

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA HÍDRICA

**Avaliação da disponibilidade hídrica sob condições de
mudanças climáticas: estudo de caso da bacia hidrográfica
do rio Santo Antônio (MG)**

Sabrina Neves Merlo Barros

23 de agosto de 2024

Itajubá, Minas Gerais

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA HÍDRICA

Sabrina Neves Merlo Barros

**Avaliação da disponibilidade hídrica sob condições de
mudanças climáticas: estudo de caso da bacia hidrográfica
do rio Santo Antônio (MG)**

Dissertação a ser submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hídrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de **Mestre em Engenharia Hídrica**.

Área de Concentração: Gestão de sistemas hídricos

Orientador: Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva
Co-Orientador: Prof. Dr. James Maia Lacerda

23 de agosto de 2024

Itajubá, Minas Gerais

FICHA CATALOGRÁFICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA HÍDRICA

Sabrina Neves Merlo Barros

**Avaliação da disponibilidade hídrica sob condições de
mudanças climáticas: estudo de caso da bacia hidrográfica
do rio Santo Antônio (MG)**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 23 de agosto de 2024, conferindo ao autor o título de **Mestre em Engenharia Hídrica**.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva (Orientador)

Prof. Dr. Prof. Dr. James Maia Lacerda (Co-orientador)

Prof^a. Dra. Marina Batalini de Macedo (docente interna)

Dr. Aloysio Portugal Saliba (convidado)

23 de agosto de 2024

Itajubá, Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

Agradeço pela minha vida e saúde e, tendo consciência dos meus privilégios, pela oportunidade de acesso à uma educação de qualidade.

A minha filha Clara pela compreensão da ausência e por me dar a oportunidade de ser melhor a cada dia. Ao meu esposo pelo apoio incondicional e suporte emocional e a minha irmã Marina Merlo, futura Doutora, pelo exemplo de dedicação à academia.

Agradeço enormemente aos meus orientadores, professores Benedito Cláudio da Silva e James Lacerda, pela disponibilidade, atenção, paciência e ensinamentos. A todos os professores do Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Hídrica, em especial à Coordenadora do Programa, Professora Márcia Viana Lisboa Martins, pela dedicação e disponibilidade durante o curso. À professora Marina e ao grande profissional Aloysio Saliba, membros da banca examinadora, pelos seus ensinamentos e esclarecimentos.

Aos meus colegas de mestrado e à oportunidade de representá-los como classe, em especial Júlio Eduardo de Oliveira Rocha e Lúcia Garrido pelo auxílio e incentivo durante o desenvolvimento e elaboração da pesquisa e à amizade para a vida. Ao Filipe Passos, aluno de Doutorado, e Marina Barbosa, aluna de mestrado, pela disponibilidade e total apoio.

Um agradecimento especial ao meu amigo, Engenheiro e, em breve, Doutor em Sustentabilidade, Kamil Cheab, a quem devo o grande incentivo para iniciar o programa de mestrado.

À Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), pela qualidade e excelência de ensino.

RESUMO

As alterações globais do clima são resultado de interferências naturais e influência da atividade humana, e seus efeitos têm se tornado cada dia mais evidentes. O combate à ideia de abundância que sustentou, durante muito tempo, a cultura do desperdício da água, sua pouca valorização como recurso e o adiamento dos investimentos necessários à otimização de seu uso, é um tema inadiável. As projeções atuais indicam importantes mudanças na distribuição temporal e espacial dos recursos hídricos e um aumento significativo na frequência e intensidade dos desastres acentuam essa pressão, evidenciando a necessidade de planos mitigatórios para garantir o uso sustentável dos recursos hídricos. Neste sentido, ressalta-se a importância do papel do Estado (União, Estados e Municípios) como principal gestor das políticas públicas que envolvem segurança e disponibilidade de recursos hídricos. As tendências mostradas nos cenários estudados nos diversos modelos devem ser consideradas pelos tomadores de decisão, avaliando o impacto nas vazões dos corpos d'água e a disponibilidade hídrica, para aplicação de ferramentas de gestão e definição de planos de ação que possibilitem adaptação e atenuação dos impactos. Desta forma, a bacia hidrográfica do rio Santo Antônio foi modelada com auxílio do Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH), buscando compreender a influência climática de projeções do CMIP6, aplicando os cenários de emissão de gases do efeito estufa SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Neste contexto o trabalho teve como objetivo o ajuste do modelo a bacia e, com as simulações, compreender quais as tendências quanto à disponibilidade hídrica futura, períodos de 2021 a 2060 e 2061 a 2100. Desta forma, o modelo foi calibrado para cada uma das sete sub-bacias, analisando as três funções objetivos e a aderência entre as vazões observadas e aquelas geradas pelo modelo. De maneira geral, os resultados foram satisfatórios, obtendo bons ajustes, exceto a calibração da sub-bacia localizada a jusante de uma usina hidrelétrica, fato compreensíveis e inerente aos modelos hidrológicos existentes. Com as séries de vazões projetadas para as sub-bacias, curvas de permanência foram elaboradas e avaliadas, assim como a variação da Q_{95} , utilizada como vazão característica para representação de disponibilidade hídrica. Assim, de forma geral, os modelos sugerem reduções de vazão em toda a bacia, para qualquer cenário ou período.

Palavras-Chave: Adaptação climática, impacto climático, planejamento hídrico, CMIP6, gestão de recursos hídricos.

ABSTRACT

Global climate changes are the result of both natural interferences and the influence of human activity, and their effects have become increasingly evident. Addressing the idea of abundance, which for a long time supported the culture of water waste, its undervaluation as a resource, and the postponement of necessary investments to optimize its use, is an urgent matter. Current projections indicate significant changes in the temporal and spatial distribution of water resources, and the increased frequency and intensity of disasters amplify this pressure, highlighting the need for mitigation plans to ensure the sustainable use of water resources. In this context, the role of the State (federal, state, and municipal governments) as the main manager of public policies involving water security and availability is crucial. The trends shown in the scenarios studied across various models must be considered by decision-makers, evaluating the impact on river flows and water availability, for the application of management tools and the development of action plans that enable adaptation and mitigation of impacts. In this regard, the Santo Antônio River basin was modeled using the Large-Scale Hydrological Model (MGB-IPH) to understand the climatic influence of CMIP6 projections, applying greenhouse gas emission scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5. The objective of the study was to adjust the model to the basin and, through simulations, understand the trends in future water availability for the periods 2021 to 2060 and 2061 to 2100. The model was calibrated for each of the seven sub-basins, analyzing the three objective functions and the consistency between observed flows and those generated by the model. Overall, the results were satisfactory, with good adjustments, except for the calibration of the sub-basin located downstream of a hydroelectric plant, a fact that is understandable and inherent to existing hydrological models. With the projected flow series for the sub-basins, flow duration curves were developed and evaluated, as well as the variation of Q_{95} , used as a characteristic flow to represent water availability. Thus, in general, the models suggest flow reductions throughout the basin, for any scenario or period.

Keywords: Climate adaptation, climate impact, water planning, CMIP6, water resource management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Variação das temperaturas ao longo do tempo e fatores por trás do aumento térmico recente.....	23
Figura 3.2 – Fluxograma de trabalho para utilização de modelos climáticos.	33
Figura 4.1 – Fluxograma metodologia.	39
Figura 4.2 – Mapa de localização da bacia.....	40
Figura 4.3 – Funcionamento MGB-IPH.....	43
Figura 4.4 – Modelo Digital de Elevação (MDE).	44
Figura 4.5 – Mapa de URH's.....	46
Figura 4.6 – Estações fluviométricas selecionadas.	48
Figura 4.7 – Hidrograma das estações fluviométricas selecionadas, dados brutos e consistidos.	50
Figura 4.8 – Estações pluviométricas e meteorológica.	51
Figura 4.9 – Estrutura de aquisição dos dados de precipitação e demais variáveis dos modelos.	57
Figura 5.1 – Arquivo das minibacias discretizadas pelo modelo.	58
Figura 5.2 – Discretização em sub-bacias, a partir das estações selecionadas.....	60
Figura 5.3 – Hidrograma com os dados observados e simulados pelo modelo, para a sub-bacia 01 (Conceição do Mato Dentro), período de 1970 a 1979 (calibração).	62
Figura 5.4 – Hidrograma com os dados observados e simulados pelo modelo, para a sub-bacia 02 (Dom Joaquim), período de 1970 a 1979 (calibração).	63
Figura 5.5 – Hidrograma com os dados observados e simulados pelo modelo, para a sub-bacia 03 (Ferros), período de 1970 a 1979 (calibração).	64
Figura 5.6 – Hidrograma com os dados observados e simulados pelo modelo, para a sub-bacia 04 (Fazenda Barraca), período de 1970 a 1979 (calibração).	65
Figura 5.7 – Hidrograma com os dados observados e simulados pelo modelo, para a sub-bacia 05 (Senhora do Porto), período de 1970 a 1979 (calibração).	66
Figura 5.8 – Hidrograma com os dados observados e simulados pelo modelo, para a sub-bacia 06 (UHE Porto da Estrela), período de 1970 a 1979 (calibração).	67
Figura 5.9 – Hidrograma diário com os dados observados e simulados pelo modelo, para as sub-bacia 01 a 06, período de 1970 a 2014.	68
Figura 5.10 – A performance do modelo, para as sete sub-bacias, considerando os valores resultantes do coeficiente NSlog.	70

Figura 5.11 – Curva de permanência sub-bacia 02 – Dom Joaquim, modelo ACCESS-ESM1-5.....	71
Figura 5.12 – Curva de Permanência sub-bacia 02 – Dom Joaquim, modelo CanESM5.....	72
Figura 5.13 – Curva de Permanência sub-bacia 02 – Dom Joaquim, modelo INM-CM4-8....	72
Figura 5.14 – Curva de Permanência sub-bacia 02 – Dom Joaquim, modelo IPSL- CM6A-LR.....	73
Figura 5.15 – Curva de Permanência sub-bacia 02 – Dom Joaquim, modelo MPI-ESM1-2-HR.....	74
Figura 5.16 – Oscilações das vazões Q_{95} , apresentadas pelos modelos, períodos de 2021-2060 e 2061-2100, para as sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Santo Antônio.....	75
Figura 5.17 – Variação das oscilações das vazões Q_{95} dos modelos, considerando o cenário e período.....	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Critérios de outorga nos estados brasileiros.	17
Quadro 3.2 – Relatórios IPCC.....	21
Quadro 3.3 – Descrição dos RCP's do CMIP5.	25
Quadro 3.4 – Descrição dos SSP's do CMIP6.	26
Quadro 3.5 – GCMs e métodos de downscaling na literatura.	28
Quadro 4.1 – Arquivos resultantes do pré-processamento no QGis.....	43
Quadro 4.2 – Parâmetros fixos	52
Quadro 4.3 – Parâmetros calibráveis.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Características da bacia do Rio Santo Antônio.....	41
Tabela 4.2 – Descrição dos usos da bacia	47
Tabela 4.3 – Estações fluviométricas selecionadas para o estudo.....	47
Tabela 4.4 – Parâmetros de Albedo.....	52
Tabela 4.5 – Parâmetros de índice de área foliar.....	52
Tabela 4.6 – Valores de altura das árvores.....	52
Tabela 4.7 – Valores para resistência superficial.	53
Tabela 4.8 - Parâmetros iniciais do solo.....	54
Tabela 5.1 – Estações fluviométricas selecionadas para o estudo.....	59
Tabela 5.2 – Valores de NS, NSlog e erro de volume, após calibração.....	69
Tabela 5.3 – Variação de vazões Q_{95} para a sub-bacia 02 – Dom Joaquim – Modelo ACCESS-ESM1-5.....	71
Tabela 5.4 – Variação de vazões Q_{95} para a sub-bacia 02 – Dom Joaquim – Modelo CanESM5.....	72
Tabela 5.5 – Variação de vazões Q_{95} para a sub-bacia 02 – Dom Joaquim – Modelo INM-CM4-8.....	72
Tabela 5.6 – Variação de vazões Q_{95} para a sub-bacia 02 – Dom Joaquim – Modelo IPSL-CM6A-LR.....	73
Tabela 5.7 – Variação de vazões Q_{95} para a sub-bacia 02 – Dom Joaquim – Modelo MPI-ESM1-2-HR.	74
Tabela 5.8 – Estimativa das demandas hídricas de retirada atual (2020) e projeção (2032), para a sub-bacia do rio Santo Antônio.	77

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
2.	OBJETIVOS.....	15
2.1	Geral.....	15
2.2	Específicos.....	15
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	Disponibilidade hídrica no Brasil	16
3.2	Projeções de mudanças climáticas.....	20
3.3	Impactos de projeções das mudanças climáticas nos recursos hídricos.....	34
4.	METODOLOGIA	38
4.1	Caracterização da área de estudo	40
4.2	Modelo de grandes bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB – IPH) 42	
4.2.1	Modelo digital de elevação	44
4.2.2	Unidades de Resposta Hidrológica (URH's).....	45
4.2.3	Dados hidroclimatológicos	47
4.2.4	Parâmetros do modelo	51
4.2.5	Calibração e verificação do modelo.....	54
4.3	Projeções climáticas	56
4.4	Verificação do comportamento das vazões futuras e Análise da disponibilidade hídrica.....	57
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
5.1	Discretização da bacia e delimitação das sub-bacias	58
5.2	Calibração do modelo	60
5.3	Projeção de vazões.....	70
5.3.1.	Curvas de permanência e variações da Q_{95} para rio do peixe, em Dom Joaquim ...	70
5.3.2	Variações da Q_{95} para a bacia do rio Santo Antônio	74
5.4	Análise da disponibilidade hídrica da bacia	76
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
	REFERÊNCIAS	79
	ANEXO A – Parâmetros calibráveis	83

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, grandes civilizações emergiram as margens de corpos d'água, proporcionando desenvolvimento, sendo sinônimo de abundância e prosperidade. Assim, devido à relevância da água como elemento básico para a sobrevivência do homem, no Brasil, juridicamente, o tema já é abordado desde a década de 30, com a publicação do Decreto Federal nº 24.643, de 10 de julho de 1934, que decretou o Código de Águas, cuja execução era de competência do Ministério de Agricultura. Posteriormente, em um contexto em que a água se tornava cada vez mais escassa, em 08 de janeiro de 1997 foi sancionada a Lei Federal nº 9.433, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e estabeleceu o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNGRH), e a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, que criou a Agência Nacional de Águas – ANA, entidade federal encarregada de executar essa Política para os rios de domínio da União e coordenar o sistema de informações (SETTI, LIMA, CHAVES, PEREIRA, 2001). O objetivo era apoiar os estados na implementação de seus planos de gerenciamento, incorporando assim uma gestão descentralizada e participativa, necessária diante da crescente demanda pelo uso/disponibilidade de recurso hídrico (SILVA, M. B. HERREROS, M. M. A. G. BORGES, 2017).

Dentro deste contexto já é consenso nas mais diversas agendas de pesquisa que o Brasil é um país privilegiado quando o tema é água, porém, nos últimos anos, vem se tornando mais evidente o combate à ideia de abundância que sustentou, durante muito tempo, a cultura do desperdício da água disponível, sua pouca valorização como recurso e o adiamento dos investimentos necessários à otimização de seu uso. Contribuindo para a desmistificação desse estereótipo, é importante destacar ainda que a distribuição deste recurso não é uniforme geograficamente, seja por razões físicas ou por ocupação humana. As projeções atuais indicam importantes mudanças na distribuição temporal e espacial dos recursos hídricos, e um aumento significativo na frequência e intensidade dos desastres relacionados aos eventos hidrológicos críticos, com o aumento das emissões de gases de efeito estufa (ZHOU, 2021). Tem sido cada vez mais recorrente o anúncio de medidas preventivas de adaptação frente à situação hídrica do estado. Em outubro de 2021 o Governo de Minas Gerais (SEMAD, 2021) anunciou, em função da baixa pluviometria do último período chuvoso, restrições de uso, como forma de sustentar a segurança hídrica, minimizar os impactos e garantir o abastecimento. Assim, a tendência é que no futuro o uso dos recursos hídricos sofra gradualmente mais pressão, mudanças climáticas ameacem sua disponibilidade e, simultaneamente a tudo isso, a demanda por água aumente

(UNESCO, 2015). A importância na definição imediata de planos com ações que possam mitigar os impactos nos recursos hídricos, contribuindo para uma gestão efetiva, minimizando possíveis conflitos de uso. Em paralelo, a evolução dos estudos vem comprovando a influência humana como a força motriz primordial por trás de diversas transformações climáticas que estamos presenciando (UNESCO, 2015).

Neste sentido, ressalta-se a importância do papel do Estado (União, Estados e Municípios) como principal gestor das políticas públicas que envolvem segurança e disponibilidade de recursos hídricos.

Posto isso, analisando o contexto específico dos estados brasileiros frente à crise hídrica, no caso de Minas Gerais, que é o universo empírico deste trabalho, já se tornou corriqueira a adequação da comunidade e de grandes consumidores de água às restrições impostas pelo cenário de escassez. Na bacia do rio Santo Antônio, inserida na bacia federal do rio Doce, têm-se rios de importante relevância para a região com destaque para uso da água para abastecimento e produção industrial influenciada pela sua vocação para extração de minério de ferro, cujas tecnologias aplicadas demandam recurso hídrico para seu beneficiamento. Destaca-se que, muitos usos, principalmente os de menor porte, nem sempre estão regularizados, fato este que pode mascarar os efeitos das políticas públicas que envolvem este tema, como também agravar os problemas relacionados à crise hídrica. Outro grande problema encontrado na bacia do rio Santo Antônio, é o despejo de efluentes domésticos sem tratamento no curso d'água, gerados pelas cidades que drena (ECOPLAN-LUME, 2022). De acordo com o estudo apresentado por SÁ (2020) os corpos d'água da bacia recebem 84 % da vazão do esgoto in natura gerado. Assim, entender a quantidade e a qualidade dos recursos hídricos é o primeiro passo em busca da redução dos conflitos e planejamento das atividades econômicas, uma vez que permite traçar planos que objetivem a preservação, proteção, a recuperação e o uso consciente (IGAM, 2023a).

Para a aplicação de políticas de gestão, parte-se do princípio que são necessários estudos que tornem possível a avaliação de cenários para planejamento, tomadas de decisão e melhores estratégias quanto ao futuro. Neste contexto, as projeções de mudanças climáticas e suas possíveis influências nas vazões dos corpos d'água tornam-se ferramentas de importante valor para compreensão da perenidade dos fluxos hídricos na bacia e determinação da disponibilidade hídrica. Tendo em vista a gestão quantitativa e qualitativa dos usos da água e a garantia ao direito de acesso, é fundamental a compreensão das vazões de referência, uma vez que são indicadores de disponibilidade hídrica e informação primordial para análise e decisão dos processos de outorga (BRASIL, 1997; MOREIRA, 2021).

Neste sentido, este projeto objetiva compreender a influência climática na oferta hídrica na bacia do rio do Santo Antônio, com projeções numéricas de modelos climáticos. A simulação de diferentes cenários climáticos do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6), são utilizados como entrada do Modelo Hidrológico de Grandes Bacias, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (MGB-IPH) que, combinados com as perspectivas de clima, permitirão a verificação da representatividade do MGB-IPH para a área de estudo e avaliar a disponibilidade hídrica futura.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar a influência das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica na bacia do rio Santo Antônio, utilizando o Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH) com entrada de dados de projeção de precipitação de cinco modelos *Downscaling* do CMIP6 e dois cenários de projeção.

2.2 Específicos

- Verificar a representatividade do MGB-IPH para a área de estudo;
- Considerando os cenários climáticos SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e períodos futuros até 2100, analisar o desempenho das projeções de vazão dos modelos do CMIP6:
 - ACCESS-ESM1-5: modelo desenvolvido pelo *Bureau of Meteorology* (BoM) e *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO), Austrália;
 - CanESM5: modelo canadense, desenvolvido pelo *Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis* (CCCma);
 - INM-CM4-8: desenvolvido pelo *Institute for Numerical Mathematics* (INM), Rússia; e
 - IPSL-CM6A-LR: modelo francês do *Institut Pierre-Simon Laplace* (IPSL); e
 - MPI-ESM1-2-HR: desenvolvido pelo *Max Planck Institute for Meteorology*, Alemanha.
- Avaliar as curvas de permanência geradas, assim como a variação da Q₉₅, com vistas ao estabelecimento de prioridades na tomada de decisões.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Disponibilidade hídrica no Brasil

A disponibilidade hídrica representa a água que pode ser utilizada nas diversas atividades de consumo e, considerando a sazonalidade da oferta hídrica, a maneira de assegurar a manutenção plena para os diversos usos é basear-se em cenários de escassez (ECOPLAN-LUME, 2010). Deste modo, o estudo para determinar a disponibilidade hídrica em uma seção de um curso d'água, envolve a análise de vazões mínimas, cujos critérios para sua determinação variam conforme as leis que regem os estados brasileiros. Suas definições são baseadas em dados monitorados de estações fluviométricas e, quando não existentes no trecho de análise, utiliza-se o artifício da regionalização de vazões, ou ainda modelos para transformação de chuva em vazão. Embora os artifícios citados não sejam a representação fiel do que ocorre na natureza, são importantes ferramentas para a gestão dos recursos hídricos (MOREIRA, 2021).

Para haver equilíbrio entre disponibilidade e demanda utiliza-se do conceito de outorga de direito dos recursos hídricos que é um instrumento da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída a partir da Lei Federal N° 9.433 de 1997 (BRASIL, 1997). A outorga garante o direito de uso dos recursos hídricos aos usuários, regulariza o uso da água, promove utilização racional e a gestão qualitativa da água.

Uma vez relacionada às leis do estado a que pertence ou à legislação federal, a depender de sua abrangência, para captações superficiais em rios perenes as vazões de referência sempre estão relacionadas às vazões mínimas. No estado de Minas Gerais aplica-se a $Q_{7,10}$ (vazão mínima de 7 dias de duração com período de retorno de 10 anos), considerada mais restritiva quando comparada às definições federais ou dos demais estados, com aplicação da Q_{90} (vazão cuja permanência ocorre em 90 % do tempo) ou a Q_{95} (vazão cuja permanência ocorre em 95 % do tempo). Importante ressaltar que é permitido a retirada máxima de apenas uma parcela da vazão da referência, determinando fluxos residuais mínimos à jusante, conforme definido na Portaria IGAM n° 48, de 04 de outubro de 2019 (IGAM, 2019). No geral, as parcelas admissíveis para retirada estão definidas à um único percentil, como no estado de Goiás (50 %) ou na Bahia (80 %), porém, para o Distrito Federal e Minas Gerais, há mais de uma regra para determinação da vazão máxima outorgável. No Distrito Federal, em uma mesma vazão, considerando a soma das vazões a serem outorgadas, é possível a retirada de até 80 % das vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} ou ainda Q_{mmm} (média dos mínimos mensais) para os casos de não existir ônus (SINJ, 2017). Já para Minas Gerais é permitido outorgar 30 ou 50 % da $Q_{7,10}$, a depender da análise técnica do órgão outorgante ou, no caso de cursos d'água pertencentes às

Circunscrições Hidrográficas (CHs) Rio Pará, Rio Paraopeba, Rio das Velhas, Rios Jequitaiá e Pacuí, Rio Urucuia, Afluentes Mineiros do Médio São Francisco e Rio Verde Grande, considerando condições naturais, o limite máximo é estabelecido em 30 % da $Q_{7,10}$ (IGAM, 2023).

No Quadro 3.1 apresentam-se a vazão mínima de referências e a parcela máxima de água outorgável, permitida em alguns órgãos dos estados brasileiros e no Distrito Federal.

Quadro 3.1 – Critérios de outorga nos estados brasileiros.

Local	Órgão gestor	Vazão máxima outorgável
Distrito Federal	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal - Adasa	80 % da $Q_{7,10}$; Q_{90} ; Q_{95} e Q_{mmm} *
Goiás	Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidades e Assuntos Metropolitanos - Secima	50 % da Q_{95}
Minas Gerais	Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM	30 % e 50 % da $Q_{7,10}$
Tocantins	Instituto Natureza do Tocantins - NATURATINS	75 % da Q_{90}
Mato Grosso	Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SEMA	70 % da Q_{95}
Mato Grosso do Sul	Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul - IMASUL	70 % da Q_{95}
Maranhão	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais - SEMA	80 % da Q_{90}
Bahia	Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos - INEMA	80 % da Q_{90}
Piauí	Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Piauí - SEMAR	80 % da Q_{95}
São Paulo	Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE	50 % da $Q_{7,10}$
Paraná	Instituto Água e Terra - IAT	50 % da Q_{95}
Brasil	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA	70 % da Q_{95}

* Q_{mmm} - média das mínimas mensais.

Fonte: Adaptado de FERREIRA (2023).

A solicitação da outorga é necessária em situações em que a intervenção pleiteada altera o regime ou os parâmetros qualitativos e/ou quantitativos do corpo de água. A regularização deve antecipar o início do uso, caso contrário, estará sujeita às penalidades previstas em lei (IGAM, 2023b). É importante esclarecer que esta ferramenta é um direito passível de suspensão em casos de violação de algum dos termos que a regem e, em outras situações previstas na legislação, como em casos de escassez hídrica.

A estruturação de ações para gestão e combate das principais adversidades relacionadas com recursos hídricos na bacia do rio Doce veio com a elaboração do Plano Integrado de

Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Doce – PIRH – em 2010, elaborado pelas empresas Ecoplan Engenharia e LUME Estratégia Ambiental. O relatório contempla um estudo das seis (06) UPGRH's localizadas no estado de Minas Gerais e outras três (03) sub-bacias situadas no Espírito Santo, sendo dividido em três volumes: Diagnóstico e Prognóstico da Bacia (Volume I), Metas e Programas de Ação (Volume II) e Diretrizes para a Gestão da Bacia (Volume III). Em seu diagnóstico, para as estimativas referentes à disponibilidade hídrica, as demandas são calculadas baseadas em dados secundários e de órgãos gestores, atentando aos usos consuntivos e não consuntivos. Assim, associaram-se as disponibilidades hídricas às vazões características do regime dos cursos d'água Q_{MLT} (média de longo termo), Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ (ECOPLAN-LUME, 2010). Após rompimento da barragem de Fundão, em 2015, e alteração do cenário levantado no PIRH vigente, os estudos foram revisados e atualizados entre 2021 e 2023, sendo aprovados em agosto de 2023 (CBH-Doce, 2024). O novo estudo, elaborado pela Engecorps Engenharia traz produtos como Consolidação do Estado da Arte sobre a Situação e Gestão de Recursos Hídricos na Bacia, Prognóstico e Alternativas de Enquadramento, Plano de Ações, Propostas de Enquadramento dos Corpos de Água, Atualização do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do rio Doce, e outros mais;

No estudo de 2010, como conclusão geral para a bacia do rio Santo Antônio, tem-se a informação de que trata-se da UPGRH com a maior disponibilidade hídrica e aquela que representa cerca de 19 % dos recursos hídricos da bacia do rio Doce (ECOPLAN-LUME, 2010). Talvez essa afirmativa seja resultado de sua posição como 3ª maior área de drenagem dentro da bacia do rio Doce (ENGENHARIA, 2023).

Em paralelo ao desenvolvimento dos estudos de Plano Integrado, aprovaram-se as propostas de Enquadramento dos corpos de água da bacia do rio Doce, tema de importante relevância quando se discute sobre disponibilidade hídrica. Para o tema, torna-se essencial considerar informações a respeito de qualidade da água, uma vez que constitui fator determinante para utilização de diversos usos (ANA, 2021), assim como a evolução das demandas.

Esse tópico é trazido por Leão, Paz e Cibim (2016), quando cita a importância do setor de saneamento no contexto da escassez hídrica. Segundo o estudo da Engecorps Engenharia (2023), a avaliação quanti-qualitativa dos mananciais da bacia do rio Santo Antônio tem como resultado áreas classificadas com vulnerabilidade qualitativa, quantitativa e ainda quanti-qualitativa. O mesmo estudo analisa a cobertura dos serviços de esgotamento sanitário na bacia do rio Doce, baseado no Atlas Esgotos – Despoeira de Bacias Hidrográficas da ANA, no Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB), em consultas aos municípios e nos dados

da Agência Reguladora de Serviços de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário do Estado de Minas Gerais (ARSAE-MG). Como resultado, é citado que, historicamente, a bacia do rio Doce possui um baixo índice de cobertura na coleta e tratamento de esgotos, o que significa que apenas 42 dos 211 municípios com sede na bacia possui, ao menos, 30 % dos efluentes tratados quando confrontado ao esgoto coletado (ENGECORPS ENGENHARIA, 2023).

A evolução da demanda, por sua vez, é colocada no estudo como fator crescente ao longo dos anos, com destaque no consumo de água na irrigação, abastecimento humano e indústria (ANA, 2021). Na bacia do Rio Doce, segundo o Relatório Pleno de Conjuntura de Recursos Hídricos do Brasil (ANA, 2021), esses grandes setores consumidores representaram um consumo, em 2020, de 34.133 m³/s, 7.101 m³/s e 4.696 m³/s, respectivamente. O mesmo estudo traz uma projeção para o consumo no ano de 2040, com aumento de 57,74 % (nova demanda de 53.842 m³/s), 10,80 % (nova demanda de 7.868 m³/s) e 35,48 % (nova demanda de 6.362 m³/s).

Para uma gestão eficiente, além do conhecimento da quantidade e qualidade atuais do recurso e da estimativa da projeção do consumo, torna-se fundamental estudos sobre as potenciais interferências que as mudanças no clima podem trazer para o regime hidrológico. O atual PIRH da bacia do Rio Doce vem sendo revisado e atualizado com estudos direcionados para a construção de cenários futuros de curto (2027), médio (2032) e longo prazo (2042), além de conteúdo para embasar propostas de enquadramento das águas em classes de usos predominantes mais restritivos. Assim, em 2022, o Produto Parcial 04 - Prognóstico e Alternativas de Enquadramento - trouxe considerações importantes a partir da inclusão de estudos de projeção de clima, analisando as alterações dos padrões de temperatura e precipitação (ENGECORPS ENGENHARIA, 2022a).

Para o estudo em questão, a base de dados utilizada para as projeções do clima futuro foi aquela do projeto NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEXGDDP), resultante de um *downscaling* estatístico derivados dos modelos climáticos globais (GCM), no contexto do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5). Assim, aplicaram-se dados de projeções de precipitação de 20 GCM e dois cenários de emissão e gases de efeito estufa, *Representative Concentration Pathways* (RCP), mais brando (RCP4.5) e mais severo (RCP8.5). Já para as análises de variação de temperatura os dados foram provenientes do portal *WorldClim* para 18 GCM e os mesmo dois cenários de emissões citados.

Há indicações de períodos de seca mais prolongadas, eventos mais extremos de precipitação e alteração de sua distribuição com concentração no período chuvoso e tendência

de contração da precipitação média anual. As temperaturas mínimas e máximas tendem ao aumento, como resultado tem-se temperaturas médias mais elevadas. Vale destacar que muitas das consequências das alterações do clima são pouco evidentes, como os reflexos na qualidade das águas. Um cenário de chuvas mais intensas e persistentes pode resultar na intensificação dos processos de carreamento de sedimentos, nutrientes e agrotóxicos, contribuindo para a poluição difusa (ENGECORPS ENGENHARIA, 2022a).

As consequências da efetivação da nova climatologia é o aumento das demandas hídricas, uma vez que alterações nos hábitos dos setores usuários de abastecimento humano, dessedentação animal e irrigação é inevitável. Essa evolução das demandas se dará, em parte, como reflexo do aumento das temperaturas, podendo-se citar, por exemplo, a pressão causada pelo calor, aumento do consumo hídrico para dessedentação e cuidado animal, diminuição da produção, fatores que certamente irão refletir no setor econômico. Vale ressaltar que este é um tema que necessita de melhor entendimento para que seja possível desenvolver metodologias que reproduzam e definam esse potencial. Na agricultura, a maior evapotranspiração resultará em maior consumo de água, com uma potencial necessidade de investimentos na irrigação uma vez que, com a diminuição da precipitação e alteração de seu regime, demandarão adaptações (ENGECORPS ENGENHARIA, 2022a).

Ainda que com as incertezas quanto às projeções, assegurar o equilíbrio hídrico, preservação e uso racional torna-se fundamental investigar as consequências e riscos à disponibilidade hídrica a partir de simulações de balanço hídrico sob alterações climáticas, ponderando assim os valores de referência de vazões mínimas, base para o planejamento e determinação das outorgas (ENGECORPS ENGENHARIA, 2022a).

3.2 Projeções de mudanças climáticas

Criado em 1988 pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (ONU Meio Ambiente) e pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) foi elaborado para fornecer avaliações regulares sobre a mudança do clima, suas implicações e possíveis riscos futuros, bem como para propor opções de adaptação e mitigação, com temas específicos acordadas entre os países membros, entre eles o Brasil. Os produtos são gerados a partir de três Grupos de Trabalho (GT) e uma Força-Tarefa sobre Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa (TFI). O Grupo I, intitulado como Base Científica, é composto por cientistas de todo o mundo que se baseiam em observações, estudos, teoria e modelagens contribuindo para aprimoramento dos dados dos relatórios. Grupo II, Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade. Grupo III, de Mitigação da Mudança do Clima, atua

na avaliação de metodologias e planos para atenuar os possíveis danos, fornecendo informações importantes para reestruturação de políticas e estratégias para enfrentamento das mudanças climáticas, reduzindo seus impactos. Por fim, a Força-Tarefa desenvolve e aperfeiçoa a metodologia e *software* para cálculo, relatório e remoção das emissões, além de estimular a aplicação desta tecnologia pelos países associados (IPCC, 2023). Ao longo desses anos, muitos foram os produtos publicados, como pode ser observado no Quadro 3.2.

Na Quadro 3.2 apresenta-se o histórico de relatórios publicados pelo IPCC.

Quadro 3.2 – Relatórios IPCC.

Ciclo de Avaliação	Produtos	Publicações
Primeiro Ciclo de Avaliação (AR1)	Estratégias de Resposta	out/90
	Avaliação de Impactos da Mudança do Clima	jun/90
	Avaliação Científicas da Mudança do Clima	jun/90
	Síntese	mar/90
Segundo Ciclo de Avaliação (AR2)	Relatório Completo da Segunda Avaliação	jun/96
	Relatório de Síntese	out/95
	Dimensões Sociais e Econômicas da Mudança do Clima	jul/95
	Impactos, Adaptações e Mitigação da Mudança do Clima: Análises Técnico-Científicas	jul/95
	A Ciência da Mudança do Clima	fev/95
	Diretrizes Revisadas para Inventários de GEE	mai/96
	Forçante Radioativa da Mudança do Clima	mar/94
	Diretrizes Técnicas para Avaliação dos Impactos da Mudança do Clima e Adaptações	mar/94
	Relatório Suplementar da Avaliação Científica	jun/92
	Relatório Suplementar da Avaliação dos Impactos Avaliações de 1990 e de 1992	jun/92 abr/92
Terceiro Ciclo de Avaliação (TAR)	Relatório de Síntese	out/01
	Mitigação	jul/01
	Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade	mai/01
	A Base Científica	jan/01
	Questões Metodológicas e Tecnológicas da Transferência de Tecnologia	mar/00
	Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Silvicultura	mar/00
	Cenários de Emissões	mar/00
Quarto Ciclo de Avaliação (AR4):	Aviação e a Atmosfera Global	mar/99
	Impactos Regionais da Mudança do Clima: Uma Avaliação da Vulnerabilidade	mar/97
	Relatório de Síntese	set/07
Quarto Ciclo de Avaliação (AR4):	Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade	jul/07
	A Base da Ciência Física	jun/07
	Mitigação da Mudança do Clima	jun/07
	Diretrizes para Inventários de GEE	mai/06
		mar/05

Ciclo de Avaliação	Produtos	Publicações
	Salvaguardando a camada de ozônio e o sistema climático global	
	Captura e Armazenamento de Dióxido de Carbono	mar/05
Quinto Ciclo de Avaliação (AR5)	Mudança do Clima	out/14
	Mitigação da Mudança do Clima	abr/14
	Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade	mar/14
	A Base da Ciência Física	set/13
	Gerenciando os riscos de eventos extremos e desastres para promover a adaptação à mudança do clima	mar/12
	Fontes Renováveis de Energia e Mitigação da Mudança do Clima	abr/11
Sexto Ciclo de Avaliação (AR6)	Relatório de Síntese	jun/22
	Mitigação da Mudança do Clima	jul/21
	A Base da Ciência Física	abr/21
Relatórios Especiais	Refinamento das Diretrizes 2006 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa	mai/19
	Relatório de Metodologia sobre forçantes Climáticas de Vida-Curta das Reuniões de Especialistas AFOLU & Setores de Resíduos	- dez/20
	Aquecimento global de 1,5°C	out/18
	Mudança do clima e terra	ago/19
	O Oceano e a criosfera em um clima em Mudança	set/19

Fonte: Adaptado BARBOSA (2024).

Com a divulgação do sexto relatório de avaliação do Grupo de Trabalho I (IPCC AR6) o entendimento sobre o aquecimento histórico e do comportamento do clima às emissões ganhou importantes progressos. No trabalho de Zhou (2021), o autor lista oito (08) tópicos sobre as principais descobertas em relação ao IPCC-AR5, podendo-se citar:

- A estimativa do aquecimento histórico global, a partir de aperfeiçoamentos na leitura dos dados históricos de temperatura, que tiveram início em 1850, retificou o aquecimento para o período de referência AR5 1986-2005, concluindo que no AR6 é maior em 0,08 [-0,01 a 0,12] °C se comparado ao AR5. O período de 2011 à 2022 foi cerca de 1,09 [0,95 a 1,20] °C mais quente quando comparado ao período de 1850 à 1900;
- Com mais estudos de detecção e análise, dispõem-se de maiores evidência que sustentam a interferência das emissões das atividades humanas no aumento da frequência de eventos extremos. As pesquisas de atribuição têm revelado que as emissões de gases de efeito estufa originárias das atividades humanas são responsáveis por um acréscimo de aproximadamente 1,07°C no aquecimento entre 1850-1900 e 2010-2019. Na Figura 3.1 segundo IPCC, 2021, pode-se observar o cenário citado;

Human influence has warmed the climate at a rate that is unprecedented in at least the last 2000 years

Changes in global surface temperature relative to 1850–1900

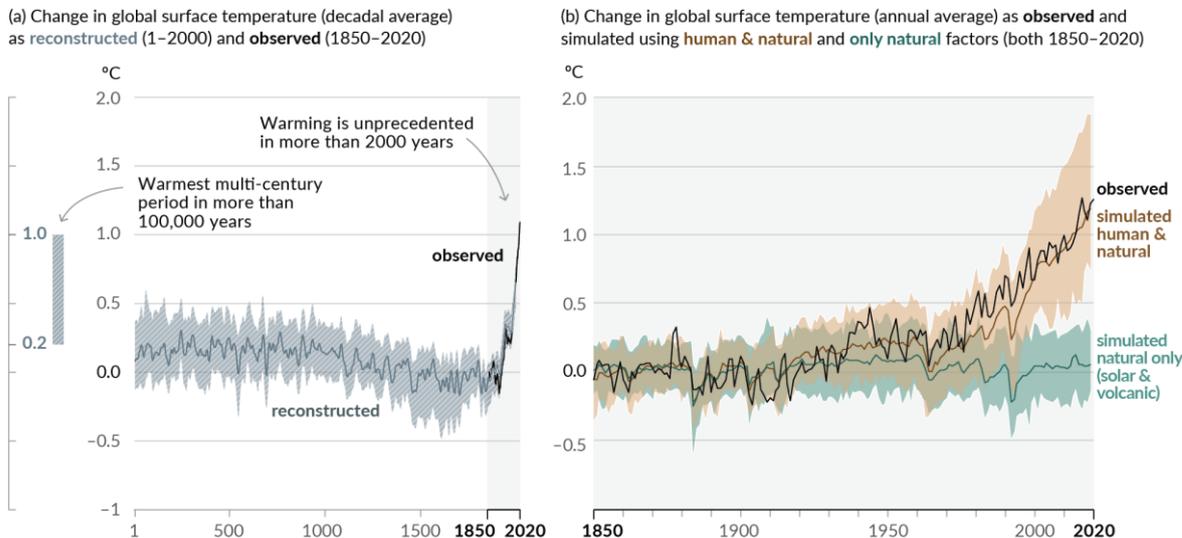


Figura 3.1 – Variação das temperaturas ao longo do tempo e fatores por trás do aumento térmico recente.
Fonte: IPCC (2021).

- Uma abordagem mais aprimorada para avaliar transformações na temperatura global da superfície terrestre, no aquecimento dos oceanos e no aumento do nível do mar é adotada. O resultado são projeções de maior precisão, a partir da fusão de diversas linhas de evidência, um desenvolvimento inédito e encorajado desde o AR5. Porém destaca a necessidade de maior confiança nas simulações e sugere o desenvolvimento de novos métodos combinados de projeções multimodelos para que forneça melhor resolução do que aqueles do Coupled Model Intercomparison Project (CMIP);
- Uma vez que vários pesquisadores desenvolvem modelos no mundo, houve uma padronização de dados e informações, buscando uma execução comum dos modelos, facilitando a comparação e análise dos ESM. Assim os ESM CMIP6 são a base para as projeções, com armazenamento e acesso aos resultados com gerenciamento do Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI) e pela Earth System Grid Federation (ESGF) (SCHOEMAN et al., 2023);
- Uma nova estimativa de sensibilidade climática (ECS), que mensura o aquecimento de longo prazo devido à duplicação da concentração de CO₂ na atmosfera em relação aos níveis pré-industriais, trouxe significativa redução na incerteza. O relatório atual indica que é provável que a ECS varie entre 2,5 °C e 4 °C, com uma estimativa central de 3 °C, mais precisa que a estimativa anterior que variava entre 1,5 °C e 4,5 °C. Em paralelo,

a resposta climática transitória às emissões acumuladas de CO₂ (TCRE), que mede a mudança temporária da temperatura média global da superfície por unidade de emissões acumuladas de CO₂, agora é estimada entre 1,0 °C e 2,3 °C, com um valor central de 1,65 °C, faixa mais estreita que a estimativa do AR5, definida como 0,8 °C a 2,5 °C. Destaca que, ainda o novo intervalo de incerteza seja importante, reduções mais significativas são essenciais uma vez que resultarão no desenvolvimento de estratégias mais concretas para restringir o aumento da temperatura global;

- Uma nova abordagem é introduzida para conectar a ciência do clima com ações práticas. Os chamados Fatores de Impacto Climático (CIDs) auxiliam na interpretação e na relevância das mudanças climáticas para a sociedade, sendo um elo fundamental entre a ciência climática (GT I) e as atividades de adaptação (GT II);
- De maneira inédita o relatório do IPCC traz considerações de eventos de alto impacto, mas de baixa probabilidade (LLHI) em cenários climáticos futuros, ajudando na compreensão dos riscos climáticos a partir da análise de resultados pouco prováveis;
- Uma nova projeção climática, alinhada com as metas de emissões líquidas zero CO₂, estabelecidas para 2050, norteará os formuladores de política dos países para que seja possível cumprir suas promessas de redução; e
- Com uma nova abordagem para estimativa de elevação da temperatura o AR6 projeta um aquecimento global médio de longo prazo (20 anos) 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais (1850-1900), em detrimento às conclusões do Relatório Especial sobre 1,5 °C de aquecimento (SR1.5) que estimou que esse valor seria superado entre 2030 e 2052.

Por fim, o autor destaca a importância de mais estudos para uma melhor compreensão e pesquisa dessas mudanças, sobretudo com investimentos em áreas onde os monitoramentos são escassos, citando o planalto tibetano, áreas áridas e semiáridas (ZHOU, 2021).

Um modelo climático é uma representação numérica dos processos físicos, químicos e até biológicos, que ocorrem na atmosfera, oceanos, terra e criosfera, embasando o entendimento do funcionamento do clima. Com eles é possível simular as mudanças climáticas passadas e futuras, considerando uma variedade de cenário de desenvolvimento humano e de emissões de gases de efeito estufa (SCHOEMAN *et al.*, 2023).

Na última década o número de produtos de estudos climatológicos tem se expandido, com destaque para aqueles desenvolvidos nas ciências da Terra e da vida, com foco em discussões voltadas para as variáveis hidrometeorológicas. Fica evidente a apreensão em como

a precipitação e temperatura, quando combinadas com outras variáveis, podem influenciar no modo de vida, sobretudo no que diz respeito à produção de alimentos, distribuição da biodiversidade, saúde humana e eventos meteorológicos extremos (SCHOEMAN *et al.*, 2023).

As narrativas climáticas retratam cenários plausíveis de transformações futuras na população, composição demográfica e padrões de consumo energético. No contexto do CMIP5, esses cenários foram formulados como *Representative Concentration Pathways* (RCP), as quais delineiam percursos de emissões de gases de efeito estufa (compensadas por outras emissões) que culminam em níveis predefinidos de força radiativa até o ano 2100. Assim, cada RCP oferece conjuntos de informações com distribuição espacial sobre transformações no uso da terra e emissões setoriais de substâncias poluentes no ar, como descrito no Quadro 3.3 .

Quadro 3.3 – Descrição dos RCP's do CMIP5.

Cenário	Descrição
RCP 2.6	É um cenário desenvolvido pela equipe de modelagem IMAGE da PBL (Netherlands Environmental Assessment Agency). Este caminho de emissão é representativo de cenários da literatura que levam a níveis de concentração de gases estufa muito baixos. Este é um cenário mais otimista de “pico-declino”. Seu nível de 2 forçamento radiativo primeiro atinge um valor de cerca de 3,1 W/m ² até meados do século, e retorna para 2,6 W/m ² até 2100. Para alcançar tais níveis de forçamento radiativo, as emissões de gases de estufa (e indiretamente emissões de poluentes atmosféricos) são substancialmente reduzidas, ao longo do tempo.
RCP 4.5	É um cenário de estabilização em que a força radiativa total é estabilizada pouco depois de 2100, sem ultrapassar o nível alto do longo termo do forçamento radiativo (Clarke <i>et al.</i> 2007; Smith e Wigley 2006; Wise <i>et al.</i> 2009). Foi desenvolvido pela equipe de modelagem do JGCRI (Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research Institute) dos EUA.
RCP 6.0	É um cenário desenvolvido pelo time de modelagem AIM do NIES (National Institute for Environmental Studies) do Japão. É um cenário de estabilização em que a força radiativa total é estabilizada pouco depois de 2100 através da aplicação de uma série de tecnologias e estratégias para reduzir as emissões de GGE.
RCP 8.5	Este RCP é um cenário pessimista e é caracterizada pelo aumento das emissões de gases estufa ao longo do tempo representando cenários da literatura que levam a altos níveis de concentrações de GGE. Foi desenvolvido usando o modelo MESSAGE e pelo quadro de avaliação integrada do IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) da Áustria.

Fonte: WAGNER R. SOARES (2023).

Quanto à utilização dos cenários, segundo Schoeman *et al.* (2023), o mais recomendado é que se utilize um cenário extremo e aqueles que refletem a política atual (RCP 4.5 – estabilização de médias emissões de GEE) e/ou um cenário futuro com aumento de 2 °C (RCP 2.6 – baixas emissões). Porém, na prática, vê-se que em muitos dos estudos empregam-se o cenário extremo RCP 8.5 (Altas emissões), isoladamente. Para o novo relatório do IPCC, CMIP6, publicado em 2022, mantêm-se os cenários RCP's, que são combinados aos cenários que contemplam sequestro de carbono, os SSP (*Shared Socio-Economic Pathways*), representando transformações compartilhadas das trajetórias socioeconômicas. Desta forma são inseridos cinco (05) SSP's (1 ao 5) com variações quanto ao consumo de materiais, consumo e

fontes de energia e desenvolvimento econômico, descritos conforme informações do Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Descrição dos SSP's do CMIP6.

Cenário	Descrição	Aquecimento em relação ao pré-industrial (intervalo de confiança de 90 %)
SSP1-1.9	Net zero CO ₂ emissões alcançadas até meados do século; evita ultrapassar 1,5°C de aquecimento em linha com a ambição do Acordo de Paris	Estabiliza em 1,4°C (1,0–1,8°C) com ultrapassagem mínima além de 1,5°C
SSP1-2.6	Net zero CO ₂ emissões alcançadas no final deste século; atinge as metas do Acordo de Paris ao evitar 2°C de aquecimento	Estabiliza a 1,8°C (1,3–2,4°C)
SSP2-4.5	Aproxima a política climática atual embora isso mude com os compromissos em cada Conferência das Partes sucessivas	2,7°C (2,1–3,5°C) até 2100
SSP3-7.0	Aproxima-se de uma situação em que nenhuma nova política climática é implementada resultando em uma duplicação do CO ₂ até 2100	3,6°C (2,8–4,6°C) até 2100
SSP5-8.5	Um cenário contrafactual extremo sob o qual o CO ₂ as emissões duplicam até meados do século e aumentam a partir daí	4,4°C (3,3–5,7°C) até 2100

Fonte: SCHOEMAN *et al.* (2023).

O estudo com modelos vem simulando dados adquiridos há mais de 100 anos e uma das primeiras projeções analisaram-se as consequências do aumento de CO₂ na atmosfera, uma vez que o mesmo promove a retenção de calor, sugerindo que uma duplicação do CO₂ atmosférico resultaria em aumento de temperatura entre 5 e 6 °C. Apenas com a invenção dos computadores digitais é que equações mais complexas de escala global puderam ser inseridas, possibilitando a evolução para os modelos atuais (SCHOEMAN *et al.*, 2023). Com a inclusão de mais processos nos modelos climáticos, como os químicos e biológicos, os até então *Coupled Atmosphere–Ocean General Circulation Models* (AOGCM ou GCM), passaram a ser designados por *Earth System Models* (ESMs). A integração da dinâmica da vegetação terrestre trouxe informações importantes aos pesquisadores e gestores de políticas públicas sobre as potenciais ameaças ligadas às alterações na utilização do solo, uma vez que a vegetação é um dos principais determinantes das alterações climáticas futuras. Mesmo com incertezas associadas, é sabido sobre a relevância da absorção de carbono pela vegetação e solo, portanto, uma vez que o clima e ações humanas são determinantes na distribuição geográfica da vegetação, associa-se que irão afetar o armazenamento de carbono terrestre e o ciclo hidrológicos (ARGLES; MOORE; COX, 2022). Assim, os ESM's reproduzem o oceano e seus processos biogeoquímicos, o gelo marinho, a atmosfera, a superfície terrestre, a vegetação, incluindo ainda as resultantes dos gases de efeito estufa, ozônio, aerossóis antropogênicos e vulcânicos (SCHOEMAN *et al.*, 2023).

No estudo de Schoeman *et al.* (2023), as imprecisões quanto à representação dos processos (estruturas), adoção dos cenários de emissões dos GEE e variação na simulação climática são as três (03) incertezas citadas quando da utilização dos ESM. Destaca que tornar as projeções mais realistas, geralmente, envolve a utilização de multimodelos, no intuito de abarcar as diferentes projeções de um conjunto diverso de ESM's. A pesquisa realizada demonstra que, quanto ao número e tipo de modelos utilizados, há destaque para o *Community Ecosystem Model* (CESM), efetivo para estudos de atribuição de impactos, mas análises com conjuntos de multimodelos, também foram notadas, mesmo que em menor escala. Porém, existem inúmeros modelos e, alguns desses Modelos Climáticos Globais presentes na literatura, juntamente com os métodos de *downscaling*, são apresentados no Quadro 3.5.

Para simulações em áreas da América do Sul, América Central e o Caribe pode-se fazer uso do modelo regional Eta, disponibilizados via PROJETA, utilizando-se de cenários de concentração dos GEE RCP4.5 e RDP8.5, otimista e pessimista, respectivamente. O PROJETA é resultado da automatização do processo de extração dos dados das projeções climáticas regionalizadas para o Brasil, pelo CPTEC/INPE, disponibilizando projeções de mudança do clima para a América do Sul regionalizadas pelo Modelo regional Eta. Com ele é possível acessar, de forma integral, os parâmetros climáticos disponíveis, possibilitando aos usuários acesso aos dados das projeções que se integram às plataformas de análise. Importante ressaltar que o modelo climático regional Eta possui configuração na resolução de 20 km nas áreas citadas, mas embora em menor extensão, função da demanda computacional, há áreas com cobertura na resolução de 5km. Essa redução de escala (*downscaling*) foi possível a partir da utilização de modelos globais como HadGEM2-ES, MIROC5, CanESM2 e BESM (CPTEC-INPE, 2024).

Quadro 3.5 – GCMs e métodos de *downscaling* na literatura.

Autor	Modelos de circulação global	Métodos de <i>downscaling</i>		País
		Dinâmico	Estatístico	
(2013)	CCSM, GFDL, PCM, CGCM, MPI, MIROC	RCM: RCM-CGCM, CRCM-CGCM, CRCM-CCSM, WRFG-CCSM, RCM-GFDL	<i>Downscaling</i> estatístico e correção de viés (SDBC)	EUA
(2017)	-	RCM: Eta-HagGEM2-ES, Eta-MIROC5	-	Brasil
(2018)	BCC-CSM 1.1, BCC-CSM 1.1M, CSIRO-Mk3.6.0, FIO-ESM, GFDL-CM3, GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, GISS-E2-H, GISS-E2-R, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MIROC5, MRI-CGCM3, NorESM1-M	-	MarkSim DSSAT (gerador meteorológico de 1º nível - modelo Markov), CLIGEN (gerador meteorológico de 2º nível - componente WEPP)	Brasil
Chen, Brissete e Leconte (2011)	CGCM	RCM: CRCM	CRCM sem correção de viés, CRCM com correção de viés (Local Intensity Scaling Method), Fator de mudança, Gerador de clima (CLIGEN), Modelo estatístico de <i>downscaling</i> (SDSM), Análise discriminante com regressão step-wise (DASR)	Canadá
Chen, Xu e Guo (2012)	CGCM3 SRES A2, HadCM2 SRES A2	-	Máquina de vetor de suporte suave (SSVM), modelo de <i>downscaling</i> estatístico (SDSM)	China
(2013)	CCSM, CGCM3, GFDL	RCM: CRCM, RCM3	<i>Downscaling</i> empírico: Escala constante (CS), escala diária (DS), tradução diária (DT), escala de intensidade local (LOCI), correção de viés diário (DBC), mapeamento de quantis (QM)	Canadá
(2014)	HadGEM2-ES, BESM, MIROC5	RCM: Eta 20km	-	Brasil
(2014b)	HadGEM2-ES, MIROC5	RCM: Eta 20km	-	Brasil
Cornelissen, Diekkruiger & Giertz (2013)	-	RCM: REMO	<i>Downscaling</i> físico	Benim

Autor	Modelos de circulação global	Métodos de <i>downscaling</i>		País
		Dinâmico	Estatístico	
(2011)	CSIRO Mk3.5, GFDL 2.0, GFDL 2.1, MIROC 3.2 medres, MPI-ECHAM5	CCAM + abordagem de escalonamento diário	Abordagem de escala diária, <i>downscaling</i> estocástico (Modelo de Markov Oculto Não Homogêneo).	Austrália
(2012)	ECHAM5 ERA-40	-	-	Global/Europa
(2011)	CSIRO Mk3.5, CCAM, GFDL-CM2.0, MRI-CGM2.3.2a	CCAM	Método de escalonamento (método de escalonamento diário constante, método de escalonamento diário, método delta ou mapeamento quantil-quantil), método analógico, GLIMCLIM (modelo linear generalizado para clima diário, NHMM (Modelo de Markov oculto não homogêneo), MMM-KDE (modelo de Markov modificado e estimativa de densidade de probabilidade do kernel)	Austrália
(2019)	BCC-CSM 1.1, BCC-CSM 1.1M, CSIRO-Mk3.6.0, FIO-ESM, GFDL-CM3, GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, GISS-E2-H, GISS-E2-R, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MIROC5, MRI-CGCM3, NorESM1-M	-	MarkSim GCM (modelo Markov)	Brasil
Guo & Wang (2016)	MIROC3.2, MIROC4h	WRF-ARW	-	China
(2012)	CGCM3 com reanálise do NCEP-NCAR	-	Regressão passo a passo (SWR), operador de seleção e encolhimento mínimo absoluto (LASSO)	Canadá
Hwang e Graham (2013)	BCCR-BCM2.0, GFDL-CM2.0, CGCM3.1, CCSM3	-	Método analógico estocástico e de correção de vieses (BCSA), correção de viés e desagregação espacial (BCSD), desagregação espacial e correção de viés (SDBC), correção de viés e analógico construído (BCCA)	EUA
(2014)	CSIRO, CCCma, BCC, LASG, CNRM, IPSL, MPI-M, MIUB, M&D, INGV, MRI, NIES, METRI, BCCR, INM, UKMO, GFDL, GISS, NCAR	-	Gerador meteorológico da Estação de Pesquisa de Asthon Longa (LARS-WG)	Bangladesh

Autor	Modelos de circulação global	Métodos de <i>downscaling</i>		País
		Dinâmico	Estatístico	
Li & Jin (2017)	CanESM2, CSIRO-Mk3.6.0, GFDL-CM3, HadGEM2-ES e MPI-ESM-LR	-	Método de mapeamento de quantis paramétricos, gerador meteorológico de local único (SSWG, gerador meteorológico tipo Richardson, cadeia de Markov)	China
(2018)	CESM1_BGC, GFDL_CM3	-	-	Brasil
(2018)	-	RCM: HadGEM3-RA	Correção de Viés Diário (DBC), Tradução Diária (DT), Mapeamento de Distribuição (DM), Mapeamento Empírico de Quantis (EQM), Escala de Intensidade Local (LOCI), Escala Linear (LS) e Transformação de Potência (PT)	China
(2018)	HagGEM2-ES	RCM: Eta 5km	-	Brasil
(2019)	CCCMA-CGCM3.1, CNRM-CM3, GFDL-CM2.0, MRI-CGCM2.3.2	-	Dimensionamento Linear	Etiópia
Ramirez-Villegas e Jarvis (2010)	BCCR-BCM2.0, CCCMA-CGCM3.1, CCCMA-GCM3.1, CNRM-CM3, CSIRO-Mk3.0, CSIRO-Mk3.5, GFDL-CM2.0, GFDL-CM2.1, GISS-AOM, GISS-MODEL-EH, GOSS-MODEL-ER, IAP-FGOALS1.0, INGV-ECHAM4, INM-CM3.0, IPSL-CM4, MIROC3.2-HIRES, MIROC3.2-MEDRES, MIUB-ECHO-G, MPI-ECHAM5, MRI-CGCM2.3.2A, NCAR-CCSM3.0, NCAR-PCM1, UKMO-HadCM3, UKMO-HadGEM1	-	Método Delta	América do Sul
Samadi, Sagarwar & Tajique (2010)	CGCM1, CGCM2, CGCM3, HadCM2, HadCM3, ECHAM4, CCSR/NIES, CSIROmk2b, GFDL-R15, GFDL-R30, NCAR PCM	-	-	Irã

Autor	Modelos de circulação global	Métodos de <i>downscaling</i>		País
		Dinâmico	Estatístico	
(2016)	CCSM4, MRI-CGCM3, CSIRO-Mk3.6.0, MIROC5 e NorESM1-M.	-	Método de correspondência de quantis equidistantes	Índia
(2017)	-	RCM: CNRM, DMI, DMI-BCM, DMI-ECHAM5, ICTP, KNMI, HC, MPI, SMHI, SMHI-BCM	MOS-Correção de viés de mapeamento analógico e quantílico	Espanha
Wagesho, Jain e Goel (2013)	BCCR-BCM2.0, CSIRO-Mk3.0	-	Métodos lineares e de transformação de potência	Etiópia
(2012)	BCM2.0, CGCM3.1, CDCM2.3.2, CSIRO-Mk3.0, ECHAM5. ECO-G, GFDL-CM 2.1, GISS-ER, IPSL-CM4, MIROC3.2, CCSM3, HadGEM2	-	-	Global

Fonte: Adaptado MACEDO (2022).

Ainda que apropriados para utilização nas escalas globais e regionais, a análise dos resultados deve ser realizada com ponderação, uma vez que reproduzir complexos sistemas e suas interatividades traz, como esperado, incertezas e divergências quando comparados (VIRGÍLIO, 2018). Na prática, há ainda necessidade de aplicação em escalas locais, exigindo correções de viés. Para refinar a escala, duas abordagens são citadas por Schoeman *et al.* (2023). A Interpolação, onde estima-se os valores de escala a partir de pontos existentes no modelo original e o *Downscaling*, dita mais elaborada que a primeira, sendo capaz de representar processos de pequena escala, como a interferência física de uma montanha na distribuição pluviométrica, por exemplo. Para derivações dos ESM's em escalas mais finas por *Downscaling*, há duas abordagens: a estatística, que considera conexões estatísticas entre a variável de interesse e os padrões de alcance regional, sendo essa relação tomada como estática; e a dinâmica, onde as relações estatísticas não são consideradas e utiliza-se um modelo regional dentro de um global e condições de contorno a fim de orientar o funcionamento do modelo mais detalhado. Para orientação desse trabalho com os resultados de modelos climáticos, apresenta-se o fluxograma da Figura 3.2.

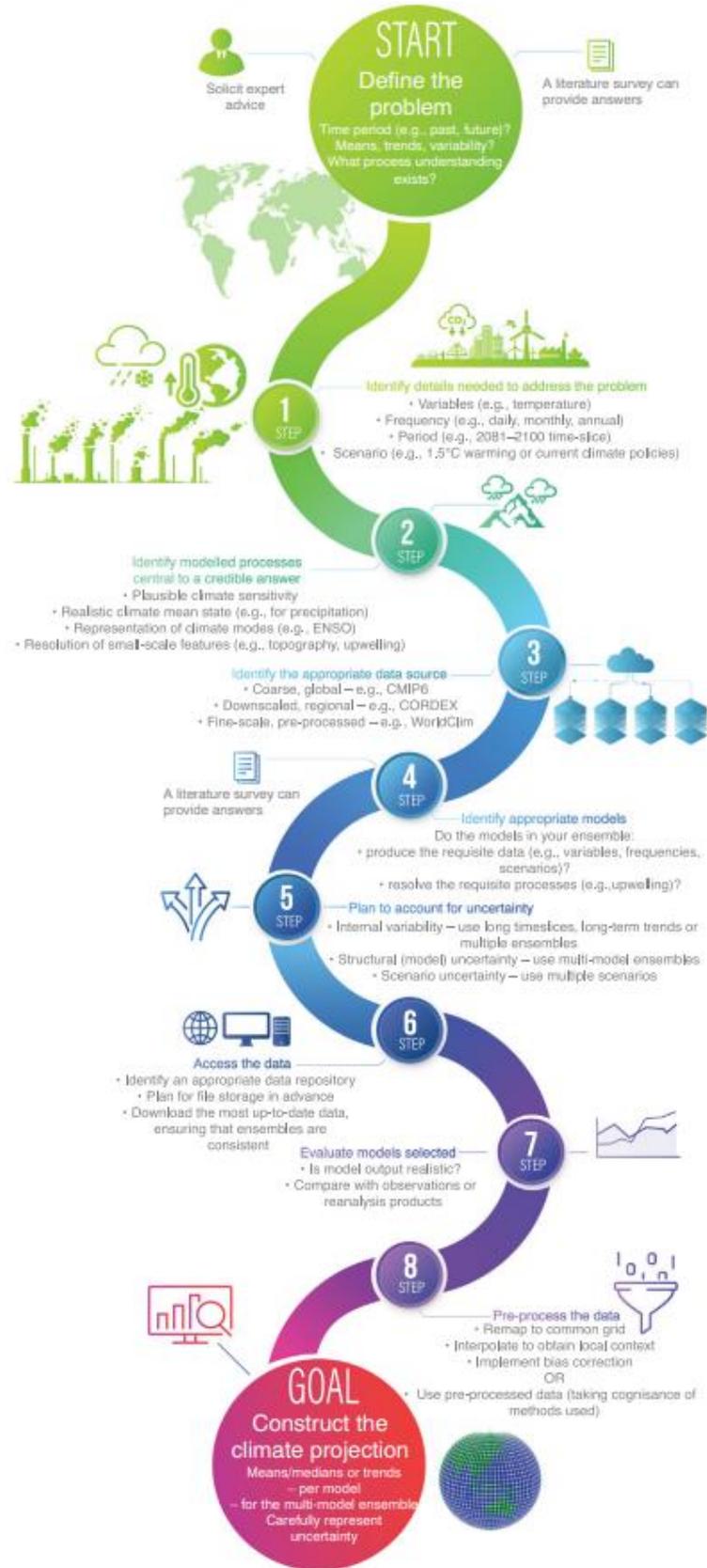


Figura 3.2 – Fluxograma de trabalho para utilização de modelos climáticos.
Fonte: SCHOEMAN *et al.* (2023).

3.3 Impactos de projeções das mudanças climáticas nos recursos hídricos

A frequência na ocorrência de eventos extremos nos últimos anos tem trazido reflexões sobre como as mudanças do clima têm alterado os regimes de chuva e evaporação. Os impactos nos diversos setores já são reais e seu estudo passa a ser um instrumento essencial de tomada de decisões (ANA, 2024c). Com o entendimento de que o caminho para garantir a segurança hídrica deve considerar estudos com os cenários de mudanças climáticas, a ANA traz um estudo com novas ferramentas, com intuito de motivar a resiliência do sistema de recursos hídricos, trazendo flexibilidade para operar de forma persistente frente aos diferentes futuros potenciais resultantes dos cenários (ANA, 2024c). Assim, é afirmativa que a avaliação dos impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos deve ser realizada aplicando cenários de clima futuros dos Modelos Climáticos Globais (GCM's ou Global Climate Models).

Comumente realiza-se uma melhoria na resolução espacial (*downscaling*) nas projeções climáticas dos GCM's. Assim o *downscaling* estatístico foi aplicado na bacia do rio Indu do Paquistão, para analisar os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos futuros no trabalho de Ali *et al.* (2019). Trata-se de uma região com poucos dados disponíveis, onde as características orográficas e complexos mecanismos de formação de chuva imputem limitações. Desta forma, a utilização da dinâmica atmosférica em larga escala tornou-se essencial para o emprego do método de *downscaling* com o objetivo de melhorar as simulações climáticas da bacia, com foco na Bacia do Alto Indu (UIB), mas a análise foi conduzida em seis sub-regiões do Paquistão. Modelaram-se ainda as temperaturas máximas e mínimas, uma vez que possuem relevante influência no balanço hídrico regional e equilíbrio das geleiras. Para as projeções utilizaram 14 Modelos de Circulação Geral (GCMs) do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5) sob os Caminhos de Concentração Representativa 4.5 (RCP4.5) e RCP8.5 foram reduzidos de escala e corrigidos de viés por três métodos de *downscaling*. O método de desagregação espacial e mapeamento de delta de quantil (SDQDM) foi utilizado para projeções futuras neste estudo. Como principais resultados pode-se citar: durante o século XXI, a bacia como um todo aquecerá de maneira não uniforme (em escalas espaço-temporais) sob ambos os RCPs. O aquecimento projetado é mais intenso sob o forçamento do RCP8.5 e durante 2071-2100, mas segue padrões complexos; no caso da temperatura, os resultados indicam um aumento projetado nas frequências e magnitudes dos extremos quentes, enquanto está diminuindo para extremos frios no século 21; no caso dos extremos de precipitação, a maioria das sub-regiões no Paquistão mostra um aumento maior na precipitação anual total e em eventos de precipitação intensa; Apesar do aumento na precipitação total, o número de dias

consecutivos secos (CDD) está aumentando, enquanto os dias consecutivos úmidos (CWD) estão diminuindo, o que pode levar a condições de seca.

A técnica de *Downscaling* Estatístico foi explorada por Costa *et al.* (2020) na análise do impacto das mudanças climáticas nos padrões de precipitação e temperaturas da região Nordeste do Brasil. Utilizaram-se os modelos climáticos globais ECHAN5-OM, HADGEM-2-ES, BCM2 e CNRM-CM3 e os cenários A1B e A2 de emissões futuras de gases de efeito estufa. Considera-se o cenário A1B realista, uma vez que descreve uma perspectiva de rápido desenvolvimento econômico, com a população alcançando o equilíbrio entre a utilização de combustíveis fósseis e alternativos. Por outro lado, o cenário A2 retrata um mundo mais diversificado, no qual o consumo de combustíveis fósseis continua predominante, acompanhado por altas taxas de crescimento populacional e um crescimento econômico menos acentuado. A capacidade dos modelos em reproduzir as condições climáticas atuais foi confirmada por meio da validação do período de referência de 1961 a 1990, com resultados altamente satisfatórios. As conclusões indicaram uma notável diminuição na quantidade de precipitação durante os respectivos períodos chuvosos nas sub-regiões do Nordeste, bem como o aumento pronunciado nas temperaturas máximas durante o primeiro semestre do ano. Além disso, há uma tendência de declínio das temperaturas máximas em amplas áreas do setor norte do Nordeste nos meses do segundo semestre, especialmente no cenário A2. Quanto às temperaturas mínimas, os resultados sugerem um aumento contínuo ao longo do ano, com um destaque para os meses de inverno.

Um estudo abordando *downscaling* foi desenvolvido por Zhang *et al.* (2022) na região árida da bacia do rio Amu Darya (ADRB) na Ásia Central, utilizando multimodelos e dois cenários do CMIP6. Nele, desenvolveu-se um novo método estatístico denominado SDBC-BMA, destinado a ajustar as variáveis climáticas em larga escala do CMIP6 para previsões de precipitação diária. O método integra diversos modelos do CMIP6, SDBC (*Stochastic Downscaling with Bayesian Model Averaging*) e BMA (*Bayesian Model Averaging*) em uma estrutura geral. O sistema de correção de dados (CDS) consiste em modelos de classificação, modelos de regressão e um modelo de correção de viés. O desenvolvimento do SDBC foi analisado e comparado com os métodos HSDM (*Historical Simulation Dynamical Downscaling*) e RSDM (*Reference Simulation Dynamical Downscaling*) e 15 estações na ADRB. Em seguida aplicado na bacia para análise das variações diárias de precipitação ao longo do século XXI. Neste contexto, foram considerados três GCMs distintos (ACCESS-CM2, CESM2-WACCM e CanESM5) e dois cenários de emissão (SSP245 e SSP585). Dentre as conclusões destacadas, citam-se: em comparação ao método RSDM, os modelos de

classificação demonstraram uma maior capacidade em reproduzir com precisão a distribuição de chuva e dias secos; o SDBC superou tanto o HSDM quanto o RSDM em métricas tradicionais e seis índices extremos; em comparação com o método SMA (*simple model average*), os vieses dos resultados obtidos com o SDBC-BMA (novo método estatístico desenvolvido) diminuíram em 49 % para extremos e 88 % para a média diária de precipitação; a maioria dos índices extremos tem projeções de aumento médio de 20 ± 21 % no cenário SSP245 e de 22 ± 24 % no cenário SSP585, sinalizando a ocorrência de eventos extremos mais frequentes no século XXI. De maneira geral, tanto a precipitação diária quanto os extremos climáticos tendem a aumentar na ADRB no futuro, reforçando a necessidade de adotar medidas adaptativas para enfrentar os desafios resultantes das mudanças climáticas.

Fica claro que o uso de modelos são essenciais para as projeções, mas é necessário trazer mais detalhamento e correção de vieses, utilizando técnicas para reduzir as saídas dos GCM's, de escalas mais grosseiras, para escalas mais refinadas, podendo, assim, retratar os sistemas. Compreender o comportamento dos modelos utilizando o *downscaling* foi o foco do estudo de Rettie *et al.* (2023) na região da Etiópia, uma vez que apresenta uma diversidade de regiões climáticas influenciadas por uma topografia complexa, sendo que a precipitação desempenha um papel crucial, especialmente no setor agrícola. O método foi validado usando um período de referência de 30 anos (1983-2012), enquanto para os estudos de caso sobre o clima projetado na década de 2050 (2036-2065), foi escolhido um período centrado nesse intervalo. Assim, baseado em 16 GCM's do CMIP6 usados para *downscaling*, e três SSP's (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5) para representação de cenários de desenvolvimento socioeconômico de médio prazo, rivalidade regional e desenvolvimento socioeconômico movido a combustíveis fósseis, respectivamente. A abordagem utilizada é a chamada correção de viés construída análogos com reordenação de mapeamento quantílico (BCCAQ) que demonstrou uma capacidade superior em representar eventos extremos. Para este estudo, foi identificado que o *downscaling* aplicado às regiões de topografia complexa obtém-se melhores resultados quanto à temperatura, o que resultou em uma redução dos erros na temperatura anual projetada, alcançando uma melhora de aproximadamente 51 % a 94 %.

O modelo Hidrológico de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (MGB-IPH) é um modelo criado no Brasil e já aplicado em várias regiões para estudos de previsões de vazão e simulação hidrológica, simulação de qualidade da água, estudos de impacto de mudanças climáticas, segundo descrito por Brito *et al.* (2021). Foi desenvolvido em função da ausência de registros e baixa densidade espacial da malha de dados hidrológicos, tendo como objetivo o cálculo da disponibilidade

hídrica, utilizando modelo chuva-vazão, possibilitando a modelagem com entrada de dados de chuva e variáveis meteorológicas e representação conceitual de demais variáveis e processos (UFRGS, 2021). Uma vez que é baseado em equações matemáticas seu ajuste se dá pela calibração das variáveis e análise da aderência entre os dados observados e resultantes do modelo. É importante ressaltar que os parâmetros utilizados podem ser de dois tipos: fixos e calibráveis, classificados a partir da relevância na influência dos resultados do modelo (VIRGÍLIO, 2018).

O modelo do Instituto de Pesquisas Hidrológicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (MGB-IPH) foi utilizado por Virgílio (2018) para projeção das vazões afluentes, sob condições de mudanças climáticas e análise da regularização de vazões, na Usina hidrelétrica (UHE) de Três Marias. O modelo atmosférico escolhido foi o ETA, alimentado pelos modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5 (AR5 IPCC), considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5. Com a análise do balanço hídrico do reservatório e as vazões afluentes, obtidas a partir da inserção dos dados de precipitação e demais variáveis necessárias no modelo MGB, foi possível projetar as tendências de geração de energia. Os resultados obtidos indicaram uma diminuição nas vazões afluentes à usina, especialmente nas vazões de referência Q_{95} e Q_{50} , importantes não só para produção de energia elétrica, mas também os demais usos da bacia hidrográfica. Assim, as projeções refletem nas estimativas de potência gerada, apresentando declínio, ainda que esse decréscimo tenha sido menos pronunciado em comparação às variações nas vazões, já que a usina atua como um sistema de regularização.

No estudo de Guerroué (2019), a análise de vazões foi aplicada na bacia do Rio Sapucaí, Minas Gerais, tomando como premissa a precipitação como única variável no tempo, cujo resultado mostrou-se confiável frente ao real comportamento hidrológico da bacia. Na ocasião o MGB também foi utilizado para projeção futura de precipitação a partir do modelo regional ETA, três modelos globais para condições de contorno (ETA-CANESM2, ETA-HADGEM2, ETA-MIROC5) e dois cenários de emissão de gases de efeito estufa e uso do solo, o RCP 4.5 e RCP 8.5. O modelo mostrou-se ajustado quando comparadas aos dados observados e, quanto às projeções de vazões, foi indicado um possível aumento na vazão correspondente ao percentil Q_{01} enquanto as vazões médias e aquelas do percentil Q_{95} apresentaram tendência de diminuição. O mesmo padrão foi notado em demais pontos da bacia, com a particularidade de que as estações de monitoramento situadas na área inferior do rio Sapucaí demonstraram maiores reduções nos níveis de vazão. Por outro lado, os pontos localizados nas regiões mais altas da bacia exibiram reduções menores e, em alguns casos, até mesmo incremento nas vazões.

4. METODOLOGIA

Na Figura 4.1 é apresentado um esquema geral da metodologia aplicada que pode ser resumida em três grandes etapas: 1) obtenção de dados hidrometeorológicos, modelo digital de elevação, mapas e imagens de satélite, escolha dos modelos, cenários e definição dos períodos para as simulações climáticas; 2) calibração do modelo MGB para então obter as vazões históricas e futuras de cada posto fluviométrico; e 3) Processamento e análise dos dados.

Para aquisição dos dados de precipitação, fluviometria e climatologia o Portal *Hidroweb*, da Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (SNIRH, 2022) e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foram consultados. Nesta etapa são inseridas ainda os parâmetros de solo e vegetação que, inicialmente, são valores padrão. As imagens de satélite e os mapas foram obtidas na página da Divisão de Geração de Imagens (DGI) do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE). Já o modelo digital de elevação e cartas topográficas são originários dos produtos disponíveis no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021).

Como fonte de dados dos cenários de mudanças climáticas as projeções dos modelos do ACCESS-ESM1-5, CAN-ESM5, INM-CM4-8, IPSL-CM6A-LR e MPI-ESM1-2-HR, do Centro de Simulação Climática da NASA (NCCCS) foram consideradas. Tais projeções são produto de *downscaling* da NASA *Earth Exchange* (NEX-GDDP-CMIP6) compostas por um conjunto de projeções corrigidas de mudanças climáticas, em alta resolução e abrangência global, derivadas do GCM, na fase do Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC AR6) (NASA, 2023). Adotaram-se dois cenários para análise, um intermediário de emissões SSP-245 e um extremo SSP-585, divididos em dois períodos de análise à saber: 2021-2060 e 2061-2100, uma vez que a série histórica de dados observados possui 40 anos de dados (1970–2014).

Para ajustes do modelo foi realizada calibração como etapa iterativa, com variação dos parâmetros e a análise dos resultados de forma contínua, e análises visuais dos hidrogramas (simulado e observado) (COLLISCHONN; TUCCI, 2001).

Para análise das tendências de comportamento das vazões futuras aplicam-se os modelos, juntamente com cenários de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), e os resultados foram analisados quanto às vazões mínimas de referência (Q_{95}), permitindo avaliar a provável variação da disponibilidade hídrica de determinado ponto.

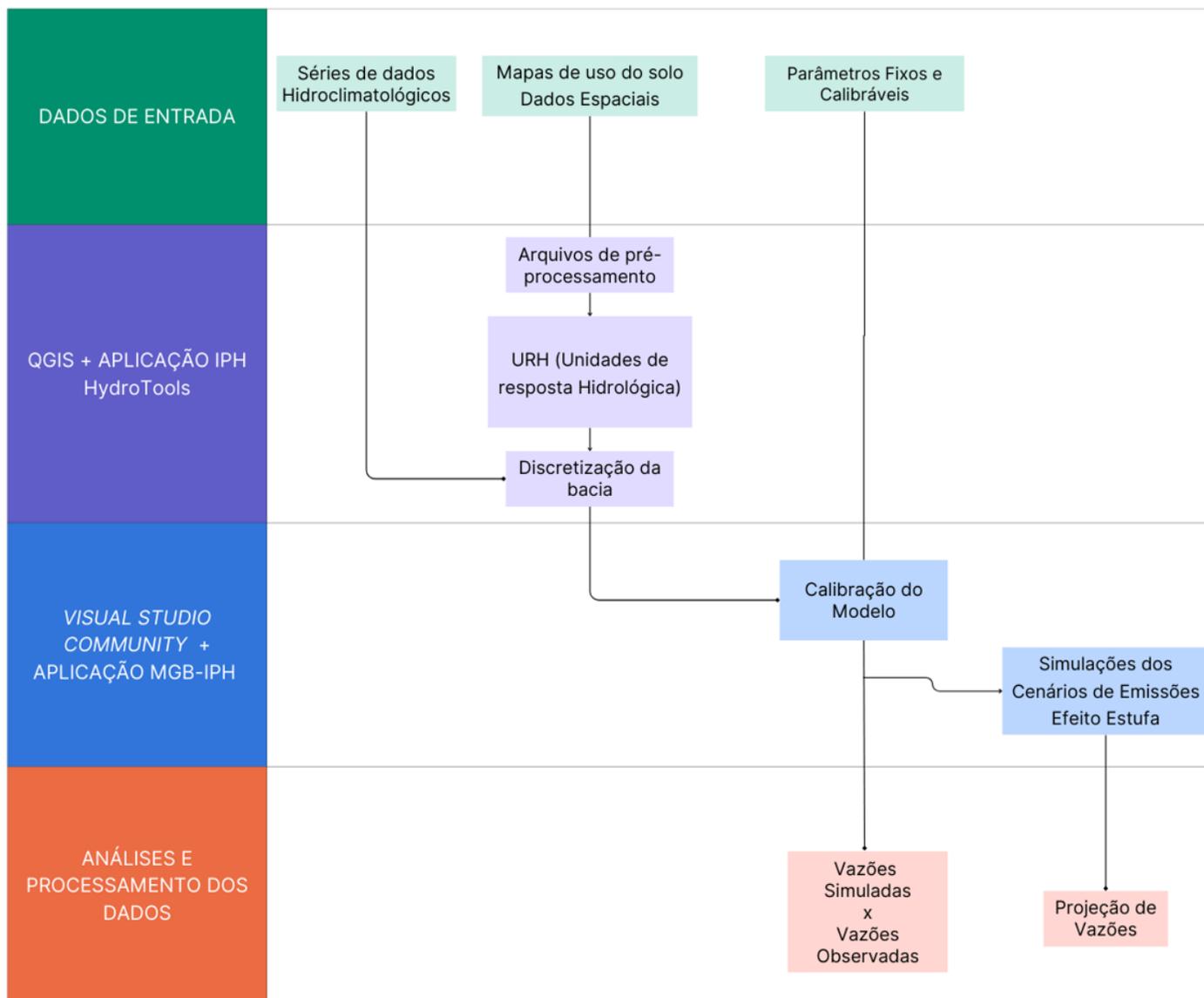


Figura 4.1 – Fluxograma metodologia.
Fonte: A autora (2024).

4.1 Caracterização da área de estudo

A bacia do rio Santo Antônio está totalmente inserida no estado de Minas Gerais, na macrobacia do rio Doce, compondo a região hidrográfica do Atlântico Sudeste. Conforme a lei 9.433 de 08 de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, emprega-se a definição de bacia hidrográfica como uma unidade de planejamento e gestão (UPGRH), estando a bacia do rio Santo Antônio identificada como UPGRH DO3 (ECOPLAN-LUME, 2010), como mostrado na Figura 4.2.

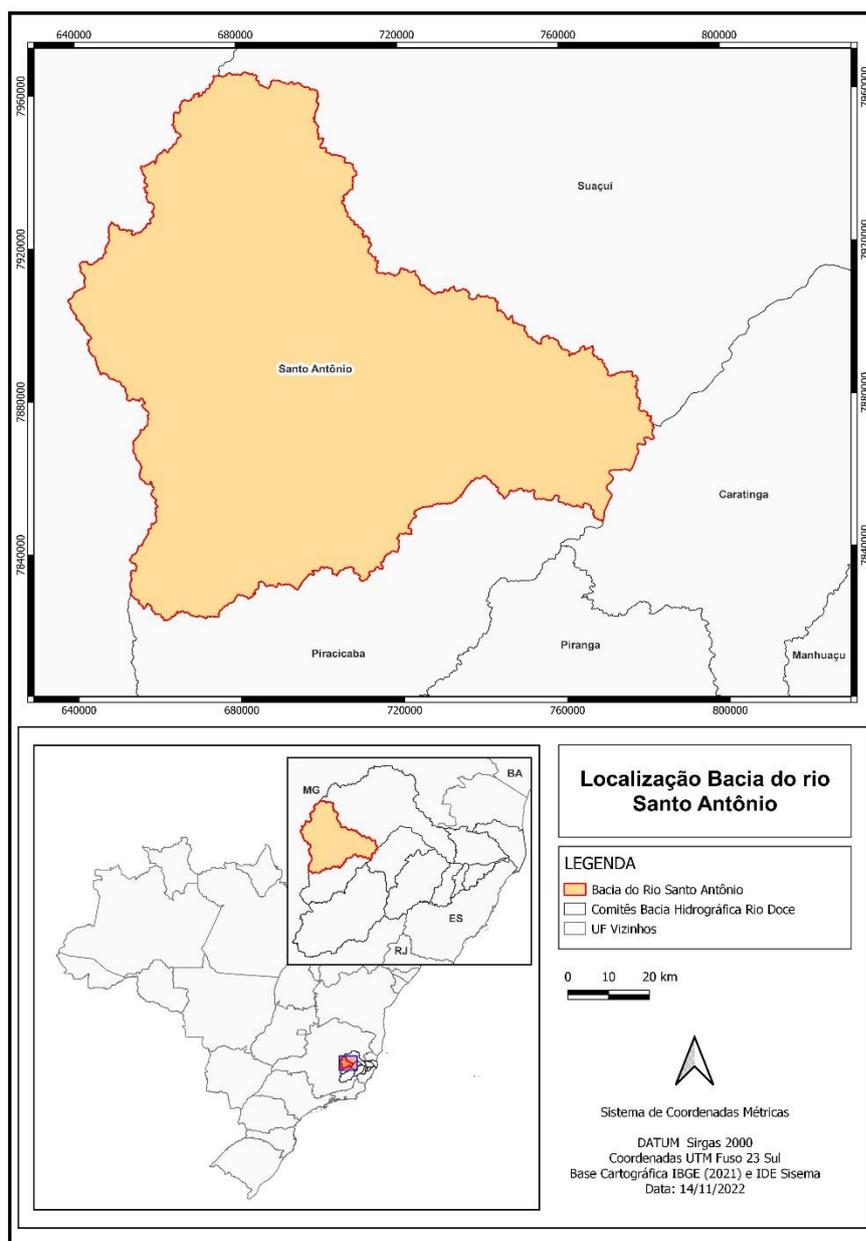


Figura 4.2 – Mapa de localização da bacia.
Fonte: A autora (2023).

O rio Santo Antônio, que dá nome à bacia, nasce no município de Conceição do Mato Dentro, possui 279,5 km de comprimento e uma área de drenagem total de 10.756,89 km². Como principais sub-bacias cita-se a do rio do Peixe e Guanhães, pela margem esquerda e a do rio do Tanque e rio Preto do Itambé, pela margem direita (ECOPLAN-LUME, 2010). A população total da bacia é de 364.026 habitantes, segundo o Censo do IBGE (2022), distribuídas em 29 municípios, englobados total ou parcialmente, sendo que 23 deles possuem sede na área (CBH-Santo Antônio, 2023).

A bacia possui rios com característica variadas contudo, destacam-se, a colocação escura das águas e o pH levemente ácido dos cursos água, que drenam as cabeceiras. Quanto sua importância e relevância para a região cita-se o uso da água para abastecimento e produção industrial influenciada pela sua vocação para extração de minérios, indústria de celulose e agropecuária (ECOPLAN-LUME, 2010).

Quanto à susceptibilidade do solo, 56 % de sua área total foi classificada como forte susceptibilidade à erosão, tendo as fortes chuvas em seu médio curso e em toda da bacia do rio Tanque, como o principal condicionante. O restante da área foi classificada como média susceptibilidade, englobando trechos como o alto curso do rio Santo Antônio e uma área ao sul da foz do rio Guanhães até a sub-bacia do rio Piracicaba (ECOPLAN-LUME, 2010).

Outro grande problema encontrado é o despejo de efluentes domésticos sem tratamento no curso d'água, gerados pelas cidades que drena. De acordo com o estudo apresentado por (SÁ, 2020) os corpos d'água da bacia recebem 84 % da vazão do esgoto in natura gerado.

Na Tabela 4.1 sintetiza-se as características principais da bacia.

Tabela 4.1 – Características da bacia do Rio Santo Antônio

Área da Bacia (km²)	279,5
Extensão do Curso Principal (km)	10756,89
Número de Municípios	29
População da bacia (habitantes)	364.026
Principais atividades econômicas	Setor de Serviços Produção Industrial (mineração) Indústria de Celulose Agropecuária (pecuária, cultivo de cana, açucare, café e milho)
Principais problemas relacionados com a gestão de recursos hídricos	Despejo de efluentes sem tratamento Alta à média susceptibilidade do solo à erosão (assoreamento)
Sistema aquífero predominante - % de ocorrência	Rochas cristalinas – 77 %

Fonte: Autora (2023).

4.2 Modelo de grandes bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB – IPH)

O Modelo de Grandes Bacias (MGB) é um modelo hidrológico distribuído desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) com objetivo de simular processos hidrológicos em grandes bacias (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2023). Na literatura científica sua utilização já é consolidada na América do Sul e para sua aplicação são necessários dados que representem suficientemente o comportamento da bacia, tanto temporal quanto espacialmente. Estes dados são: séries temporais de chuva e vazão, séries de temperatura, pressão, insolação, umidade relativa do ar e velocidade do vento, mapas de uso da terra e cobertura vegetal, tipos de solo, modelo digital de elevação (MDE) e cartas topográficas (PESSOA; KAYSER; COLLISCHONN, 2012). As informações são trabalhadas em *softwares* de SIG (Sistemas de Informações Geográficas) gerando arquivos de pré-processamento necessários ao modelo. Neste trabalho, o *software* QGis, com aplicação de ferramentas do MGB IPH *Hydro Tools*, foi utilizado.

No MGB a bacia hidrográfica é subdividida em pequenas sub-bacias, chamadas mini bacias, o que é possível a partir da interface existente entre o modelo e *softwares* de SIG. Um dos desafios para aplicação de modelos hidrológicos distribuídos é a aquisição de dados físicos da bacia, com boa representatividade espacial das variáveis. Como contorno ao problema citado, utiliza-se a definição de Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), que representam regiões hidrológicamente homogêneas de toda a área da bacia, geralmente definidas com a combinação de mapas de vegetação e cobertura e tipo de solo, sendo possível acrescentar informações de topografia e geologia (FAN *et al.*, 2015). Um balanço hídrico do solo é elaborado para cada URH, onde o escoamento superficial de cada uma de suas células é somado, transportado ao canal de drenagem e então para a rede de drenagem. Cada uma das células é caracterizada com parâmetros meteorológicos interpolados da estação meteorológica mais próxima (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2023).

Para simular o ciclo hidrológico da bacia com intervalos de tempo diários ou horários, o modelo emprega equações físicas e conceituais para representar os processos hidrológicos na superfície terrestre. O modelo possui três módulos principais: balanço de água e energia no solo, escoamento interno na mini bacia e escoamento na rede de drenagem. No módulo de balanço de água e energia no solo, são calculados os fluxos verticais de água (da atmosfera para o solo, do solo para o aquífero, e do solo e da vegetação para a atmosfera). O módulo de escoamento interno representa os fluxos de água pelas vias superficial, subsuperficial e

subterrânea. Finalmente, o módulo de escoamento na rede de drenagem lida com o fluxo de água ao longo dos principais rios (COLLISCHONN, W.; GAMA, C.H.A.; SIQUEIRA, V.A.; PAIVA, R.C.D.; FLEISCHMANN, 2020).

Na Figura 4.3 ilustra o funcionamento do MGB-IPH, processos e dados necessários.

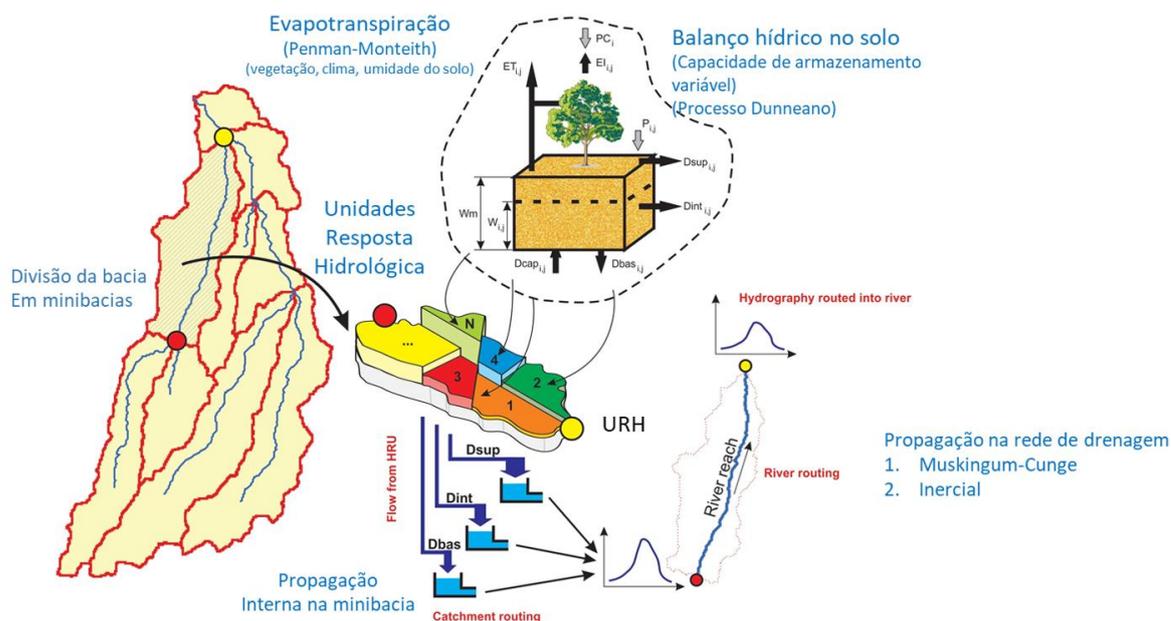


Figura 4.3 – Funcionamento MGB-IPH.

Fonte: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2023).

De forma resumida os produtos do pré-processamento no QGis são apresentados no Quadro 4.1 a seguir.

Quadro 4.1 – Arquivos resultantes do pré-processamento no QGis

Informação	Descrição
Modelo Digital de Elevação	Topografia digital da bacia em células quadradas. Comumente utiliza-se a disponibilizada pela Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).
Direções de Fluxo	Arquivo em que cada célula quadrada tem um código indicador da direção em que a água escoou naquele local.
Área Acumulada	Arquivo em que o valor de cada célula que compõe a bacia corresponde ao número de células localizadas a montante.
Rede de Drenagem	Mapa com a rede de drenagem representada por células quadradas.
Minibacias	Bacia hidrográfica de cada trecho do rio.
Sub-bacias	Unidades maiores do que as minibacias e menores do que a bacia, úteis para a definição de valores de parâmetros e para os procedimentos de calibração.
Unidades de Resposta Hidrológica	Unidades definidas pelo cruzamento de informações de uso do solo, vegetação e geologia.

Fonte: Adaptado de LIMA, J. W. M., COLLISCHONN, W. E MARENGO (2014).

4.2.1 Modelo digital de elevação

Como fonte de dados para os arquivos SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) utilizou-se o site CGIAR (*Consortium for Spatial Information*) (CGIAR-CSI, 2022), resolução 30 metros, o shape de Minas Gerais da *webgis* do site de IDE-SISEMA (Infraestrutura de Dados Espaciais) (IDE-SISEMA, 2022) e shape da Bacia do rio Doce, disponíveis no portal Sisaagua (SIGAAGUAS, 2022). O processo para elaboração dos arquivos pode ser acompanhado pelos manuais do MGB 4.6.

Na Figura 4.4 apresenta-se o modelo digital de terreno utilizado.

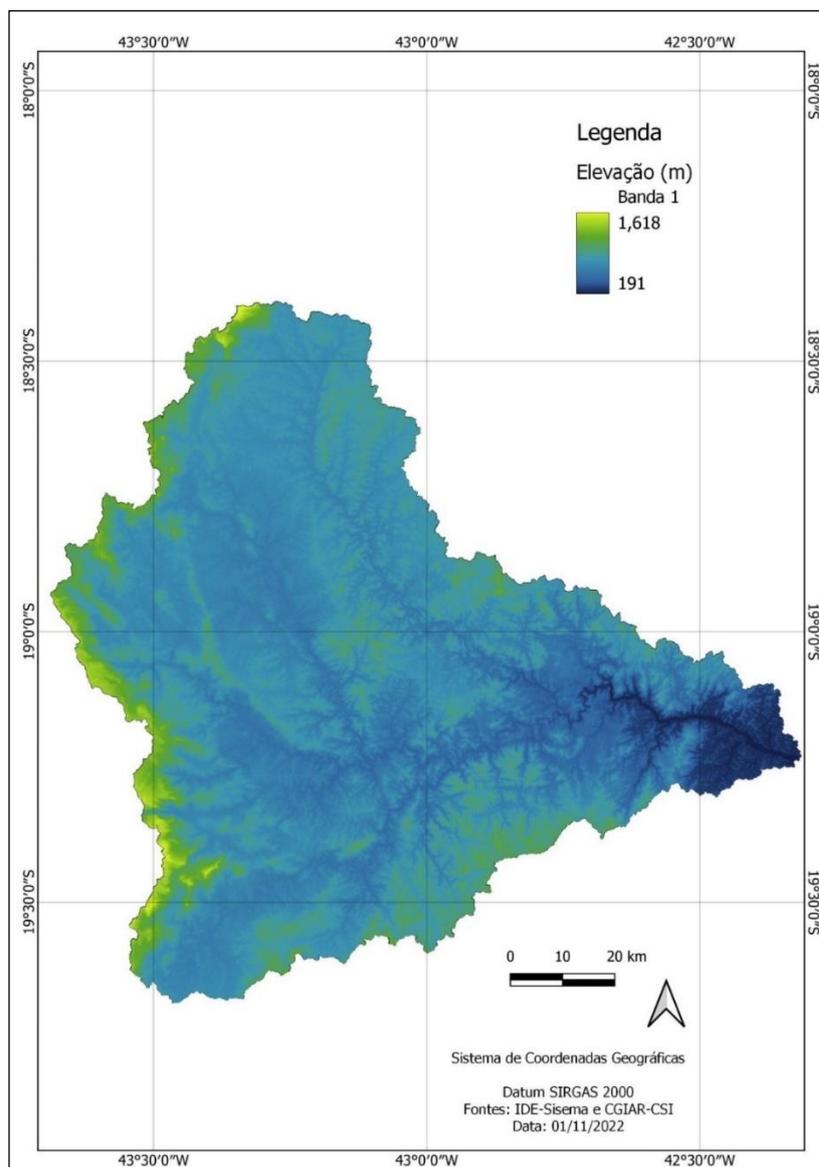


Figura 4.4 – Modelo Digital de Elevação (MDE).
Fonte: A autora (Adaptado de CGIAR-CSI (2022), 2023)

4.2.2 Unidades de Resposta Hidrológica (URH's)

As unidades de resposta hidrológica (URHs) são áreas que combinam o tipo de solo e o uso da terra, apresentando comportamento hidrológico semelhante, independentemente de onde estejam localizadas dentro da bacia. Portanto, em teoria, apresentariam o mesmo comportamento aos parâmetros da modelagem, como resposta à geração de escoamento e capacidade de armazenamento de água no solo (ALVES, M.E.; MEYER, A.O; FAN, F.M.; PAIVA, 2020). A definição das URHs é relativamente subjetiva, pois não há uma regra universal para sua criação. Sua composição depende dos dados disponíveis, do nível de complexidade desejado para representar a bacia, dos objetivos da aplicação do modelo e dos recursos computacionais disponíveis (FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D. E KAYSER, 2010).

O mapa de URH para a América do Sul, descrito no artigo de FAN *et al.* (2015), foi utilizado, uma vez que têm representado de forma satisfatória estudos similares com o modelo MGB-IPH. O mapa está disponível em resolução espacial de 400 m e possibilita a classificação em até nove classes, a saber: Agricultura em solo profundo; Agricultura em solo raso; Campo em solo profundo; Campo em solo raso; Floresta em solo profundo; Floresta em solo raso; Várzea e florestas inundáveis; Água; e Áreas semi-impermeáveis. Na Figura 4.5 é apresentado o mapa de URHs para a bacia do rio Santo Antônio e na Tabela 4.2, exibe-se ainda a descrição dos rótulos.

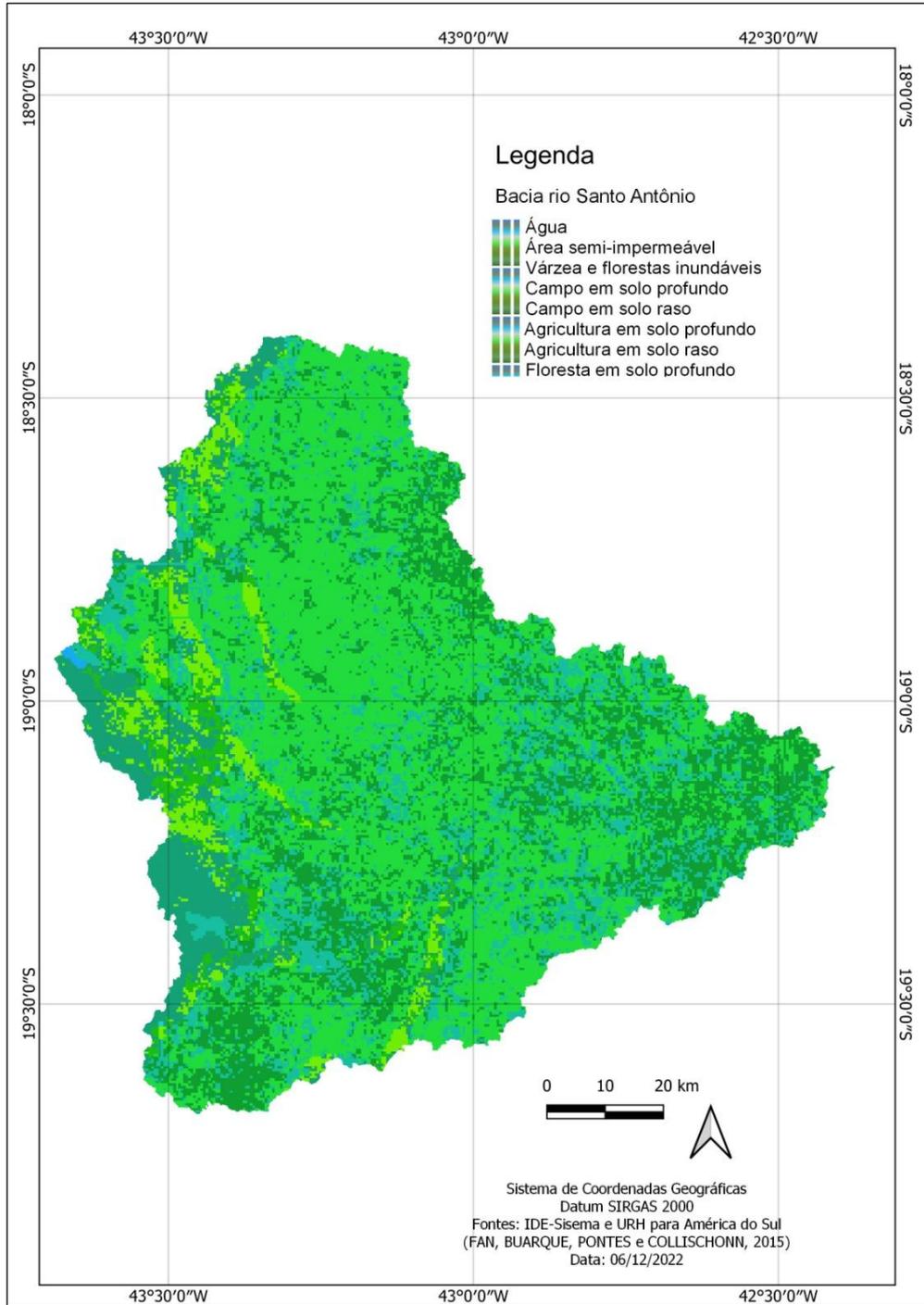


Figura 4.5 – Mapa de URH's.
Fonte: Adaptado de FAN *et al.* (2015).

Tabela 4.2 – Descrição dos usos da bacia

Código	Descrição	Percentual de Ocupação (%)
1	Floresta em solo raso	4,60
2	Floresta em solo profundo	44,87
3	Agricultura em solo raso	2,70
4	Agricultura em solo profundo	23,54
5	Campo em solo raso	7,96
6	Campo em solo profundo	16,10
7	Várzeas e florestas inundáveis	0,09
8	Áreas semi-impermeáveis	0,08
9	Água	0,06

Fonte: A autora FAN *et al.* (2015).

4.2.3 Dados hidroclimatológicos

A partir da seleção das estações fluviométricas, a bacia foi discretizada em sub-bacias, que serão modeladas com dados de precipitação, dados climatológicos, parâmetros de vegetação e solo.

Com a base de dados do SNIRH ANA (*Hidroweb* versão 3.2.7) foi possível acessar as séries históricas das estações existentes e, para análise de dados e sua qualidade, utilizou-se como suporte o Hidro 1.4, *software* que também está disponível no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA) (CGIAR-CSI, 2022). Com ele foi possível importar os dados a partir de um arquivo de extensão .mdb e utilizar de ferramentas estatísticas para trabalhar as séries de dados.

Sete (07) estações fluviométricas, mostradas na Tabela 4.3, foram selecionadas e numeradas de montante para jusante, como apresentado na Figura 4.6, e os dados de vazão (consistidos e brutos) das estações são mostrados na Figura 4.7. Para tal, utilizaram-se o *Software* Hidro (ANA, 2018) e os dados do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (ANA, 2023).

Tabela 4.3 – Estações fluviométricas selecionadas para o estudo.

Posto	Nome	Código	Latitude (S)	Longitude (W)	Rio	Município
1	CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO	56750000	7896857	663550	Rio Santo Antônio	Conceição do Mato Dentro
2	DOM JOAQUIM	56765000	7902610	684980	Rio do Peixe	Dom Joaquim
3	FERROS	56775000	7872295	708137	Rio Santo Antônio	Ferros
4	FAZENDA BARRACA	56787000	7861317	702725	Rio do Tanque	Ferros
5	SENHORA DO PORTO	56800000	7909729	701973	Rio Guanhões	Senhora do Porto
6	UHE PORTO DA ESTRELA	-	7884615	746254	Rio Santo Antônio	Açucena
7	NAQUE VELHO	56825000	7876355	771016	Rio Santo Antônio	Açucena

Fonte: A autora (2024).

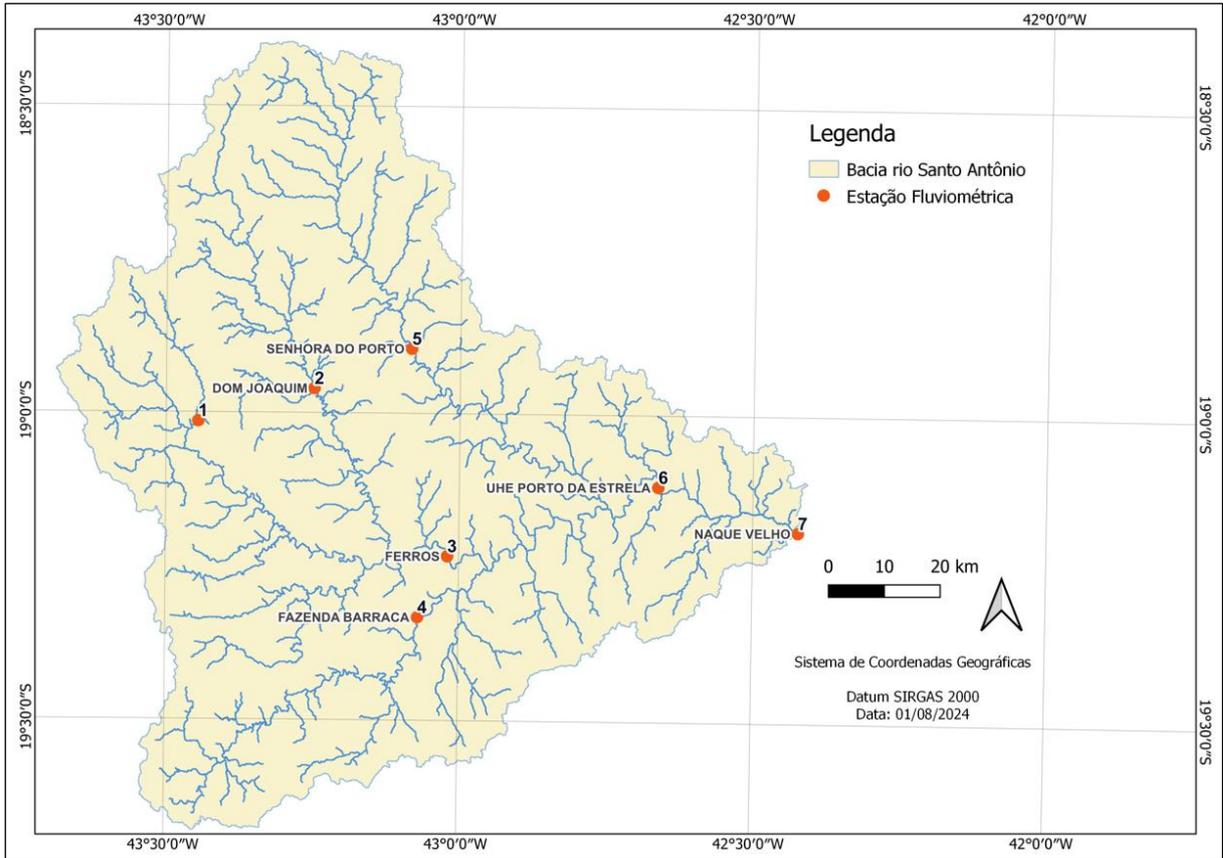
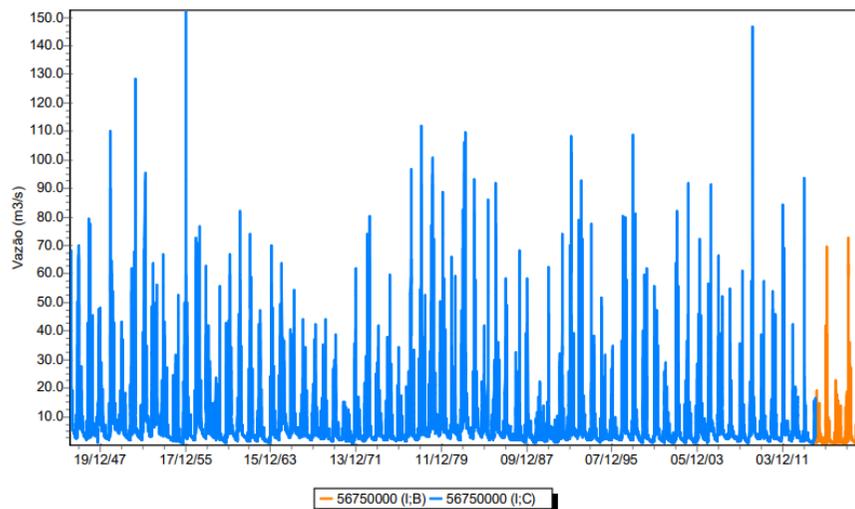
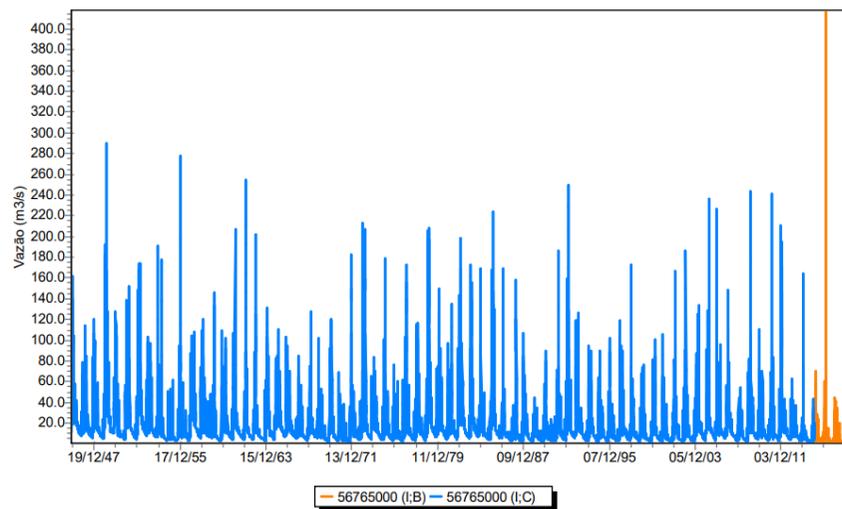


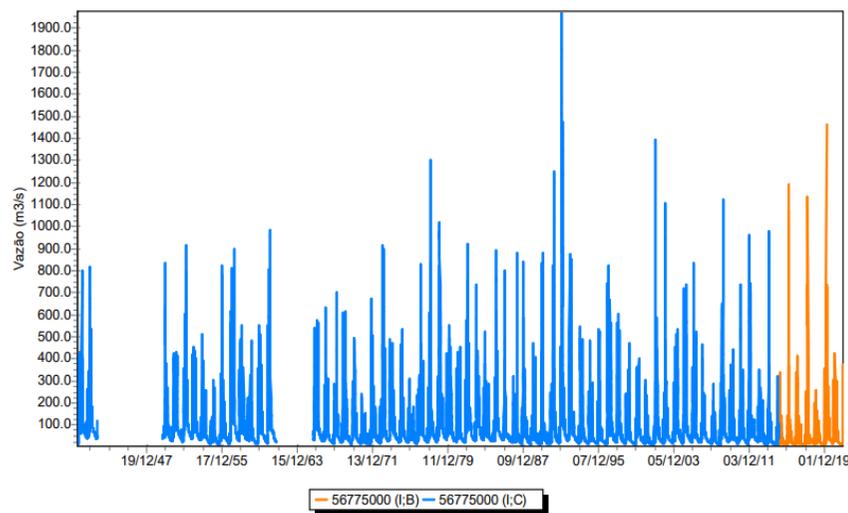
Figura 4.6 – Estações fluviométricas selecionadas.
Fonte: A autora (2024).



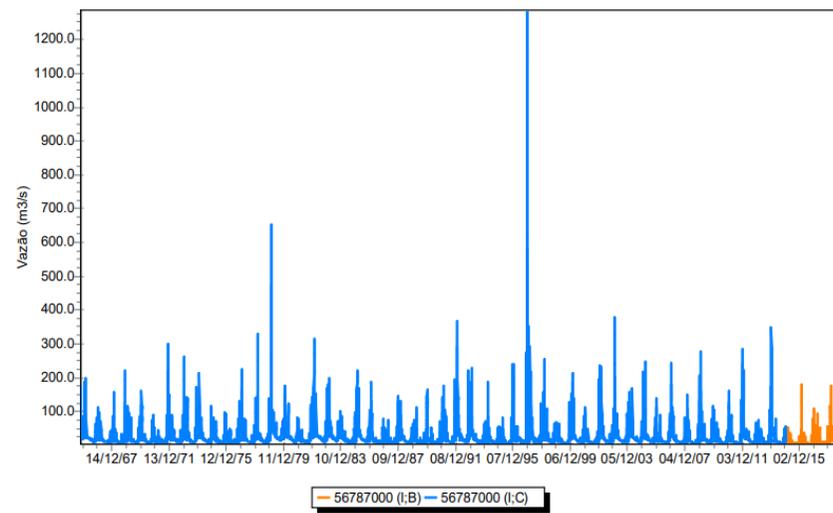
a – Estação Conceição do Mato Dentro (56750000)



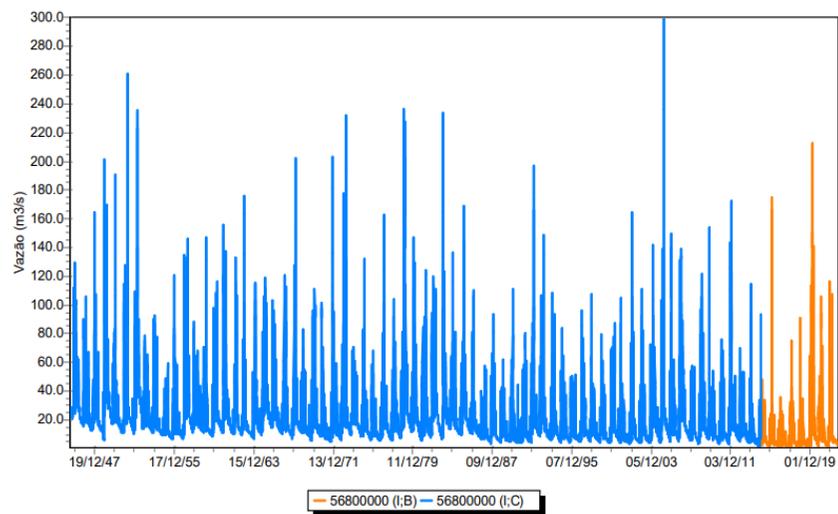
b – Estação Dom Joaquim (56765000)



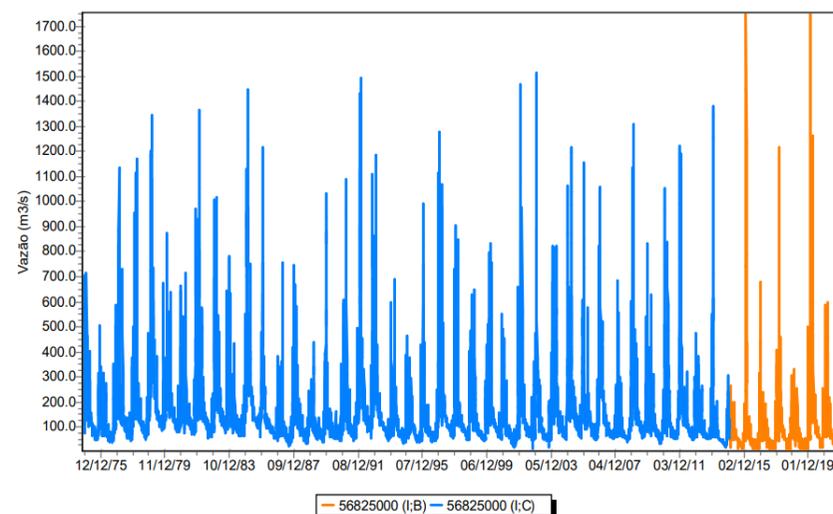
c- Estação Ferros (56775000)



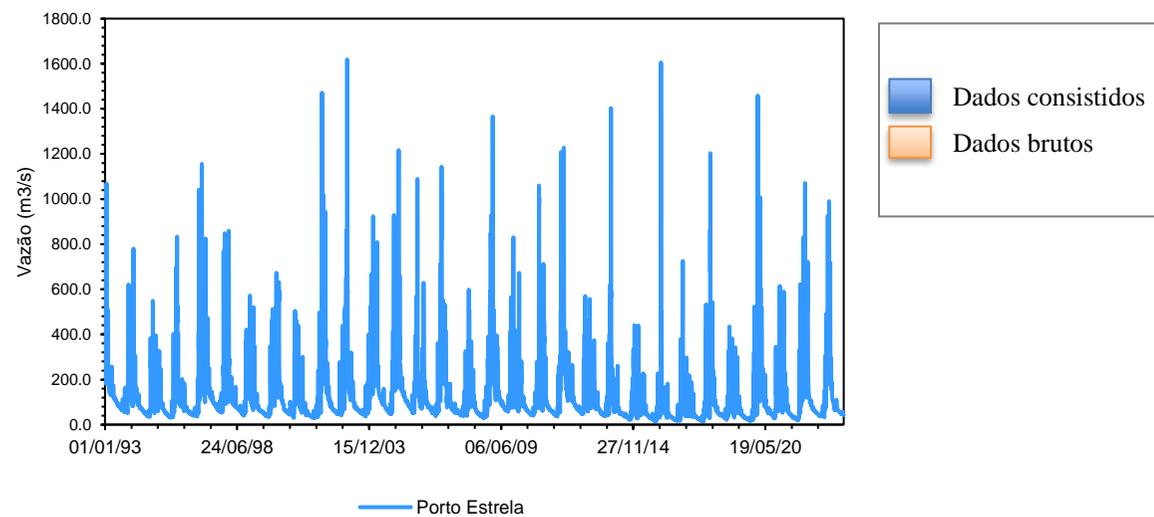
d – Estação Fazenda Barraca (56787000)



e – Estação Senhora do Porto (56800000)



f - Estação Naque Velho (56825000)



g – Estação Porto Estrela

Figura 4.7 – Hidrograma das estações fluviométricas selecionadas, dados brutos e consistidos.

Fonte: A autora (2023).

Os dados de precipitação foram obtidos no Portal *Hidroweb*, ferramenta do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), com foco em estações localizadas dentro da bacia de interesse e no intervalo de estudo, e ainda de vazões, informando os postos pré-selecionados. Os parâmetros climatológicos médias mensais como temperatura, umidade, insolação, velocidade do vento e pressão atmosférica utilizou-se como fonte, dados da estação Conceição do Mato Dentro (00083589), junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Na Figura 4.8 são ilustradas a localização das estações, além das usinas e pequenas centrais hidrelétricas.

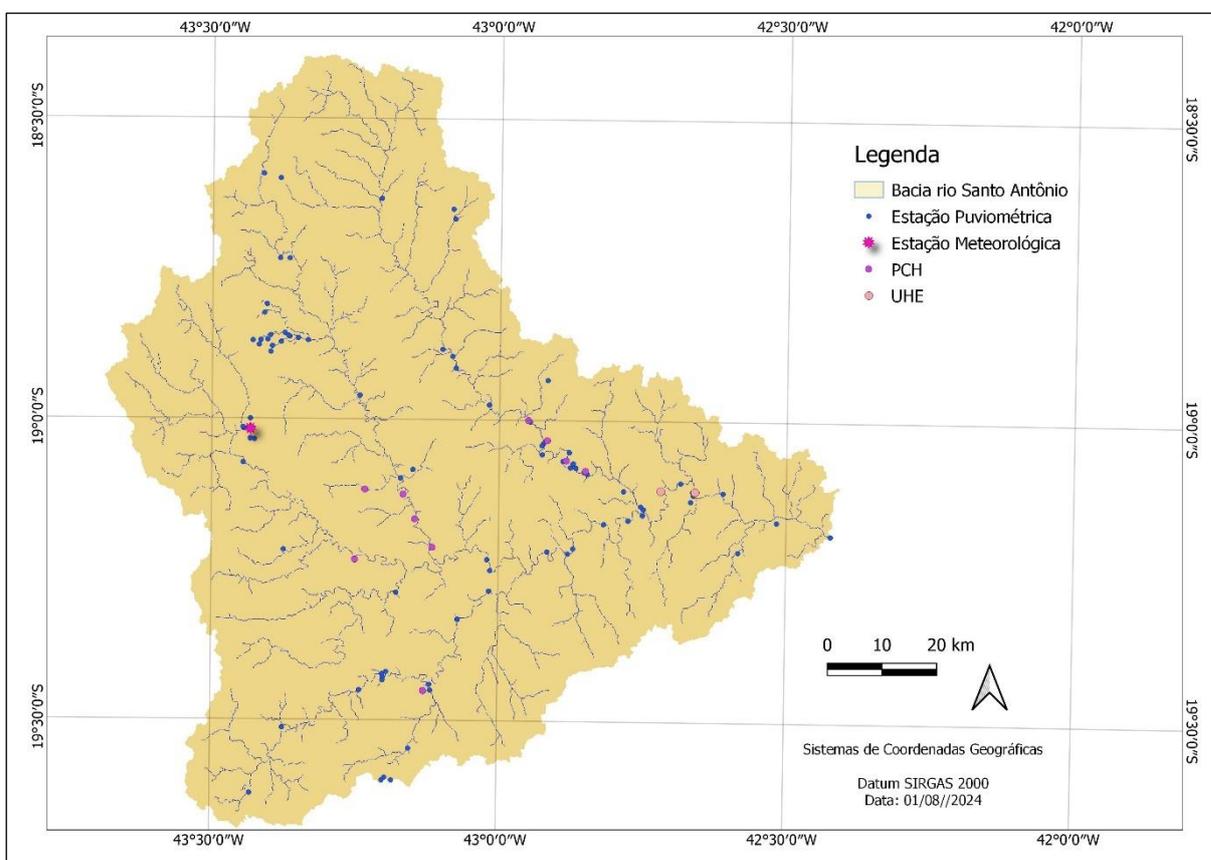


Figura 4.8 – Estações pluviométricas e meteorológica.
Fonte: A autora (2024).

4.2.4 Parâmetros do modelo

Os parâmetros fixos associados a cada URH, referentes ao valor do albedo, altura de vegetação, índice de área foliar e resistência superficial em boas condições de umidade de solo, auxiliam no cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith. A descrição de cada um desses parâmetros é apresentada no Quadro 4.2 e, na Tabela 4.4 a Tabela 4.7, mostraram-se os valores adotados.

Quadro 4.2 – Parâmetros fixos.

Parâmetro	Descrição
Índice de Área Foliar (IAF)	Expressa a relação entre a área das folhas e da área de uma parcela do solo. Parâmetro adimensional, podendo ser medido ou estimado a partir de informações na bibliografia
Albedo	Parcela da radiação solar refletida ao atingir a superfície do solo, considerando a cobertura vegetal.
Resistência Superficial	Resistência ao fluxo de umidade do solo, das plantas até a atmosfera. Varia conforme tipo de planta, dependendo ainda de variáveis como solo, temperatura do ar e radiação recebida pela planta.
Altura do Dossel	Representa a altura média da vegetação que, aplicada ao modelo, estima a resistência aerodinâmica, importante no controle da evapotranspiração. Portanto, quanto maior a resistência, menores os fluxos por evapotranspiração. Em florestas a resistência aerodinâmica é considerada menor, uma vez que a altura média é maior e intensifica a turbulência do vento.

Fonte: Adaptado de LIMA, J. W. M., COLLISCHONN, W. E MARENGO (2014) e COLLISCHONN, W (2001).

Tabela 4.4 – Parâmetros de Albedo.

HRC	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
FlorRas	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
FlorProf	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
AgriRas	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
AgriProf	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
CampRas	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
CampProf	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
Varzea	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Sem_per	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Agua	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08

Fonte: ALVES, M.E.; MEYER, A.O; FAN, F.M.; PAIVA (2020).

Tabela 4.5 – Parâmetros de índice de área foliar.

HRC	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
FlorRas	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
FlorProf	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00
AgriRas	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AgriProf	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
CampRas	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
CampProf	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Varzea	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Sem_per	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Agua	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Fonte: ALVES, M.E.; MEYER, A.O; FAN, F.M.; PAIVA (2020).

Tabela 4.6 – Valores de altura das árvores.

HRC	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
FlorRas	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
FlorProf	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
AgriRas	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
AgriProf	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
CampRas	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
CampProf	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Varzea	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Sem_per	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Agua	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10

Fonte: ALVES, M.E.; MEYER, A.O; FAN, F.M.; PAIVA (2020).

Tabela 4.7 – Valores para resistência superficial.

HRC	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
FlorRas	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
FlorProf	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
AgriRas	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
AgriProf	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
CampRas	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
CampProf	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Varzea	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Sem_per	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: ALVES, M.E.; MEYER, A.O; FAN, F.M.; PAIVA (2020).

Para os dados associados aos parâmetros do solo, inicialmente utilizaram-se W_m , b , K_{bas} , K_{int} , CS , CI e CB , descritos no Quadro 4.3 e apresentados na Tabela 4.8. Os demais mantiveram-se inalterados em todas as etapas de ajuste, sendo apresentados no ANEXO A – Parâmetros Calibráveis, os parâmetros finais.

Quadro 4.3 – Parâmetros calibráveis.

Variável	Unidade	Significado
Calibração da propagação subsuperficial (CS)	(adimensional)	Calibração da propagação subterrânea nas minibacias.
Calibração da propagação superficial (CI)	(adimensional)	Calibração da propagação subsuperficial nas minibacias.
Retardo do reservatório subterrâneo (CB)	dias	Representa o retardo do reservatório subterrâneo.
Quantidade de água que escoia subsuperficialmente (K_{INT})	mm	Controla a quantidade de água da camada de solo que escoia subsuperficialmente.
Vazão durante a estiagem (K_{BAS})	mm	Controla a vazão durante a estiagem. Valores mais altos resultam em maior escoamento subterrâneo.
Capacidade de armazenamento do solo (W_m)	mm	Capacidade de armazenamento de água no solo.
Forma da relação entre armazenamento e saturação (b)	(adimensional)	Parâmetro empírico que define a variabilidade da capacidade de armazenamento do solo em torno de W_m .
Armazenamento residual (W_c)	mm	Limita o armazenamento residual e subterrâneo.
Fluxo do reservatório subterrâneo para camada superficial (CAP)	mm	Controla a possibilidade de retorno de água subterrânea para a camada de solo.
Forma da curva de redução da drenagem intermediária (XL)	(adimensional)	Controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária ou subsuperficial do solo.
Vazão de base (QB)	m^3/s	Parâmetro que representa o fluxo de base da minibacia.

Fonte: Adaptado de LIMA, J. W. M., COLLISCHONN, W. E MARENGO (2014) e COLLISCHONN (2001).

Tabela 4.8 - Parâmetros iniciais do solo.

use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	
FlorRas		300	0.70	1.25	10.00	0.60	0.00	0.10
FlorProf		600	0.40	2.50	20.00	0.60	0.00	0.10
AgriRas		300	1.00	1.25	10.00	0.60	0.00	0.10
AgriProf		600	0.70	2.50	20.00	0.60	0.00	0.10
CampRas		300	0.80	1.25	10.00	0.60	0.00	0.10
CampProf		600	0.50	2.50	20.00	0.60	0.00	0.10
Varzea		200	1.10	0.50	5.00	0.60	0.00	0.10
ASI		100	1.50	0.10	4.00	0.60	0.00	0.10
Água		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS	20	-	-	-	-	-	-	-
CI	100	-	-	-	-	-	-	-
CB	2000	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: ALVES, M.E.; MEYER, A.O; FAN, F.M.; PAIVA (2020).

Os parâmetros fixos inseridos no modelo, embora possam sofrer alterações ao longo do ano, são considerados constantes no processo de calibração. Na janela do modelo, quando da inserção dos dados, valores são sugeridos, podendo também serem ajustados conforme informações existentes na bacia analisada (ALVES, M.E.; MEYER, A.O; FAN, F.M.; PAIVA, 2020). Já os parâmetros classificados como calibráveis, correspondem aqueles que podem ser alterados para cada sub-bacia e URH que, segundo Lima, Collischonn e Marengo (2014) influenciam significativamente nos resultados da modelagem.

4.2.5 Calibração e verificação do modelo

Com todos os dados de entrada e a bacia discretizada, iniciam-se as simulações para a calibração do modelo, ajuste dos parâmetros e, portanto, dos hidrogramas resultantes.

Esse processo foi realizado para cada uma das sete sub-bacias, utilizando-se parâmetros de vegetação e solo e dados de precipitação dos postos pluviométricos de dois períodos distintos. Na primeira etapa, com calibração automática, para o período de 1970 a 1979 e, num segundo momento, dados do período de 1980 a 2014 para verificação do ajuste. O processo consiste em simular um período distinto daquele usado na calibração, com o objetivo de verificar se o modelo é capaz de representar, de forma apropriada, um intervalo de tempo diferente do da calibração.

A etapa de validação do modelo envolve análise dos hidrogramas e análise de três funções objetivos: coeficientes de Nash-Sutcliffe das vazões calculadas e observadas (NS), coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões calculadas e observadas (NSlog) e do erro relativo de volume total dos hidrogramas (ΔV) (COLLISCHONN, 2001; LIMA, J. W. M., COLLISCHONN, W. E MARENGO, 2014).

Os coeficientes NS (Equação 1) e NSlog (Equação 2) possuem valor máximo igual a 1, o primeiro influenciado pelas vazões máximas e o segundo, pelas vazões de estiagem. Assim, NS com valores próximos a unidade refletem bom ajuste do modelo para as cheias e, no caso do NSlog, adequado comportamento do modelo para a vazões de estiagem (COLLISCHONN, 2001). A performance do modelo pode ser avaliada considerando os valores resultantes do coeficiente NS e NSlog que, segundo MORIASI *et al.* (2007), pode ser classificado como “muito bom” para NS e NSlog > 0,75, “bom” para 0,75 < NS e NSlog > 0,65, “satisfatório” para 0,50 < NS e NSlog > 0,65 e “inadequado” quando NS ou NSlog igual a 0,50.

O ΔV (Equação 3), que representa a diferença percentual entre a soma de todas as vazões calculadas e observadas, não há um valor específico almejado, mas, idealmente, espera-se que os mesmos se mantenham entre -10 % e 10 %. Esse dado é útil na verificação dos cálculos de evapotranspiração (COLLISCHONN, 2001; LIMA, J. W. M., COLLISCHONN, W. E MARENGO, 2014).

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

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

$$\Delta V = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{cal}) - \sum_{t=1}^n (Q_{obs})}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs})} \quad \text{Equação (3)}$$

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

O processo de calibração foi feito para o período de 1970 a 1979, de forma automática pela técnica de Algoritmos Genéticos, em uma rotina interna do modelo. Na calibração automática, o usuário deve fornecer uma estimativa inicial dos parâmetros calibráveis. A partir dessa estimativa, o algoritmo do modelo hidrológico simula as vazões das sub-bacias selecionadas e calcula coeficientes que devem ser multiplicados pelos parâmetros calibráveis

iniciais. Isso visa aproximar o hidrograma simulado ao observado e aprimorar as funções objetivo. Esses novos parâmetros são obtidos após várias iterações realizadas pelo algoritmo, que gera um conjunto de soluções, a ser escolhida alinhada ao objetivo do estudo.

Os parâmetros calibráveis XL, CAP e WC foram considerados fixos e baseados em valores intermediários dentro da faixa recomendada no Manual de Referência Teórica do MGB (WALTER COLLISCHONN, CLÉBER GAMA, VINÍCIUS SIQUEIRA, 2020). Os demais são apresentados no ANEXO A – Parâmetros Calibráveis. Repete-se o processo de calibração até haja uma margem de erro aceitável para o objetivo do estudo.

Com a calibração finalizada e após validação da mesma para um segundo período de dados, simula-se para todo o período, obtendo então as vazões simuladas. Como resultado da simulação tem-se as vazões geradas que são comparadas com as vazões observadas nas estações fluviométricas, verificando a representatividade do modelo hidrológico. Com o modelo calibrado pode-se gerar as previsões de vazões futuras, que terão como input os dados de precipitação futura, obtidas para cada modelo e cenário.

4.3 Projeções climáticas

As projeções climáticas no MGB foram elaboradas a partir das variáveis de cinco modelos climáticos (ACCESS-ESM1-5, CanESM5, INM-CM4-8, IPSL- CM6A-LR e MPI-ESM1-2-HR) do CMIP6, cujo conjunto foi obtido da plataforma da NASA (*Earth Exchange Global Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6) e são produto de downscaling estatístico. A escolha dos modelos foi baseada em seu bom desempenho na América do Sul, em trabalhos semelhantes, e, portanto, estarem disponíveis. Para sua utilização no MGB é necessário o ajuste dos dados para a grade do modelo, etapa já realizada no trabalho de Barbosa (2024).

Os dados diários obtidos foram trabalhados e aplicadas aos cenários SSP2-4.5 (intermediário 2,7°) e SSP5-8.5 (altas emissões 4,4°), a saber (IPCC, 2023):

- SSP2-4.5: Cenário de média emissão onde as emissões de CO₂ estão nos níveis atuais e decrescem a partir do meio do século, porém não são nulos em 2100. Os fatores socioeconômicos são mantidos conforme a tendência histórica, há pouco engajamento em relação a sustentabilidade e a igualdade social; e
- SSP5-8.5: Cenário mais agressivo quanto aos níveis de emissão de CO₂, considerando que os mesmos são duplicados até 2050 e, ao final do século, o aquecimento global chega a 4,4° acima da temperatura pré-revolução industrial. Há elevado crescimento da economia mundial, utilizando combustível fóssil e grandes aportes de energia.

Para simulação dos períodos futuros, além da precipitação, diversas são as variáveis que podem ser inseridas. Para este estudo, com exceção da pressão atmosférica, a precipitação, a temperatura do ar, a umidade relativa, a velocidade do vento e a radiação foram calculadas para cada modelo e período de análise (2021-2060 e 2061-2100) do estudo. Isso implica que, para as projeções hidrológicas futuras, o estado de uso e ocupação do solo da bacia foi se transformando e, portanto, é diferente daquele adotado para a calibração do modelo. Como resultado tem-se vazões associadas a cada um dos cinco modelos, cenários de emissão e gases de efeito estufa e períodos de análise.

Na Figura 4.9 apresenta-se a estrutura para aquisição dos dados a partir dos modelos NEX-GDDP-CMIP6.

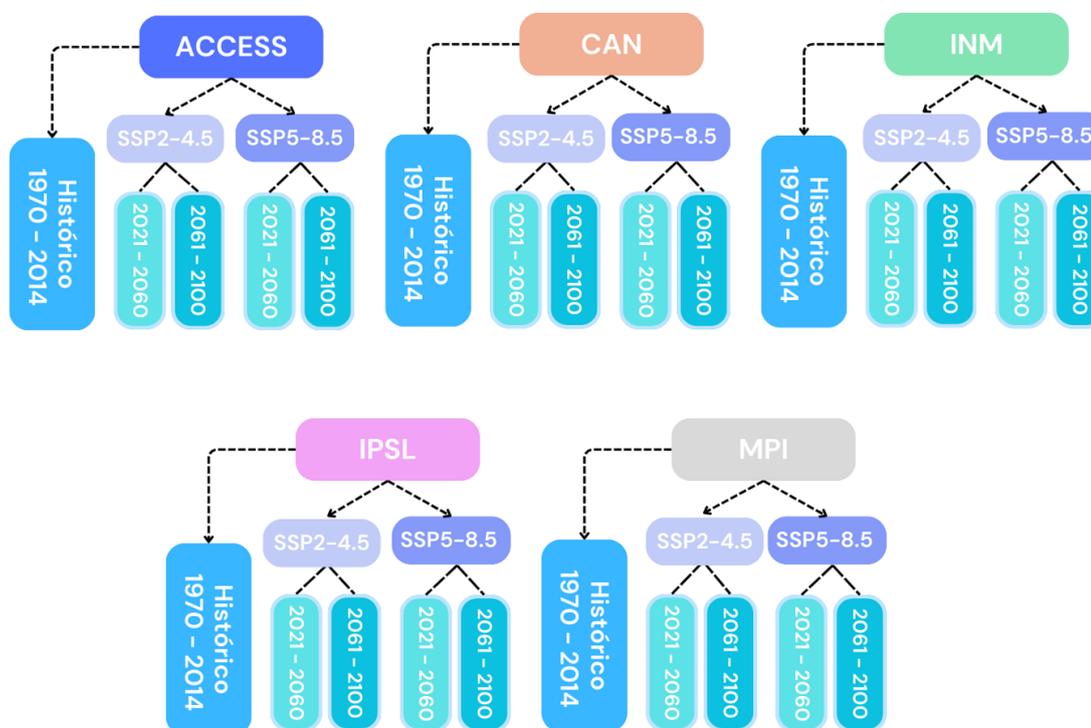


Figura 4.9 – Estrutura de aquisição dos dados de precipitação e demais variáveis dos modelos.

Fonte: A autora (2024).

4.4 Verificação do comportamento das vazões futuras e Análise da disponibilidade hídrica

Após simulação, para análise das tendências das vazões futuras, os dados das sete sub-bacias foram trabalhados, buscando um entendimento global do comportamento da bacia do rio Santo Antônio. As curvas de permanência foram geradas e, para explorar o comportamento da disponibilidade hídrica, a variação da Q_{95} foi verificada.

A curva de permanência associa a vazão com sua frequência de ocorrência no tempo, permitindo analisar as vazões com maior ou menor disponibilidade. Uma vez que a vazão

histórica simulada para cada modelo é a referência, é possível analisar a série e a Q_{95} associada a cada modelo, cenário e período. A Equação 4.4 foi aplicada com objetivo de conhecer a variação da vazão Q_{95} e compreender as tendências quanto a disponibilidade hídrica.

$$\text{Variação (\%)} Q_{95} (\text{modelo, cenário, período}) = \left[\frac{Q_{95} (\text{modelo, cenário, período}) - Q_{95} (\text{modelo, histórico})}{Q_{95} (\text{modelo, histórico})} \right] \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Discretização da bacia e delimitação das sub-bacias

A primeira etapa consistiu no pré-processamento de arquivos, com auxílio do plugin IPH Hydro Tools do MGB, eliminando as depressões no MDE, processando as direções do fluxo e elaborando a rede de drenagem da bacia. A rede de drenagem foi segmentada em função das confluências, com trechos de até 2 km² como critério, gerando uma discretização em 1.449 minibacias, conforme Figura 5.1. Baseando-se em trabalhos semelhantes, o propósito foi obter uma discretização mínima de 1.000 minibacias, uma vez que, tal discretização proporciona satisfatória representatividade das características físicas e hidrológicas das bacias hidrológicas.

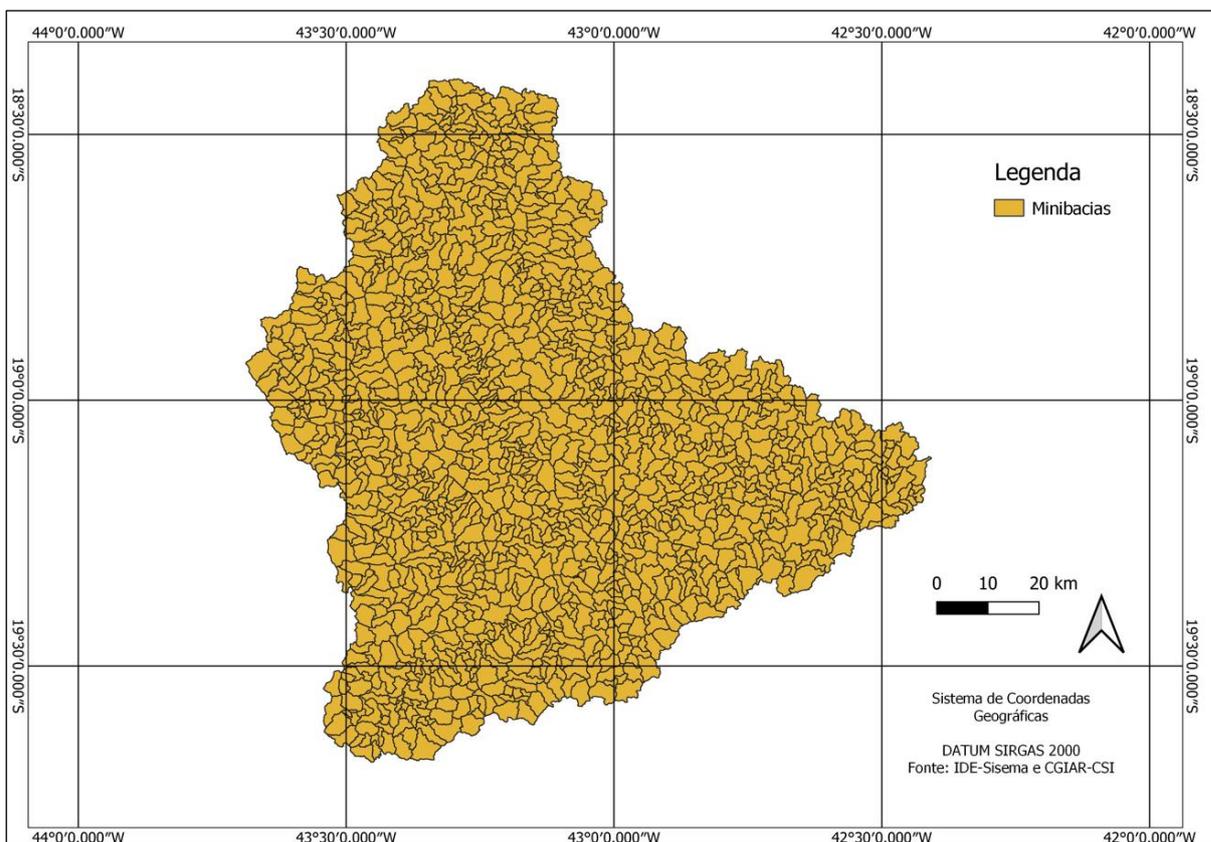


Figura 5.1 – Arquivo das minibacias discretizadas pelo modelo.

Fonte: A autora (2024).

Para a delimitação em sub-bacias, bem como para a calibração do modelo hidrológico, selecionaram-se sete estações fluviométricas com boa série histórica de dados e distribuição na área da bacia, obtidas no SNIRH ANA (*Hidroweb* versão 3.2.7). Então, as estações foram enumeradas de montante para jusante, como apresentado na Tabela 5.1, gerando as sub-bacias indicadas na Figura 5.2.

Tabela 5.1 – Estações fluviométricas selecionadas para o estudo.

Nome	Código	Latitude (S)	Longitude (W)	Rio	Município
CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO	56750000	7896857	663550	Rio Santo Antônio	Conceição do Mato Dentro
DOM JOAQUIM	56765000	7902610	684980	Rio do Peixe	Dom Joaquim
FERROS	56775000	7872295	708137	Rio Santo Antônio	Ferros
FAZENDA BARRACA	56787000	7861317	702725	Rio do Tanque	Ferros
SENHORA DO PORTO	56800000	7909729	701973	Rio Guanhões	Senhora do Porto
UHE PORTO ESTRELA	-	7884615	746254	Rio Santo Antônio	Açucena
NAQUE VELHO	56825000	7876355	771016	Rio Santo Antônio	Açucena

Fonte: A autora (2023).

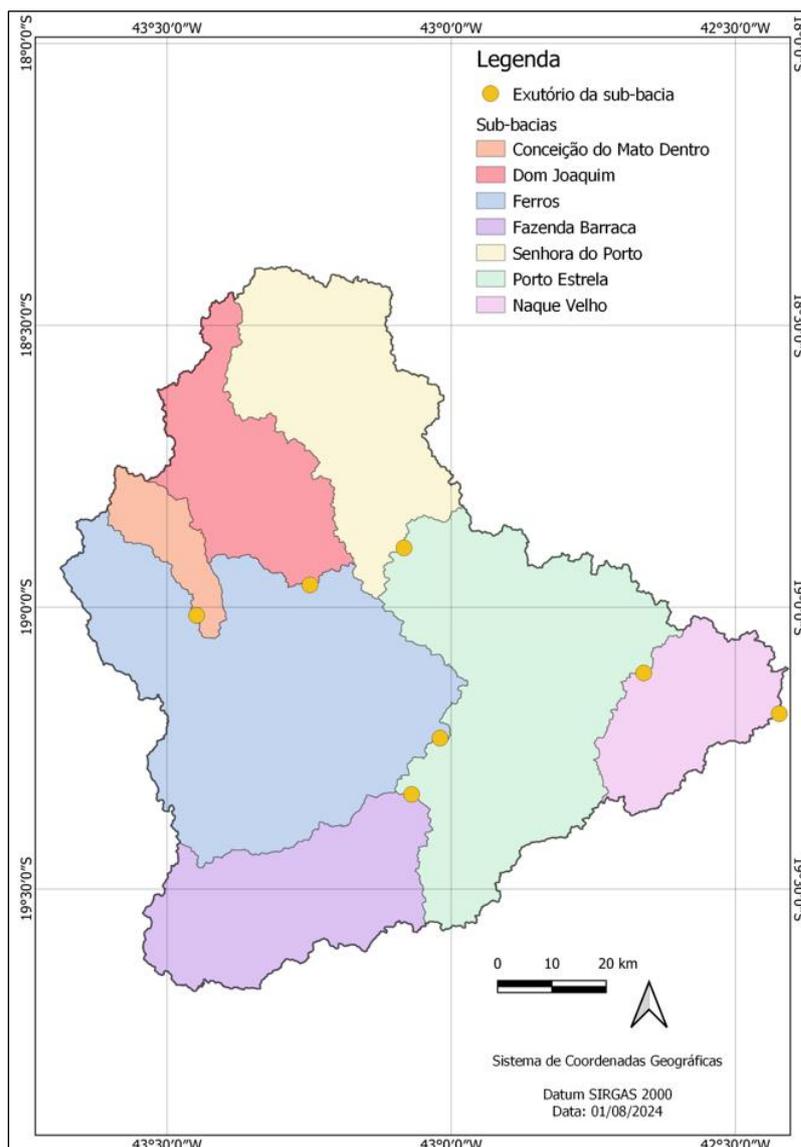


Figura 5.2 – Discretização em sub-bacias, a partir das estações selecionadas.
Fonte: A autora (2024).

Como resultado final, tem-se um arquivo com dados topológicos de cada mini-bacias, como localização, área de drenagem, comprimento dos trechos de rio, dentre outras informações que serão utilizadas quando da aplicação do mapa de URH's.

5.2 Calibração do modelo

O modelo hidrológico foi calibrado para cada uma das sete sub-bacias do rio Santo Antônio, utilizando-se os dados observados do período 1970 a 1979. O desempenho das calibrações foi verificado através das funções objetivos Nash-Sutcliffe (NS) e Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões (NSlog) e do erro relativo de volume baseado na integração das vazões diárias (ΔV).

Nas Figura 5.3 a Figura 5.8 apresentam-se os hidrogramas resultantes, valores das vazões observadas e simuladas, no período utilizado para calibração de 1970 a 1979, para seis

das sub-bacias. Além disso, para verificação da qualidade da calibração, os parâmetros foram aplicados em um período diferente da calibração, de 1970 a 2014, cujo resultado pode ser observado na Figura 5.9.

Vale ressaltar que, a estação fluviométrica que representa a sub-bacia 07, localiza-se a jusante de uma usina hidrelétrica, portanto, existe uma regularização das vazões função da interferência do reservatório. Este fato impossibilita a realização de uma simulação ajustada, uma vez que o MGB não considera tal interferência.

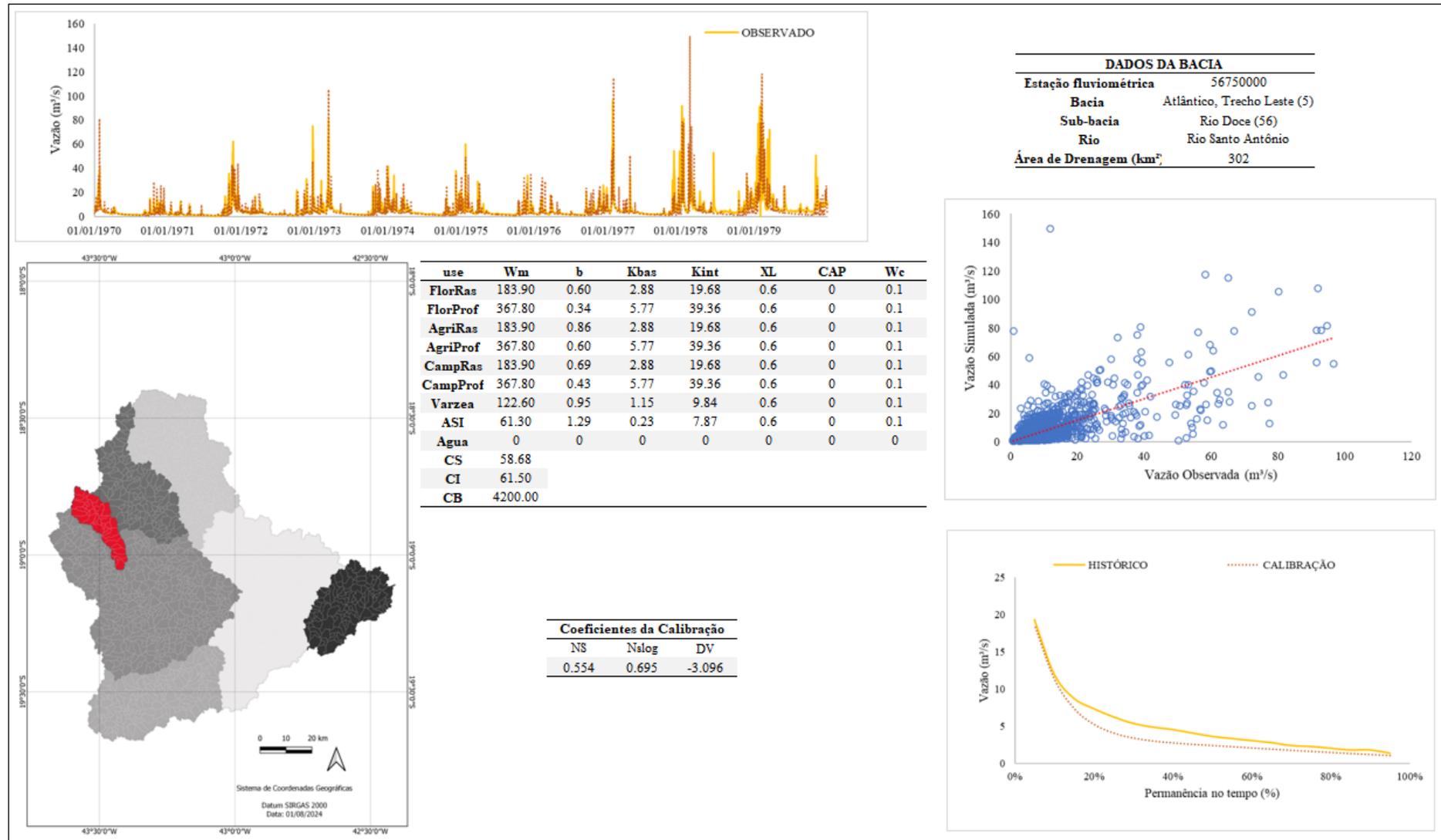


Figura 5.3 – Hidrograma com os dados observados e simulados pelo modelo, para a sub-bacia 01 (Conceição do Mato Dentro), período de 1970 a 1979 (calibração).
Fonte: A autora (2024).

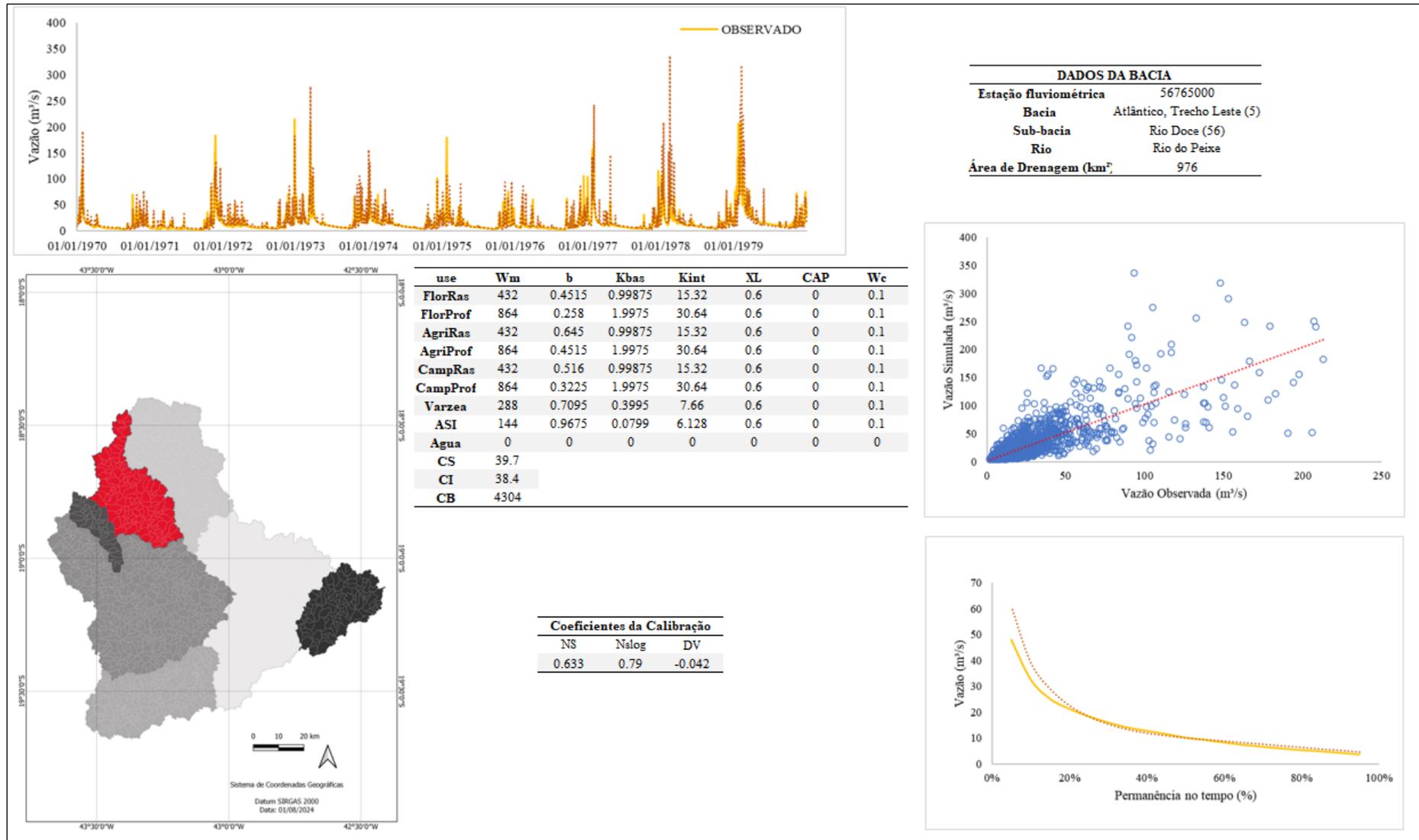
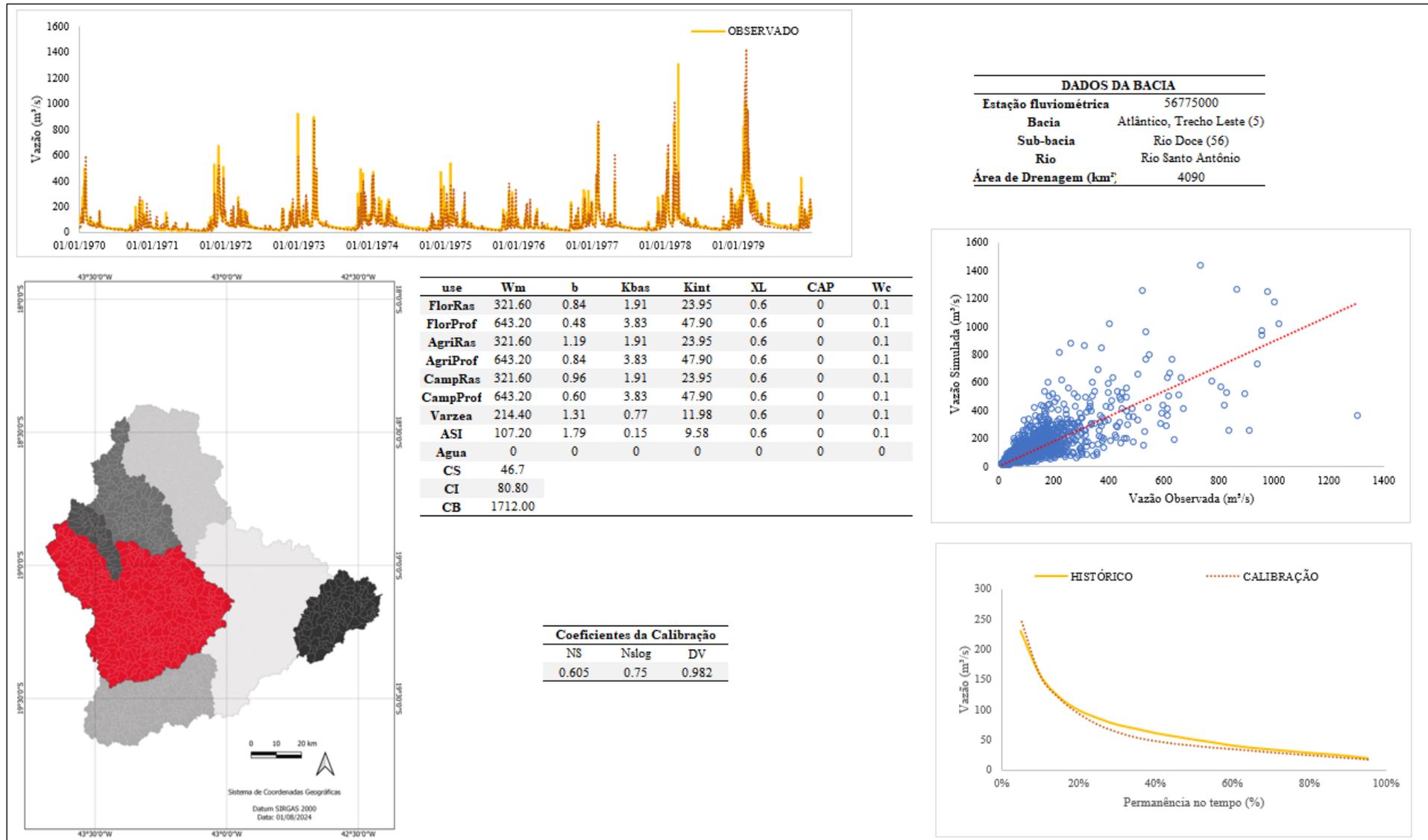
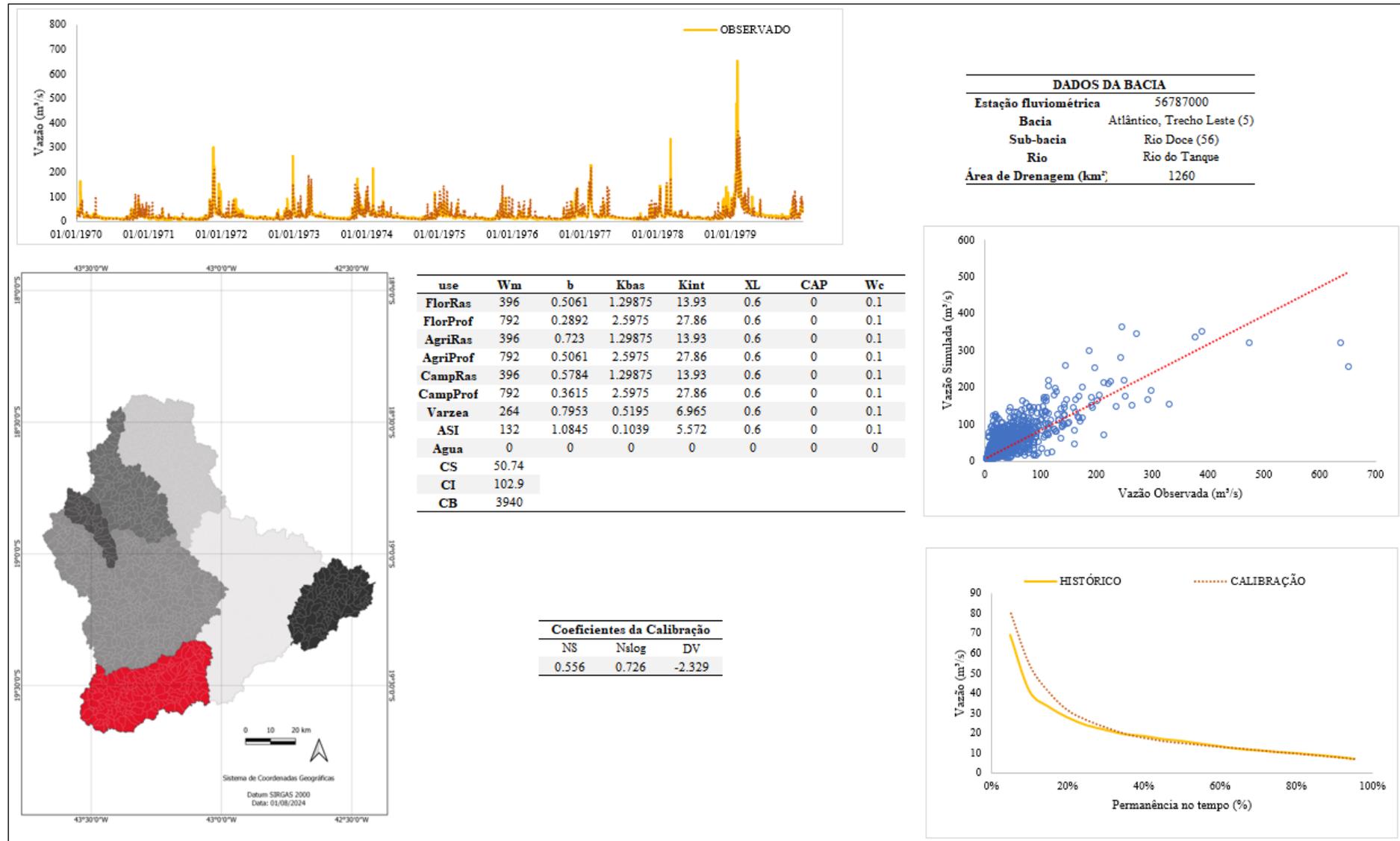
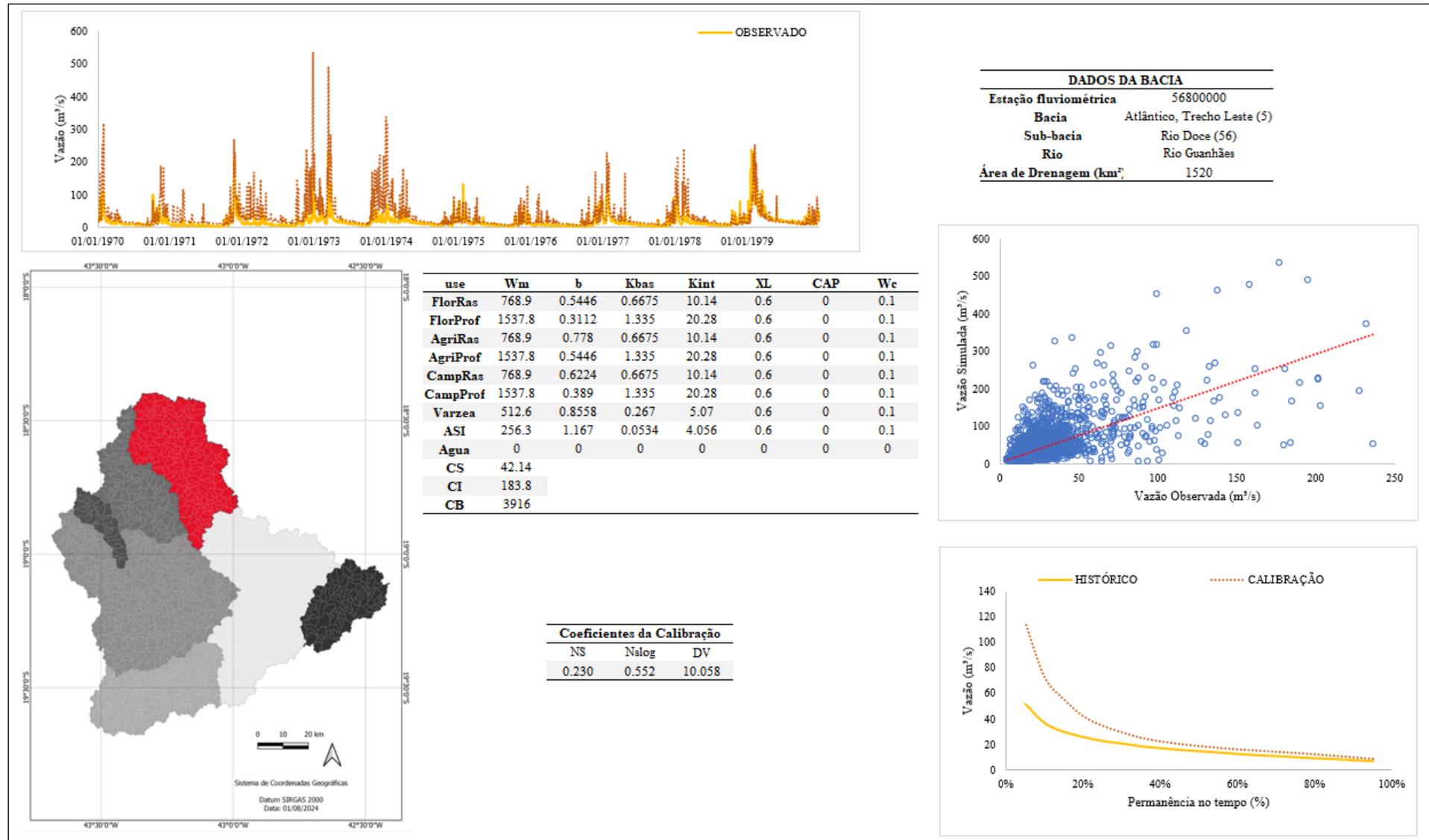


Figura 5.4 – Hidrograma com os dados observados e simulados pelo modelo, para a sub-bacia 02 (Dom Joaquim), período de 1970 a 1979 (calibração).
Fonte: A autora (2024).







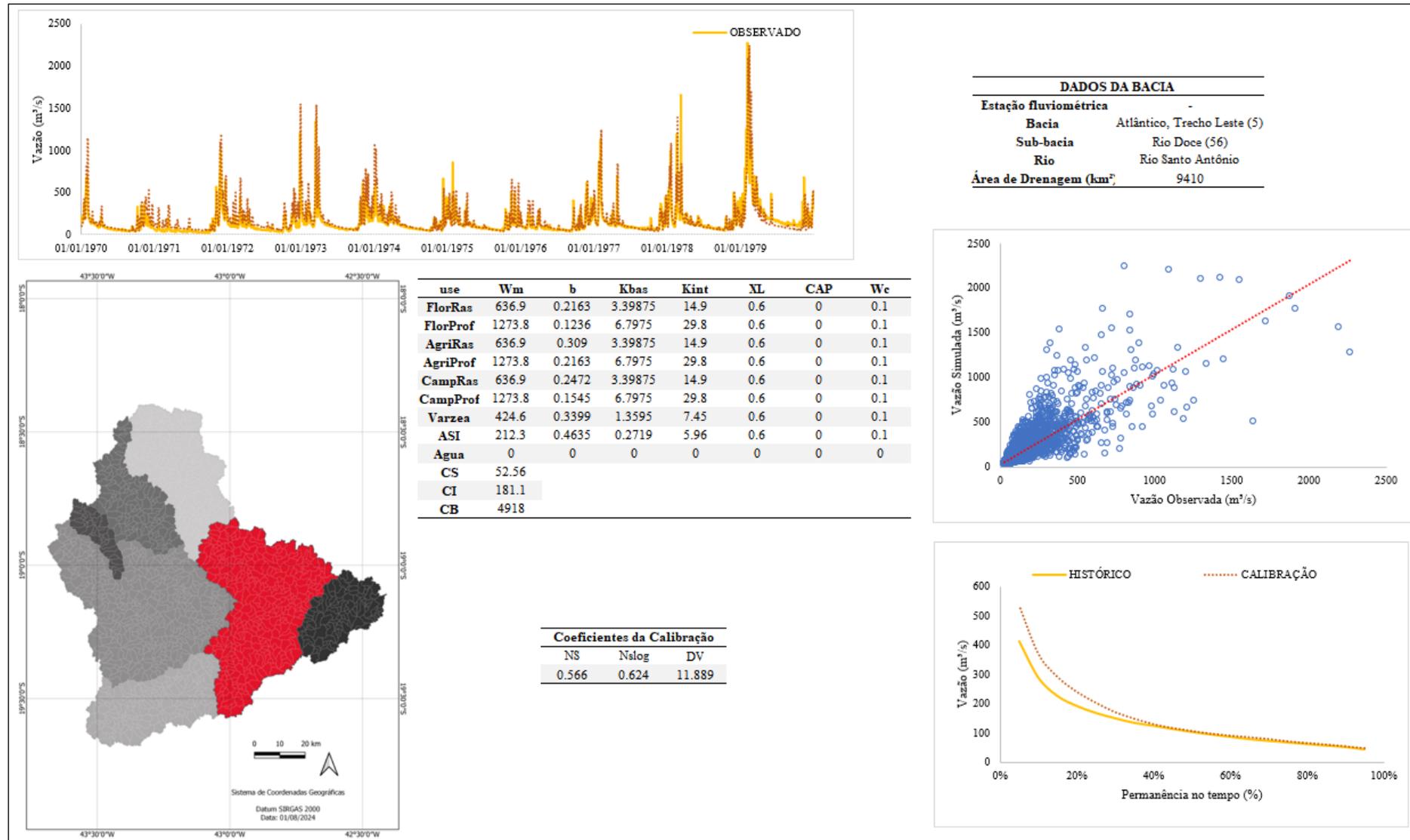


Figura 5.8 – Hidrograma com os dados observados e simulados pelo modelo, para a sub-bacia 06 (UHE Porto da Estrela), período de 1970 a 1979 (calibração).

Fonte: A autora (2024).

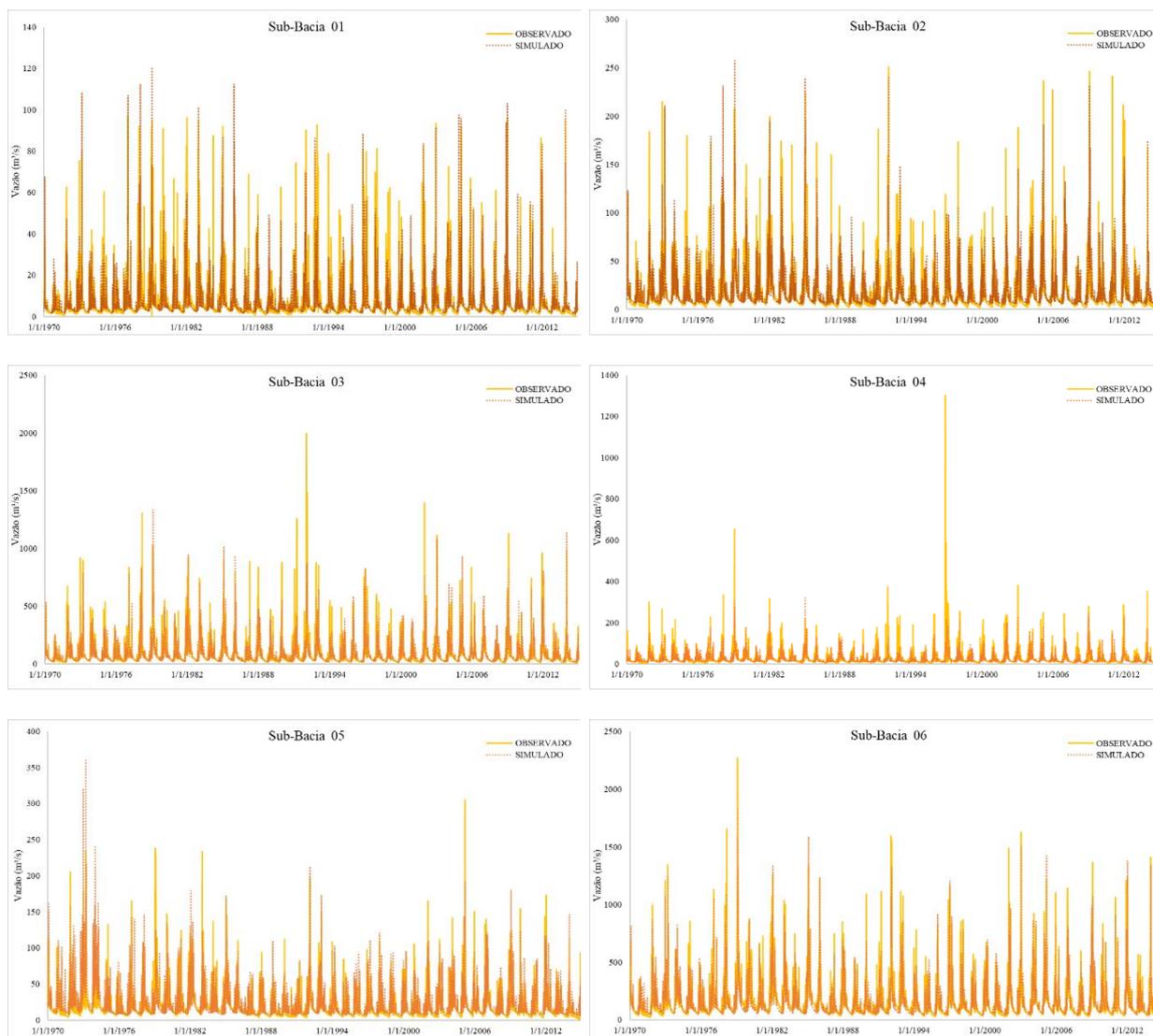


Figura 5.9 – Hidrograma diário com os dados observados e simulados pelo modelo, para as sub-bacia 01 a 06, período de 1970 a 2014.
Fonte: A autora (2024).

Algumas características da bacia podem dificultar a calibração, como sua aplicação em áreas de drenagem muito abaixo do recomendado para o uso do MGB, que é de 1.000 km², em regiões de relevo muito acidentado, onde o escoamento superficial é mais rápido e concentrado. Nos casos citados, a simulação pode não ser representada de forma adequada nas vazões médias registradas nos postos, função da maior velocidade do escoamento e, portanto, os picos de cheia não são mostrados.

A ausência de uma malha pluviométrica robusta é outro fator importante no desempenho do modelo. Geralmente, em bacias muito pequenas, as informações de chuvas são mais escassas, em número de postos ou mesmo qualidade dos dados, com isso, algumas estimativas do modelo sofrem interferências. Porém, contrariando alguns fatores, observa-se calibração

aceitável para a sub-bacia 01, cuja área de drenagem é de 302 km², poucas estações pluviométricas, mas está muito próxima da única estação meteorológica da bacia. Talvez a proximidade citada tenha sido o ponto prevalecte para o resultado da calibração.

Para sub-bacias com presença de usinas hidrelétricas (UHE's), como foi o caso da sub-bacia 07, a predição do modelo fica impossibilitada.

Quando o rio transborda, há uma atenuação dos picos de vazão. Para melhorar essa representação, uma possibilidade é utilizar um modelo digital do terreno com resolução mais detalhada, o que pode ser realizado em trabalhos futuros. Neste contexto, Fan, *et al* (2016) destaca que, em grandes áreas, os rios frequentemente percorrem centenas de quilômetros, atravessando regiões com variadas condições climáticas, geomorfológicas e geológicas. Eles passam por canais bem definidos em zonas montanhosas até alcançarem áreas alagáveis em regiões planas. Essa diversidade de processos confere uma complexidade à representação dos fenômenos hidrológicos que ocorrem na bacia como um todo.

É possível notar que, de modo geral, é perceptível uma sazonalidade e, apesar dos dados simulados apresentarem alguns pontos de cheias superestimadas, o comportamento das curvas simuladas está bem representado. Como critério de avaliação da calibração do modelo, uma vez que o estudo tem as vazões mínimas como foco, priorizou-se o Coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões (NSlog), Tabela 5.2. Ainda assim, os resultados indicam que o modelo tem um bom desempenho em representar a maioria das sub-bacias, como mostrado na Figura 5.10.

Tabela 5.2 – Valores de NS, NSlog e erro de volume, após calibração.

Sub-bacia	Coeficientes da Calibração		
	NS	Nslog	DV
01	0.554	0.695	-3.096
02	0.633	0.790	-0.042
03	0.605	0.750	0.982
04	0.556	0.726	-2.329
05	0.230	0.552	10.058
06	0.566	0.624	11.889
07	-49.334	-2.339	260.23

Fonte: A autora (2024).

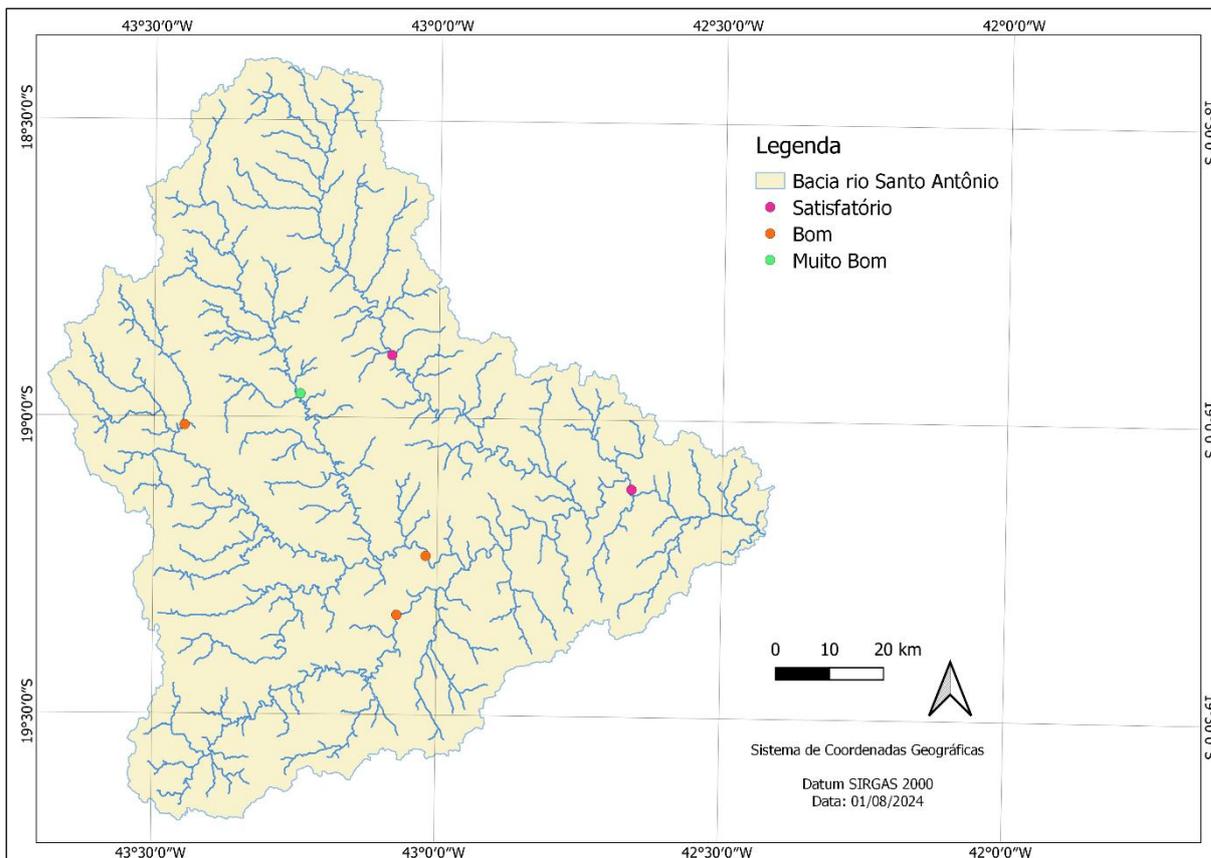


Figura 5.10 – A performance do modelo, para as sete sub-bacias, considerando os valores resultantes do coeficiente NSlog.
Fonte: A autora (2024).

5.3 Projeção de vazões

A partir das séries de vazões simuladas no MGB, elaboraram-se as curvas de permanência com dados históricos dos modelos e dados projetados de cenário de emissão. Analisou-se ainda a variação da Q_{95} , adotada como representação da disponibilidade hídrica, embora o estado de Minas Gerais considere a $Q_{7,10}$ como referência nos estudos de mínimas. Sua aplicação justifica-se, pois, além de adotada pela ANA e por vários estados, possui metodologia de cálculo simples e direta, ao contrário da $Q_{7,10}$, onde é necessário ajuste de uma distribuição estatística, podendo incrementar incerteza aos resultados. Desta forma, a Q_{95} proporcionaria mais confiança na análise do comportamento das vazões projetadas.

5.3.1. Curvas de permanência e variações da Q_{95} para rio do peixe, em Dom Joaquim

As curvas de permanência da sub-bacia 02 (Dom Joaquim), geradas a partir dos dados climáticos do modelo ACCESS-ESM1-5, são apresentadas na Figura 5.11. Quando comparadas ao histórico, as vazões características tendem à redução, mas nota-se que as vazões de alta permanência sofrem uma redução menos acentuada.

Considerando a variação da vazão Q_{95} com o período histórico (Equação 4.1), relacionada à disponibilidade hídrica, na Tabela 5.3 observam-se reduções para ambos os cenários. As variações do período de 2021-2060 mostram-se mais acentuadas no cenário SSP2-4.5 e, as associadas ao período 2061-2100, com maior tendência de redução no cenário SSP5-8.5.

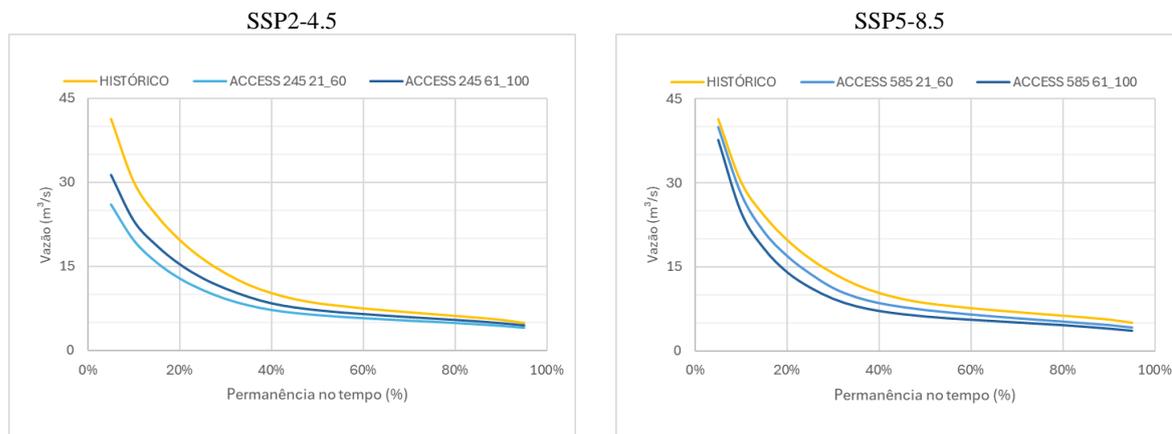


Figura 5.11 – Curva de permanência sub-bacia 02 – Dom Joaquim, modelo ACCESS-ESM1-5.
Fonte: A autora (2024).

Tabela 5.3 – Variação de vazões Q_{95} para a sub-bacia 02 – Dom Joaquim – Modelo ACCESS-ESM1-5.

Período	SSP2-4.5	SSP5-8.5
2021-2060	-19 %	-17 %
2061-2100	-11 %	-27 %

Fonte: A autora (2024).

Na Figura 5.12 são apresentadas as curvas de permanência geradas pelo modelo CanESM5, para a sub-bacia 02 (Dom Joaquim). Há previsão de redução intensa das vazões características para ambos os cenários e períodos, quando comparadas aos dados do histórico simulado, sobretudo nas vazões de menor frequência.

Observando as variações da vazão Q_{95} com o período histórico (Equação 4.1), mostradas na Tabela 5.4., nota-se que as reduções são ainda mais acentuadas no cenário SSP5-8.5.

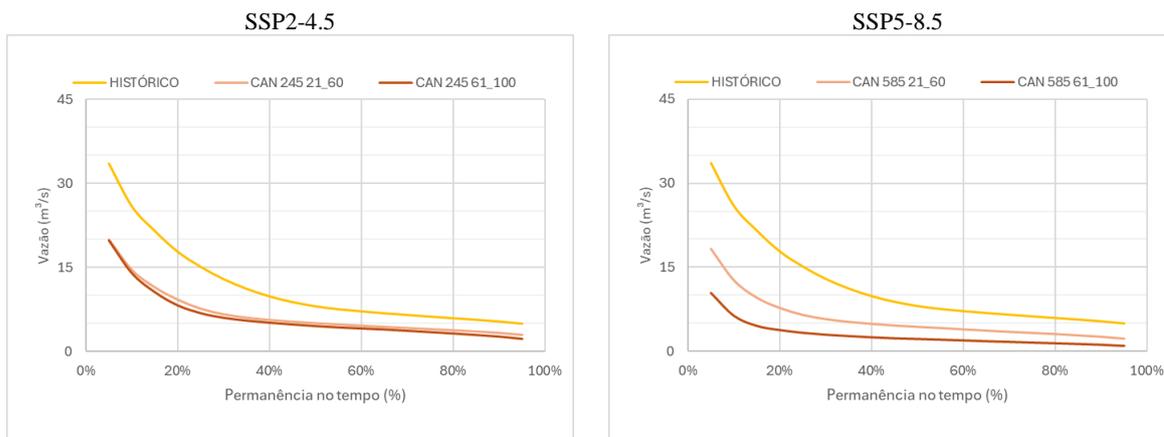


Figura 5.12 – Curva de Permanência sub-bacia 02 – Dom Joaquim, modelo CanESM5.
 Fonte: A autora (2024)

Tabela 5.4 – Variação de vazões Q_{95} para a sub-bacia 02 – Dom Joaquim – Modelo CanESM5.

Período	SSP2-4.5	SSP5-8.5
2021-2060	-41 %	-55 %
2061-2100	-54 %	-79 %

Fonte: A autora (2024).

As curvas geradas para o modelo INM-CM4-8 são apresentadas na Figura 5.13. As vazões calculadas para ambos os períodos e cenários mostraram-se com tendência de redução das vazões, quando comparadas ao histórico. Analisando as variações da Q_{95} com o período histórico (Equação 4.1), na Tabela 5.5, as maiores oscilações estão associadas ao cenário SSP5-8.5, sendo ainda mais expressivas no período de 2061 a 2100.

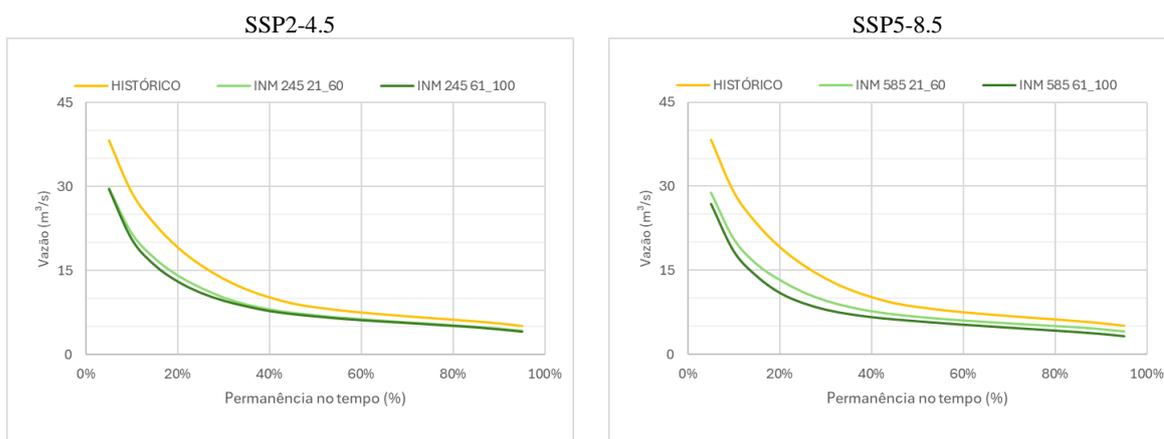


Figura 5.13 – Curva de Permanência sub-bacia 02 – Dom Joaquim, modelo INM-CM4-8.
 Fonte: A autora (2024).

Tabela 5.5 – Variação de vazões Q_{95} para a sub-bacia 02 – Dom Joaquim – Modelo INM-CM4-8.

Período	SSP2-4.5	SSP5-8.5
2021-2060	-15 %	-18 %
2061-2100	-20 %	-36 %

Fonte: A autora (2024).

As curvas resultantes do modelo IPSL- CM6A-LR, para o cenário SSP2-4.5, apresentam vazões menores às do histórico, mas pouca variação entre os períodos, como observado na Figura 5.14. A mesma redução das vazões características é mostrada no cenário SSP5-8.5, porém há maior variação entre curvas dos períodos, com destaque entre as vazões de menor frequência. Explorando as variações da vazão Q_{95} com o período histórico (Equação 4.1), da Tabela 5.6, as maiores tendências de redução estão associadas ao cenário SSP5-8.5, sobretudo no período de 2061 a 2100.

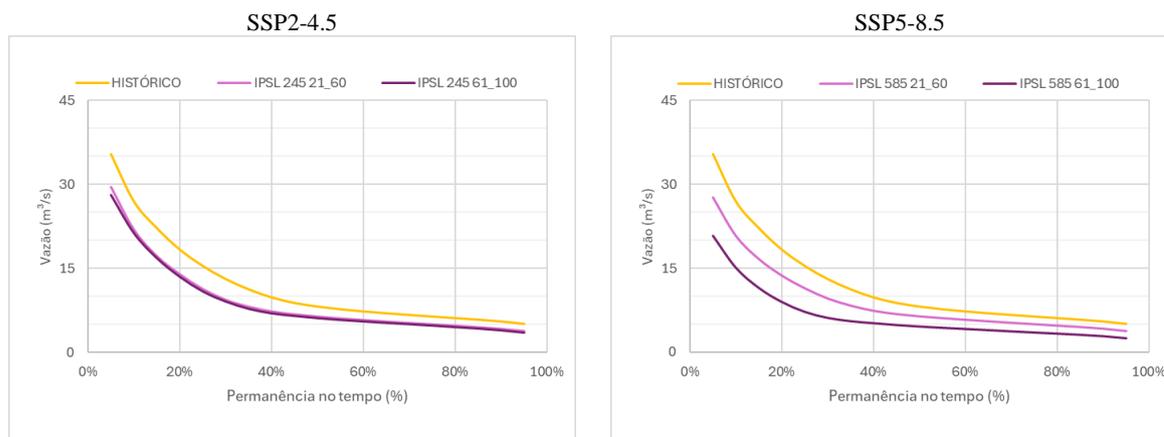


Figura 5.14 – Curva de Permanência sub-bacia 02 – Dom Joaquim, modelo IPSL- CM6A-LR.

Fonte: A autora (2024).

Tabela 5.6 – Variação de vazões Q_{95} para a sub-bacia 02 – Dom Joaquim – Modelo IPSL- CM6A-LR.

Período	SSP2-4.5	SSP5-8.5
2021-2060	-23 %	-24 %
2061-2100	-30 %	-52 %

Fonte: A autora (2024).

Por fim, na Figura 5.15 são apresentadas as curvas elaboradas com o modelo MPI-ESM1-2-HR indicando inclinação à redução das vazões características, para ambos os cenários e períodos. Verificando as variações da vazão Q_{95} com o período histórico (Equação 4.1), apresentada na Tabela 5.7, observam-se reduções mais acentuadas para o cenário SSP5-8.5, principalmente associada ao período de 2061-2100.

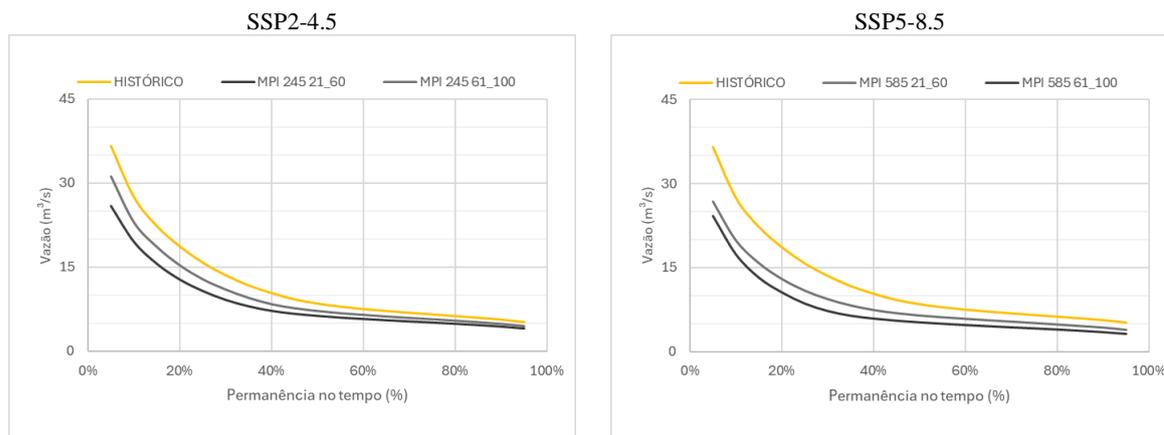


Figura 5.15 – Curva de Permanência sub-bacia 02 – Dom Joaquim, modelo MPI-ESM1-2-HR.
Fonte: A autora (2024).

Tabela 5.7 – Variação de vazões Q_{95} para a sub-bacia 02 – Dom Joaquim – Modelo MPI-ESM1-2-HR.

Período	SSP2-4.5	SSP5-8.5
2021-2060	-22 %	-24 %
2061-2100	-14 %	-38 %

Fonte: A autora (2024).

5.3.2 Variações da Q_{95} para a bacia do rio Santo Antônio

Analisando a bacia do rio Santo Antônio em sua totalidade, considerando as sete sub-bacias, na Figura 5.16 apresenta-se a variação das vazões Q_{95} , quando comparadas à mesma vazão característica histórica dos modelos. No geral, os cinco modelos tendem a uma redução em ambos os cenários, sendo mais expressiva no período entre 2061 e 2100, sugerindo uma tendência de intensificação da escassez com o tempo. O pessimismo mais expressivo está vinculado ao modelo CanESM5, onde o período de 2061 – 2100, para o cenário SSP5-8.5, apresenta variação de -79 % da vazão Q_{95} . Isso representa uma redução de 4.96 m³/s para 1.03 m³/s. Já as menores oscilações são observadas no modelo ACCESS-ESM1-5, cenário SSP2-4.5, período de 2061 a 2100, com -11 % e modelo INM-CM4-8, cenário SSP2-4.5, período 2021 a 2060, com -15 %. Em termos de vazão, tais variações representam redução de 4.96 m³/s para 4.43 m³/s e 5.06 m³/s para 4.28 m³/s, respectivamente.

Para representação geral da variação das projeções dos modelos, apresenta-se na Figura 5.17 a média associada a cada cenário e período.

Ressalta-se a importância da vazão Q_{95} , característica de vazões mínimas, utilizadas como parâmetro de disponibilidade hídrica pela ANA e outros estados, além de sua associação como vazão ecológica de referência (ANA, 2022).

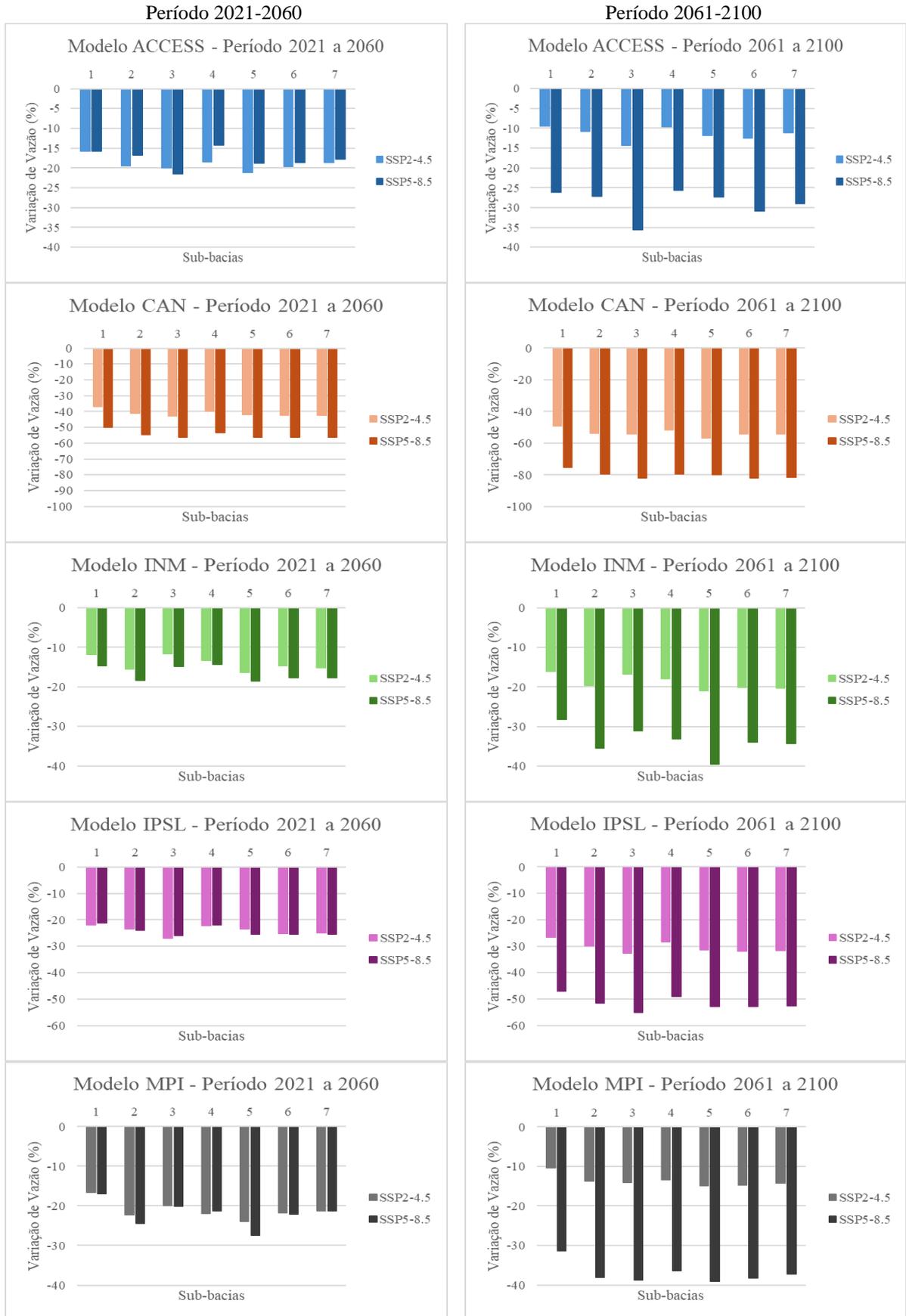


Figura 5.16 – Oscilações das vazões Q_{95} , apresentadas pelos modelos, períodos de 2021-2060 e 2061-2100, para as sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Santo Antônio.

Fonte: A autora (2024).



Figura 5.17 – Variação das oscilações das vazões Q_{95} dos modelos, considerando o cenário e período.
Fonte: A autora (2024).

5.4 Análise da disponibilidade hídrica da bacia

Segurança hídrica, segundo o Relatório Pleno Conjuntura dos Recursos Hídricos do Brasil 2021 (ANA, 2022), representa um cenário de equilíbrio entre disponibilidade hídrica, quantidade e qualidade, compatível para o consumo humano, atividades econômicas e conservação dos ecossistemas. As demandas hídricas consideradas no PIRH Doce compreendem os usos consuntivos como abastecimento humano (urbano e rural), dessedentação animal, abastecimento industrial, irrigação, mineração, geração de energia termoelétrica e aquicultura, aferidos conforme metodologia citada no “Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil”, elaborado pela ANA em 2019, e atualizados no PIRH 2023 (ENGEORPS ENGENHARIA, 2023).

Segundo ANA (2022), Minas Gerais é o segundo estado em consumo de água, ficando atrás apenas do Rio Grande do Sul, cujo maior consumo também está na irrigação. A bacia é citada ainda como uma das menos comprometidas da bacia do rio Doce, sob o ponto de vista quantitativo, possuindo apenas uma área crítica, localizada no município de Conceição do Mato Dentro. A identificação dessas áreas é resultado do balanço hídrico quantitativo cujo comprometimento das vazões de referência Q_{95} , $Q_{7,10}$ e Q_{90} é superior a 50 % que, para a DO3 referem-se as demandas para mineração que alcançam $0,16 \text{ m}^3/\text{s}$, contribuindo para um balanço de mais de 100 % no rio do Peixe e afluentes.

No estudo da Engecorps Engenharia (2023), as retiradas para o ano de 2020 e as projeções de consumo para 2032, considerando os usos consuntivos da sub-bacia do rio Santo Antônio (DO3), foram estimadas conforme dados apresentados na Tabela 5.8. Importante citar que no estudo apresentam-se uma série de análises de cenários, porém, aquele adotado como referência para o PIRH Doce, Cenário C3, não avalia a influência das mudanças climáticas. Importante destacar qual a definição do Cenário C3, também chamado de Exógeno Tendencial,

Endógeno Gestão Intensa, representa perspectivas exógenas de reproduzir, no futuro, as tendências históricas observadas na bacia e considera ações endógenas de gestão intensa.

Embora a bacia do rio Santo Antônio apresente certo conforto quanto ao balanço hídrico, como já citado, caso as reduções projetadas sejam concretizadas, a atual disponibilidade será alterada. Assim, deve-se atentar ao aumento do consumo uma vez que, considerando as variações calculadas na Tabela 5.8, teríamos uma previsão de retirada incompatível com as projeções de vazão superficial estimadas neste trabalho.

Tabela 5.8 – Estimativa das demandas hídricas de retirada atual (2020) e projeção (2032), para a sub-bacia do rio Santo Antônio.

Ano	2020 (m³/s)	2032 (Cenário C3) (m³/s)	Variação (%)
Abastecimento Urbano	0.36	0.33	-8 %
Abastecimento Rural	0.08	0.08	-1 %
Aquicultura	0.05	0.06	27 %
Dessedentação Animal	0.28	0.32	14 %
Industrial	2.35	2.36	0 %
Irrigação	0.57	0.82	44 %
Mineração	0.19	0.20	6 %
Termoelétrica	0.00	0.00	0 %
Outros	0.17	0.17	0 %
Total	4.05	5.00	23 %

Fonte: Adaptado ENGECORPS ENGENHARIA (2023).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do modelo MGB-IPH na bacia do rio Santo Antônio gerou boas respostas, com hidrogramas simulados e observados satisfatoriamente aderentes, além de bons resultados para os coeficientes de calibração dos postos fluviométricos. Dentre as limitações encontradas cita-se a impossibilidade de calibração da sub-bacia 07, função de sua localização à jusante da usina UHE Porto Estrela, porém, restrições são esperadas e aceitáveis dentre os modelos existentes atualmente.

A análise das curvas de permanência e variação das vazões Q_{95} das sub-bacias, a partir dos dados resultantes das simulações dos modelos, trouxeram como resultado uma tendência de redução das vazões, em maior ou menor escala, em ambos os cenários de emissões atmosféricas adotados e períodos analisados.

É fundamental destacar que a diminuição das vazões na bacia impactará não apenas o abastecimento humano e industrial, mas também outros usos da água que dependem das vazões mais frequentes, assim como a energia hidrelétrica. Portanto, vê-se como tendência a necessidade de uma gestão com olhar na avaliação dos impactos das mudanças climáticas, uma vez que, em cenários de escassez, os conflitos entre os diversos usuários tendem a se intensificar. Neste contexto, tratando-se de uma bacia com destaque as atividades de mineração, fica evidente e necessária a busca por alternativas que demandem menos água, uma vez que tal finalidade de consumo jamais será prioridade em um cenário de escassez hídrica. Com a tendência de um cenário de reduções, torna-se imprescindível o desenvolvimento e aplicação de estratégias de reuso, planos de segurança hídrica e outras alternativas que viabilizem a atividade.

Assim, o papel da modelagem hidroclimática se torna essencial para planejamento de setores que dependem dos recursos hídricos. Um sistema de projeção possibilitaria prever as variáveis afetadas pelos potenciais cenários de mudanças climáticas, facilitando a tomada de decisões e apoiando a implementação de medidas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

Com o modelo gerado, uma análise similar poderá ser replicada a outros pontos da bacia, como aqueles onde há grandes usuários de água. Por fim, como sugestão para trabalhos futuros, a análise conjunta da qualidade da água da bacia, frente ao aumento do consumo e possíveis alterações influenciadas pelas mudanças climáticas, torna-se um estudo importante para refinamento dos resultados aqui apresentados.

REFERÊNCIAS

- ALI, S. *et al.* Assessment of climate extremes in future projections downscaled by multiple statistical downscaling methods over Pakistan. **Atmospheric Research**, v. 222, n. January, p. 114–133, 2019.
- ALVES, M.E.; MEYER, A.O; FAN, F.M.; PAIVA, R. C. D. **Manual de Aplicação do Modelo MGB, Utilizando IPH-HYDRO TOOLS**. [s.l.] HGE, IPH, UFRGS, 2020.
- ANA. **Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico**. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>>. Acesso em 25 de ago. 2024a
- ANA. **Hidro - Sistema de Informações Hidrológicas**. Brasília, 2018. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/download>>. Acesso em 25 de ago. 2024b
- ANA. **Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**. - Brasília : ANA, 2024c.
- ANA. **Relatório Pleno Conjuntura de Recursos Hídricos Brasil 2021**. Disponível em: <<https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/>>. Acesso em 25 de jul. 2024. 2022
- ANA. **Relatório Pleno Conjuntura de Recursos Hídricos Brasil 2023**. 2024. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjunturainforme2023.pdf>>. Acesso em 28 de jul. 2024d.
- ANA. **SAR - Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin>>. Acesso em: 20 jul. 2023.
- ARGLES, A. P. K.; MOORE, J. R.; COX, P. M. Dynamic Global Vegetation Models: Searching for the balance between demographic process representation and computational tractability. **PLOS Climate**, v. 1, n. 9, p. e0000068, 2022.
- BARBOSA, M. D. A. **Análise da Influência das Mudanças Climáticas no Aproveitamento Hidroenergético da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2024.
- BRASIL. **Lei Federal nº 9.433/1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm>. Acesso em: 22 out. 2022.
- CBH-Santo Antônio**. Disponível em: <<https://www.cbhsantoantonio.org.br/a-bacia>>. Acesso em: 20 jun. 2023.
- CBH-Doce**. Disponível em: <<https://www.cbhdoce.org.br/pirh-parh-pap/pirh>>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- CPTEC-INPE. Projeta: **Guia Prático Ilustrado**. Disponível em: <https://ftp1.cptec.inpe.br/pesquisa/grpeta/petamd/Download/PROJETA/Guia_Projeta_Final_01-10.pdf>. Acesso em 15 abr. 2024.
- CGIAR-CSI. **Consortium for Spatial Information**. Disponível em: <<https://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>>. Acesso em: 22 set. 2022.
- COLLISCHONN, W.; GAMA, C.H.A.; SIQUEIRA, V.A; PAIVA, R.C.D.; FLEISCHMANN, A. S. **Manual de Referência Teórica do MGB**. Porto Alegre: HGE, IPH, UFRGS, 2020.

COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. [s.l.] Universidade do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2001.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, p. 95–118, 2001.

COSTA, R. L. *et al.* Climate change scenarios for the northeast region of Brazil through the statistical downscaling technique. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. Special Issue, p. 785–801, 2020.

ECOPLAN-LUME, C. **PIRH - Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce**. Disponível em: <<https://www.cbhdoce.org.br/pirh-parh-pap/pirh>>. Acesso em: 16 out. 2022.

ENGEORPS ENGENHARIA. Revisão e Atualização do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce (PIRH Doce), Incluindo seus Respective Planos Diretores de Recursos Hídricos (PDRHs)/Planos de Ações de Recursos Hídricos (PARHs), e Proposta de Enquadramento dos Corpos de Água da Bacia em Classes segundo os Usos Preponderantes e Atualização do Enquadramento dos Cursos d'Água da Bacia do Rio Piracicaba: **PP04 Prognóstico e Alternativas de Enquadramento**. 2022a

ENGEORPS ENGENHARIA. Revisão e Atualização do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce (PIRH Doce), Incluindo seus Respective Planos Diretores de Recursos Hídricos (PDRHs)/Planos de Ações de Recursos Hídricos (PARHs), e Proposta de Enquadramento dos Corpos de Água da Bacia em Classes segundo os Usos Preponderantes e Atualização do Enquadramento dos Cursos d'Água da Bacia do Rio Piracicaba. **PP07 Atualização do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce**. 2023

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D. E KAYSER, R. **Manual de Definição de Unidades de Resposta Hidrológica (Blocos) do Modelo MGB-IPH**. Versão 2.0 ed. Porto Alegre: IPH, 2010.

FAN, *et al.* Sobre o uso da persistência de previsões determinísticas de vazão para a tomada de decisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 218–228, 2016.

FAN, F. M. *et al.* An Hydrological Response Units Maps for all South America. **XXI Brazilian Symposium of Water Reserouces**, p. 8, 2015.

FERREIRA, F. L. V. **Disponibilidade Hídrica e Aptidão da Agricultura de Sequeiro e Irrigada no Cerrado**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2023.

GUERROUÉ, L. LE. **Influência das Mudanças Climáticas nas Vazões da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2019.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html?edicao=35938>>. Acesso em: 27 ago. 2023.

IDE-SISEMA. **Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos**. Disponível em: <<https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>>. Acesso em: 26 set. 2022.

IGAM. **Portaria IGAM nº 48, de 04 de Outubro de 2019**. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=49719>>.

IGAM. **PORTARIA IGAM Nº 23, DE 31 DE MAIO DE 2023**. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=57231>>.

IPCC. **Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** [s.l.] Cambridge University Press, 2021.

IPCC. **The Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC.** Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 1 ago. 2023.

LEÃO, R. DE S.; PAZ, M. G. A. DA; CIBIM, J. C. A outra face da crise: a importância do setor do saneamento no contexto da escassez hídrica. **Revista Acesso Livre**, v. 5, n. 5, p. 88–105, 2016.

LIMA, J. W. M., COLLISCHONN, W. E MARENGO, J. A. **Efeitos das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica.** São Paulo: AES Tietê, 2014.

MACEDO, M. B. **Relatório final de pós-doutorado: Theory of Change Observatory.** Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

MOREIRA, G. B. **Diagnóstico da disponibilidade hídrica superficial da bacia hidrográfica do rio Suaçuí - MG e os impactos dos usos insignificantes de água.** 2021. 99 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídrico – PROFÁGUA) Universidade Federal de Itajubá, 2021.

NASA. **NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections.**

PESSOA, M.; KAYSER, R.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo Hidrológico para Grandes Bacias MGB IPH e Sistemas de Informação Geográfica para suporte à decisão de outorga de direito de uso da água. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 9, n. 2, p. 21–33, 2012.

RETTIE, F. M. *et al.* High-resolution CMIP6 climate projections for Ethiopia using the gridded statistical downscaling method. **Scientific data**, v. 10, n. 1, p. 442, 2023.

SÁ, A. D. DE. **Uso da modelagem de qualidade da água na gestão dos recursos hídricos aplicada à bacia do rio Santo Antônio/MG.** [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2020.

SCHOEMAN, D. S. *et al.* Demystifying global climate models for use in the life sciences. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 38, n. 9, p. 843–858, 2023.

SEMAD. **Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável.** Disponível em: <<http://www.semad.mg.gov.br/>>. Acesso em: 17 out. 2022.

SETTI, A. A. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos.** 2. ed: ANEEL : ANA, 2001. 327 p. Disponível em: <<https://biblioteca.aneel.gov.br/acervo/detalhe/14274>>. Acesso em: 11 out. 2022.

SIGAAGUAS. **Sistema Integrado de Gestão das Águas.** Disponível em: <<https://sigaaguas.org.br/home/apps/repositorio/?group=agedoce>>. Acesso em: 26 set. 2022.

SILVA, B. M.; M.M.A.G. HERREROS.; BORGES F. Q. Gestão Integrada Dos Recursos Hídricos Como Política De Gerenciamento Das Águas No Brasil. **Revista de Administração da Universidade Federal de Santa Maria**, v. 10, n. 1, p. 101-15, 2017.

SINJ. **RESOLUÇÃO Nº 17, DE 15 DE AGOSTO DE 2017.** Disponível em: <http://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/b3b525cc84254d78bcca719d4e08f934/adasa_res_17_2017.html>. Acesso em: 4 ago. 2023.

SNIRH, S. N. DE I. SOBRE R. H. **Portal Hidroweb.** Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>. Acesso em: 17 out. 2022.

UNESCO. **Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos recursos Hídricos: água para um mundo sustentável**. Sumário Executivo. Programa de Avaliação Mundial da Água das Nações Unidas, Gabinete do Programa de Avaliação Global da Água. Divisão de Ciências Hídricas. UNESCO, 2015. Disponível em: <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015ExecutiveSummary_POR_web.pdf>. Acesso em: 24 out. 2021.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **HGE - Hidrologia de Grande Escala**. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos/sensoriamento-remoto/mapa-de-urhs-da-america-do-sul/>>. Acesso em: 30 jun. 2023.

VIRGÍLIO, R. M. **Operação de Usinas Hidrelétricas de Regularização sob Condições de Mudanças Climáticas: estudo de caso da UHE Três Marias Rebeca**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2018.

WAGNER R. SOARES. **Cenários de Mudanças Climáticas**. Disponível em: <<https://impactoclima.ufes.br/cenarios-de-mudancas-climaticas>>. Acesso em: 14 ago. 2023.

WALTER COLLISCHONN, CLÉBER GAMA, VINÍCIUS SIQUEIRA, R. P. A. F. **MANUAL DE REFERÊNCIA TEÓRICA DO MGB**. [s.l.] HGE, IPH, UFRGS, 2020.

ZHANG, Q. *et al.* A novel statistical downscaling approach for analyzing daily precipitation and extremes under the impact of climate change: Application to an arid region. **Journal of Hydrology**, v. 615, n. November, 2022.

ZHOU, T. New physical science behind climate change: What does IPCC AR6 tell us? **Innovation**, v. 2, n. 4, p. 100173, 2021.

ANEXO A – Parâmetros calibráveis

Sub-bacia 1

use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	183.90	0.60	2.88	19.68	0.60	0.00	0.10
FlorProf	367.80	0.34	5.77	39.36	0.60	0.00	0.10
AgriRas	183.90	0.86	2.88	19.68	0.60	0.00	0.10
AgriProf	367.80	0.60	5.77	39.36	0.60	0.00	0.10
CampRas	183.90	0.69	2.88	19.68	0.60	0.00	0.10
CampProf	367.80	0.43	5.77	39.36	0.60	0.00	0.10
Varzea	122.60	0.95	1.15	9.84	0.60	0.00	0.10
ASI	61.30	1.29	0.23	7.87	0.60	0.00	0.10
Agua	0	0	0	0	0	0	0
CS	58.68						
CI	61.50						
CB	4200.00						

Sub-bacia 2

use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	432.00	0.45	1.00	15.32	0.60	0.00	0.10
FlorProf	864.00	0.26	2.00	30.64	0.60	0.00	0.10
AgriRas	432.00	0.65	1.00	15.32	0.60	0.00	0.10
AgriProf	864.00	0.45	2.00	30.64	0.60	0.00	0.10
CampRas	432.00	0.52	1.00	15.32	0.60	0.00	0.10
CampProf	864.00	0.32	2.00	30.64	0.60	0.00	0.10
Varzea	288.00	0.71	0.40	7.66	0.60	0.00	0.10
ASI	144.00	0.97	0.08	6.13	0.60	0.00	0.10
Agua	0	0	0	0	0	0	0
CS	39.7						
CI	38.40						
CB	4304.00						

Sub-bacia 3

use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	321.60	0.84	1.91	23.95	0.60	0.00	0.10
FlorProf	643.20	0.48	3.83	47.90	0.60	0.00	0.10
AgriRas	321.60	1.19	1.91	23.95	0.60	0.00	0.10
AgriProf	643.20	0.84	3.83	47.90	0.60	0.00	0.10
CampRas	321.60	0.96	1.91	23.95	0.60	0.00	0.10
CampProf	643.20	0.60	3.83	47.90	0.60	0.00	0.10
Varzea	214.40	1.31	0.77	11.98	0.60	0.00	0.10
ASI	107.20	1.79	0.15	9.58	0.60	0.00	0.10
Agua	0	0	0	0	0	0	0
CS	46.7						
CI	80.80						
CB	1712.00						

Sub-bacia 4

use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	396.0	0.51	1.30	13.93	0.60	0.00	0.10
FlorProf	792.0	0.29	2.60	27.86	0.60	0.00	0.10
AgriRas	396.0	0.72	1.30	13.93	0.60	0.00	0.10
AgriProf	792.0	0.51	2.60	27.86	0.60	0.00	0.10
CampRas	396.0	0.58	1.30	13.93	0.60	0.00	0.10
CampProf	792.0	0.36	2.60	27.86	0.60	0.00	0.10
Varzea	264.0	0.80	0.52	6.97	0.60	0.00	0.10
ASI	132.0	1.08	0.10	5.57	0.60	0.00	0.10
Agua	0	0	0	0	0	0	0
CS	50.74						
CI	102.90						
CB	3940.00						

Sub-bacia 5

use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	768.90	0.54	0.67	10.14	0.60	0.00	0.10
FlorProf	1537.80	0.31	1.34	20.28	0.60	0.00	0.10
AgriRas	768.90	0.78	0.67	10.14	0.60	0.00	0.10
AgriProf	1537.80	0.54	1.34	20.28	0.60	0.00	0.10
CampRas	768.90	0.62	0.67	10.14	0.60	0.00	0.10
CampProf	1537.80	0.39	1.34	20.28	0.60	0.00	0.10
Varzea	512.60	0.86	0.27	5.07	0.60	0.00	0.10
ASI	256.30	1.17	0.05	4.06	0.60	0.00	0.10
Agua	0	0	0	0	0	0	0
CS	42.14						
CI	183.80						
CB	3916.00						

Sub-bacia 6

use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	636.9	0.22	3.40	14.90	0.60	0.00	0.10
FlorProf	1273.8	0.12	6.80	29.80	0.60	0.00	0.10
AgriRas	636.9	0.31	3.40	14.90	0.60	0.00	0.10
AgriProf	1273.8	0.22	6.80	29.80	0.60	0.00	0.10
CampRas	636.9	0.25	3.40	14.90	0.60	0.00	0.10
CampProf	1273.8	0.15	6.80	29.80	0.60	0.00	0.10
Varzea	424.6	0.34	1.36	7.45	0.60	0.00	0.10
ASI	212.3	0.46	0.27	5.96	0.60	0.00	0.10
Agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS	52.56						
CI	181.10						
CB	4918.00						