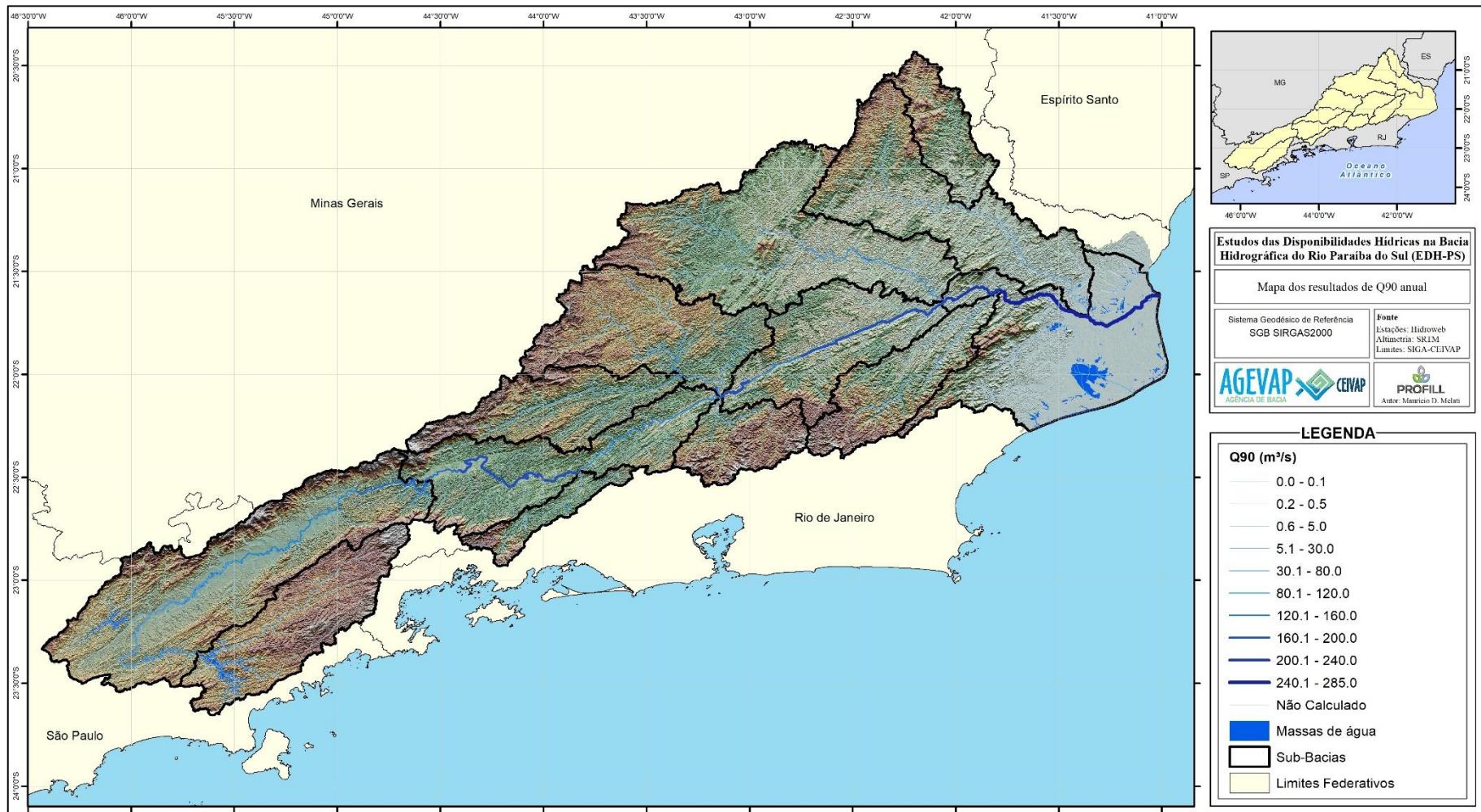


Figura 4.11 - Resultados da vazão de referência anual Q₉₀ na BHPS.

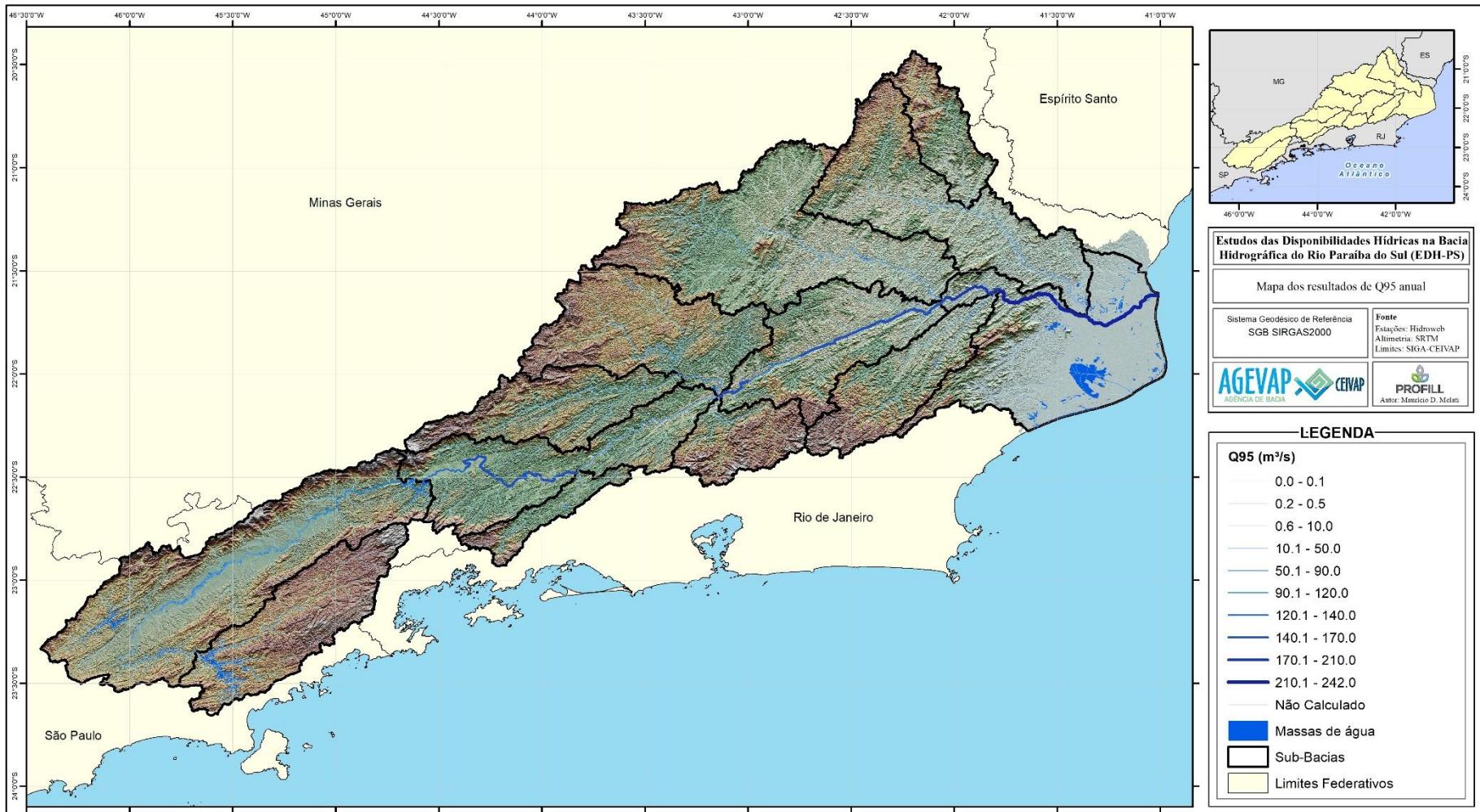


Figura 4.12 - Resultados da vazão de referência anual Q₉₅ na BHPS.

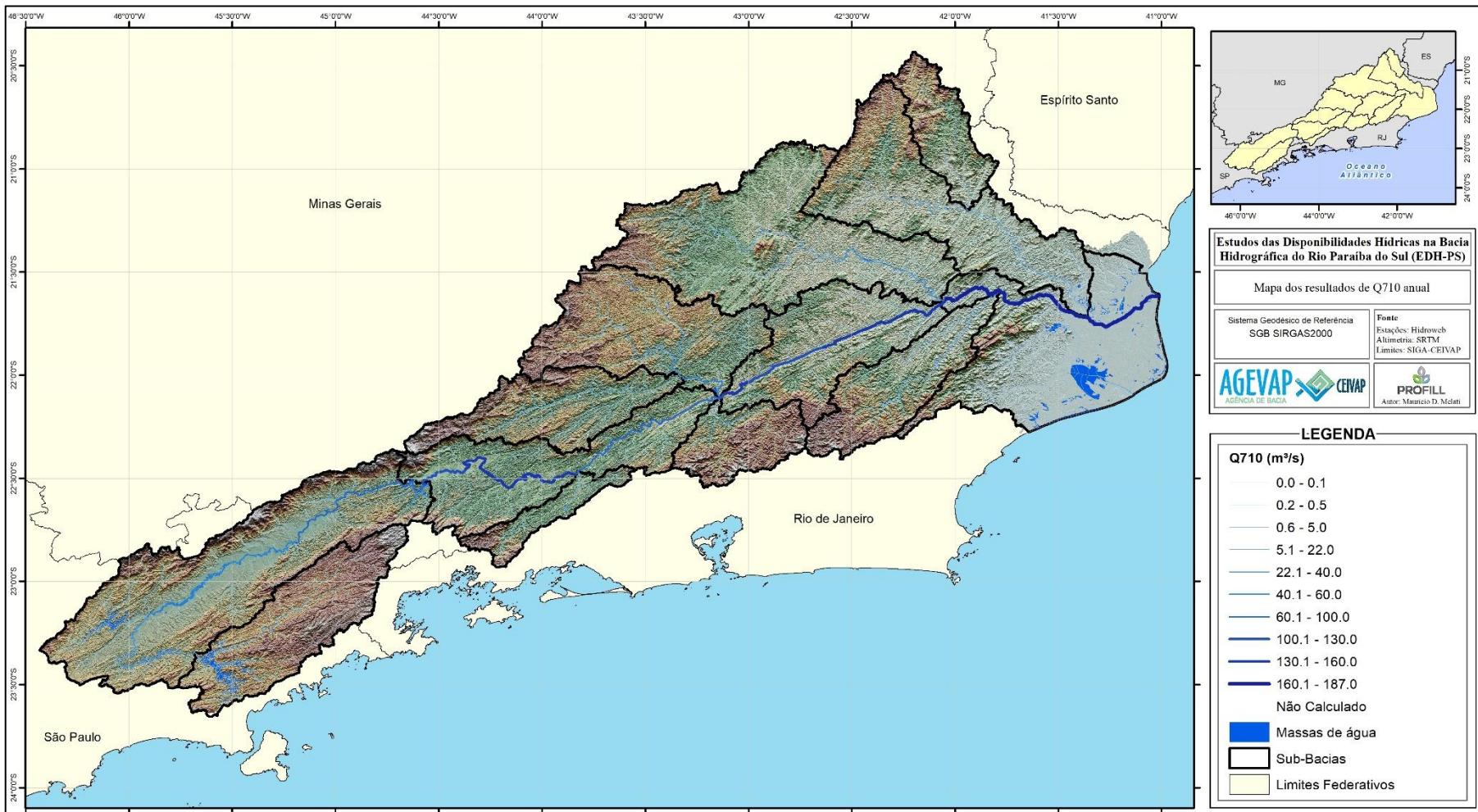


Figura 4.13 - Resultados da vazão de referência anual Q_{7,10} na BHPS.

4.6.3. Período Crítico

Entre os anos de 2015 e 2021 a BHPS passou pelas anomalias negativas mais intensas em suas vazões médias desde 1960 (período máximo avaliado no estudo), ocasionando na diminuição das vazões por longos períodos, conforme pode ser observado na Figura 4.14 que avaliou as anomalias médias anuais de vazão específica.

A Figura 4.15 e a Figura 4.16 mostram as reduções de vazão verificadas no período crítico considerando as diferenças entre os anos hidrológicos de 1978-2020 e 2014-2020, nas vazões de referência Q_{m1t} e Q_{95} anuais, respectivamente.

Os resultados obtidos mostram diferentes situações ao longo da bacia. Onde as maiores alterações em volumes hídricos ocorrem no trecho final do Rio Paraíba do Sul após o reservatório de Furnas, com valores acima de $200\text{m}^3/\text{s}$ de redução da disponibilidade hídrica Q_{m1t} , com valor máximo sendo observado após a entrega do Rio Muriaé, possivelmente por esta ser uma bacia mais vulnerável a eventos de estiagem. Já em termos de vazões mínimas, é possível observar que o trecho logo a jusante do reservatório de Furnas não apresenta grandes alterações, possivelmente pelo papel regularizador do reservatório, mas que com o aumento da área de

drenagem do Rio Paraíba do Sul, os valores de alteração da vazão mínima passam a aumentar significativamente, atingindo elevados valores após a entrega do Rio Dois Rios até a foz do Rio Paraíba do Sul.

Outro resultado a se observar é o impacto da transposição para o Rio Guandu no regime de vazões de referência em períodos críticos. Apesar da grande diminuição de volumes que ocorre a jusante do reservatório Santa Cecília, o local acaba sendo menos impactado pelo período crítico à jusante do que a montante devido a operação do complexo de lajes no local.

De uma maneira geral, foi possível observar para todas as vazões de referência que a ocorrência de um período prolongado crítico reduz consideravelmente a disponibilidade hídrica na BHPS, e em situações de escassez os resultados apresentados aqui deverão ser usados em conjunto com os obtidos para a disponibilidade hídrica para definir novos valores de referência para gestão do uso da água.

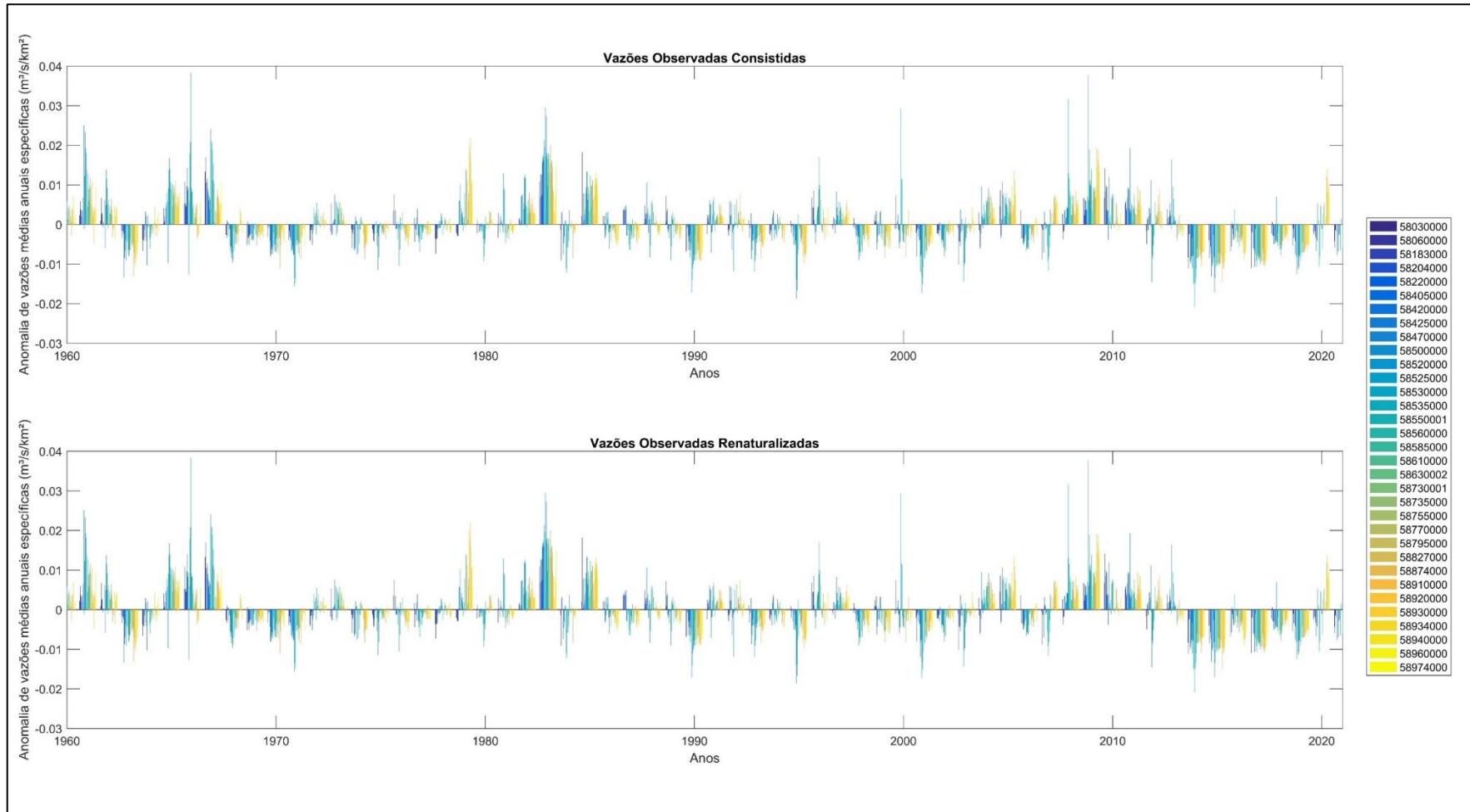


Figura 4.14 - Anomalia das vazões médias anuais específicas ($m^3/s/km^2$) para as estações com dados completos entre 1960 e 2021.

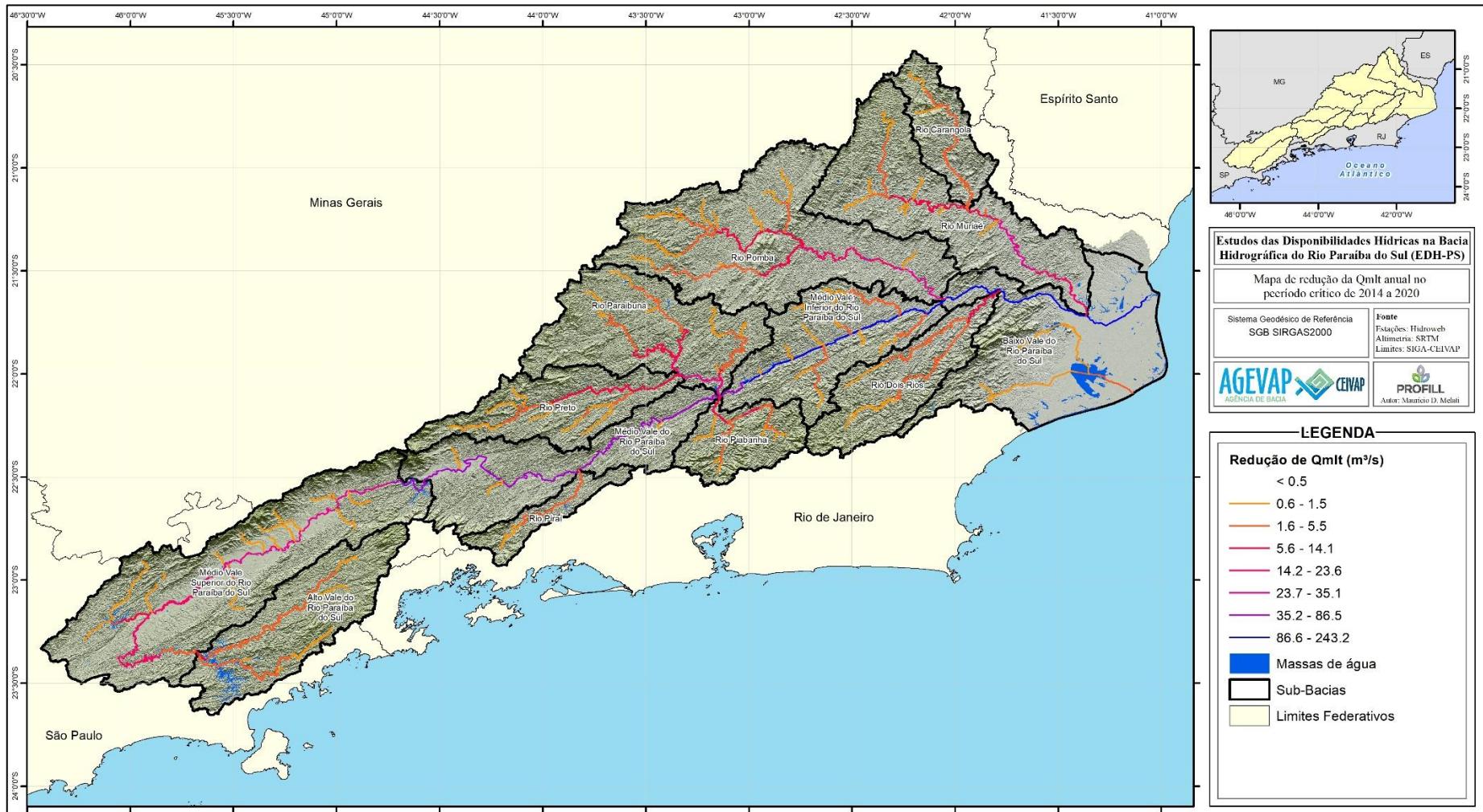


Figura 4.15 - Resultados espaciais da redução da vazão Q_{mlt} no período 2014-2020 na BHPS.

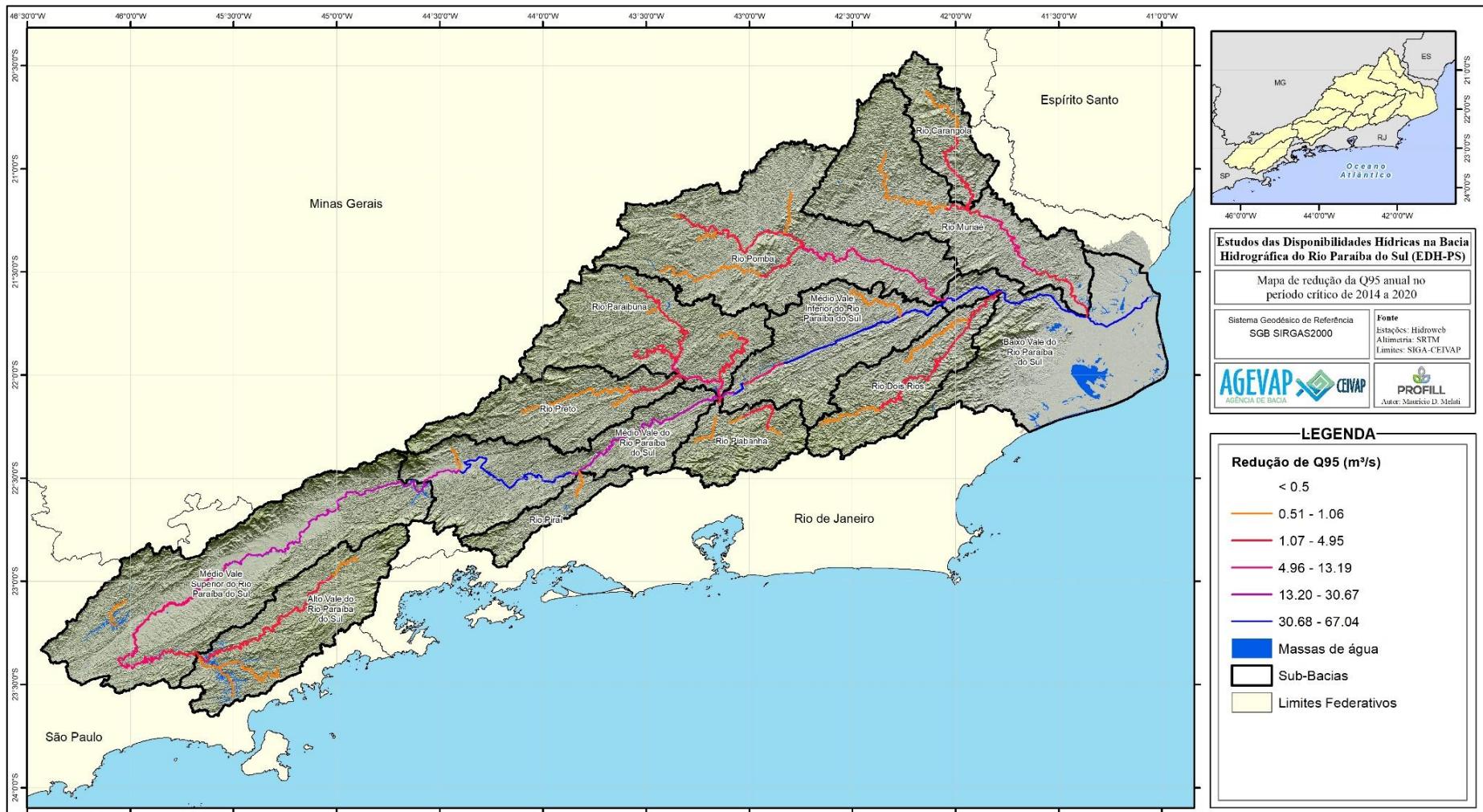


Figura 4.16 - Resultados espaciais da redução da vazão Q₉₅ no período 2014-2020 na BHPS.

4.6.4. Impacto das Transposições na Disponibilidade

Com o intuito de avaliar de maneira hipotética o impacto que as transposições para fora da BHPS acarretam no Rio Paraíba do Sul, o modelo hidrológico foi simulado considerando os volumes totais transpostos como propagados para jusante dos principais reservatórios onde ocorrem as transposições. Ou seja, a simulação considera um cenário onde as estruturas hidráulicas trabalham para regularizar o Rio Paraíba do Sul mantendo as vazões na bacia ao invés de retirar os volumes pelas adutoras. Ressalta-se que o cenário apresentado aqui não está considerando a não existência dos barramentos, mas sim a existência deles e o impacto de como a água transposta afetaria as vazões de referência se fossem mantidas na BHPS. Entre a Figura 4.17 e a Figura 4.18 é possível observar as alterações percentuais (aumentos) nas vazões de referência $Q_{m\bar{t}}$ e Q_{95} anuais no cenário simulado. A Tabela 4.1 a seguir apresenta os valores médios de aumento percentual das vazões de referência entre os reservatórios ao longo do Rio Paraíba do Sul.

O trecho com maior variação percentual de vazão para as vazões de referência está localizado entre os reservatórios de Santa Cecília e Furnas, isso ocorre devido à grande transferência de volumes hídricos pelo sistema Complexo de Lajes que foram mantidos na BHPS, onde vazões médias de $119\text{m}^3/\text{s}$ foram propagadas para

jusante do reservatório Santa Cecília. O trecho Santa Cecília – Furnas indica que para as vazões de referência Q_{95} e Q_{90} os percentuais de aumento médios foram de 179 e 143% da vazão, respectivamente. Chama a atenção o grande impacto da $Q_{7,10}$ nesse trecho, com alteração média de 194%. Ou seja, a transposição reduz em aproximadamente 3 vezes a disponibilidade hídrica no trecho.

A montante do reservatório Funil observa-se que para todas as vazões de referência as variações percentuais de volume são mais baixas, representadas pelas cores em tons de verde e amarelo. Isso se deve ao fato de que os volumes transpostos pelo sistema Jaguari-Atibainha apresentam menor representatividade frente aos volumes escoados pelo Rio Paraíba do Sul no trecho. Já os resultados obtidos mostram que quando mais o ponto avaliado do Rio Paraíba do Sul se afasta da transposição do Complexo de Lages e se aproxima da foz junto ao oceano, menor é o impacto na disponibilidade hídrica.

Tabela 4.1. Resultados de aumento percentual médio (%) dos trechos dos principais reservatórios após a propagação das vazões transpostas para jusante do Rio Paraíba do Sul.

Vazão de Referência	Jaguari - Funil	Funil – Santa Cecília	Santa Cecília - Furnas	Furnas- Foz
Q_{90}	13,0	10,0	143,4	61,1
Q_{95}	15,2	12,5	178,5	67,8
$Q_{7,10}$	16,6	13,7	193,9	82,7
$Q_{m\bar{t}}$	5,1	5,9	74,7	25,9

Fonte: Elaboração Própria.

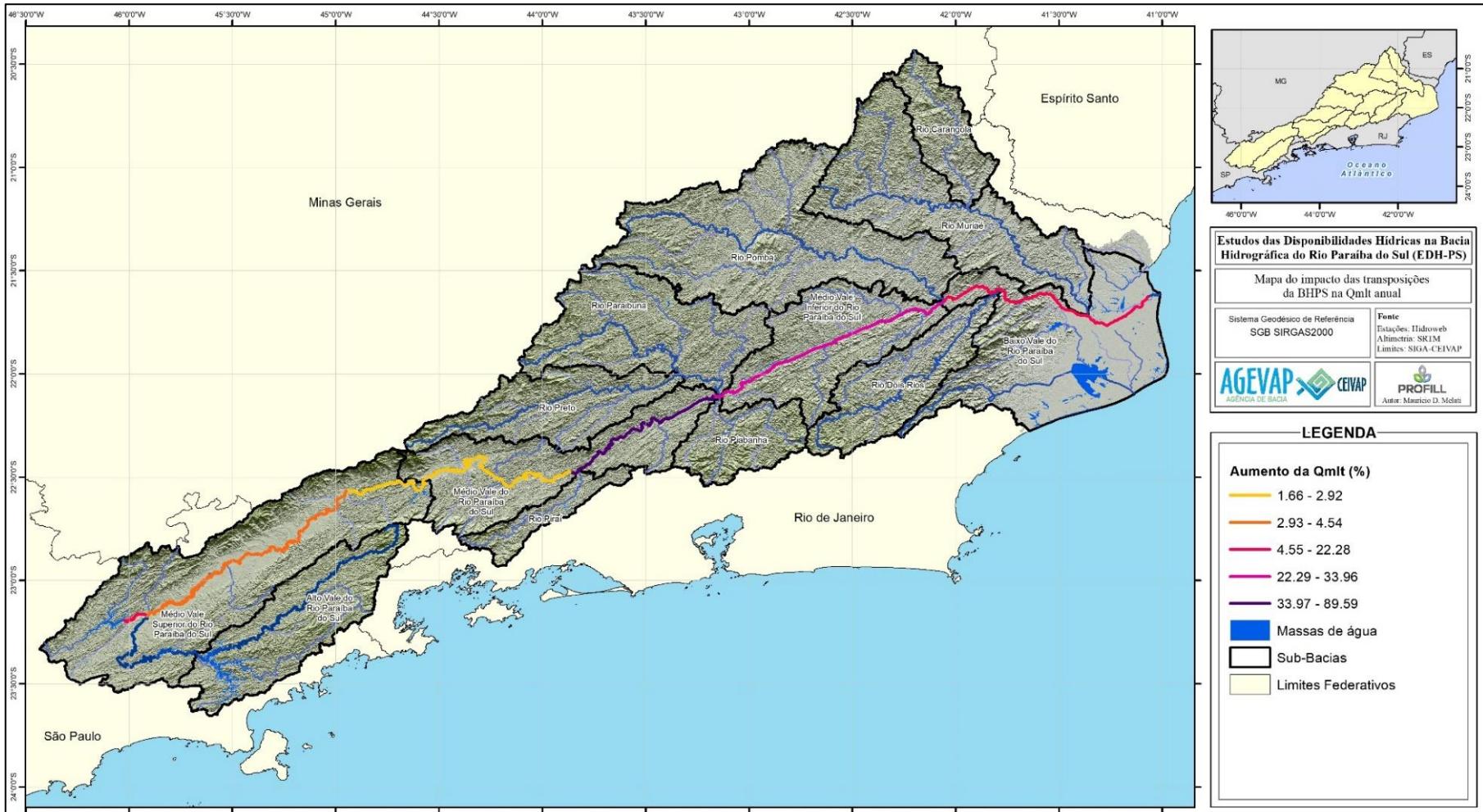


Figura 4.17 - Resultado espacial do aumento (%) da vazão $Q_{m\ell}$ anual mantendo os volumes das transposições na BHPS e propagando para jusante no Rio Paraíba do Sul.

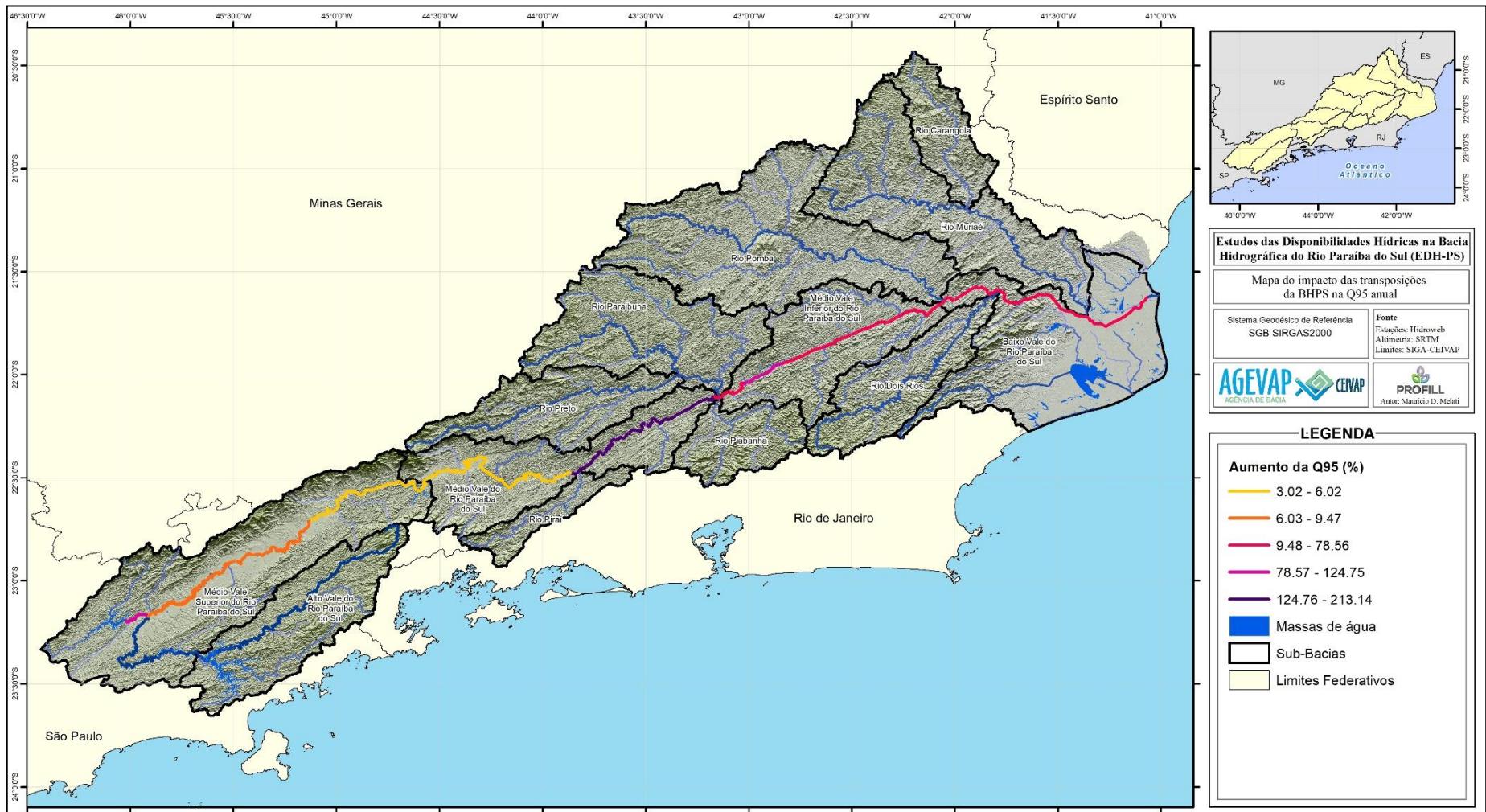


Figura 4.18 - Resultado espacial do aumento (%) da vazão Q₉₅ anual mantendo os volumes das transposições na BHPS e propagando para jusante no Rio Paraíba do Sul.

4.7. CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

4.7.1. Vazões máximas

O cálculo de vazões máximas, considerando diferentes tempos de retorno, é essencial para o dimensionamento eficiente de sistemas hidráulicos, garantindo a resiliência e a segurança necessárias diante de variabilidades climáticas e condições extremas. O cálculo das vazões máximas ($Q_{máx}$) para os tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos foi realizado nas minibacias de localização das estações fluviométricas selecionadas na área de estudo.

Os resultados obtidos foram separados de acordo com as bacias hidrográficas em valores médios de alteração nas estações para identificar áreas com mais ou menos alteração, conforme apresentado na Tabela 4.2. Os resultados mostram predominância de tendência de aumento da alteração com o aumento do tempo de recorrência. Além disso, percebe-se que sub-bacias como às do Alto Vale do Rio Paraíba do Sul, Rio Piraí e Médio Vale Superior do Rio Paraíba apresentaram as menores frações de alteração. Já as sub-bacias do Rio Dois Rios e Rio Piabuha apresentaram as maiores alterações nos dois períodos simulados. Os resultados individuais de

cada estação fluviométrica estão apresentados nos capítulos de cada sub-bacia da BHPS.

Tabela 4.2 – Resultados médios das alterações nas vazões máximas em percentual (%) das estações por bacia hidrográfica.

Sub-Bacia	Curto Prazo (2015 – 2045)				Longo Prazo (2046 – 2100)			
	TR10	TR25	TR50	TR100	TR10	TR25	TR50	TR100
Alto Vale do Rio Paraíba	3,5	6,5	8,0	9,2	14,1	13,8	13,6	13,4
Baixo Vale do Rio Paraíba	10,0	13,4	15,4	16,9	29,2	27,9	27,0	27,6
Médio Vale do Rio Paraíba	8,3	12,5	15,3	17,9	23,5	25,1	27,5	29,5
Médio Vale Inferior do Rio Paraíba	13,3	18,1	19,5	21,5	29,7	30,6	29,7	30,1
Médio Vale Superior do Rio Paraíba	6,6	10,9	13,2	15,1	21,4	23,5	24,4	25,1
Rio Dois Rios	12,6	17,2	19,4	20,8	40,0	42,6	43,4	44,2
Rio Muriaé e Carangola	-1,1	0,5	1,5	2,5	29,1	31,1	32,3	33,4
Rio Paraibuna	5,6	10,1	11,7	13,0	26,9	27,7	27,7	27,8
Rio Piabuha	13,8	17,3	18,5	19,5	30,7	32,9	33,5	34,0
Rio Piraí	4,9	5,8	7,5	9,0	14,1	11,5	11,2	11,3
Rio Pomba	3,9	7,4	9,0	10,1	28,9	30,6	31,3	31,6
Rio Preto	13,0	19,2	22,6	25,1	28,1	30,4	31,6	32,4

Fonte: Elaboração própria.

Além disso, também foram gerados os resultados de TR de vazões futuras em relação aos valores de TR atualmente usados nas séries de vazões máximas históricas simuladas. Esses dados servem como subsídio para o planejamento da BHPS em cenários de mudanças climáticas. Os resultados para o curto prazo estão apresentados na Figura 4.19 e os resultados para o longo prazo estão apresentados na Figura 4.20.

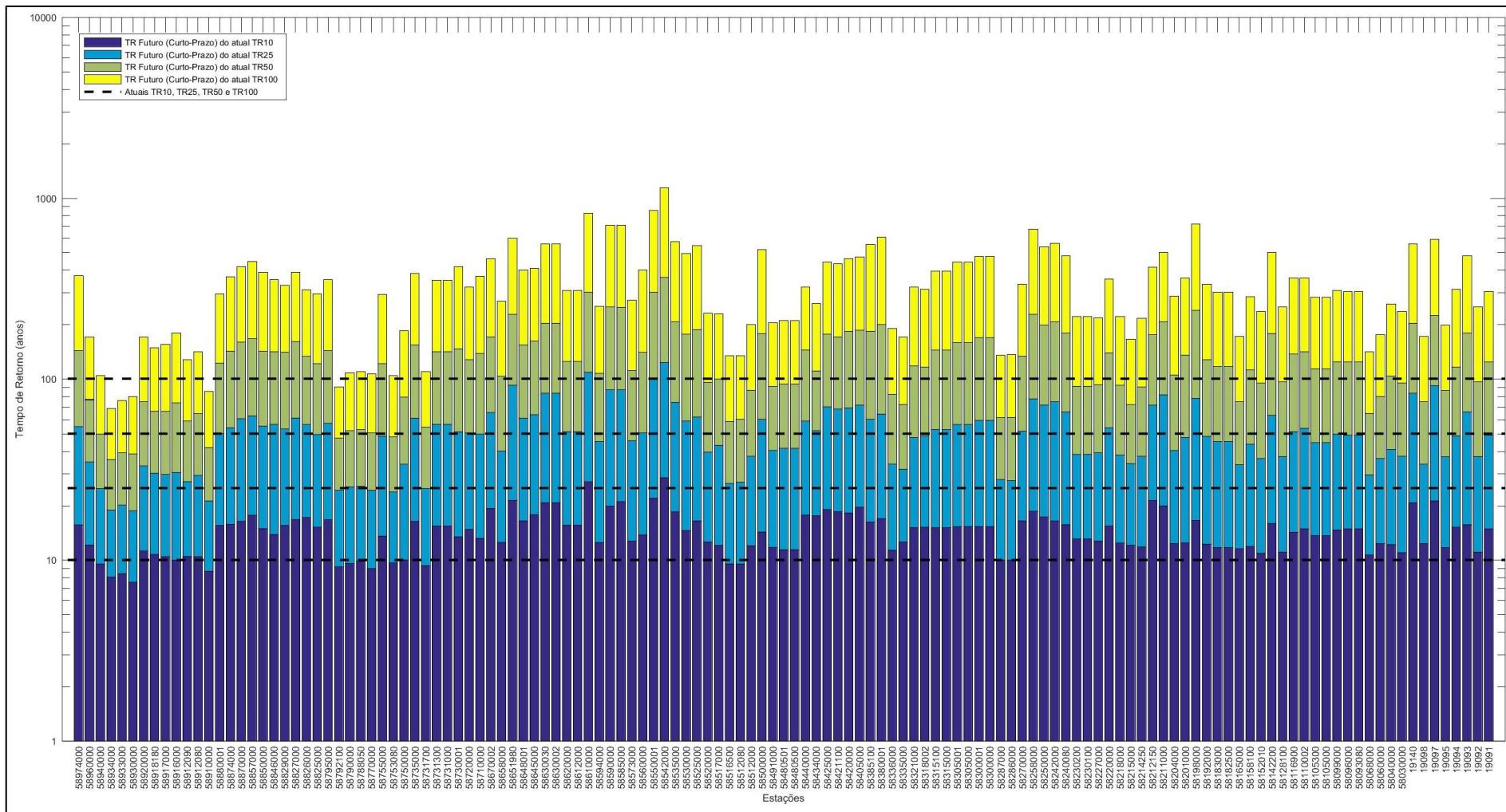


Figura 4.19 –Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no curto prazo.

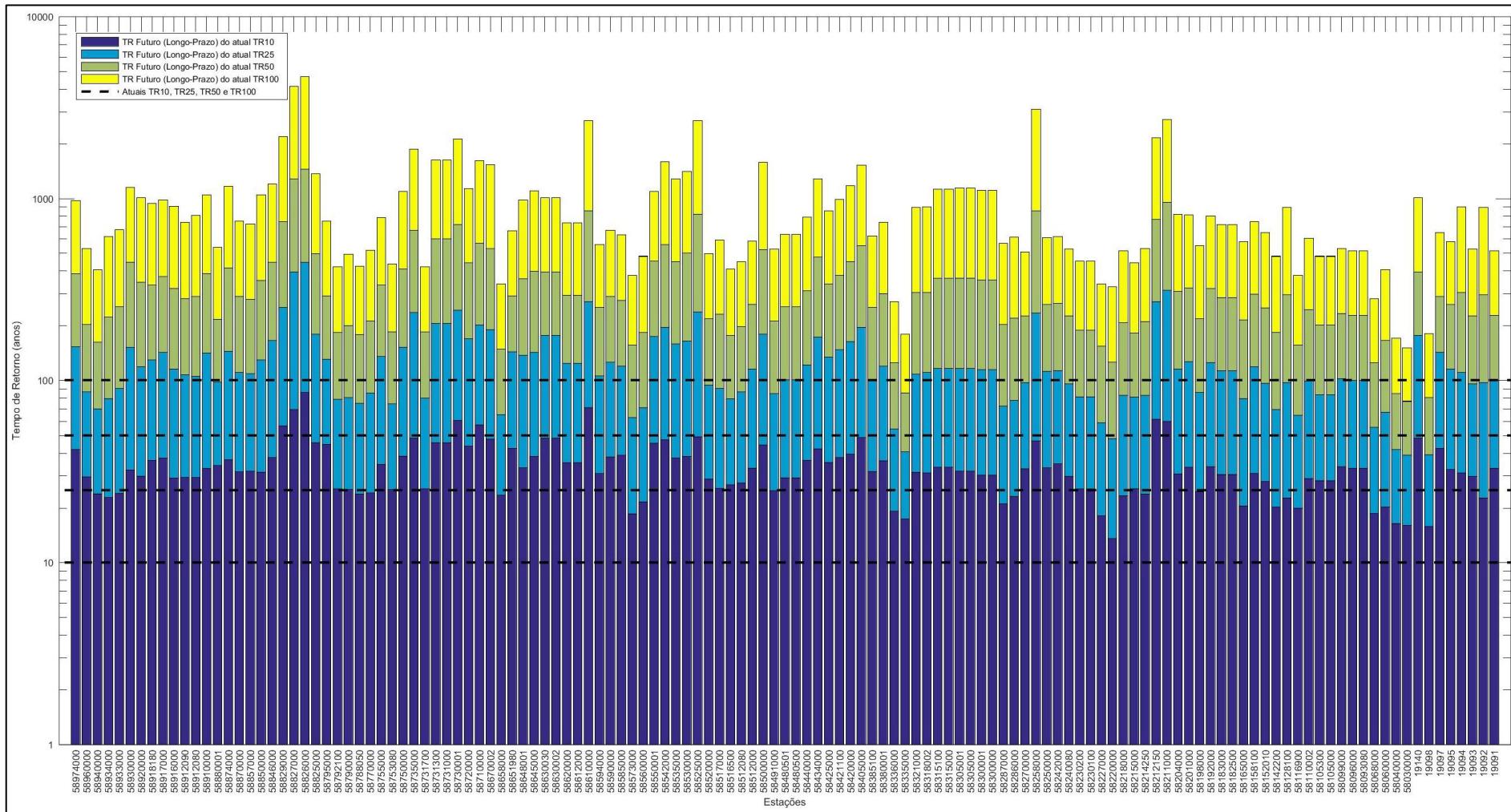


Figura 4.20 –Resultados de alteração do tempo de retorno (TR) considerando vazões futuras em cenários de mudanças climáticas no longo prazo.

4.7.2. Vazões Mínimas

Também foi estudado o impacto das mudanças climáticas nas vazões de referência para cenários futuros, com o objetivo de fornecer subsídios aos órgãos gestores e aos CBHs para a tomada de decisão e planejamento dos recursos hídricos da BHPS. Os resultados obtidos foram separados de acordo com as bacias hidrográficas em valores médios de alteração para identificar áreas com mais ou menos alteração, conforme apresentado na Tabela 3.39.

Tabela 4.3 – Resultados das alterações médias nas vazões de referência por bacia hidrográfica.

Sub-Bacia	Curto Prazo (2015 – 2045)				Longo Prazo (2046 – 2100)			
	Q ₉₅	Q _{7,10}	Q ₉₀	Q _{mlt}	Q ₉₅	Q _{7,10}	Q ₉₀	Q _{mlt}
Alto Vale do Rio Paraíba	-7,3	-10,0	-6,2	-2,9	-4,1	-8,0	-2,5	3,6
Baixo Vale do Rio Paraíba	-6,5	-5,1	-6,0	-2,3	-1,9	-5,1	-2,7	5,4
Médio Vale do Rio Paraíba	-8,4	-9,2	-6,8	-2,7	-4,0	-7,3	-2,3	6,9
Médio Vale Inferior do Rio Paraíba	-8,8	-7,5	-7,0	-2,5	-1,7	-5,0	-2,5	6,6
Médio Vale Superior do Rio Paraíba	-9,2	-8,7	-8,1	-2,6	-5,1	-8,3	-3,9	4,4
Rio Dois Rios	-6,5	-9,9	-6,0	-4,3	-5,9	-8,7	-7,2	4,2
Rio Muriaé e Carangola	-10,5	-15,5	-9,9	-3,0	-7,4	-13,2	-9,0	3,7
Rio Paraibuna	-6,1	-7,0	-6,4	-4,3	-4,5	-7,0	-2,7	5,8
Rio Piabanga	-6,1	-7,3	-5,1	-3,4	-0,2	-2,8	-0,9	7,2
Rio Piraí	-7,2	-7,6	-5,2	-2,7	-3,1	-5,7	-1,7	6,3
Rio Pomba	-10,0	-11,2	-11,7	-8,9	-7,9	-10,6	-6,7	4,1
Rio Preto	-8,9	-12,5	-7,5	-2,5	-4,4	-10,6	-4,9	6,4

Fonte: Elaboração própria.

De uma maneira geral, é possível observar que as vazões Q_{mlt} tendem a reduzir para o período de curto prazo, e aumentar para os anos futuros no longo prazo, que está coerente com as análises de estacionariedade de precipitações máximas ou aumento do número de dias com chuva acima de 50mm e chuva máxima com 5 dias consecutivos. As sub-bacias do Rio Pomba, Rio Dois Rios e Paraibuna são as regiões com maior tendência de redução das vazões Q_{mlt} no curto prazo. Já às sub-bacias Médio Vale do Rio Paraíba, Médio Vale Inferior do Rio Paraíba, Rio Piabanga, Rio Piraí e Rio Preto são as regiões com maior projeção de aumento das vazões Q_{mlt} .

As vazões Q_{95} para o curto e longo prazo apresentam predomínio de projeções de redução das vazões de referência, onde a projeção e redução é maior no cenário de curto prazo. Isso pode estar relacionado com o grande aumento de chuvas esperado para os cenários de longo prazo, implicando em maiores eventos de recarga para os aquíferos e consequentemente maior descarga pelas vazões de base. As sub-bacias dos Rios Muriaé e Carangola e Rio Pomba se destacam como as regiões com maior projeção de redução da Q_{95} . Em relação ao comportamento da vazão de referência Q_{90} , observa-se uma situação muito análoga à verificada na Q_{95} , isso se deve ao fato de as duas vazões terem obtenção muito parecida a partir da curva de permanência.

Por fim, para a vazão de referência $Q_{7,10}$, percebe-se uma situação sutilmente mais confortável no curto prazo do que no longo prazo. Neste último, as sub-bacias Alto Vale do Rio Paraíba, Rio Muriaé e Carangola, Rio Pomba e Rio Preto são as regiões que apresentaram as maiores projeções de redução da vazão de referência.

4.7.3. Discussão e Comparação dos Resultados Obtidos com a Literatura

O presente relatório avaliou a situação hídrica de disponibilidade e vazões máximas para a BHPS usando modelagem hidrológica chuva-vazão e modelos climáticos oriundos do Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, CMIP6 - *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*). Na avaliação foram usadas projeções das variáveis chuva e temperatura para projetar alterações no comportamento das vazões dos rios. O presente estudo usou um cenário intermediário de emissões (SSP 2-4.5). O uso desse cenário permite que os resultados não apresentem fortes tendências a extremos e é o cenário que predomina nas aplicações encontradas na literatura. Apesar disso, sugere-se que em estudos futuros outros cenários também sejam avaliados.

Os resultados de vazões máximas obtidos podem ser comparados com estudos existentes de mudanças climáticas para todo o Brasil. O trabalho de Brêda et al. (2020) traz análises de mudanças

climáticas para toda a América do Sul. No caso de cheias, o trabalho mostra sinais de aumento de cheias na região da BHPS, embora o sinal tenha sido relativamente fraco na composição dos modelos.

Por fim, no quesito de disponibilidade hídrica e vazões mínimas, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) lançou a primeira edição do estudo Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos do Brasil (ANA, 2024). Os resultados da publicação da ANA mostram que existe um potencial de diminuição na disponibilidade hídrica na bacia do Paraíba do Sul até 2040. Os valores apontados pela análise realizada aqui sugeriram diminuições relativamente mais baixas que os valores da ANA, porém ainda concordantes com os potenciais de redução da disponibilidade.

5. AVALIAÇÃO DA REDE DE MONITORAMENTO

O conhecimento das principais variáveis relacionadas aos recursos hídricos é essencial à implementação de uma gestão adequada para uma determinada bacia, possibilitando assim a contínua melhoria das condições de vida das comunidades que utilizam esses recursos. Neste contexto, a insuficiência do monitoramento destas variáveis acarreta problemas em determinada região de planejamento. O monitoramento fluviométrico e pluviométrico é uma ferramenta

essencial para a gestão sustentável dos recursos hídricos, a mitigação de desastres, a proteção ambiental, e o desenvolvimento econômico e social.

O presente projeto, em sua etapa de seleção de estações e consistência de dados hidrológicos selecionou um total de 475 estações pluviométricas e 203 estações fluviométricas para representação do regime hídrico da BHPS, o que indica uma densidade de cobertura de 130 km²/estação para as estações pluviométricas, e 303 km²/estação para as estações fluviométricas quando se avalia a BHPS em sua totalidade. Para fins comparativos, a *World Meteorological Organization* (WMO, 2008) indica que a densidade mínima recomendada para o monitoramento pluviométrico é de 575 km²/estação e para o monitoramento fluviométrico é de 1.875 km²/estação em regiões de relevo ondulado/montanhoso.

Quando se avalia, do total de estações selecionadas, quantas estão atualmente produzindo dados totalmente dentro da bacia, e consideradas em operação (que possuem dados a partir de 2019, observamos um total de 203 estações pluviométricas e 135 estações fluviométricas, o que indica uma densidade de cobertura de 264 km²/estação para as estações pluviométricas, e 456 km²/estação para as estações fluviométricas.

Esses resultados mostram como a BHPS, de uma maneira geral, tem um bom e denso monitoramento dos recursos hídricos. Apesar disso, a análise da bacia em sua totalidade não permite que locais específicos sejam avaliados para aprimoramento da rede atual. Sendo assim, o Quadro 5.1 mostra a densidade de monitoramento com estações consideradas em operação por sub-bacia.

Quadro 5.1 – Total de estações consistidas em operação para cada sub-bacia e densidade de monitoramento

Sub-bacia	Estações Plu	Estações Flu	Área (km ²)	Densidade Plu (km ² /Estação)	Densidade Flu (km ² /Estação)
Alto Vale do Rio Paraíba	11	7	4.288	390	613
Baixo Vale do Rio Paraíba	10	4	7.163	716	1791
Médio Vale do Rio Paraíba	18	11	4.960	276	451
Médio Vale Inferior do Rio Paraíba	8	7	4.321	540	617
Médio Vale Superior do Rio Paraíba	40	18	9.150	229	508
Rio Carangola	2	6	2.016	1008	336
Rio Dois Rios	23	12	3.157	137	263
Rio Muriaé	10	9	6.146	615	683
Rio Paraibuna	12	16	5.157	430	322
Rio Piabanha	32	8	2.060	64	258
Rio Piraí	5	7	1.125	225	161
Rio Pomba	16	23	8.582	536	373
Rio Preto	16	7	3.422	214	489
Total	203	135	61.547	303	456

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados mostram, que avaliando localmente as sub-bacias, o monitoramento da BHPS para a rede pluviométrica atende à

densidade mínima recomendada na maioria das sub-bacias, com exceção do Baixo Vale do Rio Paraíba, Rio Carangola e Rio Muriaé, todas localizadas na porção leste e nordeste da BHPS. Já para a rede fluviométrica, todas as sub-bacias atendem à densidade mínima recomendada.

Apesar de os resultados por sub-bacia indicarem locais onde potencialmente o monitoramento deveria ser ampliado, não necessariamente são os locais onde a ampliação do monitoramento traria mais benefícios. Além disso, a alocação de recursos disponíveis em novas estações também não é a única forma de melhorar o monitoramento hidrológico. A seguir, serão feitas considerações sobre como recursos poderiam ser alocados para melhoramento da rede já existente, e onde novas estações poderiam ser instaladas com base nos desafios encontrados no desenvolvimento do modelo hidrológico usado no presente estudo.

5.1.1.1. Considerações Gerais sobre o Aprimoramento da Rede Pluviométrica e Fluviométrica Existente

O aprimoramento de uma rede existente pode ser planejado de diferentes perspectivas. No desenvolvimento do presente estudo foi utilizado um modelo hidrológico que, apesar de ter sido inicialmente verificado com as 203 estações fluviométricas consistidas, somente utilizou 132 para validação e construção. Isso

se deve a muitos motivos que foram elencados no Produto 4, como, por exemplo, estações vizinhas mais completas, séries com interferências antrópicas, curva-chave disponível, entre outros. Dessa forma, algumas considerações adicionais para planejamento da rede existente são sugeridas a seguir:

- a. Recuperação de dados fluviométricos: No presente estudo, apesar do esforço feito no levantamento de informações junto aos diferentes órgãos, somente foi possível obter informações de medição de descarga líquida e parâmetros de curva-chave de 103 estações fluviométricas. A recuperação e disponibilização em bancos de dados públicos de todas as informações hidrológicas permitirão que trabalhos futuros possam incorporar e consistir um maior número de estações.
- b. Trabalhos contínuos de consistência fluviométrica integrada com estações de todos os órgãos atuantes permitirão uma análise única integrada com bancos de dados mais consistentes para os mais diversos estudos que são desenvolvidos na bacia. Esses resultados devem ser disponibilizados em locais de amplo e fácil acesso aos dados, como o portal Hidroweb. A fragmentação da disponibilização dos dados hidrológicos acarreta prejuízos nos trabalhos hidrológicos.

- c. Verificação de estações fluviométricas localizadas muito próximas e avaliação de possível realocação dos recursos para novas estações em áreas sem monitoramento. Uma análise crítica de estações repetidas em trechos muito próximos não contribui para os estudos da BHPS.
- d. Em caso de instalação de novas estações, verificação e articulação junto à Defesa Civil e órgãos atuantes na área de desastres naturais sobre a ampliação ou realocação da rede telemétrica atualmente existente. O uso de estações telemétricas é fundamental na temática de prevenção a desastres naturais e deve ser considerado no planejamento da rede.
- e. Reavaliação contínua da situação espacial do monitoramento, levando em consideração questões associadas a temas de interesse, como eventos extremos, uso da terra, densidade populacional, etc.
- f. Definição de protocolos e diretrizes para a escolha de sensores e equipamentos das estações, em especial as associadas ao monitoramento telemétrico. Ainda, diretrizes de manutenção e calibração periódicas de equipamentos

ajuda a evitar perdas de dados. No presente estudo, observou-se que o dado oriundo da rede telemétrica apresentou qualidade inferior aos obtidos pelos observadores, onde destaca-se que existe margem para melhorias no monitoramento.

- g. Capacitações e treinamentos juntos aos operadores das estações da bacia permitirão alinhar os processos metodológicos que dão origem às séries hidrológicas.
- h. Parceria e colaboração junto a universidades para desenvolvimento de metodologias e tecnologias de monitoramento e tratamento de dados.

5.1.1.2. Ampliação ou adequação do monitoramento para as sub-bacias da BHPS

A seguir, será feita uma abordagem individual da situação do monitoramento de cada uma das sub-bacias integrantes da BHPS em relação à situação do monitoramento com base nas observações feitas no presente estudo. A discussão foi feita em cima dos mapas de estações pluviométricas (Figura 5.1) e fluviométricas (Figura 5.2).

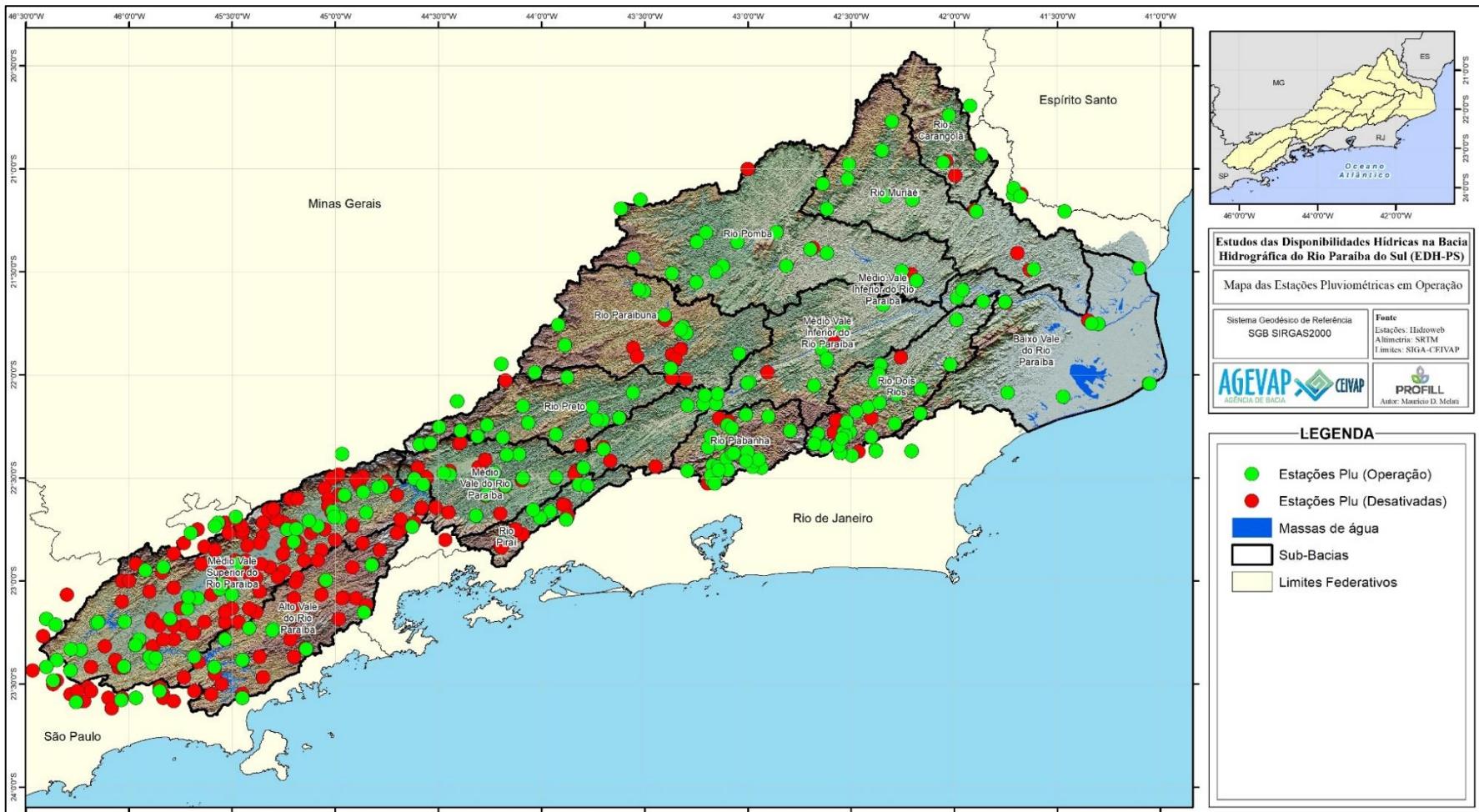


Figura 5.1 - Estações pluviométricas em operação da base de dados do projeto.

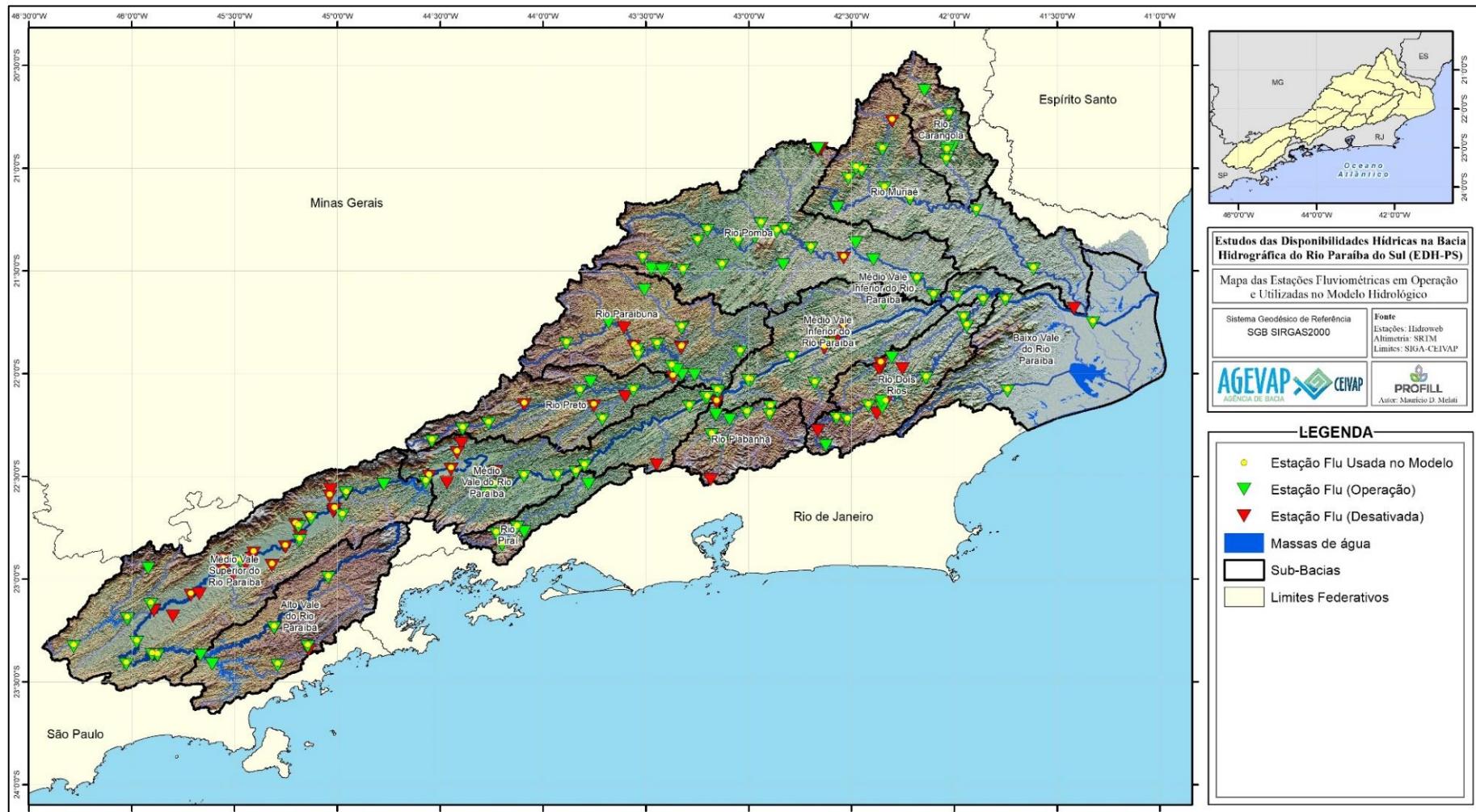


Figura 5.2 - Estações fluviométricas em operação da base de dados do projeto.

- Alto Vale do Rio Paraíba: A sub-bacia está localizada nas cabeceiras do rio Paraíba do Sul e tem seus principais rios desaguando no reservatório Paraíbuna. A densidade do monitoramento das estações está adequada e os principais rios estão bem representados no monitoramento. Em caso de ampliação do monitoramento fluviométrico na sub-bacia, sugere-se a instalação de estações na transição de relevo da cabeceira do rio Piraitinga e no rio Jacu antes da confluência com o rio Paraítinga. Essa ampliação do monitoramento irá permitir a melhor representação do comportamento dos rios das cabeceiras da bacia. Em relação ao monitoramento pluviométrico, existem muitas estações com dados consideradas desativadas, mas as consideradas em operação apresentaram boa distribuição espacial dentro da área de estudo. Em caso de ampliação do monitoramento, sugere-se a instalação de pluviômetros nas áreas de divisor hidrográfico com a sub-bacia Médio Vale Superior do Rio Paraíba.
- Baixo Vale do Rio Paraíba: A sub-bacia está localizada na foz do rio Paraíba do Sul e engloba também o rio Macabu e rio Guaxindiba. A densidade de monitoramento fluviométrica está dentro do limite mínimo recomendado. Já o monitoramento pluviométrico está com densidade um pouco abaixo do recomendado, onde recomenda-se uma pequena ampliação da rede. Em caso de ampliação da rede fluviométrica, recomenda-

se a instalação de uma nova estação no rio Guaxindiba, localizado ao norte da foz do rio Paraíba do Sul, uma vez que a área foi modelada no presente estudo sem que houvesse nenhuma estação fluviométrica. Ainda, recomenda-se que uma nova estação fluviométrica seja instalada nas cabeceiras do principal afluente do rio Macabu. Para ampliação do monitoramento pluviométrico, observa-se que a região oeste da bacia com as maiores altitudes não possui nenhuma estação de monitoramento, nem em operação, tampouco com registros históricos. O restante da área da sub-bacia apresenta bom monitoramento, assim sugere-se a ampliação do monitoramento das chuvas na área mais montanhosa mencionada.

- Médio Vale do Rio Paraíba: A sub-bacia está localizada em uma importante região da BHPS, iniciando na defluência do Reservatório do Funil e terminando nas afluências do Reservatórios de Furnas. Tanto a densidade fluviométrica quanto a densidade pluviométrica apresentam boa densidade de monitoramento em operação. Em caso de ampliação do monitoramento fluviométrico dessa sub-bacia, recomenda-se que as novas estações sejam instaladas nos principais afluentes do rio Paraíba do Sul em regiões próximas à confluência. Observou-se que algumas estações consideradas desativadas em afluentes (58258000 e 58270000) contribuíram para a

calibração do modelo e poderiam ser reativadas para dar continuidade ao monitoramento previamente desenvolvido.

- Médio Vale Inferior do Rio Paraíba: A sub-bacia está localizada na região após a defluência do reservatório de Furnas até a confluência com o rio Pomba. Tanto a densidade fluviométrica quanto a densidade pluviométrica em operação estão adequadas. O trecho principal do rio Paraíba do Sul apresenta bom monitoramento. Em caso de ampliação do monitoramento fluviométrico, recomenda-se que o afluente rio Angu tenha a estação 58658000 reativada, e uma nova estação seja instalada no afluente rio Ribeirão, na porção sudeste da área. Em relação ao monitoramento pluviométrico, observa-se uma lacuna no monitoramento de estações em operação na porção norte da sub-bacia, na divisa com a sub-bacia do rio Pomba.
- Médio Vale Superior do Rio Paraíba: A sub-bacia apresenta um elevado número de estações de monitoramento e cobre a região entre a defluência do Reservatório Paraíbuna até a afluência do Reservatório do Funil. Tanto a densidade fluviométrica quanto a densidade pluviométrica em operação estão adequadas. Em caso de ampliação do monitoramento fluviométrico, recomenda-se que seja dado foco a afluentes do rio Paraíba do Sul com condições não antropizadas na bacia, permitindo que esses pequenos rios sejam melhor representados nos modelos, uma vez que a característica da sub-bacia tem predominância

desse tipo de afluente. Ainda, recomenda-se que seja feito um trabalho de reconstituição da defluência do reservatório Jaguari, uma vez que não foi possível levantar dados anteriores a 1993. Ainda, recomenda-se a reativação das diversas estações de rios afluentes do rio Paraíba do Sul que estão aparentemente desativadas. Em relação ao monitoramento pluviométrico, observou-se que existem algumas regiões com lacuna de dados, como por exemplo no divisor hidrográfico com a sub-bacia do Alto Paraíba do Sul.

- Rio Carangola: A sub-bacia apresenta área reduzida e está com monitoramento pluviométrico abaixo do recomendado. O monitoramento fluviométrico apresenta diversas estações em operação com séries que precisam passar por um trabalho mais aprofundado de consistência, pois boa parte delas não pôde ser usada no modelo. Recomenda-se que as estações atualmente existentes sejam reavaliadas para melhor aproveitamento dos dados da bacia. Em relação aos dados pluviométricos, foi identificado que as regiões de cabeceiras, que apresentam elevados índices pluviométricos, necessitam de ampliação do monitoramento, uma vez que não há estações em operação na região.
- Rio Dois Rios: A sub-bacia apresenta uma característica montanhosa seguida de uma região mais plana com baixa altitude. Tanto a densidade fluviométrica quanto a densidade

pluviométrica em operação estão adequadas. Em caso de alocação de recursos na sub-bacia, recomenda-se avaliar as estações em operação atualmente existentes que não foram usadas no modelo hidrológico do presente estudo, uma vez que o número de estações atualmente em operação na sub-bacia é suficiente. Em relação ao monitoramento pluviométrico, recomenda-se a ampliação do monitoramento na região de divisão hidrográfica com a região montanhosa da sub-bacia do Baixo Paraíba do Sul.

- Rio Muriaé: A sub-bacia apresenta comportamento heterogêneo, com elevados índices pluviométricos nas cabeceiras de altitude e baixos índices nas baixas regiões próximas a foz. O monitoramento fluviométrico apresenta densidade adequada. Já o monitoramento pluviométrico se mostrou insuficiente em termos de densidade. Em caso de alocação de recursos na rede fluviométrica, recomenda-se que novos pequenos afluentes sejam representados, em especial na região sul da sub-bacia. Já para o monitoramento pluviométrico, recomenda-se ampliar o monitoramento da região sul da sub-bacia para melhorar a densidade de monitoramento.
- Rio Paraibuna: A sub-bacia é composta por diversos rios de grande magnitude que convergem para o rio Paraíba do Sul nas regiões de baixa altitude. Tanto a densidade fluviométrica quanto a densidade pluviométrica em operação estão

adequadas. Em caso de alocação de recursos na rede fluviométrica, recomenda-se revisar o monitoramento das estações localizadas nos dois principais afluentes localizados na porção norte da sub-bacia que não foram usados no modelo hidrológico e estão em operação. Em relação ao monitoramento pluviométrico, recomenda-se que seja ampliado o monitoramento da região norte da bacia nas proximidades das cabeceiras e na região ao sul, junto ao divisor hidrográfico com a sub-bacia do Rio Preto.

- Rio Piabanga: A sub-bacia apresenta um relevo montanhoso na região sul da BHPS. Tanto a densidade fluviométrica quanto a densidade pluviométrica em operação estão adequadas. Apesar da boa densidade de monitoramento, diversas estações não foram utilizadas na sub-bacia. Em caso de ampliação da rede de monitoramento fluviométrico, recomenda-se a instalação de estações nas regiões de cabeceira da porção sudeste da sub-bacia. Para o monitoramento pluviométrico, observou-se uma elevada concentração de estações na sub-bacia, contudo, existem áreas não cobertas, como a região do divisor hidrográfico com a sub-bacia do Médio Vale do Rio Paraíba.
- Rio Piraí: A sub-bacia apresenta comportamento peculiar, uma vez que está diretamente envolvida com os processos de transposição das águas para o rio Guandu. Tanto a densidade fluviométrica quanto a densidade pluviométrica em operação

estão adequadas. Para o monitoramento fluviométrico, em caso de instalação de novas estações, recomenda-se buscar locais não influenciados pelas transposições para que as características naturais da geração do escoamento da bacia possam ser representadas. Já em relação ao monitoramento pluviométrico, identificou-se uma área sem monitoramento de estações em operação nas regiões de cabeceira, onde sugere-se a instalação de novas estações.

- Rio Pomba: A sub-bacia é um dos principais afluentes do rio Paraíba do Sul. Tanto a densidade fluviométrica quanto a densidade pluviométrica em operação estão adequadas. Em relação ao monitoramento fluviométrico, observou-se um elevado número de novas estações na sub-bacia, onde nem todas puderam ser aproveitadas. Recomenda-se a alocação de recursos na verificação da qualidade das estações existentes que não foram utilizadas. Ainda, em caso de instalação de novas estações fluviométricas, recomenda-se que as regiões de cabeceiras e as regiões com pequenos afluentes próximos à foz recebam monitoramento. Em relação ao monitoramento pluviométrico, observou-se algumas regiões com cobertura insuficiente, como na região norte próxima às cabeceiras e na região ao sul próxima ao divisor hidrográfico. Nesses locais, sugere-se ampliação do monitoramento.

- Rio Preto: A sub-bacia apresenta relevo de transição entre montanhas e áreas de baixa altitude, com redução da pluviometria de montante para jusante. Tanto a densidade fluviométrica quanto a densidade pluviométrica em operação estão adequadas. Em caso de alocação de recursos no monitoramento fluviométrico, recomenda-se a continuação do monitoramento das estações consideradas desativadas (58542000 e 58573000). Em caso de novas estações, recomenda-se que sejam instaladas nos afluentes da região norte para representar a região montanhosa. Em caso de alocação de recursos no monitoramento pluviométrico, recomenda-se que o monitoramento atual seja mantido com possível ampliação nas regiões de divisor hidrográfico com a sub-bacia do Rio Pomba.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul – PIRH Paraíba do Sul, concluído em 2021, materializou os esforços do CEIVAP; dos Comitês Afluentes (Paraíba do Sul/SP; Preto Paraibuna/MG, COMPÉ/MG, Médio Paraíba/RJ, Piabanga/RJ, Rio dois Rios/RJ e Baixo paraíba do Sul/RJ); Órgãos Gestores: ANA, Igam, Inea, DAEE e AGEVAP, enquanto entidade delegatária, na construção do instrumento de planejamento de recursos hídricos da bacia.

Na Agenda de Produção de Conhecimento do PIRH consta a Ação 5.1.2.1 – *Elaborar estudo de refinamento das disponibilidades hídricas na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul*. Essa ação foi disposta no PIRH tendo em vista que os resultados existentes de disponibilidade hídrica existentes até então, foram considerados insuficientes ou ainda desatualizados frente a períodos recentes em que crises hídricas alteram a disponibilidade de água. Os efeitos de eventos extremos provocados por mudanças climáticas também precisavam ser considerados na obtenção de uma nova base de disponibilidades hídricas para a bacia.

Também foi objetivo com o estudo, a obtenção de uma base única de disponibilidades hídricas, que pudesse ser utilizada pelos órgãos gestores estaduais, Inea, Igam e DAEE, bem como pela ANA.

Compreende-se que a utilização de uma única base de disponibilidades hídricas colabora para uma melhor condição de gestão integrada da bacia do Rio Paraíba do Sul. Mesmo que diferentes vazões de referência sejam utilizadas entre os Estados, por exemplo, os resultados obtidos no presente estudo tem as mesmas premissas, hipóteses e mesma metodologia, o que promove uma uniformidade de resultados que favorece a pretendida gestão integrada da bacia. A avaliação de condições de entrega quantitativa, para pontos característicos da bacia do Rio Paraíba do Sul, a exemplo dos limites hidrográficos da atuação dos Comitês Afluentes, ou ainda, no limite dos Estados, é demanda antiga dos CBHs que também resta atendida com os presentes resultados.

Não menos importante, a partir da nova base de disponibilidades hídricas poderão ser elaborados novos balanços hídricos, que por sua vez, podem confirmar ou ainda destacar outras áreas críticas que devem fazer parte de uma gestão diferenciada. Destaca-se que o estudo de demandas e balanços hídricos também foi apontado como do PIRH na mesma Agenda de Produção de Conhecimento: Ação 5.1.2.2 - *Elaborar estudo de atualização do quadro de demandas hídricas e atualização dos balanços hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul*.

Sendo assim, o presente estudo trouxe os resultados da disponibilidade hídrica (vazões de referência) para toda a BHPS, na base hidrográfica completa da BHO6. Os resultados permitem que qualquer usuário possa acessar a disponibilidade hídrica da bacia espacialmente para diferentes vazões específicas. Ainda, o relatório permite avaliar a disponibilidade em outros cenários, como em condição de estiagem crítica e abordando o impacto das transposições existentes na bacia.

No estudo foram apresentados os resultados da disponibilidade hídrica na forma de vazões de referência (Q_{milt} , Q_{95} , Q_{90} e $Q_{7,10}$) em diferentes variações temporais (anual, mensal, bimestral e trimestral). Ou seja, cada um dos 272.188 trechos de rio da BHO6 apresenta 4 diferentes vazões de referência com 23 diferentes variações temporais de resultado, dando origem a 92 valores diferentes de vazão de referência para cada pequeno trecho de rio. Isso implica em 25.041.296 valores de vazão de referência gerados para toda a BHPS, facilitando o acesso aos dados hidrológicos em qualquer ponto da BHPS por qualquer usuário do banco de dados.

Ainda, o presente relatório avaliou a situação hídrica de disponibilidade e vazões máximas para a BHPS usando modelagem hidrológica chuva-vazão e modelos climáticos oriundos do Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, CMIP6 - Coupled Model Intercomparison Project

Phase 6). Na avaliação, foram usadas projeções das variáveis chuva e temperatura para projetar alterações no comportamento das vazões dos rios. O presente estudo usou um cenário intermediário de emissões (SSP 2-4.5).

Por fim, os resultados do impacto das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica ($Q_{7,10}$, Q_{milt} , Q_{95} e Q_{90}) foram apresentadas nos pontos com estações fluviométricas da BHPS, onde, para as vazões Q_{milt} , observa-se um maior número de modelos indicando diminuição das vazões para o curto prazo, e um maior número indicando aumento das vazões no longo prazo. Já para as vazões mínimas de referência Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ ocorre razoável convergência entre os modelos indicando redução das vazões mínimas. Em termos de resultado previsto de vazões máximas (TR10, TR25, TR50 e TR100), ao avaliar a bacia como um todo, os valores médios dos fatores de alteração no curto prazo para o TR10, TR25, TR50 e TR100 foram de 7%, 11%, 13% e 15%, respectivamente. Já para o longo prazo foram de 26%, 28%, 28%, e 29%, respectivamente. Esses resultados indicaram um aumento considerável dos fatores no longo prazo e uma leve tendência de aumento do fator com o aumento do tempo de recorrência.

6.1. LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

Em estudos hidrológicos, as incertezas são inerentes devido à complexidade dos sistemas naturais. As variáveis envolvidas, como

precipitação, evapotranspiração e escoamento, estão sujeitas a variações temporais e espaciais que podem ser difíceis de modelar com precisão. Além disso, a qualidade e a quantidade de dados disponíveis podem introduzir incertezas adicionais, seja pela limitação das observações ou pelas dificuldades em representar adequadamente processos hidrológicos complexos. Essas incertezas podem impactar a interpretação dos resultados e a eficácia das estratégias de gestão de recursos hídricos, tornando crucial a consideração dessas variabilidades na tomada de decisões. Sendo assim, a seguir serão discutidas as inerentes incertezas do estudo desenvolvido.

Inicialmente, é importante destacar que o monitoramento dos rios ocorre em cursos d'água de bacias geralmente grandes, com áreas de drenagem extensas. O presente estudo, buscando fornecer resultados na base hidrográfica BHO6 (elevado nível de detalhe), estimou vazões de referência em trechos de rio bastante pequenos, onde a hidrologia tem um comportamento diferente do observado em rios maiores. Por exemplo, podem ser drenagens intermitentes que apresentam forte dependência das características físicas locais, sendo de difícil representação por modelos. Assim, os resultados verificados em áreas de drenagem muito pequenas devem ser considerados com cautela para evitar estimativas distantes do que seria a realidade local observada. Ainda assim, o modelo utilizado aqui ponderou diversas características físicas que controlam os

processos de geração de vazões, produzindo adequadas estimativas de vazões de referência que ocorreriam nessas complexas regiões.

O modelo hidrológico de chuva-vazão empregado gerou vazões para milhares de trechos de rios, levando em consideração as características físicas da BHPS. Ou seja, as vazões foram estimadas a partir das precipitações na bacia. Como o objetivo do estudo foi apoiar a gestão dos recursos hídricos, onde se espera um aumento progressivo da disponibilidade hídrica (baseada em vazões de referência) de montante para jusante nos rios, mesmo que essa não seja uma condição naturalmente esperada, foram aplicados tratamentos matemáticos nos resultados que levaram a resultados distintos daqueles gerados pelo modelo hidrológico. Em geral, esses ajustes produzem resultados satisfatórios, mas podem resultar em comportamentos inesperados em relação à sazonalidade natural em trechos de rio com áreas de drenagem muito pequenas.

Além disso, em estudos de regionalização, as vazões de referência estimadas costumam ser originadas de ajustes de equações ou modelos hidrológicos, mesmo nos pontos onde existem dados observados. Portanto, toda estimativa apresentada aqui carrega certo nível de incerteza, que foi quantificada e considerada adequada no desenvolvimento do trabalho.

Outro ponto importante é que vazões de referência servem para auxiliar a tomada de decisão na gestão sustentável das águas e são uma estimativa baseada em longas séries históricas de dados, na maioria das vezes estimada com décadas de informações. Ou seja, são valores médios que mesclam décadas mais secas e mais úmidas. É importante compreender que, em situações de crise hídrica devido à ocorrência de anos secos atípicos, a estimativa gerada aqui pode ser insuficiente, e novas ponderações podem precisar ser feitas para evitar a superexploração do manancial superficial. Recomenda-se que os resultados de vazões críticas geradas neste trabalho sejam consideradas em situações assim.

Por fim, no contexto das mudanças climáticas, deve-se considerar que os resultados gerados aqui foram baseados no Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, CMIP6 - *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*). Os modelos usados carregam suas próprias e inerentes incertezas, que são amplificadas pelas incertezas subsequentes nos estudos desenvolvidos. Sendo assim, os resultados são uma excelente ferramenta de planejamento dos recursos hídricos, mas devem ser usados com cautela para evitar a tomada de decisão precipitada. O monitoramento na BHPS deve ser mantido para verificação ou confirmação das previsões feitas até aqui. Além disso, as projeções devem ser atualizadas sempre que um novo relatório do IPCC for lançado, e essas comparadas com o que havia sido projetado

anteriormente. Ainda, recomenda-se que estudos futuros no tema sejam aprofundados com novos cenários e análises de forma complementar aos desenvolvidos aqui.

Por fim, os resultados deste estudo mostram a intensificação das crises hídricas de disponibilidade na BHPS, tanto no curto quanto no longo prazo em cenários futuros. Então, recomenda-se que sejam adotadas medidas conservadoras na representação dessas projeções. Já os resultados de eventos extremos indicam maior aumento destes quanto mais distante é a projeção. Tais resultados devem servir como indicador no planejamento de estruturas hidráulicas mais resilientes na área de estudo.

7. BANCO DE DADOS DE INFORMAÇÃO

Todas as informações levantadas e produzidas pelo presente estudo deram origem a um único banco de dados em SQL contendo as bases de dados hidrológicos e geoespaciais. Os bancos de dados foram construídos de forma cumulativa, ou seja, o banco de dados do Produto 2 carrega o banco de dados do Produto 1, e o banco de dados do Produto 3 carrega ambos, e assim por diante, com as atualizações que foram feitas quando foi o caso, conforme indicado na Figura 7.1, que apresenta o fluxo de construção que deu origem ao banco de dados final do projeto: "bd_bhps".

O acesso a esse banco de dados é apresentado com detalhes no manual desenvolvido, que explica como os dados poderão ser acessados para possibilitar a manipulação dos dados por qualquer interessado.

7.1. BANCO DE DADOS HIDROLÓGICO

A base de dados hidrológica apresentada nos anexos digitais contém as estações selecionadas para o presente estudo com as informações associadas a cada uma delas nas diferentes etapas do projeto. O banco de dados hidrológicos entregue utilizou o banco PostgreSQL14 para organização das bases.

7.2. BANCO DE DADOS GEOESPACIAL

Além disso, o banco de dados SIG foi entregue juntamente a este documento como anexo digital referenciado ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000). A base de dados SIG foi entregue acompanhada de um arquivo de metadados com o respectivo dicionário de dados. Este arquivo segue as diretrizes do Manual 1 da Infraestrutura de Dados Espaciais (IDE) do Sistema e consiste em uma planilha descritiva contendo o nome de cada arquivo, tipo do arquivo e respectiva extensão, com uma breve descrição de sua origem ou fonte e qualquer outro tipo de informação e a explicação dos campos. O banco de dados SIG entregue utilizou o banco PostGis3 para organização das bases.

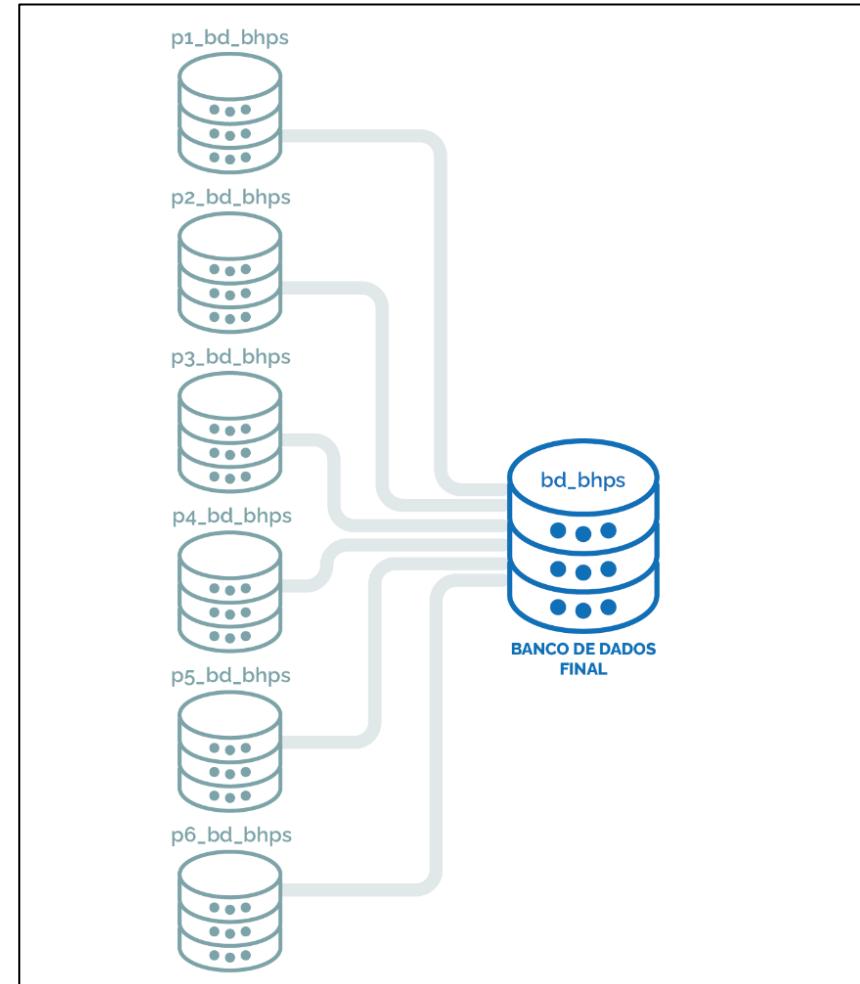


Figura 7.1 - Construção do banco de dados do projeto.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. Diretrizes e Análises Recomendadas para a Consistência de Dados Pluviométricos. Brasília, 2011a.

ANA. Diretrizes e Análises Recomendadas para a Consistência de Dados Fluviométricos. Brasília - DF, 2011b.

ANA. Nota Técnica no 30/2014/SAG-ANA. Brasília, DFAgência Nacional de Águas, , 2014. Disponível em: <<https://agevap.org.br/downloads/nt-30.2014-sag-ana.pdf>>

ANA. Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos do Brasil. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.pixabay.com/pt>.

BALLARIN, A. S. et al. CLIMBra - Climate Change Dataset for Brazil. *Scientific Data*, p. 1–31, 2023.

BRÊDA, J. P. L. F. et al. Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *Climatic Change*, v. 159, n. 4, p. 503–522, 1 abr. 2020.

CEIVAP. Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. RF01 - PIRH-PS Consolidado. Plano Integrado de Recursos

Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul 2021. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://sigaceivap.org.br/siga-ceivap/publicacoes>>.

CNRH. Resolução nº 129. , 2011.

COLLISCHONN, W. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. Tese de Doutorado—[s.l.] UFRGS, 2001.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. Porto Alegre: ABRH, 2013.

DAEE. Instrução Técnica DPO nº 12. 2017.

FAN, F. M.; COELHO, V. R. Super Manejo de Dados. Porto Alegre, 2016.

IGAM. Portaria IGAM 48. , 2019.

INEA. Resolução INEA nº 162. , 2018.

KENDALL, M. G. Rank correlation methods. 4th ed ed. [s.l.] Griffin, 1975.

MANN, H. B. Non-Parametric Test Against Trend. *Econometrica*, v. 13, n. 3, p. 245–259, 1945.

PRUSKI, F. F. et al. Conhecimento da disponibilidade hídrica natural para a gestão dos recursos hídricos. *Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 1, p. 67–77, 2011.

SOUZA, C. M. et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. *Remote Sensing*, v. 12, n. 17, 2020.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: ABRH, 1993.

USGS. Double-Mass Curves Double-Mass Curves. 1966.

WMO. Methods of observation. In: *Guide to Hydrological Practices: hydrology from measurement to hydrological information*. Geneva: [s.n.].

CONTATOS

Avenida Iguassu, 451/601
Porto Alegre/RS
CEP: 90.470/430

www.profill.com.br
profil@profill.com.br

(51) 3211-3499



Av. Luiz Dias Martins, 73
Resende/RJ
CEP: 27.516-245

www.agevap.org.br
agevap@agevap.org.br

(24) 99317-1210



Av. Luiz Dias Martins, 73
Resende/RJ
CEP: 27.516-245

www.ceivap.org.br
ceivap@ceivap.org.br

(24) 99317-1210



