

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CÂMPUS PATO BRANCO**

LUCAS RICKLI DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOB A
SEGURANÇA HÍDRICA DO SISTEMA CANTAREIRA**

PATO BRANCO

2024

LUCAS RICKLI DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOB A
SEGURANÇA HÍDRICA DO SISTEMA CANTAREIRA**

Assessment climate change impacts on water security of the Cantareira system

Trabalho de conclusão de curso de dissertação
apresentada como requisito para obtenção do título
de mestre em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Cesar Augusto Medeiros Destro.

Coorientador(a): Murilo Cesar Lucas.

PATO BRANCO

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Pato Branco



LUCAS RICKLI DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOB A SEGURANÇA HÍDRICA DO SISTEMA CANTAREIRA

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Meio Ambiente.

Data de aprovação: 23 de Agosto de 2024

Dr. Cesar Augusto Medeiros Destro, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Murilo Cesar Lucas, Doutorado - Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

Dra. Gabriela Chiquito Gesualdo, Doutorado - Pennsylvania State University

Dr. Tiago Souza Mattos, Doutorado - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (Ufms)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 16/10/2024.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que com bondade e amor guiou o meu caminho até aqui. Sem Ele, eu não teria encontrado suporte e forças nos momentos mais difíceis. À Ele toda honra e toda a glória.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Cesar Augusto Medeiros Destro e meu coorientador Prof. Dr. Murilo Cesar Lucas, pela disposição em me orientar, por todo o tempo dedicado, pelas importantes contribuições e, principalmente, pela paciência e compreensão em meio as (muitas) dificuldades e contratempos na realização deste trabalho.

Agradeço aos meus familiares e amigos, que me acompanharam neste processo, estes tornaram a maioria dos meus dias mais alegres e tranquilos, e também me ajudaram (ou melhor, me aguentaram) nos dias de angústia e tristeza. De forma especial, agradeço a minha amada esposa Arielle, que é minha parceira de todos os dias. Também aos meus pais, minha família e amigos mais próximos, essenciais em minha vida.

Agradeço às pessoas que me auxiliaram e me “salvaram” em diversos momentos, especialmente aos pesquisadores/professores Dr. André Almagro, Dr. André Ballarin, Dra. Gabriela Chiquito Gesualdo, Dr. Tiago Souza Mattos, Dr. Hugo de Oliveira Fagundes. Todos tiveram uma importante contribuição técnica para este trabalho.

Eu poderia citar dezenas de nomes, pois não foram poucas pessoas que fizeram parte de momentos singulares e significativos. Obrigado a todos que estiveram comigo. Vocês são especiais.

RESUMO

Os impactos das mudanças climáticas representam uma ameaça à segurança hídrica de reservatórios de abastecimento e podem prejudicar o fornecimento de água potável à população. Eventos de seca hidrológica são um exemplo disto e têm ocorrido com maior frequência em diversas regiões do mundo. A compreensão destes impactos é essencial para uma gestão de recursos hídricos que vise a segurança hídrica. No entanto, há uma necessidade de estudos que explorem de maneira abrangente os impactos das mudanças climáticas neste contexto. Neste trabalho, investigamos os impactos das mudanças climáticas na segurança hídrica do sistema Cantareira, que é o principal sistema de abastecimento de água para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e um dos maiores do mundo. Primeiramente, utilizando dados observados de precipitação e evapotranspiração, calibramos e validamos um modelo hidrológico conceitual, obtendo valores satisfatórios de métricas estatísticas. Para representar possíveis cenários futuros de mudanças climáticas, consideramos dois cenários de emissão do projeto CMIP6 (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) e utilizamos um conjunto de projeções futuras geradas por um *ensemble* de 10 modelos climáticos globais (MCGs). Esses dados foram utilizados para direcionar o modelo hidrológico para simular vazões para a área de estudo. Assim, foram analisados os regimes futuros de vazão e realizada avaliação da segurança hídrica do ponto de vista do excesso, escassez e vulnerabilidade hídrica. Nossos resultados indicam que a vazão dos rios deve apresentar maior variabilidade anual, com aumentos significativos da vazão simulada entre dezembro e março, e pequenos decréscimos entre maio e julho. Os resultados apontam para riscos associados ao excesso hídrico e inundações, sendo janeiro o mês mais úmido, os indicadores de segurança hídrica sugerem agosto e setembro como os meses mais vulneráveis. Em suma, nossa análise expõe a fragilidade da segurança hídrica do sistema Cantareira e fornece informações técnicas e científicas que podem ser utilizadas na elaboração de estratégias para lidar com a insegurança hídrica no futuro.

Palavras-chave: Segurança Hídrica, Mudanças Climáticas, Modelagem Hidrológica.

ABSTRACT

The impacts of climate change pose a threat to water security of supply reservoirs and can affect the provision of potable water. Hydrological drought events exemplify this threat and have been occurring more frequently in various regions worldwide. Understanding these impacts is essential for water resource management aimed at ensuring water security. However, there is a lack of comprehensive studies exploring the impacts of climate change in this context. In this study, we investigate the impacts of climate change on the water security of the Cantareira system, the primary water supply system for the São Paulo Metropolitan Region (SPMR) and one of the largest in the world. First, using daily observed precipitation and evapotranspiration data, we calibrated and evaluated a conceptual hydrological model, achieving satisfactory statistical metrics. To represent possible future climate change scenarios, we considered two emission scenarios from the CMIP6 project (SSP2-4.5 and SSP5-8.5) and used a set of future projections generated by an ensemble of 10 Global Climate Models (GCMs). These data were used to drive the hydrological model to simulate streamflows for the study area. Consequently, future streamflow values were analyzed, and water security was assessed from the perspectives of excess, scarcity, and vulnerability. Our results indicate that streamflow is expected to exhibit greater annual variability, with significant increases in simulated flow between December and March, and slight decreases between May and July. The results highlight risks associated with excess water and flooding, with January being the wettest month, while the analysis of water security indicators identifies August and September as the most vulnerable months. Overall, our analysis exposes the fragility of the Cantareira system's water security and provides technical and scientific information that can be utilized in developing strategies to address future water insecurity.

Keywords: Water Security, Climate Change, Hydrologic Modelling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mudanças na temperatura da superfície global, (a) reconstruída de 1-2000 e observada de 1850-2020, (b) observada e simulada considerando interferência humana e natural de 1850-2020.	26
Figura 2 - Cenários de projeções climáticas do IPCC até 2100 para (a) aumento da temperatura global na superfície relativa a 1850-1900, (b) área de gelo marinho, (c) pH da superfície global do oceano e (d) nível médio global dos oceanos.....	27
Figura 3 - Matriz de SSPs: Shared Socio-economic Pathways.....	29
Figura 4 - Comparação entre cenários RCP e SSP	31
Figura 5 - Delineamento da metodologia.....	38
Figura 6 - – Localização das bacias hidrográficas à montante dos reservatórios superficiais que compõem o Sistema Cantareira. Não está sendo considerada a transposição de águas da bacia do Rio Paraíba do Sul.	40
Figura 7 - Esquema do funcionamento do sistema Cantareira	40
Figura 8 - Mapa de declividades das bacias hidrográficas à montante dos reservatórios superficiais que compõem o Sistema Cantareira	41
Figura 9 - Representação esquemática do modelo conceitual utilizado no estudo.	44
Figura 10 - Vazões diárias observadas e simuladas para o período de calibração do modelo (2000-2007) para a bacia do rio Jaguari-Jacareí.....	55
Figura 11 - Vazões diárias observadas e simuladas para o período de calibração do modelo (2000-2007) para a bacia do rio Cachoeira	56
Figura 12 - Vazões diárias observadas e simuladas para o período de calibração do modelo (2000-2007) para a bacia do rio Atibainha	56
Figura 13 - Vazões diárias observadas e simuladas para o período de calibração do modelo (2000-2007) para a bacia do rio Paiva Castro	57
Figura 14 - Vazões diárias observadas e simuladas para o período de validação do modelo (2008-2015) para a bacia do rio Jaguari-Jacareí.....	58
Figura 15 - Vazões diárias observadas e simuladas para o período de validação do modelo (2008-2015) para a bacia do rio Cachoeira	58
Figura 16 - Vazões diárias observadas e simuladas para o período de validação do modelo (2008-2015) para a bacia do rio Atibainha	59
Figura 17 - Vazões diárias observadas e simuladas para o período de validação do modelo (2008-2015) para a bacia do rio Paiva Castro	59
Figura 18 - Projeções de precipitação média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Jaguari-Jacareí... ..	62
Figura 19 - Projeções de precipitação média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Cachoeira	63
Figura 20 - Projeções de precipitação média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Atibainha	64
Figura 21 - Projeções de precipitação média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório Paiva Castro.....	65
Figura 22 - Projeções de evapotranspiração média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório Jaguari Jacareí	66
Figura 23 - Projeções de evapotranspiração média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório Cachoeira	67
Figura 24 - Projeções de evapotranspiração média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório Atibainha.....	68

Figura 25 - Projeções de evapotranspiração média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Paiva Castro ..	69
Figura 26 - Projeções de vazão média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Jaguari-Jacareí.....	71
Figura 27 - Comparação entre as projeções de vazão média mensal deste trabalho (a) e de Gesualdo et al. (2019) (b), para a bacia do reservatório do Jaguari.	72
Figura 28 - Projeções de vazão média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Cachoeira	72
Figura 29 - Projeções de vazão média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Atibainha.....	73
Figura 30 - Projeções de vazão média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Paiva Castro.....	74
Figura 31 - Indicador de escassez hídrica para a bacia do reservatório do Jaguari-Jacareí.....	76
Figura 32 - Indicador de vulnerabilidade hídrica para a bacia do reservatório do Jaguari-Jacareí	77
Figura 33 - Indicador de escassez hídrica para a bacia do reservatório do Cachoeira	77
Figura 34 = Indicador de vulnerabilidade hídrica para a bacia do reservatório do Cachoeira.....	78
Figura 35 - Indicador de escassez hídrica para a bacia do reservatório do Atibainha	78
Figura 36 - Indicador de vulnerabilidade hídrica para a bacia do reservatório do Atibainha	79
Figura 37 - Indicador de escassez hídrica para a bacia do reservatório do Paiva Castro.....	79
Figura 38 - Indicador de vulnerabilidade hídrica para a bacia do reservatório do Paiva Castro	80
Figura 39 - Comparação entre vazão decamilenar e vazões observadas e projetadas para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Jaguari-Jacareí	82
Figura 40 - Comparação entre vazão decamilenar e vazões observadas e projetadas para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Cachoeira.....	83
Figura 41 - Comparação entre vazão decamilenar e vazões observadas e projetadas para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Atibainha	84
Figura 42 - Comparação entre vazão decamilenar e vazões observadas e projetadas para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Paiva Castro	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Descrição das variáveis disponibilizadas pelo dataset de Xavier et al. (2016)	42
Quadro 2 - Dados de entrada para a modelagem hidrológica (calibração e validação)	42
Quadro 3 - Descrição dos parâmetros do modelo conceitual utilizado no trabalho.....	44
Quadro 4 - Métricas estatísticas para avaliação do desempenho do modelo hidrológico conceitual	45
Quadro 5 - Descrição das variáveis do CLIMBra	46
Quadro 6 - Descrição dos Modelos Climáticos Globais (MCGs) utilizados no trabalho	47
Quadro 7 - Dados de entrada para simulação hidrológica (projeções futuras).....	47
Quadro 8 - Séries temporais futuras geradas para a área de estudo com a simulação hidrológica.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros ótimos e métricas do processo de calibração/validação do modelo.....	54
Tabela 2 - Diferenças relativas entre as precipitações médias mensais projetadas e observadas para a bacia do reservatório do Jaguari-Jacareí.....	62
Tabela 3 - Diferenças relativas entre as precipitações médias mensais projetadas e observadas para a bacia do reservatório do Cachoeira	63
Tabela 4 - Diferenças relativas entre as precipitações médias mensais projetadas e observadas para a bacia do reservatório do Atibainha	64
Tabela 5 - Diferenças relativas entre as precipitações médias mensais projetadas e observadas para a bacia do reservatório Paiva Castro.....	65
Tabela 6 - Diferenças relativas entre a evapotranspiração média mensal projetada e observada para a bacia do rio Jaguari-Jacareí	67
Tabela 7 - Diferenças relativas entre a evapotranspiração média mensal projetada e observada para a bacia do rio Cachoeira	67
Tabela 8 - Diferenças relativas entre a evapotranspiração média mensal projetada e observada para a bacia do rio Atibainha	68
Tabela 9 - Diferenças relativas entre a evapotranspiração média mensal projetada e observada para a bacia do reservatório do Paiva Castro	69
Tabela 10 - Diferenças relativas entre a vazão média mensal projetada e observada para a bacia do reservatório do Jaguari-Jacareí.....	71
Tabela 11 - Diferenças relativas entre a vazão média mensal projetada e observada para a bacia do reservatório do Cachoeira	72
Tabela 12 - Diferenças relativas entre a vazão média mensal projetada e observada para a bacia do reservatório do Atibainha.....	73
Tabela 13 - Diferenças relativas entre a vazão média mensal projetada e observada para a bacia do reservatório do Paiva Castro.....	74
Tabela 14 - Demanda de abastecimento da RMSP para cada um dos reservatórios do sistema Cantareira	75
Tabela 15 - Valores de p do teste de Kolmogorov-Smirnov para os dados de vazão média mensal dos reservatórios do sistema Cantareira.....	81
Tabela 16 - Proporção relativa entre as vazões projetadas e observadas e a vazão decamilenar para a bacia do reservatório do Jaguari-Jacareí.....	82
Tabela 17 - Proporção relativa entre as vazões projetadas e observadas e a vazão decamilenar para a bacia do reservatório do Cachoeira	83
Tabela 18 - Proporção relativa entre as vazões projetadas e observadas e a vazão decamilenar para a bacia do reservatório do Atibainha	84
Tabela 19 - Proporção relativa entre as vazões projetadas e observadas e a vazão decamilenar para a bacia do reservatório do Paiva Castro	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AR-5	Fifth Assessment Report
AR-6	Sixth Assessment Report 6
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project Phase
Cfa	Clima subtropical
CO ₂	Gás carbônico
ET _o	Evapotranspiração potencial de referência
GCM	General Circulation Model
GEE	Gases de Efeito Estufa
Gw	Gigawatts
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Changes
km ²	Quilômetros quadrados
m/s ²	Metro por segundo ao quadrado
m ³ /s	Metro cúbico por segundo
mm	Milímetros
MSE	Erro Quadrático Médio
MW	Megawatts
NSE	Coefficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe
Patm	Pressão Atmosférica
r	Coefficiente de correlação de Pearson
RCP	Representative Concentration Pathways
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
RS	Radiação Solar Incidente
SHE	Système Hydrologique Européen
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SYR	The Synthesis Report
T _{máx}	Temperatura máxima
T _{mín}	Temperatura Mínima
T	Temperatura do Bulbo Seco
UNEP	United Nations Environment Programme
UR	Umidade Relativa do Ar
WMO	World Meteorological Organization
WGI	Working Group I
WGII	Working Group II
WGIII	Working Group III
W/m ²	Watt por metro quadrado
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivo Geral.....	16
2.2	Objetivos Específicos	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	Modelos Hidrológicos	17
3.1.1	Hidrologia e processos hidrológicos	17
3.1.2	Modelagem Hidrológica	18
3.1.3	Propósito e classificação de modelos hidrológicos.....	19
3.1.4	Modelagem conceitual flexível.....	21
3.1.5	Calibração e validação	23
3.2	Mudanças Climáticas.....	23
3.2.1	O Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados - CMIP 6.....	27
3.2.2	Modelos Climáticos	31
3.2.3	Desempenho dos Modelos Climáticos Globais do CMIP6.....	32
3.2.4	Mudanças climáticas em estudos hidrológicos	32
3.3	Segurança Hídrica	35
4	MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1	Área de Estudo	38
4.2	Aquisição de dados hidrológicos e meteorológicos	41
4.3	Calibração e validação do modelo hidrológico.....	42
4.3.1	Modelagem hidrológica	43
4.3.2	Métricas de avaliação do desempenho do modelo hidrológico	44
4.4	Dados climáticos dos Modelos Climáticos Globais do CMIP6	46
4.5	Simulação hidrológica para cenários futuros do CMIP6.....	47
4.5.1	Cálculo da evapotranspiração potencial de referência (ET _o)	48
4.6	Impacto das mudanças climáticas	50
4.7	Análise da segurança hídrica	50
4.7.1	Níveis de provisão de água	51
4.7.2	Uso e demanda de água.....	51
4.7.3	Indicadores de escassez e vulnerabilidade hídrica.....	52
4.7.4	Vazão decamilenar	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
5.1	Dados hidrológicos e meteorológicos históricos da área de estudo	54

5.2	Modelagem Hidrológica	54
5.2.1	Calibração do modelo	54
5.2.2	Validação do modelo conceitual	57
5.2.3	Projeções de precipitação para os reservatórios do sistema Cantareira	60
5.2.4	Projeções de evapotranspiração para reservatórios do sistema Cantareira	65
5.3	Simulação Hidrológica.....	69
5.3.1	Projeções de vazão para os reservatórios do sistema Cantareira	70
5.4	Análise da segurança hídrica	75
5.4.1	Indicadores de escassez e vulnerabilidade hídrica.....	75
5.4.2	Vazão decamilenar	80
6	CONCLUSÃO	86
	REFERÊNCIAS	88

1 INTRODUÇÃO

Segurança hídrica pode ser definida como a capacidade de garantir o acesso da população à água em quantidade e qualidades adequadas para sustentar meios de subsistência, o bem-estar humano e desenvolvimento socioeconômico, assegurar a proteção contra poluição e desastres relacionados à água (GELFAN, 2023; GREY; SADOFF, 2007).

As ameaças à segurança hídrica envolvem três problemas principais: escassez hídrica, excesso de água e perda da qualidade da água. A segurança hídrica pode então ser alcançada por meio de uma gestão eficiente dos recursos hídricos, considerando tanto seu potencial produtivo quanto seu potencial destrutivo, a fim de promover o desenvolvimento sustentável. A manutenção da segurança hídrica é um tema complexo e pode ser influenciada por vários fatores, dentre estes, é importante destacar o aspecto das mudanças climáticas, especialmente o estudo dos impactos decorrentes das alterações climáticas (FONSECA; ANDRADE; SANTOS, 2022; JARAMILLO; NAZEMI, 2018).

As mudanças climáticas representam uma ameaça global significativa à segurança hídrica. De acordo com os últimos relatórios do Intergovernamental Panel on Climate Change – IPCC (IPCC, 2023), as atividades humanas, por meio da emissão de gases de efeito estufa (GEE), provocaram o aquecimento do clima global, com um aumento de 1.1°C na temperatura média da superfície terrestre no início do século XXI (2011-2020) em relação ao século anterior (1850-1900). Muitas regiões do mundo estão experienciando os impactos das mudanças climáticas no dia a dia através do aumento da ocorrência de chuvas fortes, inundações e secas. No geral, estes eventos extremos e desastres naturais relacionados à água são reconhecidos como as principais ameaças impostas pelas mudanças climáticas tanto para a sociedade quanto para o meio ambiente (GELFAN, 2023).

As secas, em particular, são eventos climáticos que causam desequilíbrios hidrológicos, elas iniciam com um déficit de precipitação (seca meteorológica), que pode evoluir para déficits de vazão dos rios e níveis de reservatórios (seca hidrológica), reduzindo a capacidade de abastecimento de água (SHAMSHIRBAND et al., 2020). A forte seca hidrológica que atingiu a região sudoeste do Brasil em 2014 é um exemplo dos impactos que as secas podem ter na segurança hídrica. Durante esse período, o Sistema Cantareira, principal fonte de abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo

(RMSP), sofreu uma queda drástica em sua capacidade, afetando o abastecimento de cerca de 9 milhões de pessoas (CUSTÓDIO, 2015).

Com as previsões de que os impactos das mudanças climáticas agravarão a tensão entre oferta e demanda de água, torna-se essencial avaliar a implicação desses impactos na segurança hídrica de reservatórios de abastecimento de água potável (KUMAR, 2015; TIWARI; MISHRA, 2022; YIN et al., 2022). Uma metodologia eficaz para tal avaliação é a utilização de modelagem hidrológica combinada com modelos climáticos globais. Esta abordagem vem sendo utilizada em diversas regiões do mundo, pois permite simular a vazão dos rios e avaliar a capacidade de abastecimento dos reservatórios sob diferentes cenários de projeções climáticas (DHAMI; PANDEY, 2013).

No entanto, no Brasil ainda é pouca a literatura que trata especificamente deste assunto, estudos como o de Gesualdo et al. (2019) e Sone et al. (2022), que avaliaram os impactos das mudanças climáticas na segurança hídrica da bacia do rio Jaguari, parte do Sistema Cantareira, são exemplos de contribuição científica no país referente ao tema. Ainda sim, existe uma necessidade de pesquisas que forneçam atualizações e análises mais abrangentes, bem como utilizem de projeções climáticas mais recentes.

Este trabalho busca preencher essa lacuna na literatura, com o objetivo principal de avaliar os impactos das mudanças climáticas na segurança hídrica do sistema Cantareira, utilizando os modelos do projeto CMIP6. Este estudo segue, em partes, a metodologia proposta por Gesualdo et al. (2019), visando atualizar e expandir as análises dos impactos climáticos, não apenas na bacia do rio Jaguari, mas em todos os reservatórios que compõem o Sistema Cantareira.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a segurança hídrica do sistema Cantareira sob o efeito de mudanças climáticas utilizando 10 climáticos globais do Projeto CMIP6.

2.2 Objetivos Específicos

1. Calibrar e validar um modelo hidrológico para as bacias dos quatro reservatórios do sistema Cantareira: Jaguari-Jacaré, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro.
2. Obter projeções climáticas de precipitação, evapotranspiração e temperatura para o sistema Cantareira, a partir de 10 Modelos Climáticos Globais.
3. Simular e analisar as vazões futuras dos reservatórios do sistema Cantareira.
4. Analisar os impactos hidrológicos das mudanças climáticas na segurança hídrica do sistema Cantareira.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Modelos Hidrológicos

3.1.1 Hidrologia e processos hidrológicos

A Hidrologia é a geociência que estuda e trata da água na superfície terrestre, sua ocorrência, circulação e distribuição, suas propriedades físicas e químicas, bem como sua relação com o meio ambiente e seres vivos (DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015).

Um de seus principais objetivos é a compreensão dos fluxos e interações da água sobre e sob a terra e as trocas com a atmosfera, analisando sua relação com o meio ambiente em cada fase do ciclo hidrológico (CALIXTO, 2020).

Mesmo em meio a significativos progressos na capacidade de assimilar e processar grandes quantidades de dados, a variabilidade natural dos processos envolvidos e a falta de teorias que expliquem adequadamente processos em diferentes escalas espaciais conferem a esta ciência alto grau de incertezas (aleatórias e epistêmicas) (CALIXTO, 2020).

Quando isolados e analisados em microescala, muitos processos hidrológicos são bem caracterizados e descritos pelas teorias existentes (por exemplo, equação de Richards para escoamento de água em solos não saturados). Entretanto, em macroescala, as heterogeneidades e interdependências com fenômenos atmosféricos, ecossistemas e as atividades humanas, entre outros, tornam a Hidrologia uma ciência de comportamento complexo e difícil previsão, sendo necessários estudos experimentais e contínua coleta de dados em diferentes circunstâncias (KUMAR, 2015).

O ciclo hidrológico é o componente central da Hidrologia e consiste em uma série de processos (precipitação, evaporação, interceptação, infiltração, transpiração, escoamento superficial, escoamento subterrâneo) que ocorrem em escalas locais e globais (KUMAR, 2015).

Sistemas hidrológicos geralmente são avaliados em termos do balanço hídrico, aplicável em diferentes escalas temporais ou espaciais (CALIXTO, 2020). As estimativas das variáveis de entrada, saída e de estado, bem como parâmetros adotados para delimitar um sistema hidrológico, possuem diversas incertezas associadas. Ainda assim, muitas aplicações hidrológicas, com diferentes graus de complexidade, encontram na equação

de balanço hídrico uma forma de restringir e relacionar, de uma forma fisicamente baseada, os processos envolvidos (BEVEN, 2019).

Devido à rápida urbanização e industrialização, incluindo as mudanças climáticas e mudanças na cobertura da terra, várias alterações ocorreram nos sistemas hidrológicos. Diferentes processos e fenômenos que ocorrem dentro do ciclo hidrológico devem ser estudados minuciosamente para descrever essas variações (DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015).

Atualmente, vários modelos hidrológicos foram e vêm sendo desenvolvidos em todo o mundo para auxiliar no estudo das mudanças dos sistemas hidrológicos, bem como do impacto do clima na hidrologia e nos recursos hídricos (DHAMI; PANDEY, 2013).

3.1.2 Modelagem Hidrológica

Um modelo é uma representação simplificada de um processo ou fenômeno do mundo real. Seu objetivo é obter resultados próximos da realidade utilizando a menor quantidade de parâmetros possível (SALIS et al., 2019).

Na hidrologia, modelos hidrológicos são ferramentas que realizam uma representação matemática e buscam descrever e prever o comportamento de sistemas e processos hidrológicos (SALIS et al., 2019).

Jain et al. (2003) caracterizam os sistemas hidrológicos em acordo com as seguintes propriedades:

- Sistemas físicos: Representam um ente real;
- Sequenciais: Consistem em entradas, saídas e um meio de processamento;
- Dinâmicos: Cada entrada, a depender das condições anteriores, não resulta em uma saída única.

O exemplo prático de sistema hidrológico é a bacia hidrográfica. A sua modelagem matemática busca simular os fluxos de matéria e energia através de suas fronteiras (MEIRA NETO, 2013).

A modelagem de uma bacia pode ser entendida como a estrutura de um modelo matemático dinâmico e seus componentes. Apresentando variáveis de entrada (precipitação, temperatura, radiação solar), de estado (nível d'água do aquífero, umidade do solo, entre outras) e de saída (vazão, evapotranspiração, etc) (JAIN; SINGH, 2003).

3.1.3 Propósito e classificação de modelos hidrológicos

Os modelos hidrológicos são utilizados com dois propósitos principais: descrever o sistema em estudo (estabelecendo suas relações internas e fenômenos que nele ocorrem) e fazer previsões sobre o comportamento deste sistema em situações não observadas (BLÖSCHL; SIVAPALAN, 1995). O uso destes modelos busca melhor compreensão dos processos, testar hipóteses e dar suporte a tomada de decisões (MOGES et al., 2021).

A modelagem hidrológica é usada, por exemplo, para predição de vazões em estudos de operação de reservatórios, prevenção de eventos severos de seca, inundações, na avaliação da disponibilidade hídrica, estudos de impactos de mudanças climáticas, mudanças no uso da terra, entre outros (SINGH, 2018).

Cada vez mais modelos vêm sendo desenvolvidos para estudar processos que ocorrem em bacias hidrográficas (escoamento, sedimentação, entre outros), o desenvolvimento de novos modelos e melhora no desempenho dos já existentes serve como ferramenta de suporte aos gestores e executores de políticas de gestão de recursos hídricos (ASGARI et al., 2022).

Em geral, modelos hidrológicos buscam extrapolar espacial e temporalmente dados observados de modo a obter informações de interesse. Por natureza, eles não são capazes de representar as complexidades do mundo real, de maneira que os resultados obtidos por meio deles certamente conterão incertezas. A redução destas incertezas é o que motiva o avanço no desenvolvimento destes modelos, pelo aumento do poder preditivo e reconhecimento de que ainda há muito a se fazer para descrever a dinâmica e as interações com os compartimentos hidrológicos (BLÖSCHL et al., 2019).

Conforme Meira Neto (2013), a classificação de modelos hidrológicos já foi abordada diversas vezes na literatura. Frequentemente, os modelos hidrológicos são classificados conforme o tamanho da série temporal das variáveis de entrada (contínuo ou baseado em evento), conforme à variabilidade espacial das variáveis e parâmetros (concentrado ou distribuído) e conforme à aleatoriedade das variáveis e parâmetros (estocástico ou determinístico).

Modelos concentrados e distribuídos são, em geral, os mais utilizados em estudos de reservatórios, gestão de recursos hídricos, mudanças no uso e ocupação do solo (DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015).

3.1.3.1 Modelos Conceituais

Geralmente os modelos conceituais são concentrados e simulam os processos hidrológicos da bacia hidrográfica por meio de reservatórios interconectados, sendo carregados por chuva, infiltração e percolação e esvaziados por processos de evaporação, escoamento e drenagem (DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015).

Os parâmetros dos modelos conceituais usualmente não são representados por entidades físicas, passíveis de medição em campo. Equações semiempíricas são utilizadas neste tipo de modelo e seu uso depende de processos de calibração (manual ou automática) pela comparação com dados observados (MEIRA NETO, 2013).

Uma vez que estes parâmetros estejam calibrados, é possível relacioná-los às características físicas da bacia em estudo. São exemplos de modelos conceituais: o modelo TOPMODEL, HYMOD, Superflex e HBV (QUAN et al., 2015).

Em modelos conceituais deseja-se reduzir as incertezas e obter com precisão os parâmetros do modelo. É necessário o equilíbrio entre a complexidade do modelo, a disponibilidade dos dados e o objetivo da modelagem (SEIBERT, 1999).

Wagener et al. (2001) lista algumas características desejadas no processo de modelagem conceitual:

- Equilíbrio entre a complexidade do modelo, suportado pela disponibilidade de dados, com a aplicação desejada;
- Otimização do uso das informações disponíveis buscando reduzir as incertezas (estruturais e paramétricas);
- Calibração multiobjetivo de parâmetros baseada em variáveis de fluxo e de estado.

Em termos de avaliação dos impactos das mudanças climáticas, é comum o uso de modelos conceituais, estes têm o potencial de obter predições da quantificação do escoamento superficial, descarga e outras variáveis relacionadas (SANTOS et al., 2014).

3.1.3.2 Modelos Físicos

Os modelos físicos possuem descrições mais detalhadas dos processos físicos que ocorrem na bacia, sendo uma representação matematicamente idealizada do fenômeno real. Isso se reflete na natureza de suas variáveis e parâmetros, que são fundamentados em grandezas físicas mensuráveis e são funções de tempo e espaço, como condutividade hidráulica do solo e índice de área foliar (MEIRA NETO, 2013).

Devido à natureza física dos parâmetros, tais modelos têm menor dependência de variáveis observadas, o que pode viabilizar sua utilização em bacias não monitoradas. Porém, problemas de compatibilização de escala das unidades espaciais e o grande número de parâmetros que descrevem as características físicas da bacia tornam comum a prática de calibração em modelos físicos, como acontece nos modelos conceituais (DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015; DHAMI; PANDEY, 2013).

Um exemplo desta classe de modelos é o SHE (Système Hydrologique Européen) e o SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015).

Devido a sua natureza, modelos físicos são distribuídos, ou seja, seus parâmetros e variáveis estão distribuídos pela bacia e variam espacialmente. Por depender ainda de uma grande quantidade de parâmetros, modelos físicos sofrem com a super parametrização, o que pode dificultar a sua aplicação. (NOVAIS, 2016).

3.1.3.3 Modelos Empíricos

Os modelos empíricos, também conhecidos como caixa preta, são modelos baseados em dados de variáveis observadas. As equações utilizadas em tais modelos não têm fundamentação física na descrição dos processos, como no caso dos modelos físicos e conceituais, mas na análise dos dados de entrada e de saída. (MEIRA NETO, 2013)

Um exemplo deste tipo de modelo é o hidrograma unitário, bem como os métodos estatísticos de regressão linear. Estes são modelos orientados à observação, baseados apenas nas informações dos dados existentes sem considerar as características e processos do sistema hidrológico. Geralmente modelos métricos envolvem equações matemáticas derivadas de séries temporais de entrada e saída do sistema e não dos processos físicos da bacia hidrográfica, sendo válidos apenas dentro dos limites estabelecidos no estudo. (DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015)

3.1.4 Modelagem conceitual flexível

É essencial que um modelo hidrológico seja uma representação da realidade, para que possa desempenhar seu papel como uma ferramenta de compreensão dos sistemas hidrológicos. É importante enfatizar que nenhum modelo hidrológico representa perfeitamente os processos hidrológicos; esses modelos são, na verdade, simplificações

hipotéticas de como o sistema opera (CLARK; KAVETSKI; FENICIA, 2011). Modelos eficazes são aqueles que exibem melhor desempenho e menores incertezas (SAVENIJE, 2009).

Muitas vezes bons resultados de modelos hidrológicos complexos podem ser obtidos à custa de fundamentações inadequadas, tais como o aumento indiscriminado do número de parâmetros ou uma representação equivocada da dinâmica da bacia, resultando em uma notável degradação na confiabilidade das validações. O problema advindo da complexidade inadequada é a superparametrização e a incerteza associada aos parâmetros (PERRIN; MICHEL; ANDRÉASSIAN, 2003).

Bacias com diferentes dinâmicas hidrológicas demandam abordagens distintas de modelagem. Uma estrutura de modelo fixa, uniforme para todas as bacias, enfrenta dificuldades em acomodar todas as possibilidades de comportamento de cada local. Pesquisas em diferentes bacias têm demonstrado que o desempenho de um modelo é intrinsecamente específico para cada uma delas (KAVETSKI; FENICIA, 2011).

Poncelet et al. (2017) utilizaram uma estrutura de modelo fixa em um conjunto de bacias hidrográficas de diversos países para investigar a relação entre as simulações diárias de vazão e as características topográficas e climáticas das bacias. A conclusão a que chegaram é que a representação dos processos hidrológicos é fortemente limitada pela própria estrutura do modelo. Assim, eles sugerem a exploração de diferentes estruturas de modelo como meio de aprimorar as performances e, consequentemente, a representação dos processos hidrológicos.

Estruturas flexíveis em modelos hidrológicos têm sido propostas para esse fim. Clark et al. (2008) propuseram uma variedade de estruturas de modelos construídas a partir de quatro modelos hidrológicos pré-existentes. Nesse estudo, emergiram relações entre a estrutura dos modelos e o desempenho obtido, indicando que a escolha da estrutura é tão importante quanto a seleção dos parâmetros do modelo.

Fenicia et al. (2011) propuseram uma estrutura de modelagem flexível chamada SUPERFLEX. O SUPERFLEX é fundamentado em blocos genéricos como reservatórios, junções e funções de propagação do fluxo entre os reservatórios. Esses componentes podem ser combinados de diferentes maneiras. Os reservatórios representam o armazenamento e a liberação de água, enquanto a função de propagação diz respeito à transferência e à distribuição dos fluxos. As junções simbolizam a separação, união e/ou redimensionamento dos fluxos.

A modelagem flexível e a estrutura SUPERFLEX proposta por Fenicia et al. (2011), devido simplicidade de implementação e baixo número de parâmetros em alguns de seus modelos, bem como sua possibilidade de adaptação a diferentes tipos de bacias, vem sendo utilizado com resultados satisfatórios em diversos estudos (DAVID et al., 2019; FENICIA et al., 2014; SUI; VAN DE VEN, 2023; VAN ESSE et al., 2013).

3.1.5 Calibração e validação

Os modelos hidrológicos precisam ser calibrados para se adequarem as condições específicas de uma área de estudo. Em geral, os parâmetros do modelo não possuem correspondência imediata com as propriedades físicas, e, portanto, necessitam de dados observados para serem calibrados (ASGARI et al., 2022).

A calibração é um processo iterativo de ajuste de parâmetros na qual, comparando os dados observados com os resultados simulados, os parâmetros do modelo são otimizados para melhor caracterizar os processos do sistema hidrológico em estudo (ASGARI et al., 2022).

A otimização destes parâmetros torna o modelo mais acurado, minimizando as diferenças entre os resultados da simulação e os dados observados. Em geral, essas diferenças são descritas em termos de funções objetivos. A utilização de funções objetivo possibilita, por exemplo, avaliar a proximidade entre séries, avaliando numericamente as características específicas dos hidrogramas observados e simulados pelos modelos hidrológicos (MEIRA NETO, 2013).

A validação é uma etapa sucessiva à calibração e essencial para orientar a utilização e também criação de modelos, sendo uma forma de verificar se estes fornecem as respostas certas pelos motivos corretos (DHAMI; PANDEY, 2013).

Biondi et al. (2012) esquematizaram uma série de orientações para a validação de desempenho e científica de modelos hidrológicos. Para a validação de desempenho, os autores recomendam:

- Utilizar dados independentes dos usados na calibração;
- Utilizar diferentes métricas de avaliação e visualizar graficamente os resultados;
- Discutir sobre as incertezas dos dados de entrada;

3.2 Mudanças Climáticas

Mudanças climáticas referem-se a mudança no estado do clima, podendo ser identificadas por meio de alterações na média ou variabilidade de suas propriedades, e que persistem por longo prazo (décadas ou mais). A causa das mudanças climáticas pode ser desde processos internos naturais ou pela influência de forças externas, como erupções vulcânicas, modulações dos ciclos solares e mudanças antrópicas na composição da atmosfera ou no uso da terra (IPCC, 2014).

A convenção sobre mudanças climáticas das Nações Unidas (UNITED NATIONS, 1992) define mudanças climáticas como uma mudança de clima que é atribuída direta ou indiretamente a atividades humanas que, em conjunto com variabilidades naturais climáticas, causam alteração na composição da atmosfera terrestre.

Com o intuito de fornecer informações científicas que possam ser utilizadas para orientar políticas climáticas, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) foi criado em 1988, pela Organização Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, WMO) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (United Nations Environment Programme, UNEP) (IPCC, 2022).

O IPCC, por meio de uma série de relatórios, revisa milhares de artigos científicos publicados a cada ano a fim de fornecer um resumo abrangente do estado de conhecimento sobre a ciência de mudanças climáticas, com enfoque em seus impactos, riscos futuros, bem como alternativas de adaptação e mitigação para reduzir estes riscos (IPCC, 2022).

Este trabalho ocorre com a contribuição de pesquisadores do mundo inteiro, que são divididos em três principais grupos de trabalho. O Grupo de Trabalho I (Working Group I, WGI) visa avaliar a base científica física do clima e das mudanças climáticas. O Grupo de Trabalho II (Working Group II, WGII) avalia a vulnerabilidade dos sistemas socioeconômicos e naturais às mudanças climáticas. O Grupo de Trabalho III (Working Group III, WGIII) estuda a vulnerabilidade dos sistemas socioeconômicos e naturais às mudanças climáticas (IPCC, 2021).

Periodicamente, o IPCC produz Relatórios de Avaliação (Assessment Cycle, AR), que compilam os estudos dos três grupos de trabalho. O quinto relatório de avaliação do IPCC (Fifth Assessment Report, AR5), publicado em 2014. Neste documento, foram apresentados quatro cenários de influência humana no sistema climático, conhecidos como Trajetórias de Concentração Representativa (Representative Concentration

Pathway, RCP), baseadas nos cenários de emissão e concentração de gases de efeito estufa na atmosfera (por ação antrópica) (IPCC, 2014).

Estes cenários foram desenvolvidos considerando fatores como, uso e ocupação do solo, crescimento econômico, o investimento em fontes de energia alternativas (sustentáveis), bem como o possível esforço em mitigar os impactos das mudanças climáticas. O número associado com cada cenário RCP indica a intensidade das mudanças climáticas induzidas pelo homem para o ano 2100 em relação ao período pré-industrial (IPCC, 2014).

O último relatório publicado do IPCC, o Sexto Relatório de Avaliação (AR6) terminou seu ciclo em meados de 2023, com a publicação de um Relatório Síntese (The Synthesis Report, SYR) AR6, que compila uma série de contribuições dos três Grupos de Trabalho do IPCC, bem como de relatórios especiais. Durante este último ciclo (AR6), foram publicados relatórios completos, resumos e sumários técnicos reunindo uma grande quantidade de informações e pesquisa científica pelos Grupos de Trabalho acerca dos assuntos os quais são encarregados (IPCC, 2022).

Conforme o relatório do Grupo de Trabalho I, que aborda as bases físicas das mudanças climáticas, como contribuição ao sexto relatório de avaliação do IPCC (2021), as mudanças climáticas e as alterações no estado do sistema climático observados recentemente são sem precedentes ao longo de séculos e milhares de anos (IPCC, 2021).

No ano de 2019, por exemplo, as concentrações de CO₂ na atmosfera foram as maiores em 2 milhões de anos. A temperatura da superfície terrestre aumentou mais desde 1970 do que em qualquer outro período de tempo equivalente, pelo menos, nos últimos 2.000 anos. A área média anual de gelo marinho do Ártico atingiu seu nível mais baixo desde 1850. Desde 1900, o nível médio dos mares aumentou mais rapidamente neste período de tempo do que qualquer outro equivalente em 3.000 anos (IPCC, 2021).

Ainda de acordo com o relatório do Grupo de Trabalho I (IPCC, 2021), as mudanças climáticas estão afetando o clima e os extremos climáticos (secas, ondas de calor, fortes precipitações e ciclones tropicais), em todas as regiões do mundo. Nos últimos 2000 anos, por conta da influência humana, a recente mudança na temperatura superficial global tem aumentado a uma taxa sem precedentes (Figura 1).

A mudanças na temperatura observadas nos últimos 150 anos (linha preta da Figura 1a) demonstram um severo aquecimento da superfície terrestre, sendo um dos mais significativos em milhares de anos, o último período em que se registrou um aquecimento

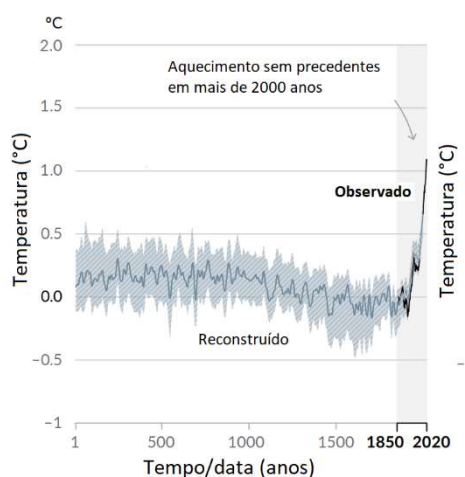
desta magnitude foi a aproximadamente a 6.500 anos atrás (barra cinza posicionada a esquerda na Figura 1a).

Os aumentos exponenciais observados da temperatura da terra nas últimas décadas (linha preta da Figura 1b) demonstram a influência das atividades humanas, em comparação a simulações realizadas considerando apenas influências naturais (solar e vulcânicas, linha verde da Figura 1b), fornecidos de modelos climáticos globais da Fase 6 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP6).

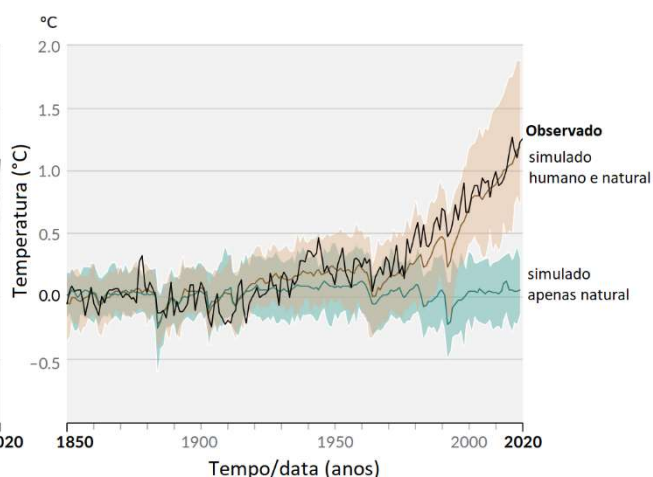
Figura 1 – Mudanças na temperatura da superfície global, (a) reconstruída de 1-2000 e observada de 1850-2020, (b) observada e simulada considerando interferência humana e natural de 1850-2020.

Mudanças na superfície global relativas a 1850-1900

(a) Mudanças na temperatura da superfície global reconstruída (1-2000) e observada (1850-2020).



(b) Mudanças na temperatura da superfície global, observada e simulada usando fator humano e natural e apenas natural



Fonte: IPCC (2021)

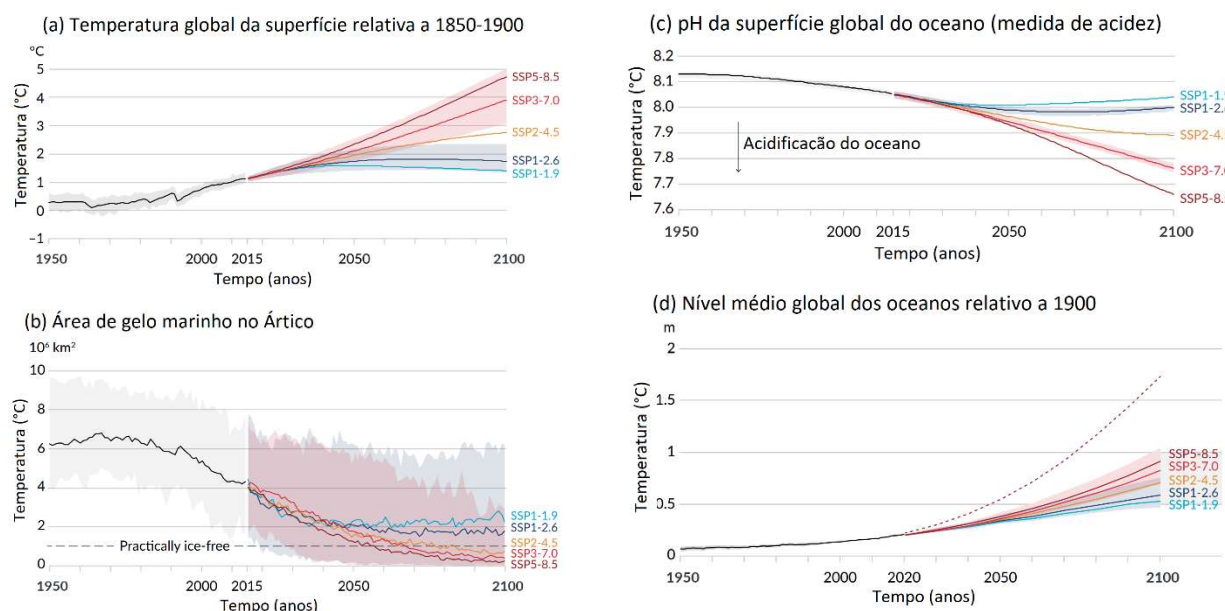
Os efeitos das mudanças climáticas são evidentes nos parâmetros do ciclo hidrológico, como a precipitação, a temperatura, a evaporação, transpiração, entre outros (RAJU; KUMAR, 2018).

Segundo o IPCC (2021), as chuvas intensas estão tornando-se mais severas e frequentes e afetando o escoamento superficial, principalmente em regiões como África, Ásia, América do Sul e América Central. Outros efeitos na hidrologia, evidenciam-se na qualidade da água, afetada pelo aquecimento de rios e lagos.

Ainda na última fase de relatórios, utilizando combinação das projeções futuras do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (Coupled Model Intercomparison Project, CMIP6), o IPCC estima possíveis aumentos de temperatura da superfície (Figura 2a), diminuição na área de gelo no Ártico (Figura 2b), diminuição do pH médio dos oceanos (Figura 2c), bem como aumento no nível médio dos mares (Figura 2d). A

severidade destes efeitos varia entre cenários mais otimistas (SSP1) e mais pessimistas (SSP5), em acordo com os desafios que a sociedade encontrará em mitigar e se adaptar as mudanças climáticas (IPCC, 2021).

Figura 2 - Cenários de projeções climáticas do IPCC até 2100 para (a) aumento da temperatura global na superfície relativa a 1850-1900, (b) área de gelo marinho, (c) pH da superfície global do oceano e (d) nível médio global dos oceanos



Fonte: IPCC (2021)

3.2.1 O Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados - CMIP 6

O Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (Coupled Model Intercomparison Project, CMIP) é uma estrutura experimental que objetiva analisar os modelos climáticos globais e a melhor compreensão das mudanças climáticas passadas, presentes e futuras. São realizados também experimentos para avaliar a previsibilidade do sistema climático em várias escalas de tempo e espaço, assim como fazer previsões do estado do clima observado (WCRP, 2020).

O último CMIP publicado foi a Fase 6 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6) do Programa Mundial de Pesquisa do Clima (World Climate Research Programme, WCRP).

O CMIP 6, em comparação com os modelos climáticos do CMIP 5 e das fases anteriores, possui uma melhor representação dos processos físicos, químicos e biológicos, assim como uma maior resolução. Houve significativa melhora na simulação dos indicadores de mudanças climáticas (IPCC, 2021).

No CMIP 6, foi definida uma nova estrutura de cenários integrados de mudança climática, o principal objetivo destes cenários é facilitar a comunidade de pesquisadores em caracterizar as incertezas associadas aos esforços de mitigação necessários para alcançar resultados climáticos específicos e aos esforços de adaptação da sociedade em se preparar e responder as mudanças climáticas (O'NEILL et al., 2014).

Esta estrutura permitirá que os analistas realizem estudos e escolham os cenários em acordo com a atual e suposições futuras do contexto socioeconômico e resultados da mudança climática da região em estudo, bem como possibilitará que avaliem uma ampla gama de estudos de outras comunidades de pesquisa, agrupando-os de acordo com as suposições comuns que fazem sobre estes cenários (O'NEILL et al., 2014; VAN VUUREN et al., 2014).

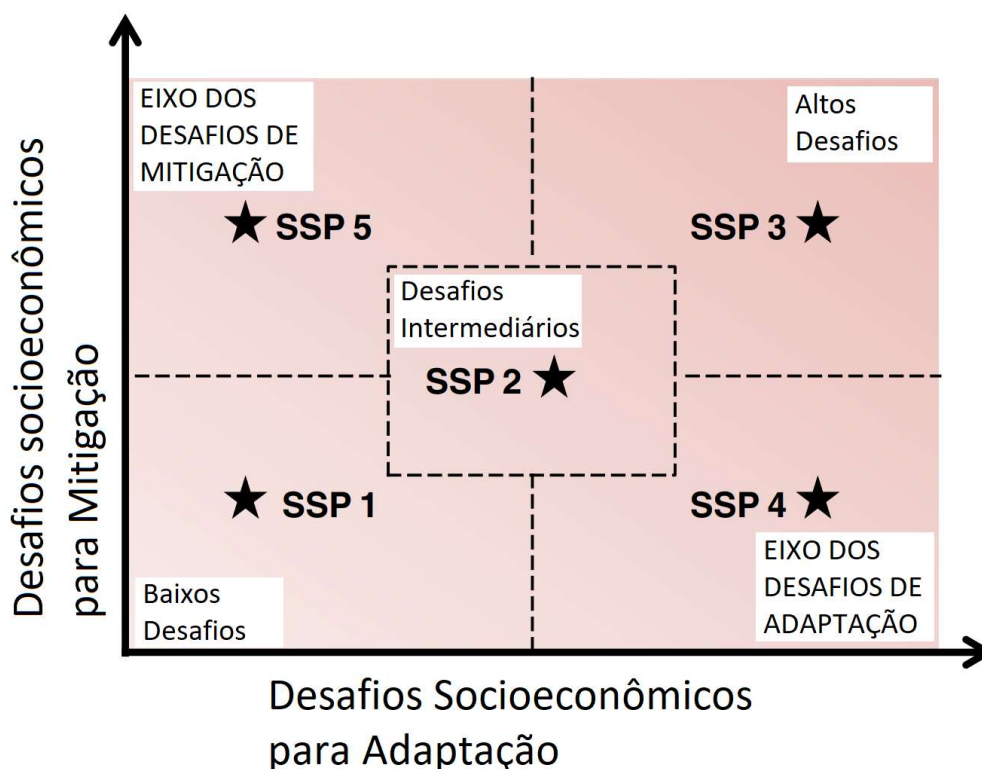
Esses cenários são conhecidos como Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (Shared Socio-economic Pathways, SSP), e descrevem tendências alternativas plausíveis na evolução da sociedade no século 21, com cenários de mudanças socioeconômicas globais projetadas até 2100 (IPCC, 2022).

Para garantir que o conjunto de SSPs desenvolvidos abranja uma gama de resultados que permitirão a caracterização das incertezas na mitigação, adaptação e impactos, as projeções futuras associadas foram definidas em uma matriz cujos eixos representam os principais determinantes de incertezas nos resultados (VAN VUUREN et al., 2014).

Um eixo da matriz (Figura 3) representa os desafios da sociedade em mitigar os cenários de aquecimento global associados a emissão de GEEs, portanto, descreve os resultados climáticos, incorporando os Caminhos de Concentração Representativos (RCPs) e as projeções de modelos climáticos baseados neles, que fazem parte do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados 5 (CMIP5) (O'NEILL et al., 2014).

O segundo determinante das incertezas nos resultados é o desenvolvimento socioeconômico, uma vez que diferentes caminhos de desenvolvimento econômico podem levar a sociedades com diferentes capacidades de adaptação aos cenários futuros de mudança. A matriz, portanto, inclui um segundo eixo definido por um conjunto de hipóteses de referência alternativas sobre o futuro de desenvolvimento socioeconômico, os SSPs propriamente ditos, que representam os desafios da sociedade em se adaptar e reagir aos cenários futuros (O'NEILL et al., 2014).

Figura 3 - Matriz de SSPs: Shared Socio-economic Pathways



Fonte: O'Neill et al. (2014)

Assim, os SSPs foram estabelecidos a partir de uma série de narrativas que descrevem os desenvolvimentos alternativos (Figura 3) e os desafios a serem atingidos para cada um dos cinco SSP definidos a seguir (O'NEILL et al., 2014; VAN VUUREN et al., 2014):

SSP1 - Caminho da Sustentabilidade: Tomando o caminho verde. Baixos desafios na mitigação e na adaptação às mudanças climáticas. Onde o mundo muda gradualmente em direção a um caminho mais sustentável, enfatizando um desenvolvimento mais inclusivo que respeita os limites ambientais. Crescem os investimentos em educação e saúde e o desenvolvimento econômico com enfoque no bem-estar humano. A desigualdade é reduzida tanto entre os países quanto dentro deles.

SSP2 - Meio Caminho: Considera desafios moderados na mitigação e adaptação às mudanças climáticas. É um meio termo entre o SSP1 e SSP3. Considera constância nas tendências econômicas, tecnológicas e sociais. O desenvolvimento tecnológico e econômico são desiguais, com alguns países se sobressaindo. O meio ambiente sofre degradação e a intensidade do uso de recursos e energia reduz gradualmente.

SSP3 - Chamado de Rivalidade Regional: Considera desafios altos para mitigação e adaptação. As políticas se tornam cada vez mais orientadas para questões de segurança nacional e regional. Os países se concentram em alcançar metas de energia e segurança alimentar apenas dentro de seus territórios, em detrimento de um desenvolvimento coletivo. Os investimentos

em educação e desenvolvimento tecnológico diminuem, desenvolvimento econômico é lento e as desigualdades persistem ou pioram com o tempo. O crescimento populacional é baixo nos países industrializados e alto nos países em desenvolvimento. Uma baixa prioridade internacional para lidar com as preocupações ambientais leva a uma forte degradação ambiental em diversas regiões.

SSP4 – Caminho da Desigualdade: Considera baixos desafios para mitigação, altos desafios para adaptação. Crescente desigualdades entre países e dentro deles. Existe a degradação coletiva da sociedade e os conflitos tornam-se cada vez mais comuns. O setor de energia se desenvolve com altos investimentos em combustíveis como carvão e petróleo. Considera também um desenvolvimento econômico rápido nas fontes de energia de baixo carbono nas principais regiões emissoras do mundo, elevando a capacidade de mitigação nestas áreas, porém em outras regiões o desenvolvimento avança lentamente.

SSP5 - Caminho de Desenvolvimento de Combustíveis: Considera desafios baixos para adaptação e altos para mitigação. É caracterizado pela ausência de políticas climáticas, alta demanda de energia cuja principal fonte é a partir de combustíveis à base de carbono. Poucas medidas para mitigação e poucos investimentos em tecnologias alternativas e sustentáveis. Desenvolvimento econômico rápido, distribuição equitativa dos recursos e lento crescimento populacional, melhorando a capacidade adaptativas da sociedade aos impactos climáticos (O'NEILL et al., 2014; RIAHI et al., 2017).

Na concepção das projeções climáticas futuras dos cenários SSPs do CMIP6, existe a possibilidade de associa-los ou compará-los com os cenários dos demais projetos CMIP. O'Neill et al. (2014) analisaram e detalharam possíveis paralelos entre os cenários SSPs do CMIP6 com os cenários SRES (A1, B1, A2 e B2) do CMIP3, bem como traçou comparação entre as projeções do CMIP6 com os RCPs do CMIP5 (Figura 4):

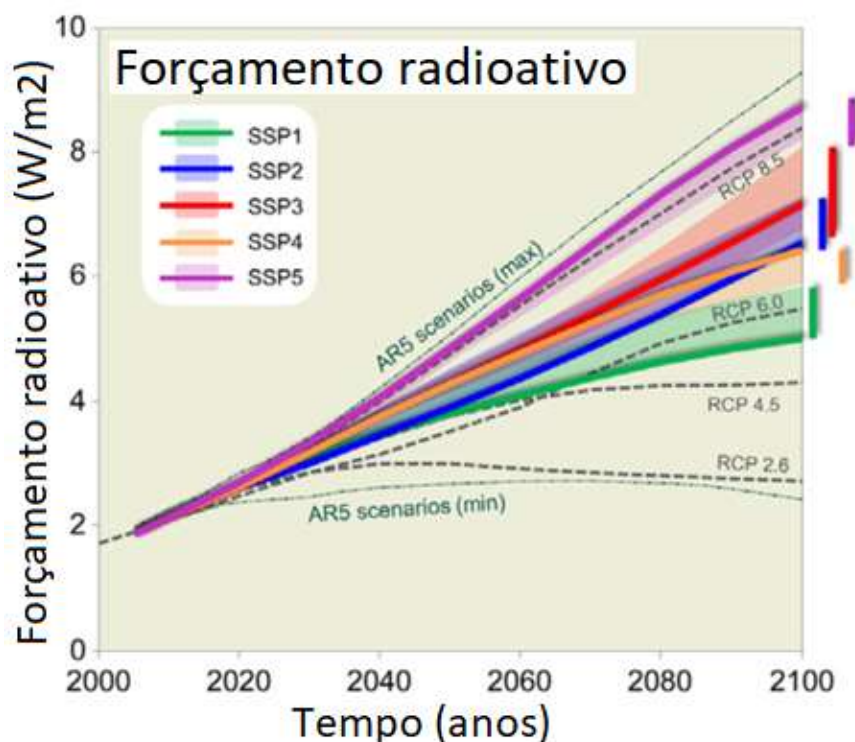
SSP1-2.6: Este cenário representa o limite inferior do conjunto de caminhos futuros e pode ser associado ao cenário RCP2.6 do CMIP5. Considera uma média de aquecimento menor a 2°C até 2100.

SSP2-4.5: Associado ao cenário RCP4.5 do CMIP5. Representa o meio termo dos caminhos futuros.

SSP3-7.0: Este cenário preenche uma lacuna nos cenários do CMIP5, com um nível de forçamento similar ao SSP2.

SSP5-8.5: Associado ao cenário RCP8.5 do CMIP5. Representa o limite superior do conjunto de caminhos futuros.

Figura 4 - Comparação entre cenários RCP e SSP



Fonte: O'Neill et al. (2014)

3.2.2 Modelos Climáticos

Os modelos climáticos representam os processos físicos da atmosfera, da superfície terrestre, oceano e gelo marinho, baseados nos princípios físicos, biológicos e químicos, e suas interações, para melhorar o entendimento e a previsibilidade do comportamento do clima (IPCC, 2012). Estes modelos pesquisam a influência da variabilidade natural, atividade humana ou a combinação das duas, nas mudanças climáticas observadas ou simuladas. Os resultados dos modelos auxiliam a tomada de decisões relacionadas ao gerenciamento dos recursos hídricos, agricultura, transporte e planejamento urbano (GFDL, 2022).

Um modelo climático global (Global Climate Model ou General Circulation Model - GCM) é uma representação matemática dos principais componentes do sistema climático em uma escala global, através de uma grade de células 3D. Enquanto o modelo regional climático (Regional Climate Model - RCM) é um modelo numérico que simula processos atmosféricos e da superfície terrestre, para escalas menores em comparação com os GCM (IPCC, 2014).

Os GCM contêm vieses devido à resolução espacial dos modelos climáticos globais e não fornecem informações em escala regional ou local. Por isso, é preciso aumentar a resolução espacial dos GCM para obter informações à escala local (SHRESTHA et al., 2020).

3.2.3 Desempenho dos Modelos Climáticos Globais do CMIP6

Os Modelos Climáticos Globais (MCGs) são uma ferramenta essencial para investigar os impactos das mudanças climáticas na segurança hídrica de bacias (AGYEKUM et al., 2023). No entanto, para o uso de MCGs em estudos sobre uma região específica em um determinado período, o seu desempenho em simular as condições climáticas observadas deve ser avaliado. Esta avaliação reduzirá incertezas associadas aos modelos e erros nas análises, bem como fornecerá projeções confiáveis para o futuro (IPCC, 2014).

No ciclo do projeto CMIP5 (anterior ao CMIP6) havia uma literatura mais abundante de verificação do desempenho dos MCGs que fundamentou a escolha dos autores que trataram da segurança hídrica com cenários de mudança climática em diversas regiões do mundo: Coréia do Sul (AHN; JEONG; KIM, 2016), Egito (ALKHAWAGA; ZEIDAN; ELSHEMY, 2022), Austrália (HALIK; PUTRA; WIYONO, 2022), China (SUN et al., 2022). Mesmo em países que tinham poucos estudos avaliando o desempenho dos modelos do CMIP5, como é o caso do Brasil (ALMAGRO et al., 2020; LLOPART; SIMÕES REBOITA; PORFÍRIO DA ROCHA, 2020), foram desenvolvidos alguns datasets de conjuntos multimodelos (regionais e globais) que forneciam projeções mais confiáveis para estes casos (GESUALDO et al., 2019).

No caso do CMIP6, como são relativamente novos, são poucos os estudos que avaliaram o desempenho dos MCGs no Brasil ou América do Sul (CORREA FILHO, 2004; DIAS; REBOITA, 2021). Apesar da importância de avaliar a performance dos modelos, não há pesquisas em nível nacional que realizem esta avaliação de forma relevante, no contexto de segurança hídrica e mudanças climáticas, quanto mais para áreas importantes em termos de abastecimento de água, como o Sistema Cantareira.

3.2.4 Mudanças climáticas em estudos hidrológicos

Estudos realizados em diversos países nos últimos anos abordam projeções futuras de mudanças climáticas, sua influência em possíveis cenários de seca e segurança hídrica de reservatórios de abastecimento.

Shrestha et al. (2020) simularam cenários de seca em três regiões da Índia para o período 2015-2044. Utilizaram dados de temperatura e precipitação dos modelos climáticos globais do CMIP6 e seus resultados indicam que todas as regiões avaliadas devem sofrer de secas severas no futuro. Os autores ressaltam a importância do uso de projeções climáticas,

utilizando vários modelos climáticos globais sob diferentes cenários de emissão de gases efeito estufa (GEE).

Zhao et al. (2019), estudaram possíveis mudanças na ocorrência, duração e intensidade das secas na bacia do rio Weihe na China. Os autores utilizaram dados de 40 modelos climáticos globais do projeto CMIP5, refinando os resultados para 3 GCMs, considerando três períodos futuros (2010–2054, 2030–2074 e 2055–2099). Os resultados obtidos pelos autores indicaram, como esperado, que o GCM com cenário climático mais seco (CSIRO-Mk3-6.0) apontou secas com maior intensidade, duração e frequência, enquanto o modelo mais úmido (MIROC5) indicou secas de menor intensidade, duração e frequência. Os autores também reforçaram as incertezas dos resultados ao trabalhar com diferentes GCMs, principalmente em escala regional.

Ahn et al. (2016) pesquisaram sobre os impactos na capacidade agrícola no abastecimento hídrico em uma bacia de Coreia do Sul. Eles utilizaram o modelo hidrológico SWAT, com dados do projeto CMIP5, para os cenários de emissões RCP4.5 e RCP8.5, os autores escolheram um GCM específico para a área de estudo (HadGEM3-RA, em escala regional). Os resultados apontaram fortes impactos devido aos cenários de mudanças climáticas, com uma taxa máxima de escassez hídrica para usos agrícolas de 38%.

Alkhawaga et al. (2022) estudaram a segurança hídrica e alimentar na província de Kafr El-Sheikh, no Delta do Nilo, Egito, ante a cenários de mudanças climáticas e urbanização. O principal fator investigado pelos autores foi a quantidade de água necessária para irrigação de áreas agrícolas, visto que na região de estudo, 85% da água doce é consumida pela agricultura. Foram utilizados dados futuros de mudanças climáticas do projeto CMIP5, para três cenários de emissões de gases estufa (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5). Os resultados da pesquisa indicaram a segurança hídrica da província é extremamente sensível às mudanças climáticas projetadas. Além disso, em boa parte dos cenários, foi prevista forte redução da área agrícola, o que colocaria em risco também a segurança alimentar da região.

Halik et al. (2022) avaliaram índices de severidade de seca utilizando dados climáticos futuros para a bacia hidrográfica de Sampean Baru, Indonésia. Foram utilizadas as projeções futuras do projeto CMIP5, para os cenários de emissões de gases estufa RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5, considerando o período de 2019-2050. O modelo hidrológico adotado para simulação de vazão foi o SWAT. Os autores encontraram que o aumento de emissão de gases estufa e da temperatura indicado pelos cenários RCP terão efeito real nos cenários de seca da área de estudo, sendo que quanto mais pessimista o cenário (RCP 8.5, por exemplo), maior o índice de eventos severos e extremos de seca.

Marques et al. (2022) investigaram a eficiência de políticas públicas em longo prazo considerando o impacto das mudanças climáticas para a bacia do rio Paraíba do Sul, Brasil. Foram utilizados dados climáticos do projeto CMIP3, para o período de 2010-2099, e o modelo hidrológico MHD-INPE para estimar valores de vazão. Índices de Sustentabilidade foram calculados para avaliar o desempenho do reservatório considerando os níveis de aquecimento do IPCC e a contribuição das políticas públicas para a sustentabilidade dos recursos hídricos na área de estudo. Os resultados indicaram que o sistema da bacia do Rio Paraíba do Sul operará com mais estresse frente aos impactos das mudanças climáticas.

Kim et al. (2021) realizaram um estudo na bacia do rio Ruvubu, Burundi; buscando compreender a influência das mudanças climáticas no clima local, principalmente em eventos severos de precipitação e vazão. A pesquisa utilizou dados de projeções climáticas do projeto CMIP6, estimativas de vazão futura foram feitas utilizando o modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tools (SWAT). Os autores concluíram que as mudanças do clima poderão causar alterações na magnitude e distribuição sazonal de precipitação e vazão, bem como o aumento de evento severos, com precipitação extrema e risco de inundação.

Sun et al. (2022) analisaram a segurança hídrica regional no leste da China, na bacia do Rio Qinhuai, no contexto de mudanças climáticas. Estimativas de vazão foram realizadas com auxílio do modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tools (SWAT), com dados de projeções climáticas do projeto CMIP6, utilizando um conjunto de modelo climáticos globais (GCMs) sob três cenários de emissões (SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5). Os resultados da pesquisa mostraram aumentos severos de precipitação e vazão no futuro, não afetando necessariamente a segurança hídrica do reservatório, mas trazendo sérios riscos de inundação.

Dong et al. (2022) investigaram os impactos dos cenários de mudança climática nas características sazonais de seca na bacia do Rio Lancang-Mekong, Ásia. Foram utilizados dados do projeto CMIP6 para três cenários de emissões (SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5), com base em oito modelos climáticos globais (GCMs). Resultados mostram aumentos notáveis de eventos de seca estação seca, os autores reforçam a necessidade de estratégias eficazes para melhorar a segurança hídrica e alimentar da bacia diante dos cenários futuros.

Guo et al. (2022) estudaram as respostas hidrológicas da bacia do rio Amarelo, China ante aos cenários de mudança climática. Para tal, os autores avaliaram e compararam o desempenho dos modelos do projeto CMIP5 e CMIP6. Foram utilizados dados de 21 modelos climáticos globais (GCMs) do projeto CMIP6 em três cenários de emissões (SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5) e 18 GCMs do projeto CMIP5 para os cenários RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5. Para estimar dados de vazão, foi adotado o modelo hidrológico Soil and Water Assessment

Tools (SWAT). Os autores concluíram que os valores de vazão futura sofrerão menor redução considerando os cenários do projeto CMIP6 em comparação ao CMIP5. Mesmo constatada tal diferença, em ambos os casos, a segurança hídrica da bacia deverá ser afetada pelos cenários de mudança climática.

Gesualdo et al. (2019) investigaram a influência das mudanças climáticas na bacia do Rio Jaguari, São Paulo. Os autores utilizaram dados climáticos do projeto CMIP5 com projeções futuras geradas por 17 modelos climáticos globais (GCMs) para dois cenários de emissões (RCP4.5 e RCP8.5). Cenários de vazão foram projetados com o modelo hidrológico HYMOD, as estimativas foram avaliadas com indicadores de seca e escassez para analisar vulnerabilidade hídrica do reservatório. Os resultados apontam possível fragilidade da segurança hídrica na região, com aumento do risco de inundações e secas, bem como aumento do período de seca da bacia, sendo outubro e novembro os meses mais vulneráveis.

3.3 Segurança Hídrica

Mesmo não tendo um conceito plenamente consolidado, a segurança hídrica pode ser definida como a disponibilidade de água em quantidade e qualidades adequadas para atender as seguintes demandas: garantir o bem-estar da população, permitir o desenvolvimento socioeconômico, proteger contra poluição e desastres naturais relacionados a água, preservar os ecossistemas e o meio ambiente, possibilitar uma vida saudável em um ambiente pacífico e politicamente estável (GELFAN, 2023; GREY; SADOFF, 2007) .

Alguns autores argumentam que a segurança hídrica deve ser analisada de forma global, sendo alcançada por meio de uma gestão rigorosa dos recursos hídricos. Para Grey e Sadoff (2007), o conceito de segurança hídrica é comparável aos de segurança alimentar e energética, que relaciona o acesso eficiente a alimentos e energia, proporcionando a satisfação das necessidades básicas da sociedade em suporte à vida. No entanto, ao contrário dos alimentos e da energia, a segurança hídrica considera não apenas a escassez do recurso, mas também sua presença em excesso, devido ao potencial destrutivo da água em seu estado natural.

Em termos gerais, as ameaças relacionadas à segurança hídrica envolvem três aspectos principais: A escassez hídrica (secas hidrológicas), o excesso de água (inundações) e a perda de qualidade da água (GELFAN, 2023).

A segurança hídrica pode então ser alcançada por meio de uma gestão eficiente dos recursos hídricos, considerando tanto seu potencial produtivo quanto seu potencial destrutivo, a fim de promover o desenvolvimento sustentável. Porém, se trata de um tema complexo e

vários aspectos influenciam na manutenção da segurança hídrica: o aspecto hidrológico, referente à disponibilidade de água, sua distribuição espacial e variabilidade temporal; o aspecto socioeconômico, determinado pela estrutura econômica, refletindo também em legados naturais, culturais e escolhas políticas; e o aspecto das mudanças climáticas, especialmente o estudo dos impactos decorrentes das alterações climáticas, que influenciam a gestão dos recursos hídricos e infraestrutura necessária para evitar a escassez hídrica (FONSECA; ANDRADE; SANTOS, 2022; JARAMILLO; NAZEMI, 2018).

Estes aspectos tornam a segurança hídrica essencial na busca pelo desenvolvimento sustentável, podendo esta ser um limitador do desenvolvimento local. Regiões com ambientes hidrológicos complexos, caracterizados por variações sazonais significativas, com períodos de intensa pluviosidade seguidos por longas secas, apresentam maiores desafios para a manutenção da segurança hídrica, necessitando de uma gestão de recursos eficiente e investimentos em infraestrutura (GREY; SADOFF, 2007).

Ainda assim, apesar dos aspectos naturais (hidrológicos) influenciarem diretamente na distribuição desigual da água na superfície terrestre, as ameaças à segurança hídrica podem ser agravadas pelo crescimento populacional, fatores socioeconômicos e políticos que criam acesso desigual à água doce, uma gestão pública ineficiente que leva ao uso irracional e extensivo dos recursos hídricos, entre outros. Regiões alta disponibilidade de recursos hídricos podem apresentar baixos níveis de segurança hídrica (por exemplo, áreas do norte da Índia e em Bangladesh), devido as condições socioeconômicas, o acesso desigual de certos grupos da população à água doce e ao baixo nível de proteção contra inundações (GELFAN, 2023).

Além disso, segurança hídrica assumiu um papel central quando se trata de estratégias de adaptação e mitigação dos impactos das mudanças climáticas, que vêm afetando a segurança hídrica de milhões de pessoas, principalmente em regiões da África, Ásia, América Central e do Sul, bem como em povos indígenas, pequenas comunidades e no Ártico. Entre 2010 e 2020, as taxas de mortalidade humana referente a eventos extremos como inundações e secas foi 15 vezes maior em regiões vulneráveis em comparação com as demais (IPCC, 2023). Quase metade da população do mundo (aproximadamente 4 bilhões de 7.8 bilhões de pessoas) passa por situação de escassez hídrica pelo menos por um mês no ano, seja por razões climáticas ou não climática (MEKONNEN; HOEKSTRA, 2016).

Muitas regiões do mundo estão experienciando os impactos das mudanças climáticas no dia a dia através do aumento da intensidade e frequência de eventos extremos, como chuvas fortes, inundações e secas. Desde a década de 1970, 44% de todos os desastres naturais foram

relacionados a inundações. Com o agravamento das mudanças climáticas, projeta-se que uma fração maior da população global enfrente problemas de escassez hídrica (IPCC, 2023)

Enquanto as mudanças climáticas afetam diretamente a disponibilidade hídrica, elas também influenciam as necessidades de água para diferentes usos de diversos setores, como na agricultura, energia e indústria, saúde e saneamento. A agricultura e a irrigação, por exemplo, representam a maior proporção do uso consuntivo de água (aproximadamente 60-70% das abstrações de água). A falta de acesso ao saneamento básico é uma das principais causas de doenças transmitidas pela água. Em 2017, aproximadamente 2,2 bilhões de pessoas não tinham acesso a água potável, e cerca de 4,2 bilhões de pessoas não tinham acesso a serviços de saneamento básico. Eventos extremos têm causado déficits hídricos significativos em cidades do mundo todo. Entre 1971 e 2000, entre 16% e 39% das cidades experimentaram problemas no abastecimento de água (IPCC, 2023).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

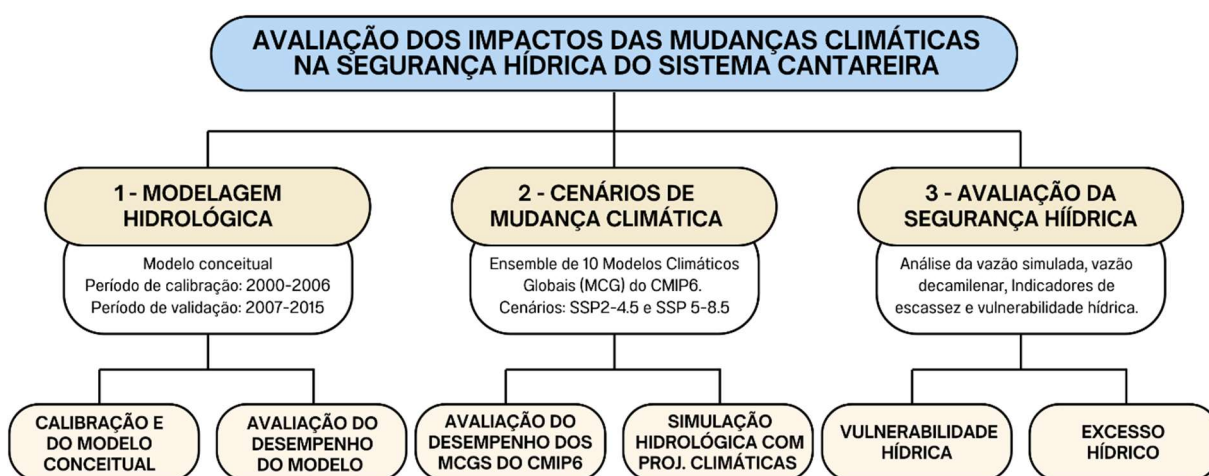
A análise da segurança hídrica seguiu as seguintes etapas principais, conforme Gesualdo et. al. (2019) (Figura 5):

Primeiro, foi calibrado e validado um modelo conceitual para as bacias a montante dos reservatórios do sistema Cantareira e seu desempenho foi avaliado utilizando dados climáticos observados de 2000 até 2015.

Na segunda etapa, foram obtidos os dados climáticos dos MCGs do projeto CMIP6 e realizada simulação hidrológica para três períodos até o final do século XXI (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100) utilizando as projeções climáticas do CMIP6 e considerando dois níveis de emissões (SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

Na terceira etapa, a partir das simulações, foi avaliada a segurança hídrica do sistema Cantareira, foram analisados regimes de vazão dos reservatórios e calculados indicadores de escassez e vulnerabilidade hídrica para os cenários futuros.

Figura 5 - Delineamento da metodologia



Fonte: Adaptado de Gesualdo et al. (2019)

4.1 Área de Estudo

A área de estudo são as bacias hidrográficas à montante dos reservatórios que compõem o Sistema Cantareira. O Sistema Cantareira (Figura 6), localizado parcialmente nas bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ), é o maior sistema de abastecimento público da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e um dos maiores do mundo. Com uma área total de 2.279,5 km², abrange 12 municípios, sendo quatro deles em Minas Gerais (Camanducaia, Extrema, Itapeva e Sapucaí-Mirim) e oito em São Paulo (Bragança Paulista,

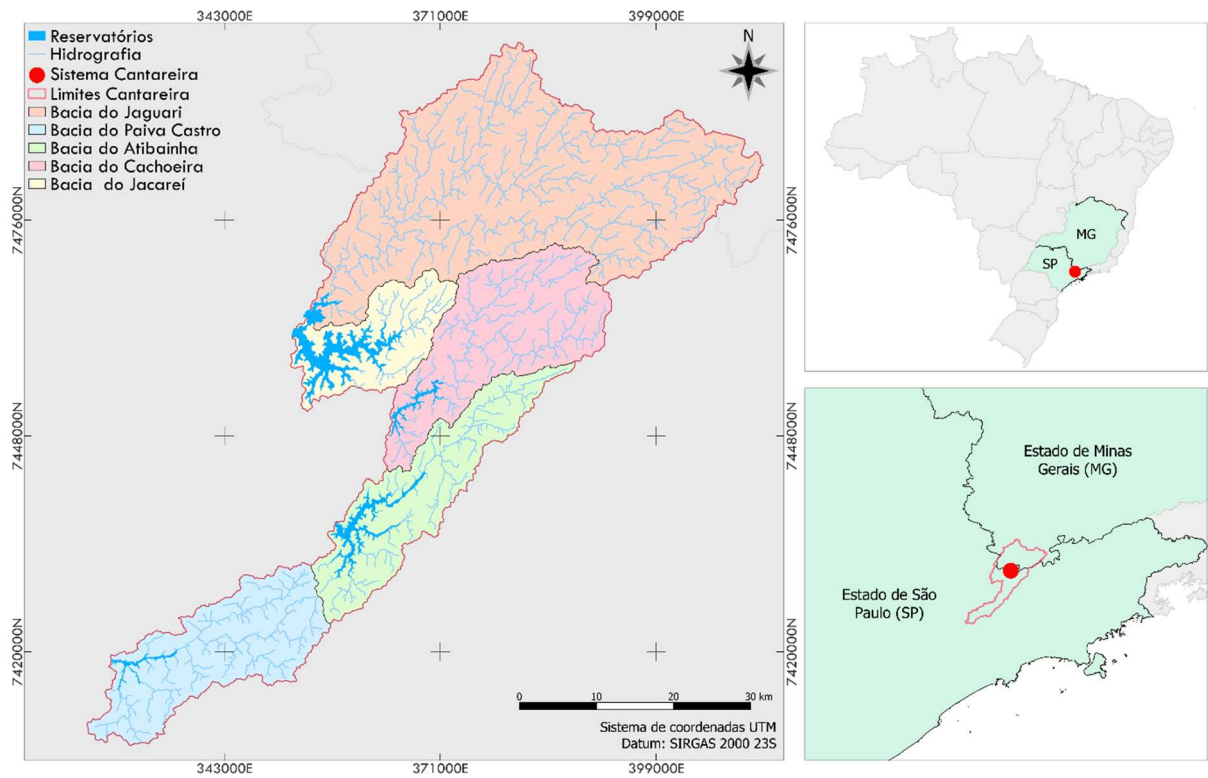
Caieiras, Franco da Rocha, Joanópolis, Nazaré Paulista, Mairiporã, Piracaia e Vargem) (WHATELY; CUNHA, 2006).

Seis reservatórios compõem o sistema Cantareira: Jaguari, Jacareí, Cachoeira, Atibainha, Paiva Castro e Águas Claras. Os quatro primeiros estão situados nas Bacias PCJ, enquanto os dois últimos estão na Bacia do Alto Tietê, sendo o maior deles o reservatório do Jaguari e do Jacareí, que são operados como um único reservatório (Jaguari-Jacareí). As represas estão localizadas em diferentes níveis (Figura 7) e são interligadas por canais e túneis com um total de 48 km de extensão (SÃO PAULO, 2020).

A captação de água ocorre nas represas instaladas nas cabeceiras dos rios Jaguari, Jacareí, Cachoeira e Atibainha, fornecendo até 33 m³/s para a RMSP. O Sistema abastece até 8,8 milhões de pessoas (46% da RMSP) nas zonas norte, central, parte das zonas leste e oeste da Capital, além dos municípios de Franco da Rocha, Francisco Morato, Caieiras, Guarulhos (parcialmente), Osasco, Carapicuíba, Barueri (parcialmente), Taboão da Serra (parcialmente), Santo André (parcialmente) e São Caetano do Sul (SÃO PAULO, 2020; WHATELY; CUNHA, 2006).

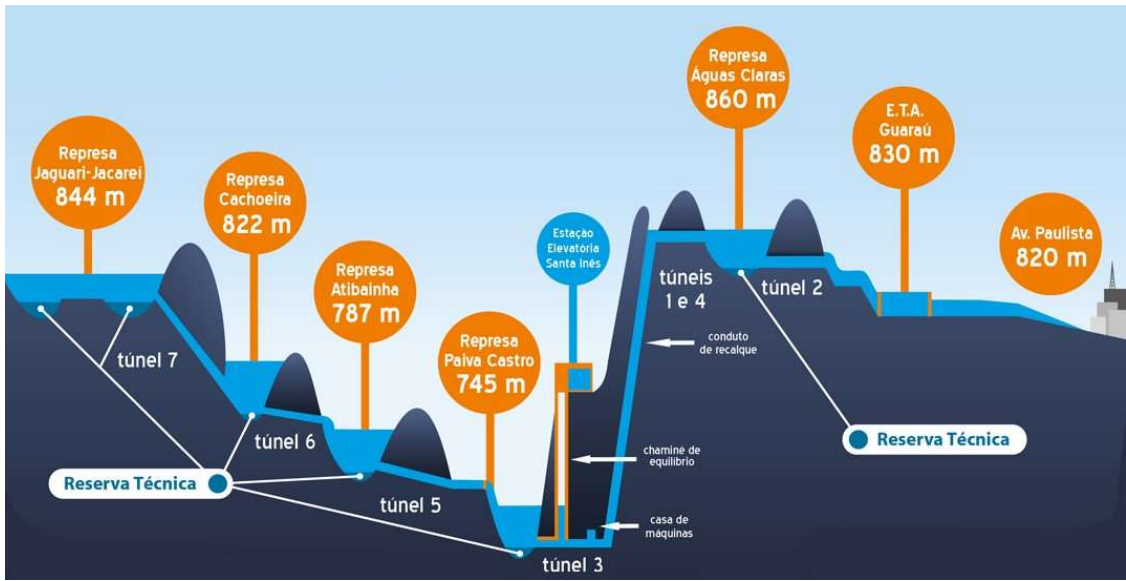
A primeira outorga para uso do Sistema Cantareira foi concedida à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) em 1974, por um período de 30 anos, para fins de abastecimento público. A renovação mais recente da outorga ocorreu em 2017, que estendeu a autorização por mais 10 anos (SÃO PAULO, 2020). A Figura 8 apresenta mapa de declividades da área de estudo.

Figura 6 - Localização das bacias hidrográficas à montante dos reservatórios superficiais que compõem o Sistema Cantareira. Não está sendo considerada a transposição de águas da bacia do Rio Paraíba do Sul.



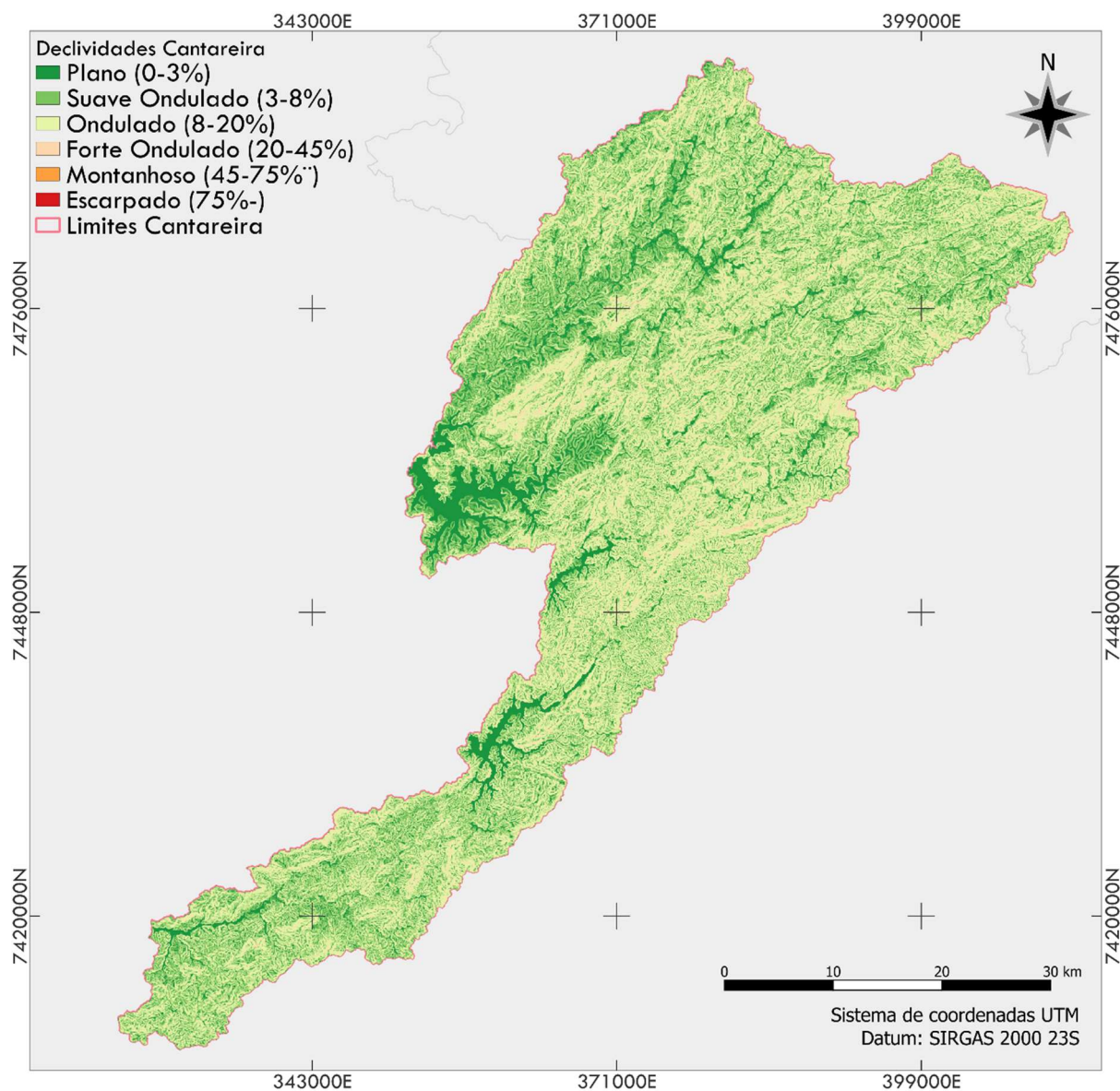
Fonte: O autor (2024).

Figura 7 - Esquema do funcionamento do sistema Cantareira



Fonte: adaptado de SABESP (2024).

Figura 8 - Mapa de declividades das bacias hidrográficas à montante dos reservatórios superficiais que compõem o Sistema Cantareira



Fonte: O autor (2024).

4.2 Aquisição de dados hidrológicos e meteorológicos

No decorrer do trabalho, foram utilizadas séries históricas diárias de precipitação (pr) (mm), evapotranspiração potencial de referência (ETo) (mm), vazão (Q) (m^3/s), temperatura máxima (Tmax/tasmax) ($^{\circ}\text{C}$), temperatura mínima (Tmin/tasmin) ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (RH/hur) (%), velocidade do vento (u2/sfcWind) (m/s) e radiação solar (W/m^2).

Para realizar a simulação hidrológica do tipo chuva-vazão, foram utilizadas séries históricas diárias de precipitação, evapotranspiração e vazão, para o período de 2000-2015. Os

dados de precipitação de evapotranspiração foram obtidos do conjunto de dados de Xavier et al. (2016) e as séries de vazão foram obtidas do Portal dos Mananciais (SABESP, 2024).

O conjunto de dados de Xaxier et al. (2016) contém dados diários (Quadro 1) de todo território brasileiro, em um grid com resolução espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (latitude x longitude). Devido ao controle de qualidade e a extensa rede de estações pluviométricas (3625) e climáticas (735) utilizadas, já foi utilizado e validado em várias aplicações em território brasileiro (DIAS; MARTINS; MARTINS, 2024; DOS SANTOS SILVA et al., 2023; MARCHEZEPE et al., 2023; REBOITA et al., 2023). Os dados são disponibilizados em formato netCDF, o seu manuseio e extração foram realizados com auxílio de *scripts* em linguagem de programação *Python*.

Quadro 1 - Descrição das variáveis disponibilizadas pelo dataset de Xavier et al. (2016)

Variável	Abreviação	Unidade
Precipitação	prec	mm
Temperatura máxima	Tmax	°C
Temperatura mínima	Tmin	°C
Umidade relativa do ar	RH	%
Velocidade do vento	u2	m/s
Radiação Solar	Rs	W/m ²
Evapotranspiração potencial de referência	ETo	mm

Fonte: O autor (2024).

O Portal dos Mananciais, operado pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP, 2024), fornece informações diárias e históricas da situação dos mananciais da RMSP, como séries diárias de vazão para os reservatórios do sistema Cantareira (partir de 2000).

Quadro 2 - Dados de entrada para a modelagem hidrológica (calibração e validação)

Variável de entrada	Unidade	Detalhes dos dados	Fonte
Dados Climáticos: Evapotranspiração potencial de referência (ETo)	mm	Dados diários (Período de 01/01/2000 até 31/12/2015)	(XAVIER; KING; SCANLON, 2016)]
Dados Pluviométricos: Precipitação (pr)	mm	Dados diários (Período de 01/01/2000 até 31/12/2015)	(XAVIER; KING; SCANLON, 2016)
Dados Fluviométricos: Vazão (Q)	m ³ /s (convertidos em mm/d na modelagem)	Dados diários (Período de 01/01/2000 até 31/12/2015)	(SABESP, 2024)

Fonte: O autor (2023).

4.3 Calibração e validação do modelo hidrológico

O modelo conceitual utilizado neste trabalho é baseado em uma das dez estruturas flexíveis do SUPERFLEX, propostas por Fenícia et al. (2011) e necessita de quatro parâmetros calibráveis para a modelagem hidrológica do tipo chuva-vazão (Quadro 3). A implementação do modelo, foi executada por meio scripts em linguagem de programação *Python*.

Os dados de entrada foram separados em dois períodos: calibração e validação. A calibração do modelo ocorreu utilizando a série histórica de 2000-2006 e a validação de 2007-2015. Através da calibração foi possível definir se o modelo de fato simula a vazão observada. O tamanho das séries históricas utilizadas nas etapas da metodologia foi limitado a disponibilidade dos dados, visto que a SABESP fornece dados de vazão diários para os quatro reservatórios a partir do ano 2000 e o conjunto de dados de Xavier et. al. (2016) fornece dados climáticos até o ano de 2015. Vários trabalhos obtiveram resultados satisfatórios utilizando métodos semelhantes de modelagem hidrológica (ALKHAWAGA; ZEIDAN; ELSHEMY, 2022; GESUALDO et al., 2019; KIM et al., 2021; LIBRARY et al., 2017)

4.3.1 Modelagem hidrológica

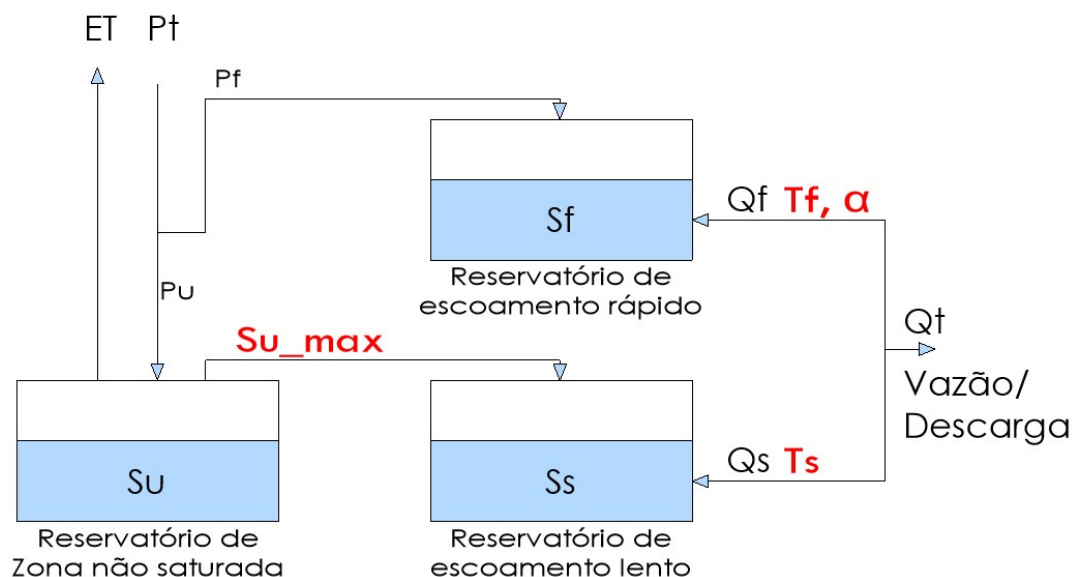
O modelo conceitual utilizado neste trabalho considera que o volume de água que atinge a superfície do solo é particionado em precipitação efetiva, umidade que se armazena no solo e evapotranspiração e sua implementação é bastante simples.

A precipitação efetiva segue para o reservatório de zona não saturado, que tem seu comportamento e capacidade regidos pelo parâmetro capacidade de armazenamento máximo Su_{max} . O fluxo do reservatório de zona não saturado é dividido entre escoamento rápido e escoamento lento.

O escoamento rápido corresponde ao escoamento superficial e é representado pelo reservatório rápido, regido pelo parâmetro T_f que relaciona o tempo de permanência da água nele. O fluxo de saída deste reservatório não é linear, tendo uma função exponencial associada ao parâmetro α . O escoamento de base (lento) é representado pelo reservatório lento e corresponde ao escoamento subterrâneo, tendo um parâmetro T_s também relacionado ao tempo de permanência da água neste.

A representação da concepção do modelo conceitual utilizado pode vista na Figura 9, mostrando os blocos de cada reservatório, suas interligações e como o fluxo se propaga entre eles, com os parâmetros marcados em vermelho.

Figura 9 - Representação esquemática do modelo conceitual utilizado no estudo



Fonte: O autor (2023).

Quadro 3 - Descrição dos parâmetros do modelo conceitual utilizado no trabalho

Parâmetro	Descrição
Su_max	Capacidade máxima de armazenamento do reservatório de zona não saturada.
α	Grau de variabilidade do fluxo de saída do reservatório de escoamento rápido
T_f	Tempo de residência no reservatório de escoamento rápido/superficial
T_s	Tempo de residência no reservatório de escoamento lento/base.

Fonte: O autor (2023).

4.3.2 Métricas de avaliação do desempenho do modelo hidrológico

A avaliação da performance do modelo hidrológico levou em conta seu desempenho em simular a climatologia da área de estudo, comparando a vazão observada (Q_{obs}) e a vazão simulada (Q_{sim}). A análise foi feita com base nas médias mensais.

Foram selecionadas as seguintes métricas estatísticas de avaliação: A porcentagem de viés (P_{bias}), a eficiência Kling-Gupta (KGE), o Mean Square Error (MSE) e o coeficiente de correlação de Pearson (r) (Quadro 4).

O P_{bias} (Equação 1) é utilizado para avaliar se o modelo tende a superestimar ou subestimar as vazões:

$$P_{bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs})} \times 100 \quad (1)$$

O KGE (Equação 2-3) é um índice que avalia o desempenho considerando vários aspectos: a correlação linear entre observações e simulações (r), a medida de erro de variabilidade do fluxo (α) e o viés dos dados (β):

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (2)$$

Desenvolvendo a equação acima, temos que:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\alpha_{sim}}{\alpha_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (3)$$

Onde α_{obs} e α_{sim} são os desvios padrões nas observações e simulações, respectivamente, e μ_{sim} e μ_{obs} as médias das simulações e observações.

O MSE (Equação 4) foi selecionado como a métrica para avaliar o erro médio do modelo em relação à vazão observada:

$$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{n} \quad (4)$$

O MSE, conforme Hallak e Pereira Filho (2011), é uma métrica frequentemente empregada para verificar a precisão de modelos numéricos, sendo sensível a discrepâncias substanciais, uma vez que eleva ao quadrado as diferenças individuais. O MSE é sempre positivo, e sua equivalência a zero representa uma simulação impecável.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) (Equação 5) foi utilizado para avaliar a correlação linear e concordância entre os dados observados e simulados:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{mobs})^2 \times (Q_{sim} - Q_{msim})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{mobs})^2 \times \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{msim})^2}} \quad (5)$$

Quadro 4 - Métricas estatísticas para avaliação do desempenho do modelo hidrológico conceitual

Métrica estatística	Equação	Amplitude	Melhor valor
Percentual de viés (Pbias)	$Pbias = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs})} \times 100$	$-\infty$ até $+\infty$	0
O Erro Quadrático Médio (MSE)	$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{n}$	0 até ∞	0
Coeficiente de correlação de Pearson (r)	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{mobs})^2 \times (Q_{sim} - Q_{msim})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{mobs})^2 \times \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{msim})^2}}$	-1 até 1	1

Coeficientes de eficiência de Kling-Kupta (KGE)	$KGE: 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$	$-\infty$ até 1	1
---	--	-----------------	---

Fonte: O autor (2024).

4.4 Dados climáticos dos Modelos Climáticos Globais do CMIP6

Os modelos climáticos globais do projeto CMIP6 apresentam melhorias na resolução espacial e na representação dos processos físicos em comparação aos modelos prévios do CMIP5 (EYRING et al., 2016). O conjunto de dados CLIMBra (BALLARIN et al., 2023) fornece dados com correção de viés de até 19 modelos do CMIP6 para o território do país, bem como um conjunto ensemble dos mesmos (média aritmética dos valores dos modelos), também em um grid de resolução espacial de 0.25° x 0.25° (latitude/longitude), em formato netCDF.

O CLIMbra disponibiliza dados climáticos (brutos ou com correção de viés) tanto de séries diárias históricas (1980-2013) quanto futuras (2015-2100) para 6 variáveis (Quadro 5) em dois cenários de emissão: SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

Neste trabalho, foram utilizados dados de 10 MCGs, para simulação hidrológica e projeções futuras foi utilizado dados de um conjunto ensemble destes 10 MCGs (Quadro 6), visto que apenas estes 10 dos 19 fornecem séries diárias de todas as variáveis necessárias para cálculo da evapotranspiração potencial de referência pelo método de Penman-Monteith (FAO-56) (ALLEN et al., 1998).

Quadro 5 - Descrição das variáveis do CLIMBra

Variável	Abreviação	Unidade
Precipitação	pr	mm
Temperatura máxima	tasmax	°C
Temperatura mínima	tasmin	°C
Umidade relativa do ar	hur	%
Velocidade do vento	sfcWind	m/s
Radiação Solar	rss	W/m2

Fonte: Adaptado de Ballarin et al. (2023).

O conjunto de dados desenvolvido por Ballarin et al. (BALLARIN et al., 2023) é recente, porém vem sendo utilizado e validado em estudos climáticos aplicados ao território brasileiro (BALLARIN et al., 2023a; FERREIRA et al., 2023; MONTEIRO; CABRAL, 2023; REBOITA et al., 2023).

Quadro 6 - Descrição dos Modelos Climáticos Globais (MCGs) utilizados no trabalho

Modelo	Instituição	País
ACCESS_ESM1	Australian Community Climate and Earth System Simulator Climate Model Version 1	Austrália
CMCC_ESM2	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici	Itália
EC_EARTH3	EC Earth Consortium	Europa
INM_CM4_8	Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences	Rússia
INM_CM5	Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences	Rússia
IPSL_CM6A	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)	França
MIROC6	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	Japão
MPI_ESM1	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	Alemanha
MRI_ESM2	Meteorological Research Institute (MRI)	Japão
NorESM2	Norwegian Earth System Model	Noruega

Fonte: O autor (2023).

4.5 Simulação hidrológica para cenários futuros do CMIP6

Com a calibração/validação do modelo, foi possível realizar simulação hidrológica e estimativa das vazões futuras do sistema Cantareira para o período de 2015-2100. A simulação hidrológica utilizou como entrada projeções futuras de precipitação e evapotranspiração (Quadro 8).

As projeções de vazão geradas dividem-se em três períodos até o final do século XXI: curto prazo (P1: 2015-2040), médio prazo (P2: 2041-2070) e longo prazo (P3: 2071-2100). Este procedimento foi feito para os dois cenários de emissão: mais otimista (SSP2-4.5) e mais pessimista (SSP5-8.5).

Quadro 7 - Dados de entrada para simulação hidrológica (projeções futuras)

Variável de entrada	Unidade	Detalhes dos dados	Fonte
Dados Climáticos: Evapotranspiração potencial de referência (ET _o)	mm	Dados diários (Período de 01/01/2015 até 31/12/2100)	CLIMBra (BALLARIN et al., 2023)
Dados Pluviométricos: Precipitação (pr)	mm	Dados diários (Período de 01/01/2015 até 31/12/2100)	CLIMBra (BALLARIN et al., 2023)

Fonte: O autor (2024).

Esta abordagem já foi utilizada por diversos autores (GESUALDO et al., 2019; KIM et al., 2021; ZHAO et al., 2019) e possibilita melhor compreensão dos resultados, permitindo

uma análise diferenciada dos impactos ao longo do tempo e sob diferentes contextos climáticos projetados. Ao dividir as projeções em períodos específicos e cenários de emissão distintos, pode-se avaliar não apenas tendências imediatas, mas também entender possíveis desafios em longo prazo. O contraste entre os dois cenários de emissão oferece uma perspectiva abrangente das possíveis trajetórias futuras, visando entender a importância das estratégias de mitigação e adaptação frente às mudanças climáticas

4.5.1 Cálculo da evapotranspiração potencial de referência (ET_o)

Para os dados observados, o dataset de Xavier et al. (2016) fornece não apenas os dados diários das variáveis climáticas, mas também da evapotranspiração potencial de referência (ET_o) já calculada pela equação de Penman-Monteith (FAO-56) (ALLEN et al., 1998), utilizados na entrada da calibração e validação do modelo.

Porém, no caso das projeções do CMIP6 do CLIMBra, é necessário o cálculo da ET_o. Assim, as projeções futuras de ET_o foram calculadas utilizando a equação de Penman-Monteith (FAO-56) (ALLEN et al., 1998) (Equação 6), utilizando os dados diários do CLIMBra para o período de 2015-2100.

$$ET_{o_{PMF}} = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) \cdot U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (6)$$

A Equação 1 expressa a ET_o (mm/dia) e envolve múltiplas variáveis, como Rn (saldo de radiação sobre a superfície da cultura em MJ/m²dia), G (densidade do fluxo de calor do solo em MJ/m²dia), T (temperatura do bulbo seco em °C), U₂ (velocidade do vento a 2 m de altura em m/s), e_s (pressão de vapor de saturação em kPa), e_a (pressão parcial de vapor em kPa), Δ (declividade da curva de pressão de vapor de saturação em kPa/°C), γ (coeficiente psicrométrico em kPa/°C).

A declividade da curva de pressão de vapor de saturação (Δ) foi calculada usando a Equação 7, seguida pelo cálculo da pressão do vapor de saturação (e_s) através da Equação 8, onde é T a temperatura do bulbo seco, em °C, valor obtido na estação meteorológica.

$$\Delta = \frac{4098 \cdot 0,6108 e^{\frac{17,27T}{T+237,3}}}{(T + 237,3)^2} \quad (7)$$

$$e_s = 0,6108 e^{\frac{17,27T}{T+237,3}} \quad (8)$$

O parâmetro e_a (pressão parcial de vapor) foi determinado conforme a Equação 9, utilizando a umidade relativa do ar (UR, em %), obtida das estações meteorológicas.

$$e_a = e_s \frac{UR}{100} \quad (9)$$

O coeficiente psicrométrico (γ) foi estimado segundo a Equação 10, com base em valores da pressão atmosférica (P_{atm}) retirados da série de dados da estação meteorológica.

$$\gamma = 6,647 \cdot 10^{-4} \cdot P_{atm} \quad (10)$$

O saldo de radiação solar (R_n , em MJ/m².dia) foi calculado a partir das Equações 11, 12 e 13, utilizando valores de radiação solar (R_s) retirados das estações meteorológicas e outros parâmetros. No roteiro de cálculo de R_n é necessário a determinação, principalmente, de dois fatores: o saldo de radiação de ondas curtas (R_{ns} , em MJ/m².dia) e o saldo de radiação de ondas longas (R_{nl} , em MJ/m².dia)

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (11)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s \quad (12)$$

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{(T_{max} + 273,6)^4 + (T_{min} + 273,6)^4}{2} \right) \cdot (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \cdot (1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{s0}} - 0,35) \quad (13)$$

Sendo α o albedo da cultura hipotética = 0,23, σ é a constante de Stefan-Boltzmann = $4,903 \times 10^{-9}$ (MJ/K⁴.m².dia), T_{max} e T_{min} valores obtidos das estações meteorológicas em °C e R_{s0} é a radiação solar, quando n/N é igual a 1,0 e foi calculada através das equações 14 e 15.

$$R_{s0} = (a_s + a_b) \cdot R_a \text{ (com céu limpo)} \quad (14)$$

$$R_{s0} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} z) \cdot R_a \text{ (com céu limpo, sem } a \text{ e } b \text{ calibrados)} \quad (15)$$

Sendo z a altitude do local (880 m), R_a a radiação solar no topo da atmosfera (MJ/m².d), $a_s = 0,25$ e $a_b = 0,50$ são coeficientes de transmutância atmosférica. O valor de R_a foi calculado através da Equação 16.

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{sc} \int [\omega s \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega s)] \quad (16)$$

Onde $G_{sc} = 0,0820$ MJ/m².min é a constante solar, dr é a distância relativa do sol a Terra em radianos (equação 17), ωs é o ângulo horário do pôr do sol (equação 18, em radianos), φ é a latitude do local e δ a declinação solar (equação 19), ambos em radianos.

$$dr = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right) \quad (17)$$

$$\omega s = \arccos[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad (18)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (19)$$

4.6 Impacto das mudanças climáticas

Com as estimativas futuras de vazão, foi possível ter melhor compreensão dos impactos das mudanças climáticas na segurança hídrica do sistema Cantareira. A comparação das médias mensais de vazão observadas e projetadas permitiu a análise de alguns pontos importantes:

- Alterações nas médias mensais de vazão, verificando, para cada mês do ano, se são projetados acréscimos ou decréscimos na vazão média, e a magnitude destas alterações.
- Alterações na variabilidade anual da vazão, com mudanças na duração e distribuição de períodos chuvosos ou de seca.
- Alterações na intensidade e distribuição dos picos e mínimos de vazão mensal, referente aos meses que historicamente apresentam maior ou menor valor médio.
- Valores de diferença relativa entre as vazões médias mensais projetadas e observadas
- Em cada etapa da análise, comparação entre as projeções considerando os impactos em curto, médio e longo prazo (P1, P2 e P3) e considerando os diferentes cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5, respectivamente).

Uma análise integrada com as projeções de precipitação e evapotranspiração permite também compreender se haverá alteração no comportamento das bacias em termos dos princípios do balanço hídrico. Gesualdo et al. (2019) e Zhao et al. (2019) são exemplos de trabalhos que apresentaram resultados satisfatórios utilizando esta abordagem.

4.7 Análise da segurança hídrica

Para análise da segurança hídrica em termos de escassez hídrica, a principal abordagem utilizada foi a desenvolvida por Rodrigues, Gupta e Mediondo (2014) e usada por Gesualdo et. al. (2019), na qual a demanda de água (abstração e consumo) é comparada com níveis probabilísticos de provisão de água (Eq. 20), baseada nos requisitos mínimos de fluxo ambiental (Environmental Flow Requirements – EFR).

Especificamente, foi aplicada a parte da metodologia referente à "água azul", que trata da água disponível em forma de recursos hídricos superficiais e subterrâneos que pode ser diretamente utilizada para usos consuntivos: consumo humano, agricultura, indústria, entre outros (RODRIGUES; GUPTA; MENDIONDO, 2014).

4.7.1 Níveis de provisão de água

Os níveis de provisão de água (Eq. 20) foram estimados levando em conta a disponibilidade de água (nos rios) para uso consuntivo:

$$\text{nível de provisão de água}_{(i,x,t)} = Q_{(x,t)} - EFR_{(i,x,t)} \quad (20)$$

Onde o nível de provisão de água (i,x,t) (m^3/s) é calculado com base na vazão natural do rio $Q(x,t)$ (m^3/s) e na fração desta vazão que deve ser mantida a fim de atender aos requisitos mínimos de fluxo ambiental (Environmental Flow Requirements – EFR) (i,x,t) (m^3/s).

Os valores da vazão natural do rio Q foram obtidos com o modelo conceitual calibrado e utilizados para obtenção dos respectivos valores de EFR, por meio do método da vazão $Q_{7,10}$:

Método da vazão $Q_{7,10}$ ($EFR_{Q_{7,10}}$): O $EFR_{Q_{7,10}}$ é definido pela vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$), sendo esta vazão um dos parâmetros para análise e concessão de outorgas de direito de uso da água nas bacias (SÃO PAULO, 2020). O valor de $Q_{7,10}$ é a vazão mínima anual de 7 dias que se espera ser excedida, em média, em 9 de cada 10 anos, o que equivale ao décimo percentil da distribuição das vazões mínimas anuais de 7 dias (REILLY; KROLL, 2003).

4.7.2 Uso e demanda de água

A principal demanda de água do sistema Cantareira, objeto deste estudo, é o abastecimento da RMSP. Dada a dificuldade de determinar a demanda específica para o sistema Cantareira e para cada um dos quatro reservatórios, a demanda da RMSP foi tratada como sendo a vazão outorgada para a Estação de Tratamento de Água (ETA) de Guaraú, que é responsável por captar água do Sistema Cantareira e destiná-la ao abastecimento da RMSP. Esta vazão é outorgada em faixas que variam conforme o volume útil do Sistema Cantareira, variando entre 24,8 e 33 m^3/s em níveis normais (SABESP, 2024; SÃO PAULO, 2020).

A soma teórica da vazão natural dos quatro reservatórios do Sistema Cantareira fornece a vazão do chamado sistema equivalente. A vazão do sistema equivalente (entrada) e a vazão retirada pela ETA Guaraú (saída) são valores agregados utilizados pela SABESP na gestão do Cantareira como um todo, para monitoramento diário dos níveis (%) e volume útil (hm^3) do sistema. Vários estudos e projetos que realizaram a simulações hidráulicas do funcionamento do sistema Cantareira para diversos fins trataram a demanda de abastecimento da RMSP como a vazão outorgada para a ETA Guaraú (33 m^3/s) (SÃO PAULO, 2020).

Para distribuir a vazão de 33 m³/s entre os quatro reservatórios, foi calculada a média das vazões observadas de cada reservatório para o período histórico (2000-2015). Com base nessas médias, determinou-se a proporção percentual de contribuição de cada reservatório para a vazão total do sistema. Esses percentuais foram aplicados à vazão de 33 m³/s para obter valores teóricos de demanda de abastecimento para a RMSP em cada reservatório.

4.7.3 Indicadores de escassez e vulnerabilidade hídrica

Assim, a segurança hídrica foi avaliada utilizando os indicadores de escassez e vulnerabilidade hídrica (RODRIGUES; GUPTA; MENDIONDO, 2014) (Eq. 22 e 23).

$$escassez\ hídrica_{(i,x,t)} = \frac{consumo\ de\ água_{(x,t)}}{nível\ médio\ de\ provisão\ de\ água_{(i,x,t)}} \quad (22)$$

$$vulnerabilidade\ hídrica_{(i,x,t)} = \frac{abstração\ de\ água_{(x,t)}}{nível\ baixo\ de\ provisão\ de\ água_{(i,x,t)}} \quad (23)$$

Onde a abstração de água (x,t) (m³/s) é a soma correspondente das outorgas de captação de água e o consumo de água (x,t) (m³/s) refere-se à parcela de uso consuntivo da água (captações - lançamentos). O nível médio de provisão de água (i,x,t) (m³/s) considera o percentil 50 do nível de provisão de água e o nível baixo de provisão de água considera o percentil 30. Para ambos os níveis de provisão, foi utilizado o EFR_{Q7,10}. Devido a falta de dados específicos de consumo e abstração de água considerando a demanda de abastecimento da RMSP do sistema Cantareira, neste trabalho o valor de abstração de água (Eq. 23) considerado foi o mesmo do valor de consumo de água (Eq. 22), conforme explicado na seção anterior (4.7.2 Uso e demanda de água).

4.7.4 Vazão decamilenar

Além de considerar a escassez e vulnerabilidade hídrica através dos respectivos indicadores, também foi avaliada a segurança hídrica sob o aspecto do excesso de água. Para isso, foi realizada comparação entre as vazões médias mensais projetadas pelo modelo hidrológico calibrado e a vazão decamilenar.

A vazão decamilenar é uma medida hidrológica frequentemente empregada como parâmetro de dimensionamento de obras hidráulicas de grande porte, representando uma vazão de recorrência de 10.000 anos, sendo a vazão de cheia de projeto considerada pela Agência

Nacional de Águas (ANA, 2016) para o projeto de barragens (OLIVEIRA; FRANÇA; OLIVEIRA, 2023).

Assim, a vazão decamilenar representa um cenário extremo de entrada de água nos reservatórios do Sistema Cantareira, servindo como referência para avaliar a capacidade destes em lidar com eventos de excesso de água. Para o cálculo a vazão decamilenar, foi realizado tratamento estatístico dos dados históricos de vazão, ajustando-os a uma distribuição probabilística adequada, neste caso a distribuição de Gumbel. Para verificar o ajuste dos dados, foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) (MASSEY, 1951).

Uma vez ajustada a distribuição, foi possível determinar a vazão correspondente a um período de retorno de 10.000 anos, isto envolve a extrapolação dos dados históricos para então calcular a vazão decamilenar, que tem uma probabilidade de 0,01% de ser excedida.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Dados hidrológicos e meteorológicos históricos da área de estudo

5.2 Modelagem Hidrológica

A modelagem hidrológica foi realizada para o período de calibração, compreendendo o intervalo dos anos de 2000 até 2006, e de validação, compreendendo os anos de 2007 até 2015.

Na calibração do modelo foram encontrados os parâmetros satisfatórios (Tabela 1) e que ajustaram melhor a série de vazão simulada à observada. O período de validação foi utilizado para avaliar o desempenho dos parâmetros, com a modelagem em intervalos de tempo distintos.

5.2.1 Calibração do modelo

Os resultados dos parâmetros ótimos obtidos após a calibração do modelo são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 - Parâmetros ótimos e métricas do processo de calibração/validação do modelo

Reservatório	Parâmetros ótimos				KGE		r		MSE		Pbias (%)	
	alpha	su_max	tf	ts	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.
Jaguari-Jacaré	0.225	228.911	85.243	3.347	0.83	0.80	0.83	0.82	0.49	0.61	1.82	9.50
Cachoeira	0.189	820.873	49.270	2.467	0.77	0.77	0.77	0.78	0.51	0.73	0.39	0.37
Atibainha	0.201	386.247	139.564	1.334	0.65	0.65	0.65	0.66	1.07	1.28	0.45	6.14
Paiva Castro	0.144	443.131	103.676	1.297	0.62	0.66	0.62	0.67	0.78	0.94	-0.63	-0.31

Fonte: O autor (2024).

Não foi executada uma análise de sensibilidade dos parâmetros, porém no processo de calibração, alguns exibiram maior sensibilidade, exercendo, portanto, um impacto mais significativo na performance do modelo. Pequenas variações nos valores de Su_max e Ts geraram significativas alterações na vazão simulada. As Figuras 10-13 permitem a visualização das vazões simuladas e observadas ao longo do período de calibração do modelo para os reservatórios em estudo.

Para o reservatório do Jaguari-Jacaré, na calibração, o modelo apresentou KGE de 0,83, indicando um desempenho muito bom, valores de KGE próximos de 1 são desejáveis. O

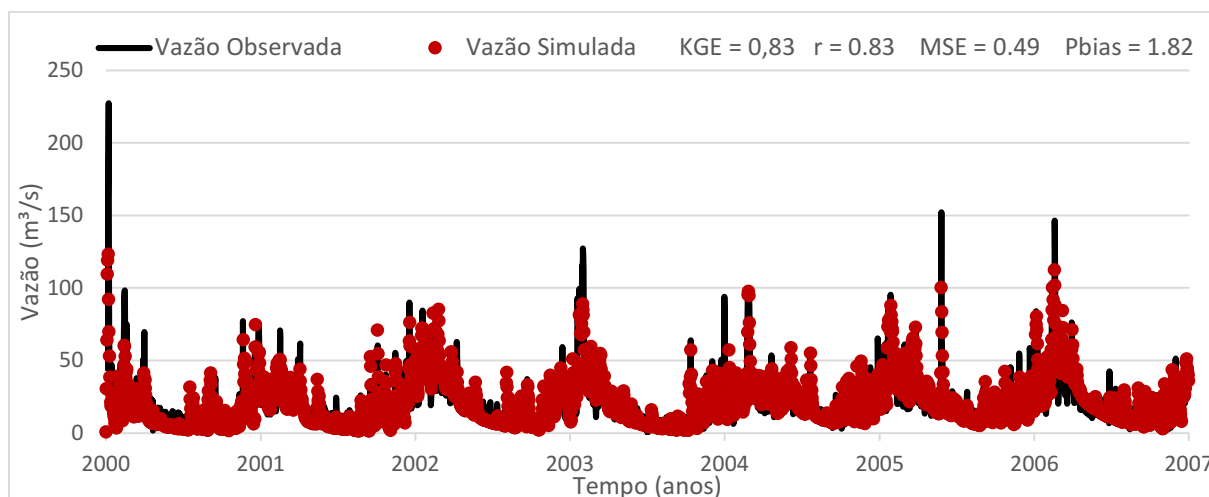
desempenho para o Cachoeira também foi robusto ($KGE = 0,77$), refletindo uma boa capacidade de simulação. No entanto, para os reservatórios do Atibainha e Paiva Castro, os valores ($KGE = 0,65$ e $KEG = 0,62$, respectivamente) apontam para um desempenho moderado a satisfatório, sugerindo a necessidade de ajustes adicionais ou diferentes estratégias para calibração.

O coeficiente de correlação (r) possibilitou avaliar a relação linear entre os valores observados e simulados. Para o reservatório do Jaguari, o valor de $r = 0,83$ indica uma forte correlação e precisão do modelo em replicar a variabilidade observada. O Cachoeira teve desempenho semelhante ($r = 0,77$). Novamente, para os reservatórios do Atibainha e Paiva Castro, os valores foram relativamente menores ($r = 0,65$ e $r = 0,62$, respectivamente), sugerindo menor correspondência linear entre a série simulada e observada.

O MSE ofereceu uma perspectiva sobre a magnitude média dos erros de previsão. Para o reservatório do Jaguari e Cachoeira, com $MSE = 0,49$ e $0,51$, respectivamente, os valores relativamente baixos indicam que os erros de previsão do modelo são pequenos em relação à variância dos dados. Para os reservatórios do Paiva Castro e Atibainha, porém, verificou-se aumento na magnitude médias dos erros ($MSE = 0,78$ e $MSE = 1,07$, respectivamente).

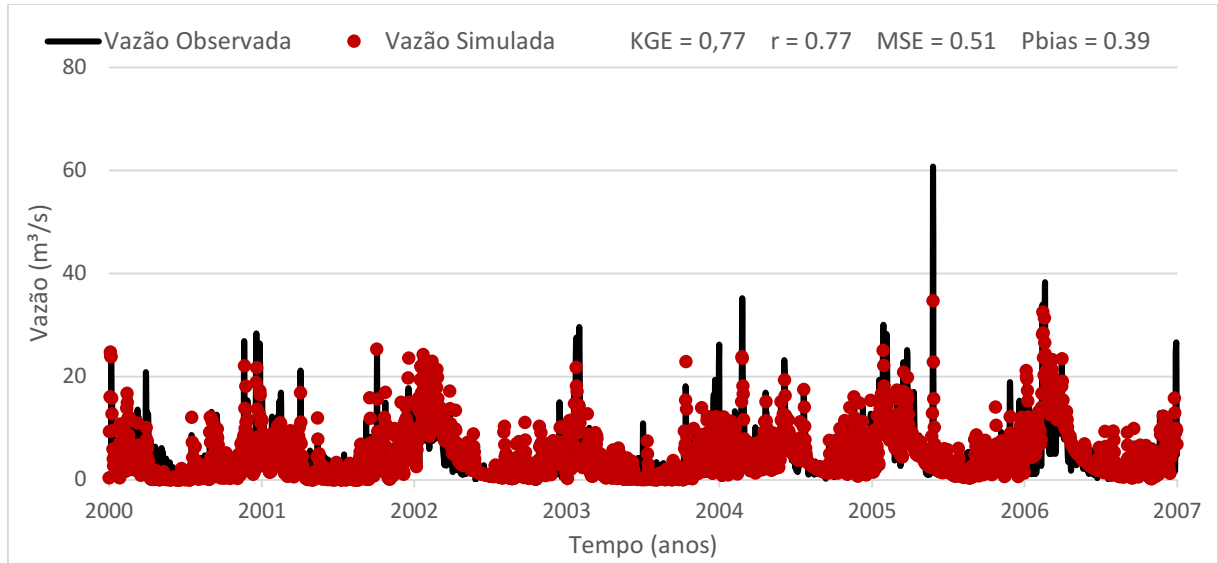
O uso do Pbias possibilitou quantificar o viés sistemático do modelo. Para o reservatório do Jaguari, o Pbias foi de 1,82%, o que indica uma leve superestimação das vazões simuladas pelo modelo. Nos reservatórios do Cachoeira ($Pbias = 0,39\%$), Atibainha ($Pbias = 0,45\%$) e Paiva Castro ($Pbias = -0,63\%$), os valores são baixos, indicando um viés praticamente inexistente, o que é o ideal. Com exceção do Paiva Castro, em todos os reservatórios o modelo tende a superestimar as vazões simuladas em relação às observadas.

Figura 10 - Vazões diárias observadas e simuladas para o período de calibração do modelo (2000-2007) para a bacia do rio Jaguari-Jacareí



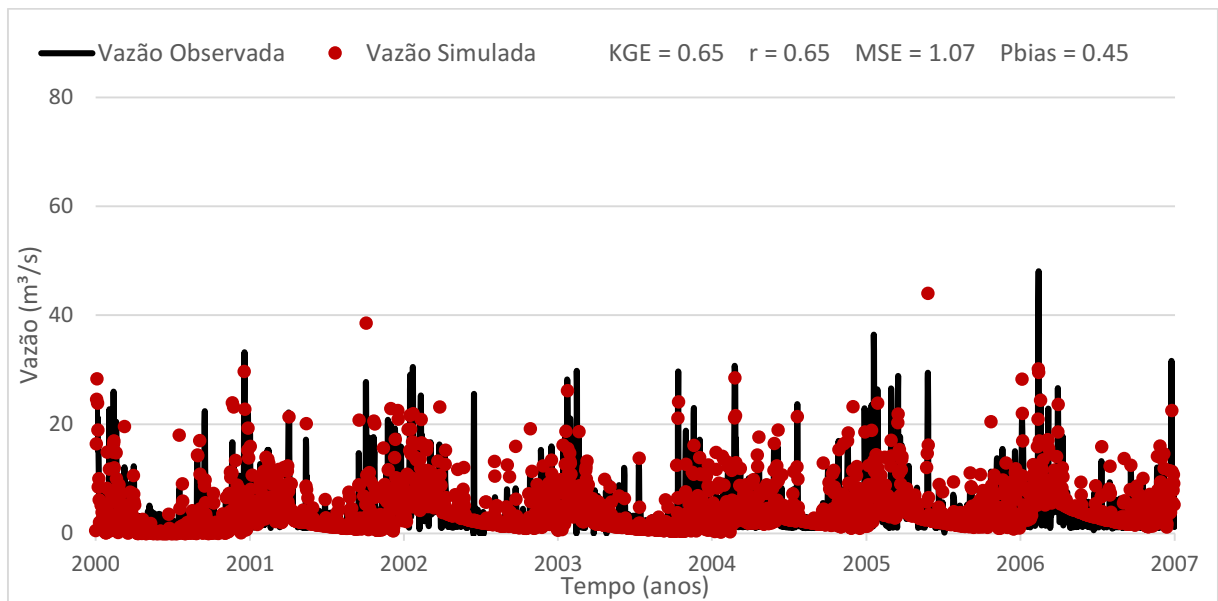
Fonte: O autor (2024)

Figura 11 - Vazões diárias observadas e simuladas para o período de calibração do modelo (2000-2007) para a bacia do rio Cachoeira



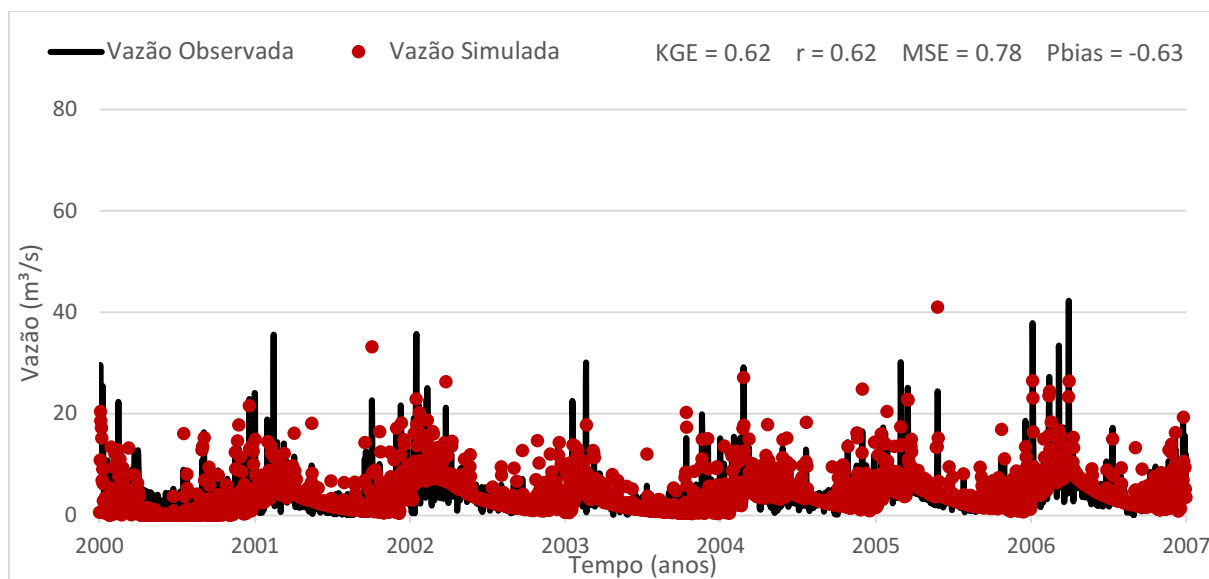
Fonte: O autor (2024)

Figura 12 - Vazões diárias observadas e simuladas para o período de calibração do modelo (2000-2007) para a bacia do rio Atibainha



Fonte: O autor (2024)

Figura 13 - Vazões diárias observadas e simuladas para o período de calibração do modelo (2000-2007) para a bacia do rio Paiva Castro



Fonte: O autor (2024)

Para todos os reservatórios, o modelo teve dificuldades em reproduzir satisfatoriamente os picos de vazão, graficamente nota-se que os pontos máximos de vazão observada, em geral, não acompanhados pela respectiva vazão simulada. Em compensação, o modelo representou bem a maioria das tendências observadas, principalmente as tendências de baixa e os mínimos de vazão, bem como intervalos de ascensão e recessão.

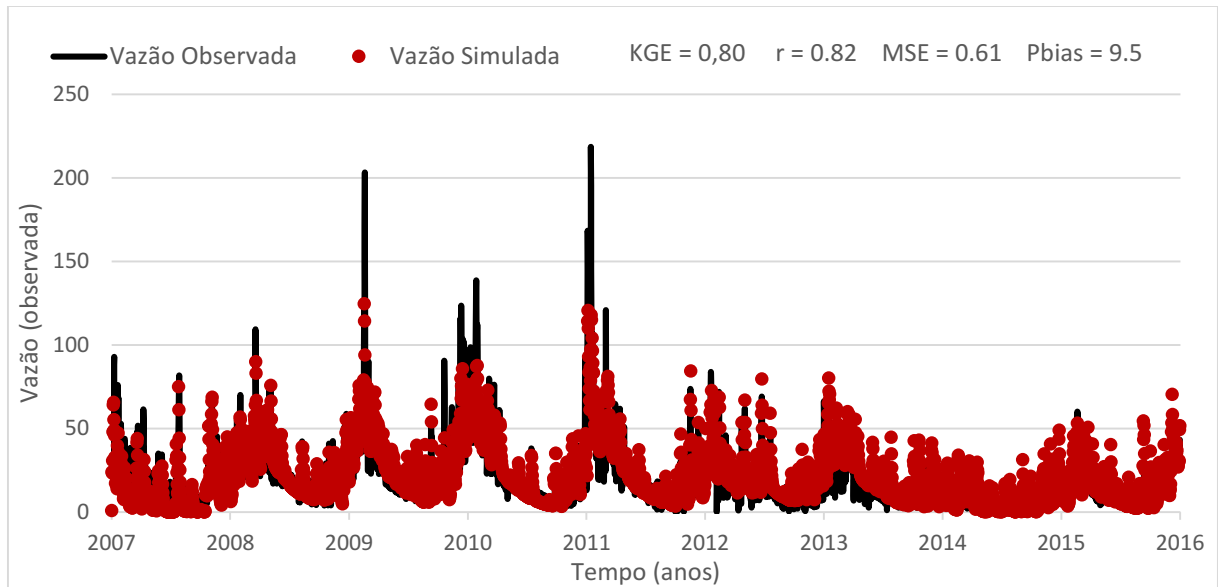
Os resultados demonstram que o modelo teve um desempenho variável entre os diferentes reservatórios. O desempenho é particularmente bom no caso dos reservatórios do Jaguari-Jacaré e Cachoeira, enquanto para o Atibainha e Paiva Castro, embora os resultados sejam aceitáveis, há margem para melhorias. Recomenda-se a revisão e possível refinamento no processo de calibração para aumentar a precisão das previsões, especialmente no caso do Atibainha e Paiva Castro.

De forma geral, o modelo se mostrou confiável e eficaz em replicar a hidrologia das bacias estudadas, apresentando boa concordância e correlação dos dados, bem como reprodução das principais tendências, com algumas áreas identificadas para aprimoramento futuro.

5.2.2 Validação do modelo conceitual

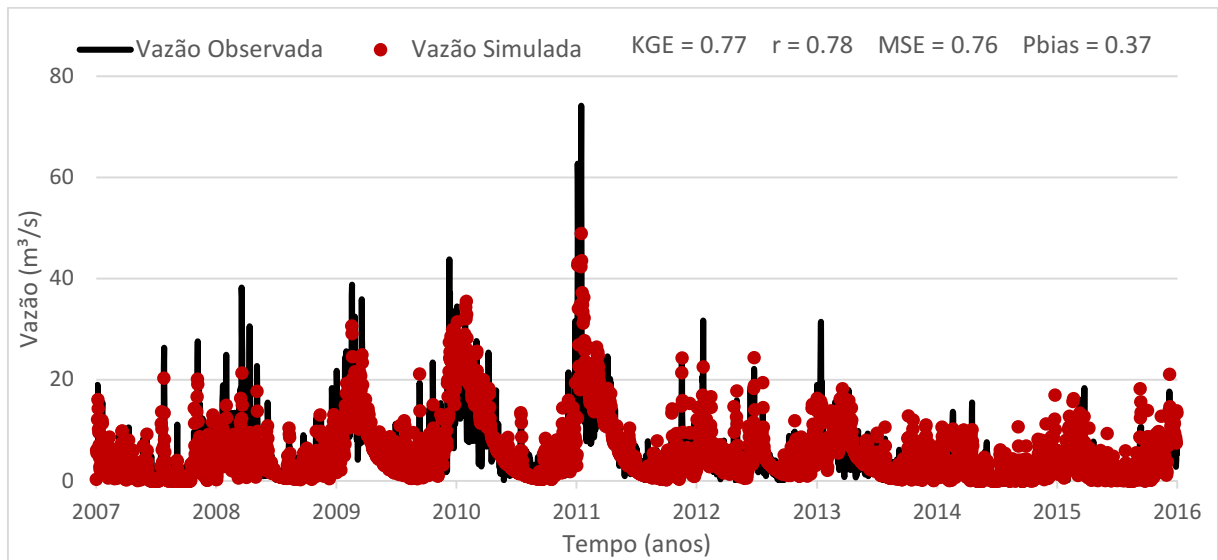
Nas Figuras 14-17, são exibidos os resultados de vazão simulada durante o período de validação, utilizado o conjunto de parâmetros ótimos obtidos na etapa de calibração.

Figura 14 - Vazões diárias observadas e simuladas para o período de validação do modelo (2008-2015) para a bacia do rio Jaguari-Jacaré



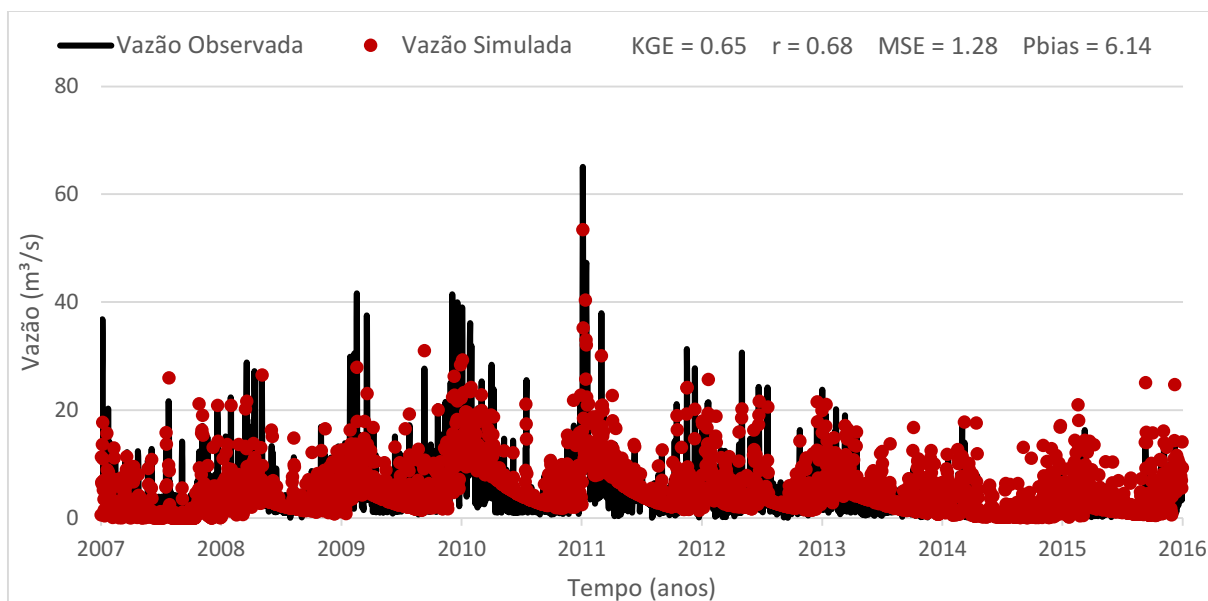
Fonte: O autor (2024)

Figura 15 - Vazões diárias observadas e simuladas para o período de validação do modelo (2008-2015) para a bacia do rio Cachoeira



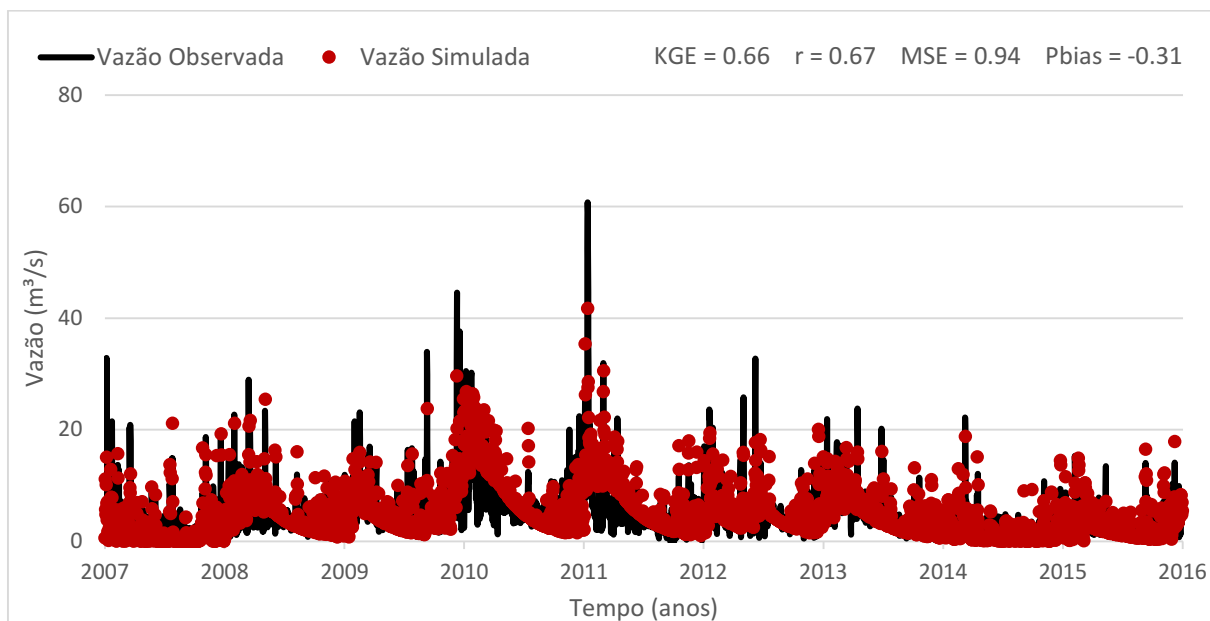
Fonte: O autor (2024)

Figura 16 - Vazões diárias observadas e simuladas para o período de validação do modelo (2008-2015) para a bacia do rio Atibainha



Fonte: O autor (2024)

Figura 17 - Vazões diárias observadas e simuladas para o período de validação do modelo (2008-2015) para a bacia do rio Paiva Castro



Fonte: O autor (2024)

Os resultados da validação do modelo evidenciam a continuidade do desempenho observado durante a calibração, embora com algumas variações significativas entre os reservatórios analisados.

Para os reservatórios Jaguari-Jacareí, o KGE foi de 0,80, o que, embora ligeiramente inferior ao valor da etapa de calibração (0,83), ainda indica um desempenho muito bom. O mesmo para o Cachoeira, que neste caso se manteve estável em 0,77. Os reservatórios do

Atibainha e Paiva Castro apresentaram KGE de 0,65 e 0,66 na validação, respectivamente, valores levemente superiores aos resultados de calibração (KGE = 0,65 e 0,62), indicando que, apesar de um desempenho moderado, o modelo continua a apresentar desafios na simulação das vazões. Os coeficientes de correlação (r) durante a validação também mostram tendência semelhante, com Jaguari-Jacaré ($r = 0,82$) e Cachoeira ($r = 0,78$) demonstrando forte correlação entre os dados observados e simulados, e os reservatórios Atibainha e Paiva Castro apresentando valores menores ($r = 0,66$ e $r = 0,67$, respectivamente).

O MSE também refletiu o desempenho entre os reservatórios. Jaguari-Jacaré e Cachoeira mantiveram valores relativamente baixos (MSE = 0,61 e 0,73, respectivamente). Atibainha e Paiva Castro apresentaram um aumento para 1,28 e 0,94, respectivamente. Quanto ao Pbias, os resultados da validação mostram que o reservatório Jaguari-Jacaré apresentou um viés de superestimação ainda maior (Pbias = 9,5%), enquanto o Cachoeira permaneceu próximo da neutralidade (Pbias = 0,37%). Atibainha e Paiva Castro mostraram valores de Pbias mais baixos (Pbias = 6,14% e Pbias = -0,31%, respectivamente).

Assim como na calibração, o modelo encontrou dificuldades em reproduzir os picos de vazão durante a validação. Observa-se que os máximos de vazão observada frequentemente não foram acompanhados pela vazão simulada, o que é um aspecto crítico a ser abordado em futuras calibrações. Contudo, o modelo demonstrou competência em replicar as tendências gerais, especialmente nas mínimas de vazão e nas dinâmicas de ascensão e recessão.

No geral, os resultados da validação reafirmam a confiabilidade do modelo na simulação da hidrologia dos reservatórios do sistema Cantareira. Embora os reservatórios Jaguari-Jacaré e Cachoeira apresentem um desempenho satisfatório, Atibainha e Paiva Castro ainda requerem melhorias significativas.

5.2.3 Projeções de precipitação para os reservatórios do sistema Cantareira

As projeções futuras de precipitações indicam tendências semelhantes para todos os reservatórios (Figuras 22-25). Foram verificados acréscimos nos índices de precipitação durante o verão (entre novembro e fevereiro), em relação ao período histórico. Tanto para as projeções quanto para a série observada, o mês mais chuvoso continua sendo janeiro.

As diferenças relativas entre as vazões projetadas e observadas (Tabelas 3-6) reafirmam a magnitude dos acréscimos durante o verão. Para o reservatório do Jaguari-Jacaré, são indicados aumentos na faixa de 35-46% na precipitação média (para os dois cenários e todo

período) no mês de fevereiro. O mesmo para os reservatórios do Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro (com aumentos 29-38%, 21-30% e 17-27%, respectivamente).

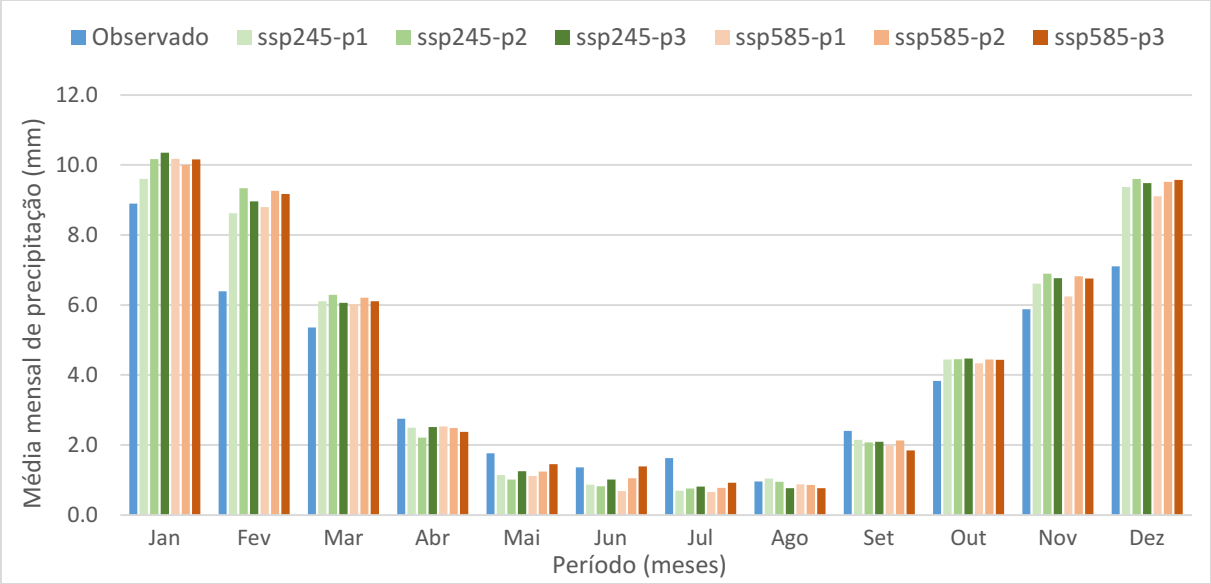
Percebe-se também decréscimos da precipitação em meses do outono e inverno (abril até setembro), com déficits de chuva mais significativos entre maio e julho. Nota-se uma mudança do mês mais seco, no período histórico os mínimos de chuva se dão no mês de agosto, enquanto nas projeções passam a ocorrer no mês de julho.

No geral, não foram identificadas diferenças significativas na variabilidade anual dos regimes de precipitação. Tanto para o período histórico quanto para as projeções, o período chuvoso continua a ocorrer a partir de outubro até março e a seca entre abril e setembro. Nota-se, porém, maior intensidade destes eventos, as projeções indicam que os aumentos relativos são maiores justamente nos meses mais chuvosos (dezembro até fevereiro), e menores nos meses mais secos (maio até julho).

Interessante notar que os resultados não indicam grandes diferenças para precipitação média mensal entre os dois cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5). As diferenças relativas entre os regimes de chuva históricos e projetados são similares para ambos os cenários, assim como a variabilidade sazonal, que também se manteve similar para os períodos avaliados (curto, médio e longo prazo).

Utilizando projeções do projeto CMIP5, alguns autores obtiveram resultados semelhantes em estudos de segurança hídrica nas respectivas regiões. Siqueira et al. (2021), por exemplo, também estimou acréscimos de precipitação média entre os meses de outubro e dezembro para ambos os cenários de emissão. Outros pesquisadores (AHN; JEONG; KIM, 2016; KIM et al., 2021; SIQUEIRA et al., 2021) também não identificaram mudanças significativas na variabilidade anual de precipitação, na distribuição dos períodos seco e chuvoso, bem como alteração nas principais tendências. Siqueira et al. (2021) porém, verificou maiores reduções de precipitação média mensal projetadas para o período seco, desde março até setembro, sem alteração no mês mais seco.

Figura 18 - Projeções de precipitação média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Jaguari-Jacaré



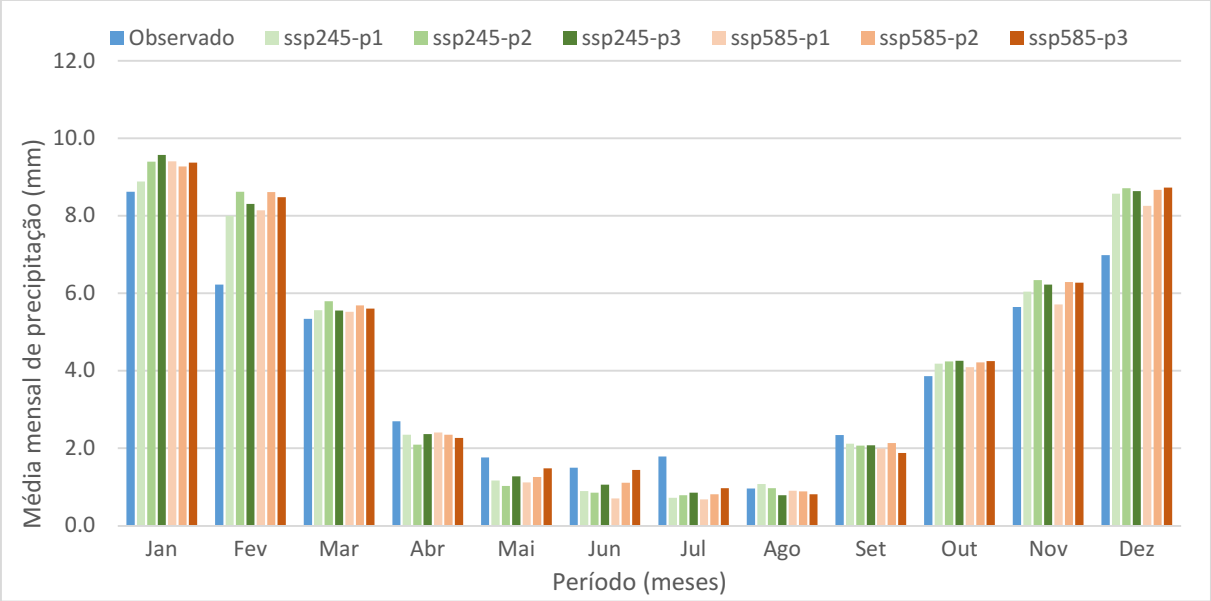
Fonte: O autor (2024)

Tabela 2 - Diferenças relativas entre as precipitações médias mensais projetadas e observadas para a bacia do reservatório do Jaguari-Jacaré

	ssp2-4.5- p1	ssp2-4.5- p2	ssp2.4-5- p3	ssp5-8.5- p1	ssp5-8.5- p2	ssp5-8.5- p3
Jan	8%	14%	16%	14%	12%	14%
Fev	35%	46%	40%	38%	45%	43%
Mar	14%	17%	13%	12%	16%	14%
Abr	-9%	-20%	-9%	-8%	-10%	-14%
Mai	-35%	-42%	-29%	-37%	-30%	-17%
Jun	-36%	-40%	-25%	-50%	-23%	2%
Jul	-58%	-53%	-50%	-60%	-52%	-43%
Ago	9%	-2%	-20%	-9%	-10%	-20%
Set	-11%	-14%	-13%	-17%	-11%	-23%
Out	16%	16%	17%	13%	16%	16%
Nov	12%	17%	15%	6%	16%	15%
Dez	32%	35%	33%	28%	34%	35%

Fonte: O autor (2024)

Figura 19 - Projeções de precipitação média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Cachoeira



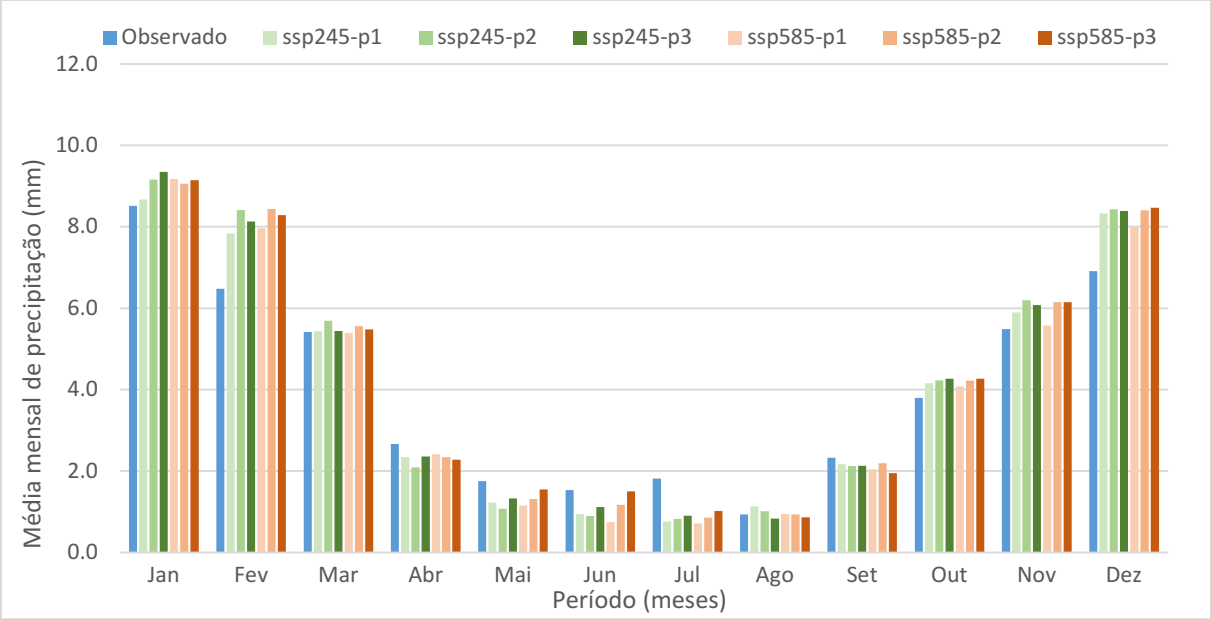
Fonte: O autor (2024)

Tabela 3 - Diferenças relativas entre as precipitações médias mensais projetadas e observadas para a bacia do reservatório do Cachoeira

	ssp2-4.5- p1	ssp2-4.5- p2	ssp2.4-5- p3	ssp5-8.5- p1	ssp5-8.5- p2	ssp5-8.5- p3
Jan	3%	9%	11%	9%	8%	9%
Fev	29%	38%	33%	31%	38%	36%
Mar	4%	9%	4%	3%	7%	5%
Abr	-13%	-22%	-12%	-11%	-13%	-16%
Mai	-34%	-42%	-28%	-37%	-29%	-16%
Jun	-40%	-43%	-29%	-53%	-26%	-4%
Jul	-60%	-56%	-52%	-62%	-55%	-46%
Ago	12%	1%	-18%	-6%	-7%	-16%
Set	-9%	-11%	-11%	-15%	-9%	-20%
Out	9%	10%	10%	6%	9%	10%
Nov	7%	12%	10%	1%	11%	11%
Dez	23%	25%	24%	18%	24%	25%

Fonte: O autor (2024)

Figura 20 - Projeções de precipitação média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Atibainha



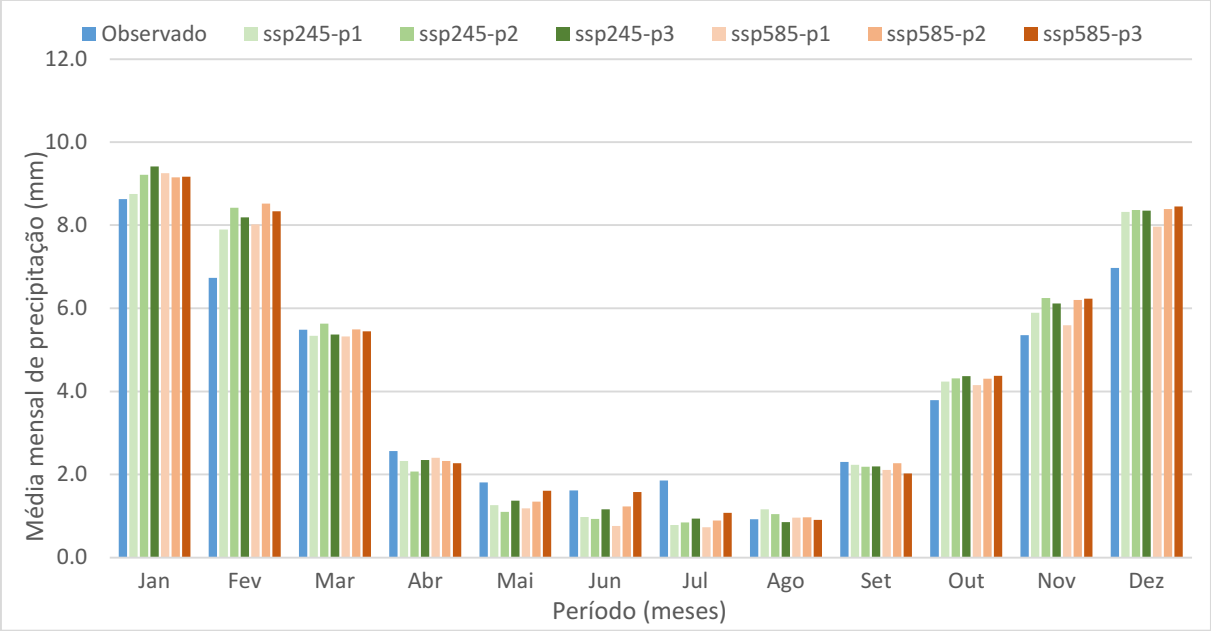
Fonte: O autor (2024)

Tabela 4 - Diferenças relativas entre as precipitações médias mensais projetadas e observadas para a bacia do reservatório do Atibainha

	ssp2-4.5- p1	ssp2-4.5- p2	ssp2.4-5- p3	ssp5-8.5- p1	ssp5-8.5- p2	ssp5-8.5- p3
Jan	2%	8%	10%	8%	6%	7%
Fev	21%	30%	25%	23%	30%	28%
Mar	0%	5%	0%	0%	3%	1%
Abr	-12%	-22%	-11%	-10%	-12%	-15%
Mai	-30%	-39%	-24%	-34%	-25%	-12%
Jun	-39%	-42%	-27%	-51%	-24%	-2%
Jul	-58%	-55%	-50%	-61%	-53%	-44%
Ago	21%	9%	-11%	1%	0%	-7%
Set	-7%	-9%	-8%	-12%	-5%	-16%
Out	9%	11%	12%	7%	11%	12%
Nov	7%	13%	11%	1%	12%	12%
Dez	20%	22%	21%	16%	22%	22%

Fonte: O autor (2024)

Figura 21 - Projeções de precipitação média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório Paiva Castro



Fonte: O autor (2024)

Tabela 5 - Diferenças relativas entre as precipitações médias mensais projetadas e observadas para a bacia do reservatório Paiva Castro

	ssp2-4.5- p1	ssp2-4.5- p2	ssp2.4-5- p3	ssp5-8.5- p1	ssp5-8.5- p2	ssp5-8.5- p3
Jan	1%	7%	9%	7%	6%	6%
Fev	17%	25%	22%	19%	27%	24%
Mar	-3%	3%	-2%	-3%	0%	-1%
Abr	-9%	-19%	-9%	-6%	-9%	-11%
Mai	-30%	-39%	-24%	-35%	-25%	-11%
Jun	-39%	-42%	-28%	-53%	-24%	-2%
Jul	-58%	-54%	-49%	-60%	-52%	-42%
Ago	25%	13%	-7%	4%	4%	-2%
Set	-3%	-5%	-5%	-8%	-1%	-12%
Out	12%	14%	15%	10%	14%	16%
Nov	10%	17%	14%	5%	16%	17%
Dez	19%	20%	20%	14%	20%	21%

Fonte: O autor (2024)

5.2.4 Projeções de evapotranspiração para reservatórios do sistema Cantareira

As projeções de evapotranspiração (Figuras 26-29) na média mensal apontam para o inverso do constatado com as projeções de precipitação, também para todos os reservatórios.

As projeções futuras indicam decréscimos na média mensal de evapotranspiração entre outubro-março e acréscimos entre abril-setembro, em relação à série histórica. O período com os menores valores ocorre nos meses de junho e julho, tanto para as projeções quanto para o período observado. Isto pode ser constatado graficamente (Figuras 26-29) e nas diferenças relativas entre as séries projetadas e observadas (Tabelas 7-10)

Percebe-se pouca alteração na variabilidade anual da evapotranspiração. Tanto para o período histórico quanto para as projeções, os valores mensais oscilam entre tendências de baixa, até atingir o mínimo, geralmente em junho, e tendências de alta, até atingir o pico, geralmente em novembro. Isto ocorre em ambos os cenários de emissão e horizontes considerados (curto, médio e longo prazo). Esta similaridade e constância das tendências é verificada claramente nas Figuras 26-29.

Nota-se um padrão claro para os cenários (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) e horizontes (P1-P3), entre si e com relação ao período histórico. Existe um acréscimo em todos os meses nos valores de evapotranspiração para o cenário mais pessimista (SSP5-8.5) em relação ao cenário mais otimista (SSP2-4.5). Da mesma forma, para ambos os cenários de emissão, as médias aumentam conforme os horizontes considerados, com pequenos acréscimos considerando o curto prazo (P1), porém maiores valores em longo prazo (P3). Assim, as projeções de evapotranspiração tendem a aumentar no cenário SSP5-8.5 e em longo prazo (P3).

Figura 22 - Projeções de evapotranspiração média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório Jaguari Jacareí

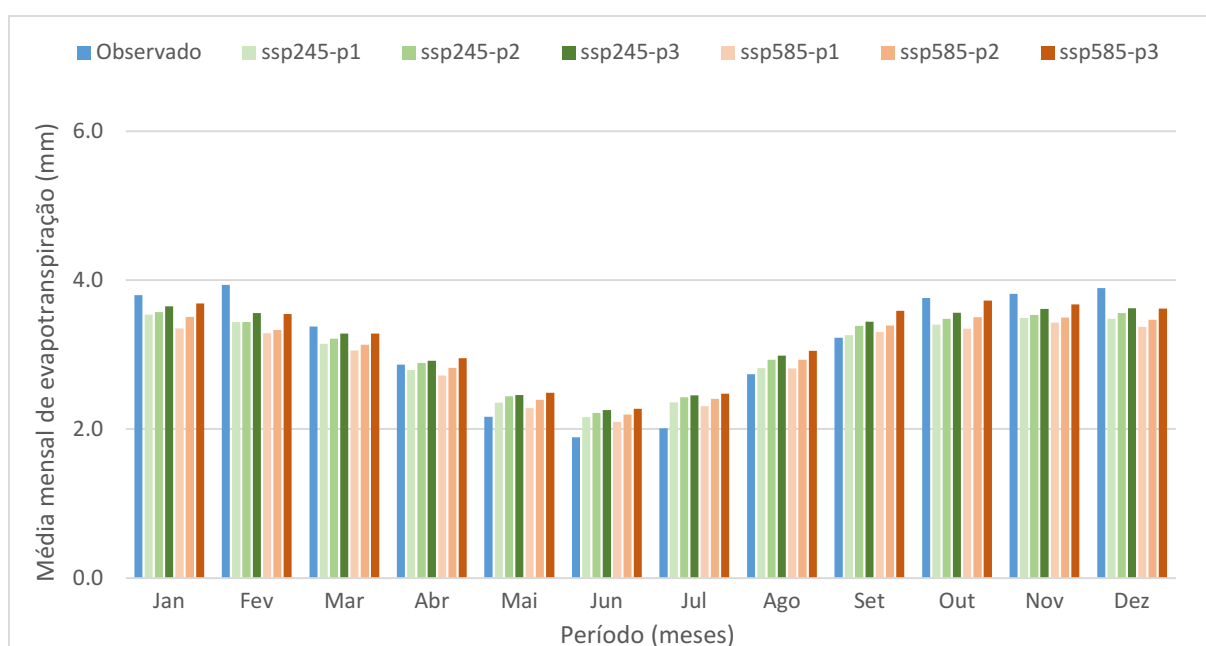


Tabela 6 - Diferenças relativas entre a evapotranspiração média mensal projetada e observada para a bacia do rio Jaguari-Jacareí

	ssp2-4.5- p1	ssp2-4.5- p2	ssp2.4-5- p3	ssp5-8.5- p1	ssp5-8.5- p2	ssp5-8.5- p3
Jan	-7%	-6%	-4%	-12%	-8%	-3%
Fev	-13%	-13%	-10%	-17%	-15%	-10%
Mar	-7%	-5%	-3%	-10%	-7%	-3%
Abr	-3%	1%	2%	-5%	-2%	3%
Mai	9%	13%	14%	5%	11%	15%
Jun	14%	17%	19%	11%	16%	20%
Jul	17%	21%	22%	15%	20%	23%
Ago	3%	7%	9%	3%	7%	11%
Set	1%	5%	7%	2%	5%	11%
Out	-9%	-7%	-5%	-11%	-7%	-1%
Nov	-9%	-7%	-5%	-10%	-8%	-4%
Dez	-11%	-9%	-7%	-13%	-11%	-7%

Fonte: O autor (2024)

Figura 23 - Projeções de evapotranspiração média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório Cachoeira

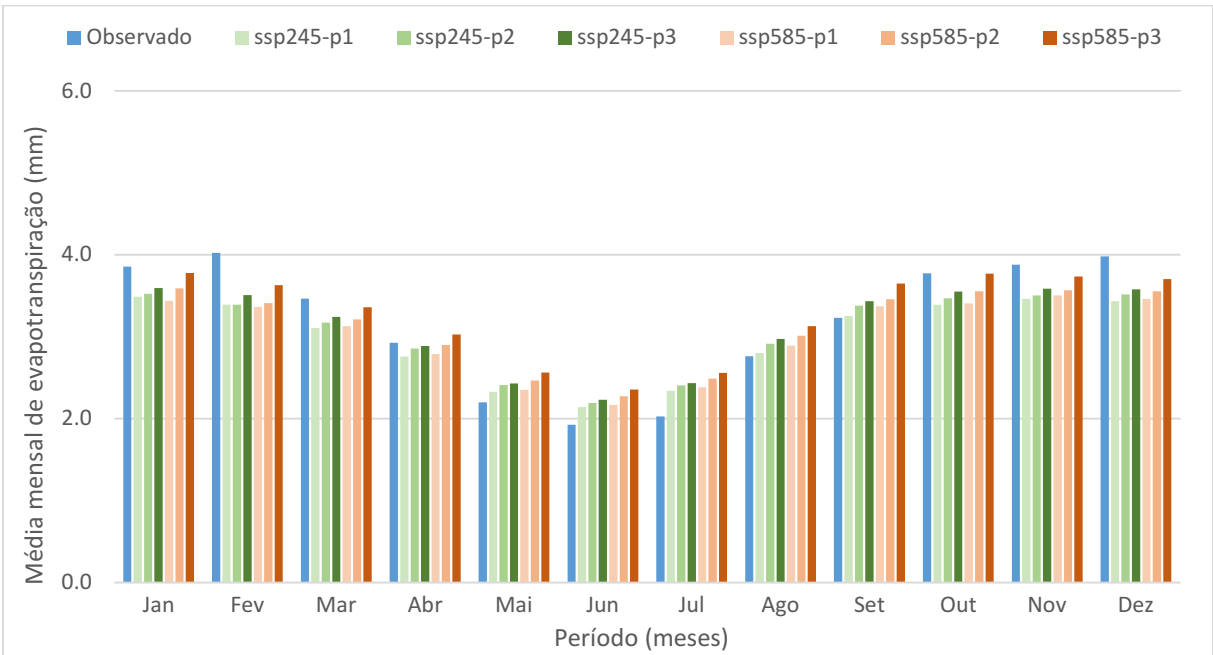


Tabela 7 - Diferenças relativas entre a evapotranspiração média mensal projetada e observada para a bacia do rio Cachoeira

	ssp2-4.5- p1	ssp2-4.5- p2	ssp2.4-5- p3	ssp5-8.5- p1	ssp5-8.5- p2	ssp5-8.5- p3
Jan	-10%	-9%	-7%	-11%	-7%	-2%
Fev	-16%	-16%	-13%	-16%	-15%	-10%
Mar	-10%	-8%	-6%	-10%	-7%	-3%

Abr	-6%	-2%	-1%	-5%	-1%	4%
Mai	6%	10%	10%	7%	12%	17%
Jun	11%	14%	16%	13%	18%	22%
Jul	15%	19%	20%	17%	23%	26%
Ago	1%	6%	8%	5%	9%	13%
Set	1%	5%	6%	4%	7%	13%
Out	-10%	-8%	-6%	-10%	-6%	0%
Nov	-11%	-10%	-8%	-10%	-8%	-4%
Dez	-14%	-12%	-10%	-13%	-11%	-7%

Fonte: O autor (2024)

Figura 24 - Projeções de evapotranspiração média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório Atibainha

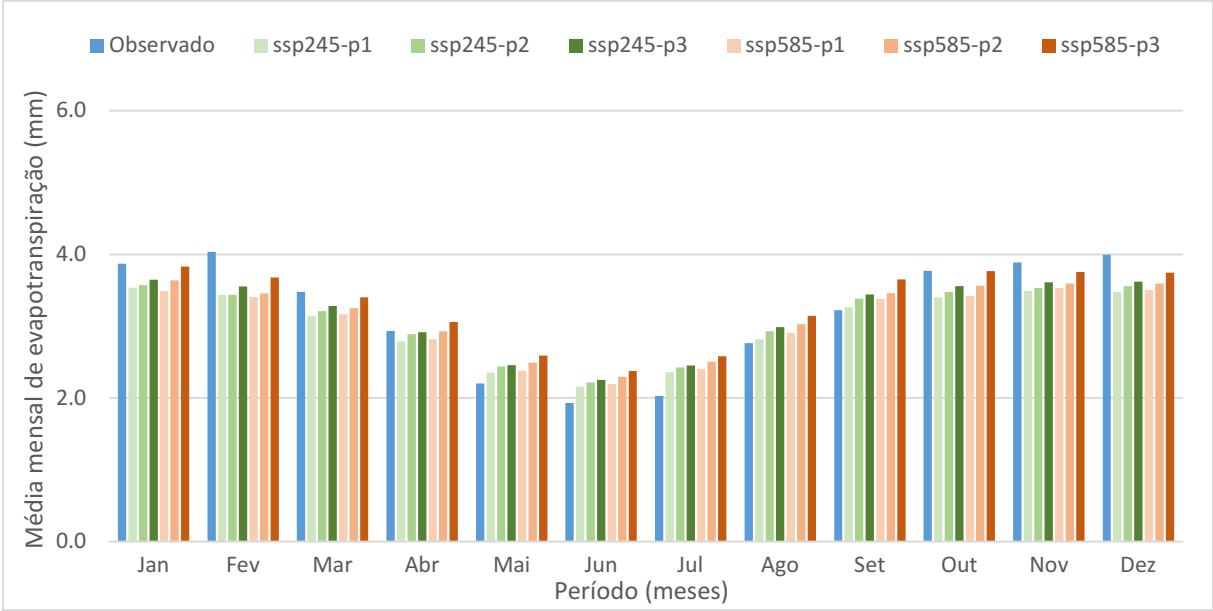


Tabela 8 - Diferenças relativas entre a evapotranspiração média mensal projetada e observada para a bacia do rio Atibainha

	ssp2-4.5- p1	ssp2-4.5- p2	ssp2.4-5- p3	ssp5-8.5- p1	ssp5-8.5- p2	ssp5-8.5- p3
Jan	-9%	-8%	-6%	-10%	-6%	-1%
Fev	-15%	-15%	-12%	-16%	-14%	-9%
Mar	-10%	-8%	-6%	-9%	-7%	-2%
Abr	-5%	-2%	-1%	-4%	0%	4%
Mai	7%	11%	12%	8%	13%	18%
Jun	12%	15%	17%	14%	19%	23%
Jul	16%	20%	21%	18%	24%	27%
Ago	2%	6%	8%	5%	10%	14%
Set	1%	5%	7%	5%	7%	13%
Out	-10%	-8%	-6%	-9%	-6%	0%

Nov	-10%	-9%	-7%	-9%	-8%	-3%
Dez	-13%	-11%	-9%	-12%	-10%	-6%

Fonte: O autor (2024)

Figura 25 - Projeções de evapotranspiração média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Paiva Castro

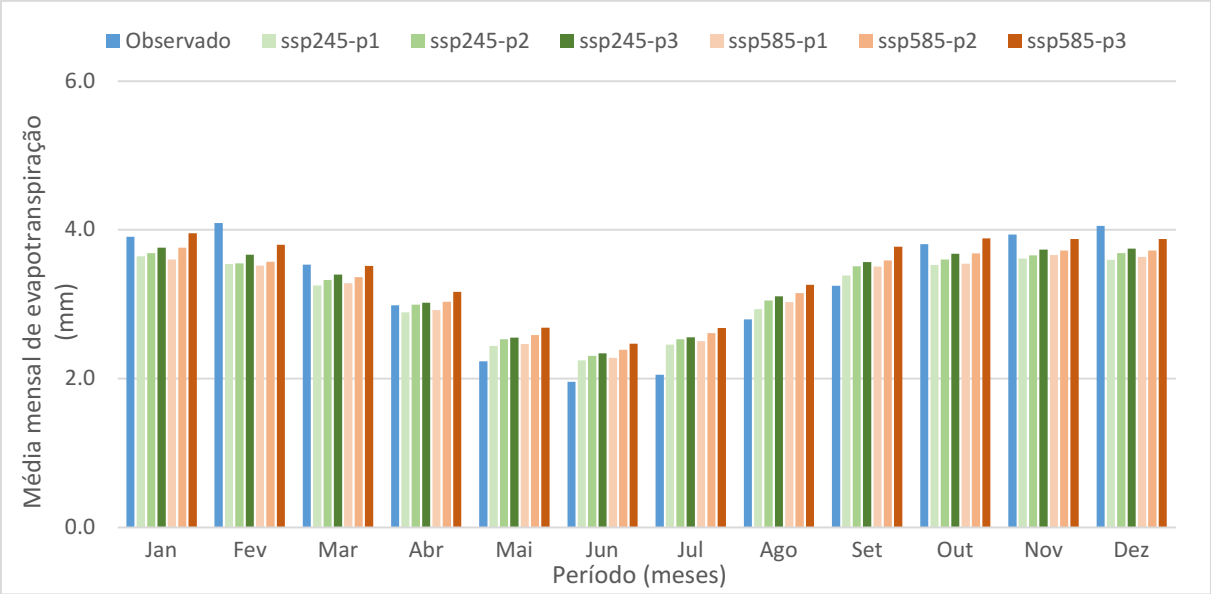


Tabela 9 - Diferenças relativas entre a evapotranspiração média mensal projetada e observada para a bacia do reservatório do Paiva Castro

	ssp2-4.5-p1	ssp2-4.5-p2	ssp2.4-5-p3	ssp5-8.5-p1	ssp5-8.5-p2	ssp5-8.5-p3
Jan	-7%	-6%	-4%	-8%	-4%	1%
Fev	-13%	-13%	-10%	-14%	-13%	-7%
Mar	-8%	-6%	-4%	-7%	-5%	-1%
Abr	-3%	0%	1%	-2%	2%	6%
Mai	9%	13%	14%	11%	16%	20%
Jun	15%	18%	20%	17%	22%	26%
Jul	20%	23%	25%	22%	27%	31%
Ago	5%	9%	11%	8%	13%	17%
Set	4%	8%	10%	8%	10%	16%
Out	-7%	-5%	-3%	-7%	-3%	2%
Nov	-8%	-7%	-5%	-7%	-5%	-2%
Dez	-11%	-9%	-8%	-10%	-8%	-4%

Fonte: O autor (2024)

5.3 Simulação Hidrológica

Utilizando as projeções futuras de precipitação e evapotranspiração, foi realizada simulação hidrológica e geradas séries temporais de vazão simulada para cada um dos quatro reservatórios do sistema Cantareira, para o período de 2015-2100 (Quadro 11).

Quadro 8 - Séries temporais futuras geradas para a área de estudo com a simulação hidrológica

Variável	Abrev.	Unid.	Período	MCG	Cenários
Vazão	Q	m³/s	01/01/2015 - 31/12/2100	Ensemble	SSP2-4.5 e SSP5-8.5
Total de séries temporais e dados diários gerados: 8 séries temporais e 251288 dados diários					

Fonte: O autor (2024)

5.3.1 Projeções de vazão para os reservatórios do sistema Cantareira

Para todos os reservatórios, as projeções futuras de vazão média mensal (Figuras 30-34) apontam uma maior variabilidade anual para ambos os cenários (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) comparados com o período histórico de 2000 até 2015. Caracteriza-se um aumento na vazão nos meses de primavera e verão (outubro até maio) e leves decréscimos no inverno (julho até agosto).

As diferenças relativas entre o período histórico e as projeções futuras (Tabela 11-14) reafirmam acréscimos críticos entre janeiro e março. As vazões projetadas para o reservatório do Jaguari-Jacaré aumentam na faixa de 38-97% em relação à série histórica (considerando ambos cenários e horizontes). Para os reservatórios do Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro, os aumentos são de 14-106%, 9-68%, 12-77%, respectivamente. Os acréscimos mais críticos na vazão são projetados para o mês de março em médio prazo (P2) para o cenário SSP2-4.5: 97% para o Jaguari-Jacaré, 106% para o Cachoeira, 64% para o Atibainha e 77% para o Paiva Castro.

Não houveram mudanças significativas nos mínimos de vazão, continuando o mês de agosto sendo o mais seco, tanto para o período histórico quanto para o simulado. Ainda assim as projeções futuras indicam decréscimos de vazão nos meses mais críticos (entre junho e agosto): até -14% para o Jaguari-Jacaré, entre 13-46% para o Cachoeira, até 11% para o Atibainha e 24% para o Paiva Castro.

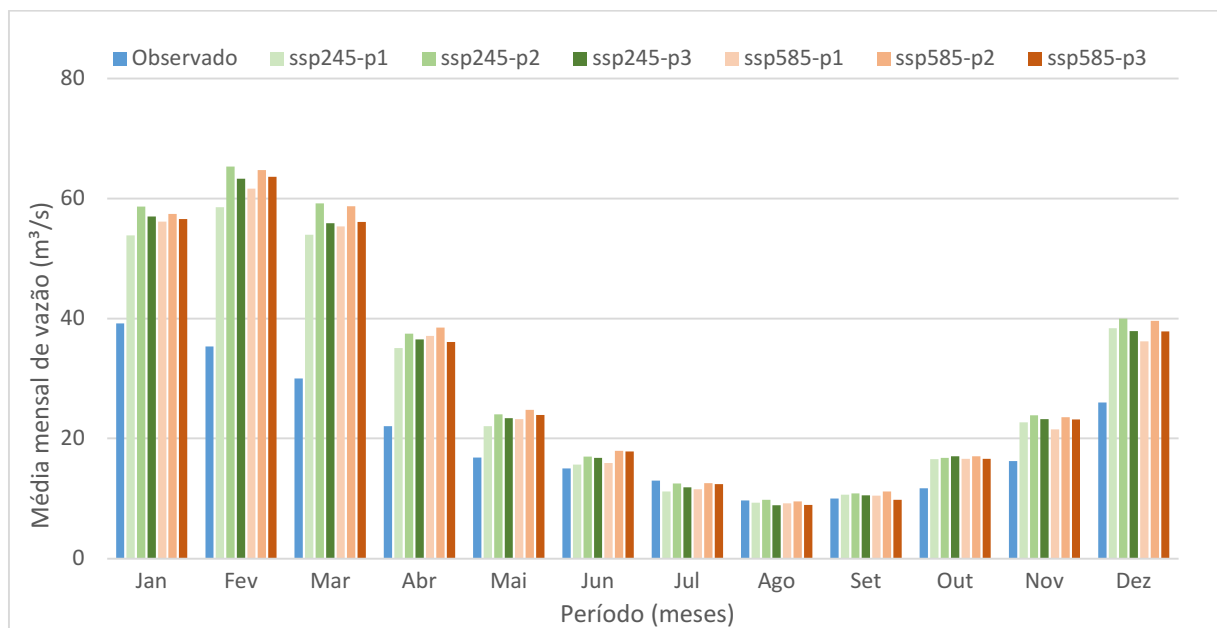
Para todos os reservatórios ocorreu uma mudança no mês com a vazão média máxima, no período histórico pico de vazão ocorre no mês de janeiro, enquanto nas projeções futuras ocorre no mês de fevereiro. As diferenças relativas são menores em janeiro comparado a fevereiro-março justamente por, historicamente, janeiro ser o mês mais úmido. Este resultado

é semelhante ao constatado por Gesualdo et al. (2019), reforçando o fato de que as mudanças climáticas não afetam apenas a intensidade e duração dos eventos, mas também sua distribuição.

Vários trabalhos também projetaram alterações significativas na variabilidade anual de vazão (ante a cenários futuros do projeto CMIP5) (GESUALDO et al., 2019; HALIK; PUTRA; WIYONO, 2022; MARTINS et al., 2021). Halik et al. (2022) e Martins et al. (2021) obtiveram resultados semelhantes, projetando maiores acréscimos no verão e poucas variações no inverno, sem alterações nas distribuições dos meses secos e chuvosos.

Gesualdo et al. (2019), porém, estimou alterações mais significativas para o período de seca em sua intensidade (mais severo) e distribuição (mais extenso) em sua pesquisa para a bacia do rio Jaguari, parte do Cantareira. A Figura 31 apresenta a comparação entre as projeções de vazão para o Jaguari deste trabalho e de Gesualdo et al. (2019).

Figura 26 - Projeções de vazão média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Jaguari-Jacaré



Fonte: O autor (2024)

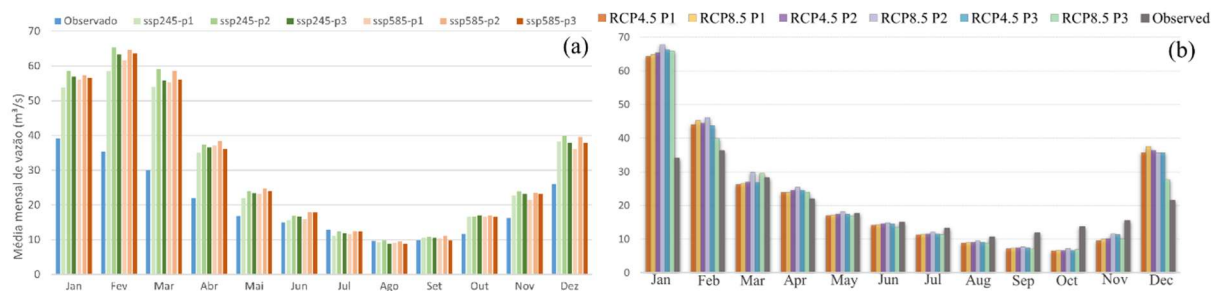
Tabela 10 - Diferenças relativas entre a vazão média mensal projetada e observada para a bacia do reservatório do Jaguari-Jacaré

	ssp2-4.5- p1	ssp2-4.5- p2	ssp2.4-5- p3	ssp5-8.5- p1	ssp5-8.5- p2	ssp5-8.5- p3
Jan	38%	50%	46%	43%	47%	45%
Fev	66%	85%	79%	75%	83%	80%
Mar	80%	97%	86%	85%	96%	87%
Abr	59%	70%	66%	68%	75%	64%
Mai	31%	43%	39%	38%	47%	42%

Jun	4%	13%	12%	6%	20%	19%
Jul	-14%	-4%	-8%	-11%	-3%	-4%
Ago	-4%	1%	-8%	-5%	-2%	-8%
Set	7%	9%	6%	5%	12%	-2%
Out	41%	43%	45%	42%	45%	41%
Nov	39%	47%	43%	32%	45%	43%
Dez	48%	54%	46%	39%	52%	46%

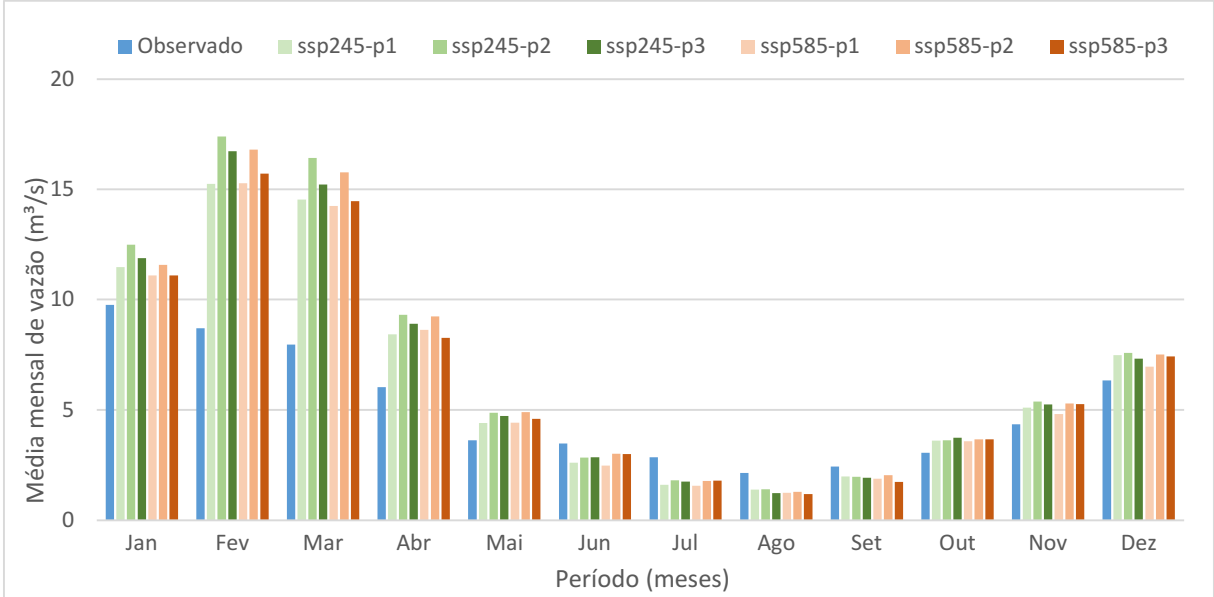
Fonte: O autor (2024)

Figura 27 - Comparação entre as projeções de vazão média mensal deste trabalho (a) e de Gesualdo et al. (2019) (b), para a bacia do reservatório do Jaguari.



Fonte: O autor (2024)

Figura 28 - Projeções de vazão média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Cachoeira



Fonte: O autor (2024)

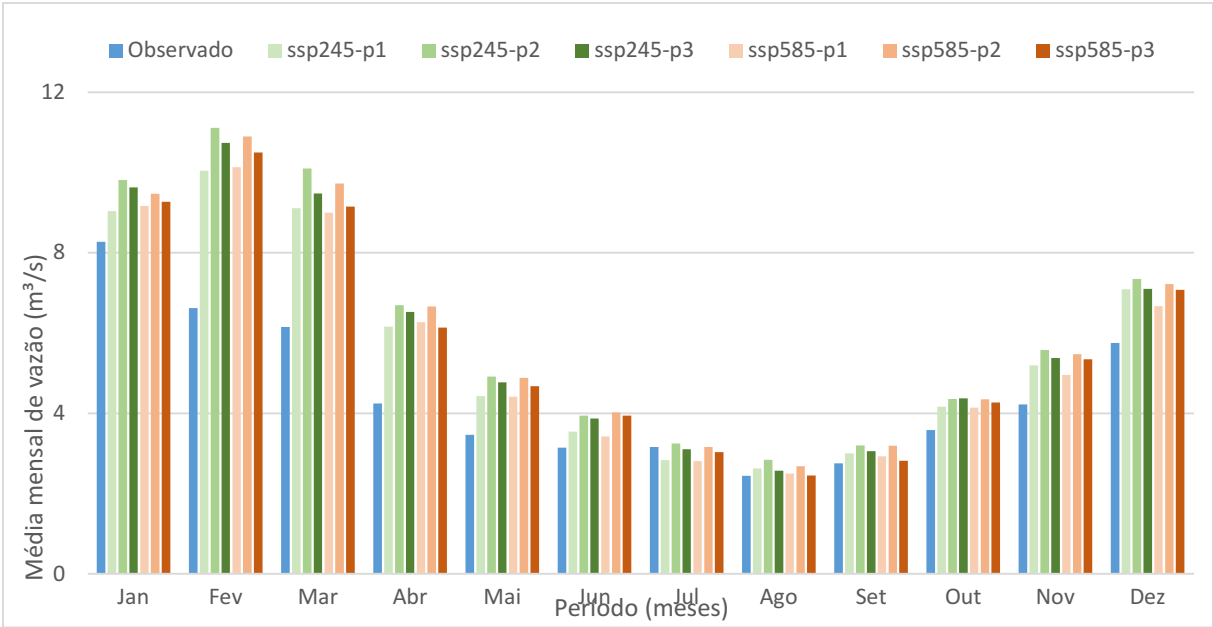
Tabela 11 - Diferenças relativas entre a vazão média mensal projetada e observada para a bacia do reservatório do Cachoeira

	ssp2-4.5- p1	ssp2-4.5- p2	ssp2.4-5- p3	ssp5-8.5- p1	ssp5-8.5- p2	ssp5-8.5- p3
Jan	18%	28%	22%	14%	19%	14%
Fev	75%	100%	92%	76%	93%	81%

Mar	83%	106%	91%	79%	98%	82%
Abr	40%	54%	48%	43%	53%	37%
Mai	22%	35%	31%	22%	36%	27%
Jun	-25%	-18%	-18%	-29%	-13%	-14%
Jul	-44%	-37%	-39%	-46%	-38%	-37%
Ago	-35%	-35%	-43%	-42%	-40%	-45%
Set	-19%	-20%	-21%	-23%	-17%	-29%
Out	18%	19%	22%	17%	20%	20%
Nov	17%	24%	21%	11%	22%	21%
Dez	18%	20%	15%	10%	19%	17%

Fonte: O autor (2024)

Figura 29 - Projeções de vazão média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Atibainha



Fonte: O autor (2024)

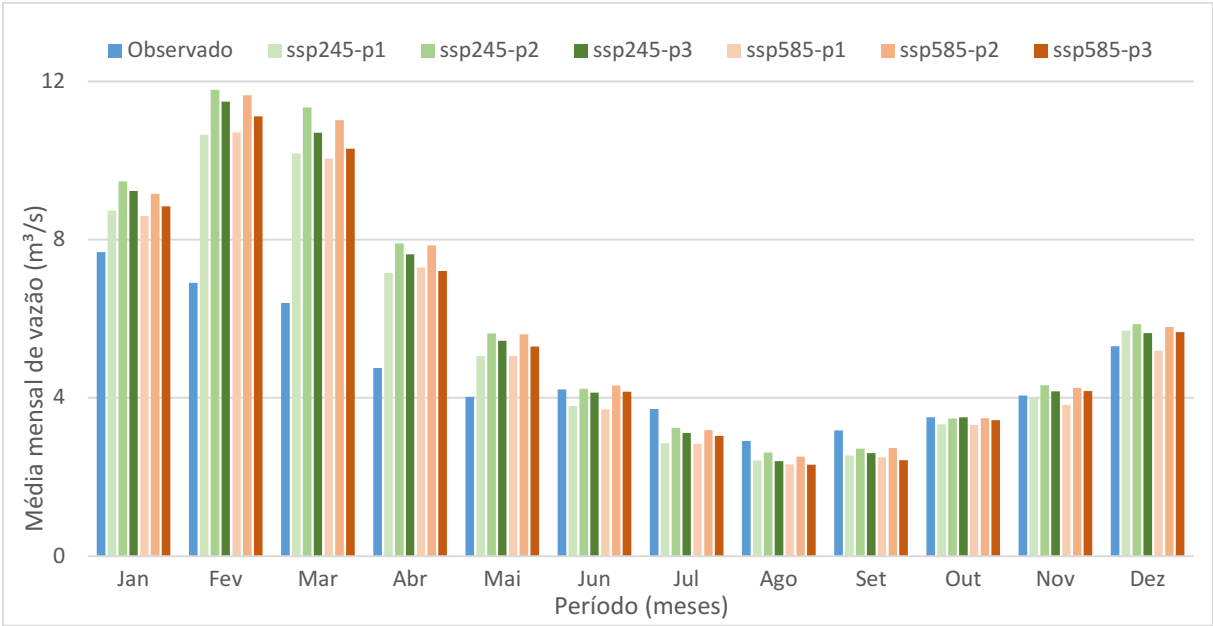
Tabela 12 - Diferenças relativas entre a vazão média mensal projetada e observada para a bacia do reservatório do Atibainha

	ssp2-4.5- p1	ssp2-4.5- p2	ssp2.4-5- p3	ssp5-8.5- p1	ssp5-8.5- p2	ssp5-8.5- p3
Jan	9%	19%	16%	11%	14%	12%
Fev	52%	68%	62%	53%	65%	59%
Mar	48%	64%	54%	46%	58%	49%
Abr	45%	58%	54%	48%	57%	45%
Mai	28%	42%	38%	28%	41%	35%
Jun	13%	25%	23%	9%	28%	25%
Jul	-10%	3%	-2%	-11%	0%	-4%
Ago	8%	16%	5%	2%	10%	0%

Set	9%	16%	11%	6%	16%	2%
Out	16%	22%	22%	16%	21%	19%
Nov	23%	32%	27%	17%	30%	27%
Dez	23%	28%	24%	16%	26%	23%

Fonte: O autor (2024)

Figura 30 - Projeções de vazão média mensal para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Paiva Castro



Fonte: O autor (2024)

Tabela 13 - Diferenças relativas entre a vazão média mensal projetada e observada para a bacia do reservatório do Paiva Castro

	ssp2-4.5-p1	ssp2-4.5-p2	ssp2.4-5-p3	ssp5-8.5-p1	ssp5-8.5-p2	ssp5-8.5-p3
Jan	14%	23%	20%	12%	19%	15%
Fev	54%	71%	66%	55%	69%	61%
Mar	59%	77%	67%	57%	72%	61%
Abr	51%	66%	60%	53%	65%	52%
Mai	26%	40%	35%	26%	39%	32%
Jun	-10%	0%	-2%	-12%	2%	-1%
Jul	-23%	-13%	-16%	-24%	-14%	-18%
Ago	-17%	-10%	-18%	-20%	-14%	-21%
Set	-20%	-15%	-18%	-21%	-14%	-24%
Out	-5%	-1%	0%	-6%	-1%	-2%
Nov	-1%	6%	3%	-6%	5%	3%
Dez	7%	11%	6%	-2%	9%	7%

Fonte: O autor (2024)

5.4 Análise da segurança hídrica

5.4.1 Indicadores de escassez e vulnerabilidade hídrica

Tabela 14 - Demanda de abastecimento da RMSP para cada um dos reservatórios do sistema Cantareira

Reservatório	Média das vazões diárias (2000-2015) (m³/s)	Percentual de contribuição para o sistema (%)	Contribuição para a vazão outorgada (m³/s)
Jaguari-Jacareí	20.35	59%	19.43
Cachoeira	5.04	15%	4.81
Atibainha	4.47	13%	4.27
Paiva Castro	4.70	14%	4.49
Total para o sistema	34.56	100%	33.00

Fonte: O autor (2024)

A distribuição da demanda de abastecimento da RMSP entre os quatro reservatórios do Sistema Cantareira foi calculada conforme mostra a Tabela 15. As Figuras 35-42 apresentam os indicadores de segurança hídrica (escassez e vulnerabilidade) calculados para os cenários SSP 2-4.5 e SSP5-8.5 para os três períodos futuros projetados (P1, P2 e P3).

Para todos os reservatórios e considerando todos os horizontes (curto, médio e longo prazo), os indicadores de escassez e vulnerabilidade hídrica apresentam comportamentos similares, sem grandes diferenças nos diferentes cenários de provisão. Os valores permanecem menores entre dezembro e abril, sugerindo níveis relativamente seguros de provisão de água durante este período.

Todos os cenários projetam que o período com maior insegurança hídrica para os reservatórios do Cantareira deve ocorrer entre julho e setembro. Os maiores valores, para ambos indicadores, ocorrem para as projeções em curto prazo (P1) nos dois cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5). Os valores mais críticos, porém, ocorrem para projeções de longo prazo (P3) para o cenário de emissão SSP5-8.5.

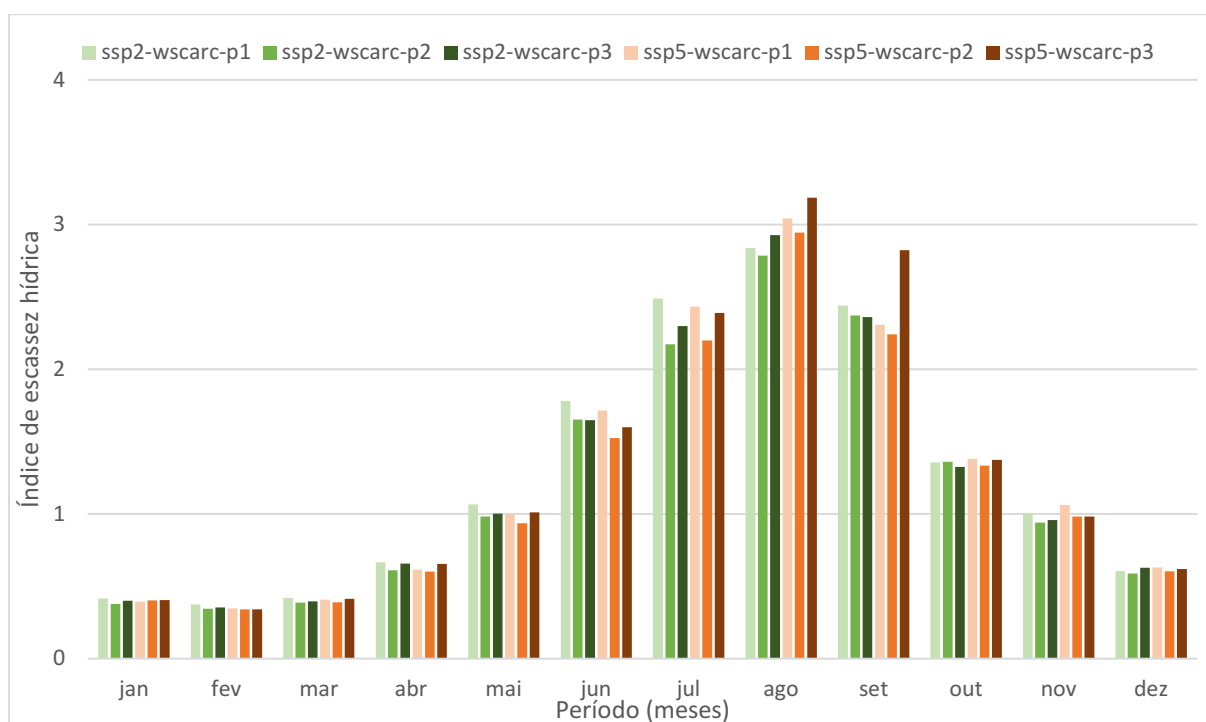
Considerando estes resultados, é possível que eventos mais severos de seca possam ocorrer com mais frequência no período do inverno (entre julho e setembro). Isto corrobora com as projeções de vazão para os reservatórios, que indicam em sua maioria decréscimos na

vazão até setembro. Estes resultados concordam com Rodrigues et al. (2014), que relataram os maiores valores de escassez e vulnerabilidade (1987-2009) no reservatório do Cachoeira em setembro. Resultado semelhante também foi constatado por Gesualdo et. al. (2019) para a bacia do Jaguari, que apontaram, porém, uma maior vulnerabilidade hídrica no mês de novembro.

Altos valores do indicador de vulnerabilidade são esperados, resultantes da diferença entre a medida estatística para os níveis de provisão de água para escassez (percentil 50) e vulnerabilidade (percentil 30). Esses resultados projetam níveis crescentes de insegurança hídrica até o final do século, com condições mais pessimistas sob o cenário SSP5-8.5 em longo prazo (P3).

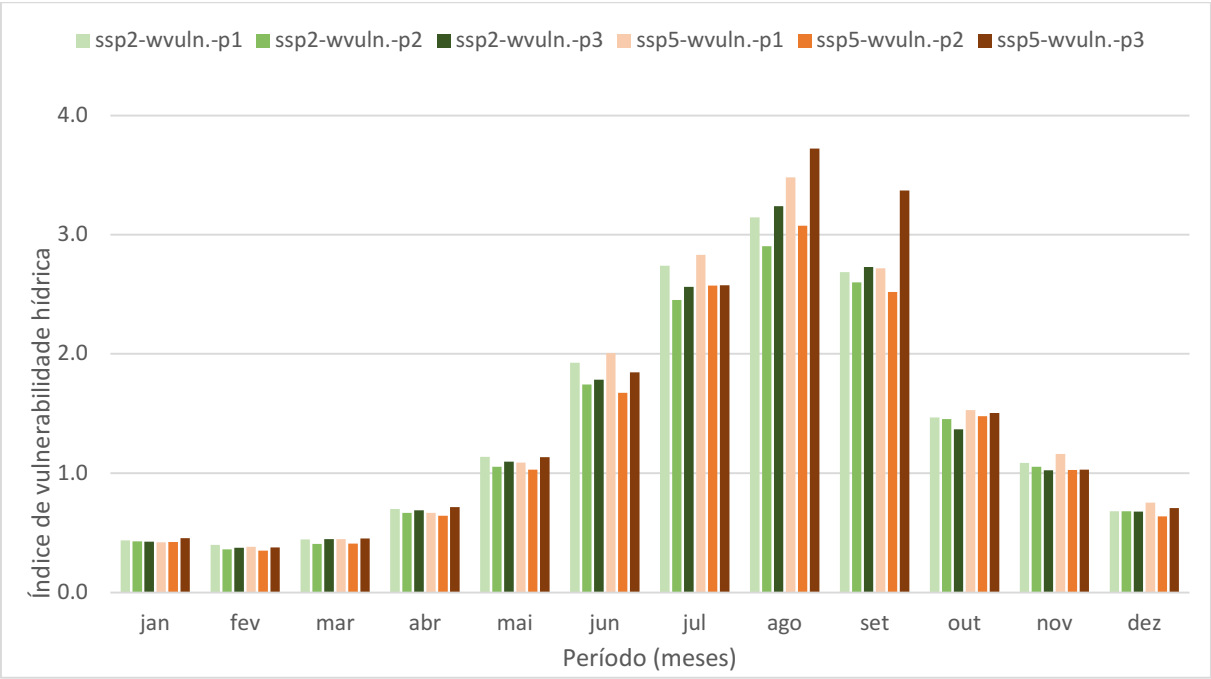
Em geral, esses resultados expõem a insegurança hídrica associada à Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), abastecida pelo sistema Cantareira. Estudos anteriores descaram a vulnerabilidade da região a eventos de escassez hídrica, a propensão de ocorrência futura de eventos de seca meteorológica e hidrológica, bem como a relação associada com impactos das mudanças climáticas (GESUALDO et al., 2019; MARENGO et al., 2010; MILANO et al., 2018; SILVA DIAS et al., 2013). Os resultados deste trabalho reafirmam estas ameaças à segurança hídrica no que se refere as projeções de vazão, com o os meses de agosto e setembro como os mais críticos.

Figura 31 - Indicador de escassez hídrica para a bacia do reservatório do Jaguari-Jacareí



Fonte: O autor (2024)

Figura 32 - Indicador de vulnerabilidade hídrica para a bacia do reservatório do Jaguari-Jacaré



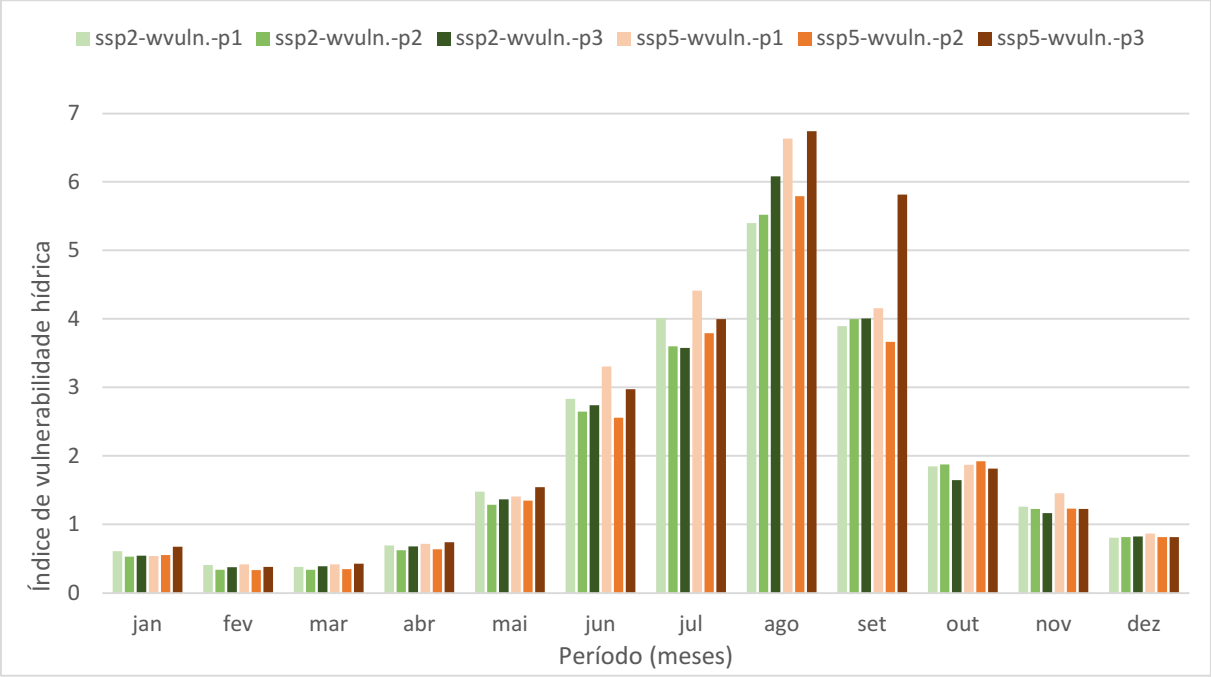
Fonte: O autor (2024)

Figura 33 - Indicador de escassez hídrica para a bacia do reservatório do Cachoeira



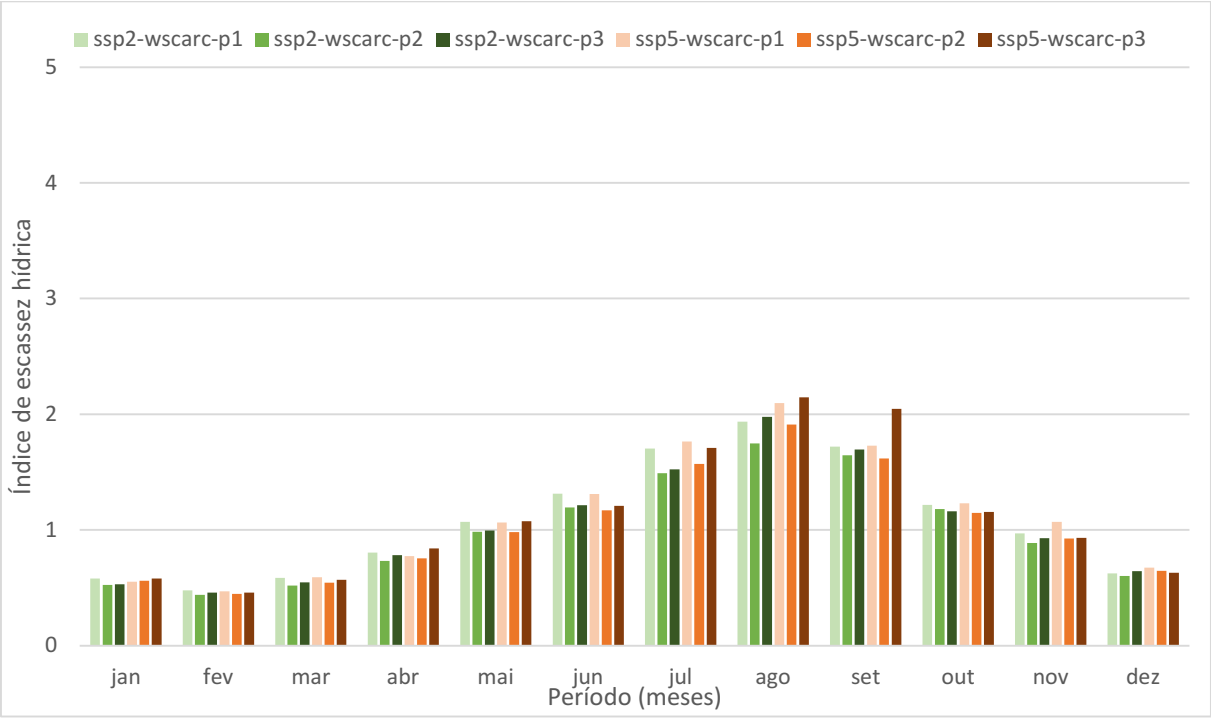
Fonte: O autor (2024)

Figura 34 = Indicador de vulnerabilidade hídrica para a bacia do reservatório do Cachoeira



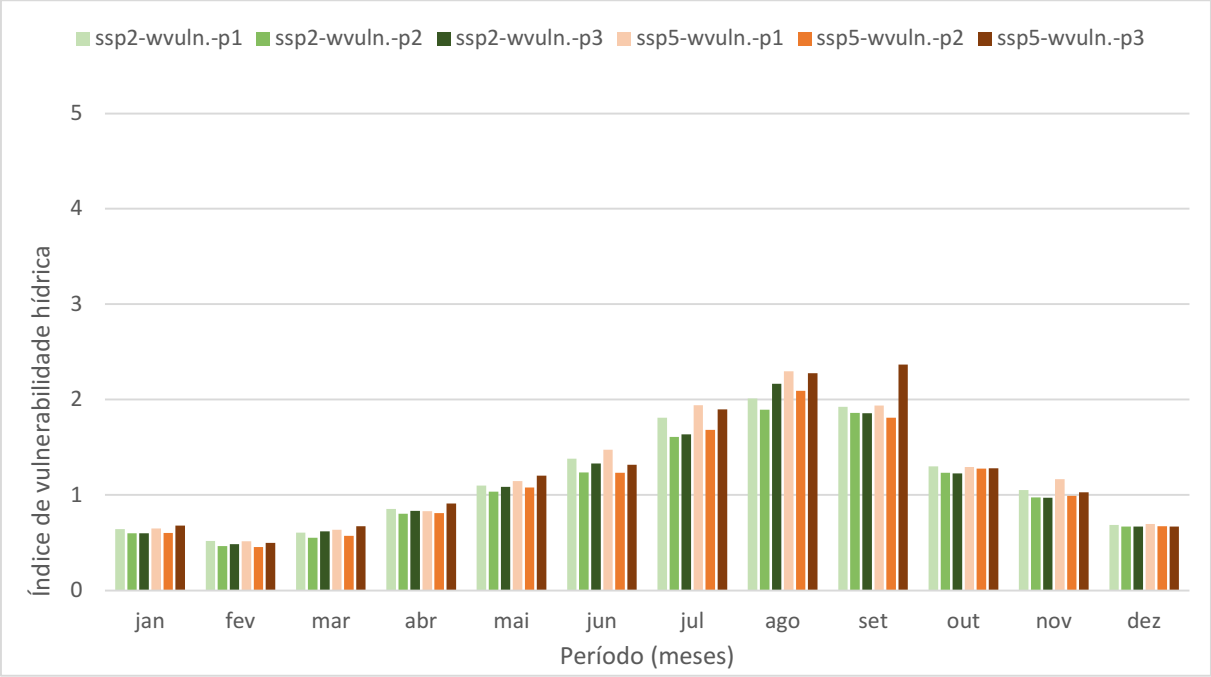
Fonte: O autor (2024)

Figura 35 - Indicador de escassez hídrica para a bacia do reservatório do Atibainha



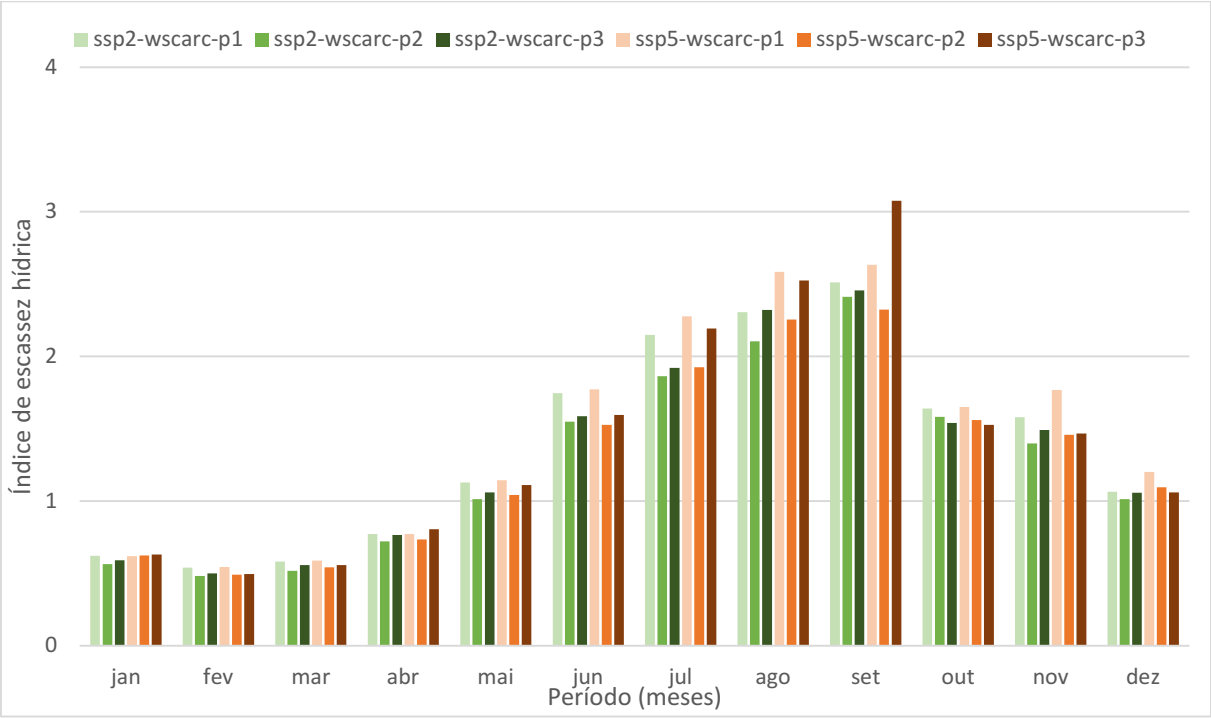
Fonte: O autor (2024)

Figura 36 - Indicador de vulnerabilidade hídrica para a bacia do reservatório do Atibainha

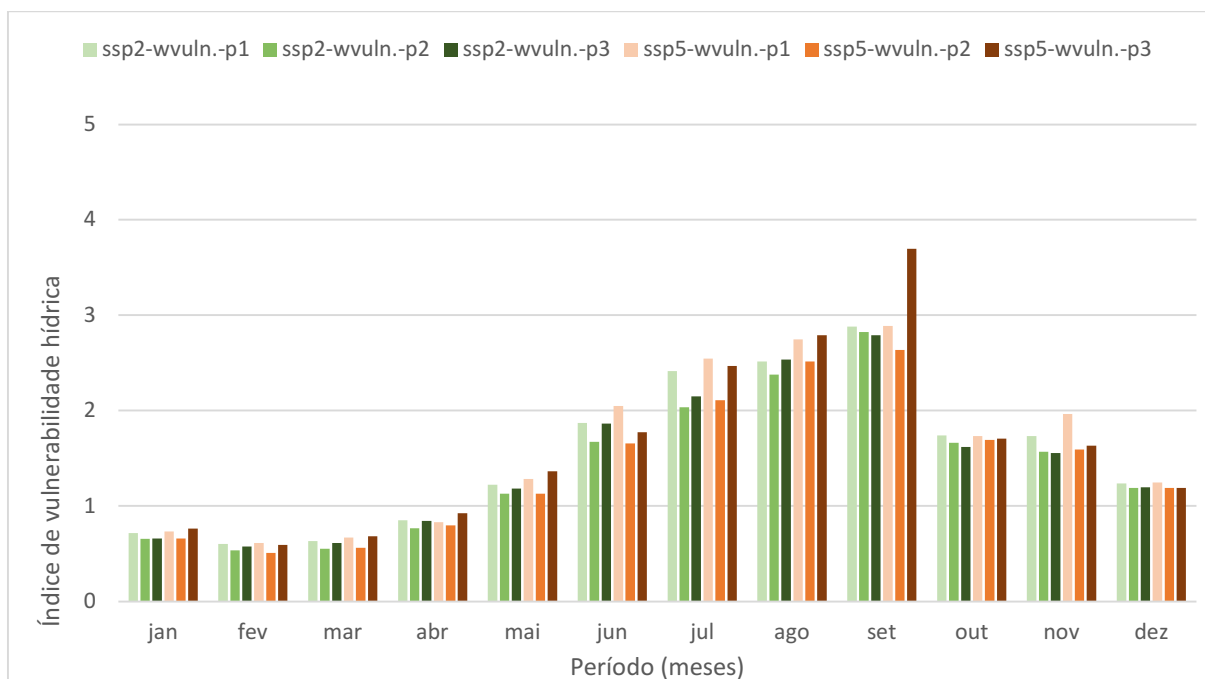


Fonte: O autor (2024)

Figura 37 - Indicador de escassez hídrica para a bacia do reservatório do Paiva Castro



Fonte: O autor (2024)

Figura 38 - Indicador de vulnerabilidade hídrica para a bacia do reservatório do Paiva Castro

Fonte: O autor (2024)

5.4.2 Vazão decamilenar

Os resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov para os dados médios mensais de vazão de cada reservatório indicam um bom ajuste dos dados à distribuição de Gumbel ($p > 0.05$), conforme esperado. A Tabela 16 apresenta os p-valores para cada reservatório e mês do ano.

As figuras 43-46 possibilitam visualizar a comparação entre as vazões médias mensais observadas, projetadas e a vazão decamilenar. Observa-se que as vazões futuras, em alguns casos, podem evoluir para uma porcentagem significativa da vazão decamilenar (Tabelas 17-20).

Isto se aplica-se a todos reservatórios nos meses mais cheios (entre janeiro e março), onde a vazão observada equivale a 23-31% da vazão decamilenar. As vazões projetadas pela simulação hidrológica indicam acréscimo neste percentual, podendo atingir até 51% da vazão decamilenar para o Jaguari-Jacare, 53% para o Cachoeira, 52% para o Atibainha e 65% para o Paiva Castro. Em todos os casos, estes valores críticos ocorrem para as projeções de médio prazo (P2) do cenário SSP2-4.5.

Estes resultados refletem os fortes acréscimos verificados nas projeções de precipitação e de vazão para os meses de janeiro, fevereiro e março. Para este período, em geral, a proporção entre a vazão projetada e decamilenar é significativamente maior que a proporção entre vazão observada e decamilenar.

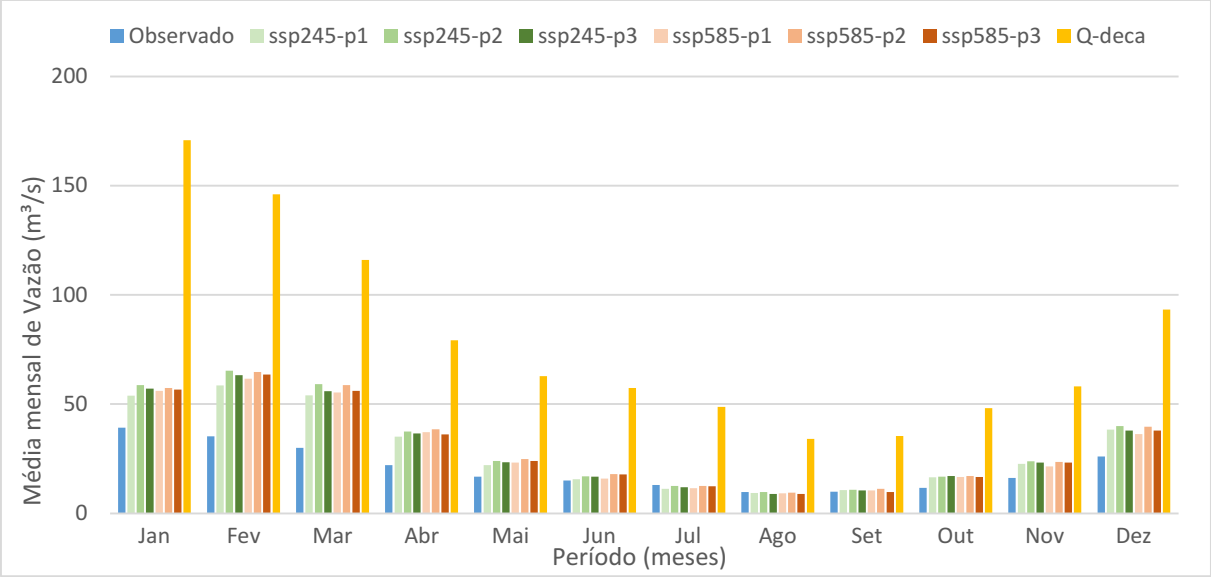
A análise dos fatores que levam a ocorrência de inundações e enchentes é complexa e não depende apenas de aumentos significativos na vazão dos rios, como os constatados aqui. Ainda assim, considerando que a vazão decamilenar é uma vazão de cheia de projeto calculada com base em um Tempo de Retorno (TR) de 10.000 anos, e que as projeções deste trabalho consideram um horizonte máximo 100 anos (2024-2100), os resultados apontam para possíveis ameaças à segurança hídrica no que se refere ao excesso hídrico, bem como à segurança das barragens.

Tabela 15 - Valores de p do teste de Kolmogorov-Smirnov para os dados de vazão média mensal dos reservatórios do sistema Cantareira

Mês	Jaguari-Jacaré	Cachoeira	Atibainha	Paiva Castro
Jan	0.82	0.72	0.82	0.71
Fev	0.92	0.99	0.92	0.99
Mar	0.75	0.99	0.50	0.97
Abr	0.97	0.70	0.97	0.93
Mai	0.96	0.95	0.96	0.66
Jun	0.91	0.89	0.91	0.96
Jul	0.91	0.97	0.91	0.69
Ago	0.83	0.41	0.83	0.91
Set	0.67	0.94	0.67	0.90
Out	0.51	0.82	0.51	0.87
Nov	0.36	0.79	0.54	0.94
Dez	0.67	0.89	0.67	0.96

Fonte: O autor (2024)

Figura 39 - Comparação entre vazão decamilenar e vazões observadas e projetadas para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Jaguari-Jacaré



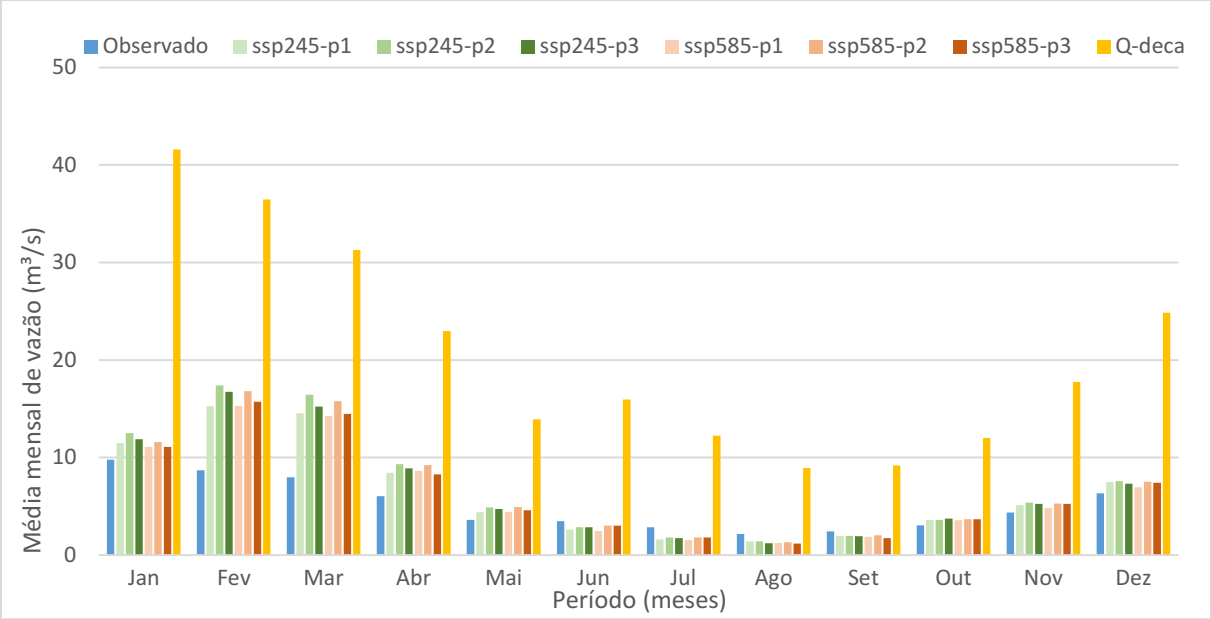
Fonte: O autor (2024)

Tabela 16 - Proporção relativa entre as vazões projetadas e observadas e a vazão decamilenar para a bacia do reservatório do Jaguari-Jacaré

	Observado	ssp2-4.5-p1	ssp2-4.5-p2	ssp2.4-5-p3	ssp5-8.5-p1	ssp5-8.5-p2	ssp5-8.5-p3
Jan	23%	32%	34%	33%	33%	34%	33%
Fev	24%	40%	45%	43%	42%	44%	44%
Mar	26%	47%	51%	48%	48%	51%	48%
Abr	28%	44%	47%	46%	47%	49%	46%
Mai	27%	35%	38%	37%	37%	40%	38%
Jun	26%	27%	30%	29%	28%	31%	31%
Jul	27%	23%	26%	24%	24%	26%	25%
Ago	28%	27%	29%	26%	27%	28%	26%
Set	28%	30%	31%	30%	30%	32%	28%
Out	24%	34%	35%	35%	34%	35%	34%
Nov	28%	39%	41%	40%	37%	40%	40%
Dez	28%	41%	43%	41%	39%	42%	41%

Fonte: O autor (2024)

Figura 40 - Comparação entre vazão decamilenar e vazões observadas e projetadas para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Cachoeira



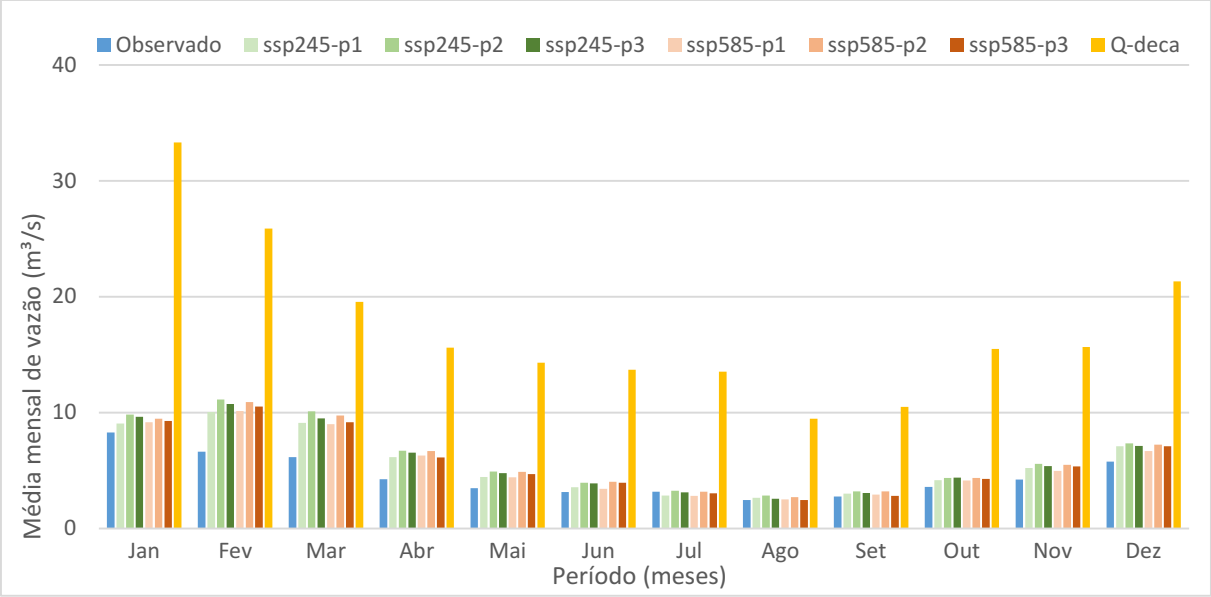
Fonte: O autor (2024)

Tabela 17 - Proporção relativa entre as vazões projetadas e observadas e a vazão decamilenar para a bacia do reservatório do Cachoeira

	Observado	ssp2-4.5-p1	ssp2-4.5-p2	ssp2.4-5-p3	ssp5-8.5-p1	ssp5-8.5-p2	ssp5-8.5-p3
Jan	23%	28%	30%	29%	27%	28%	27%
Fev	24%	42%	48%	46%	42%	46%	43%
Mar	25%	47%	53%	49%	46%	50%	46%
Abr	26%	37%	41%	39%	38%	40%	36%
Mai	26%	32%	35%	34%	32%	35%	33%
Jun	22%	16%	18%	18%	16%	19%	19%
Jul	23%	13%	15%	14%	13%	15%	15%
Ago	24%	16%	16%	14%	14%	14%	13%
Set	27%	22%	21%	21%	20%	22%	19%
Out	25%	30%	30%	31%	30%	31%	30%
Nov	25%	29%	30%	30%	27%	30%	30%
Dez	25%	30%	31%	29%	28%	30%	30%

Fonte: O autor (2024)

Figura 41 - Comparação entre vazão decamilenar e vazões observadas e projetadas para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Atibainha



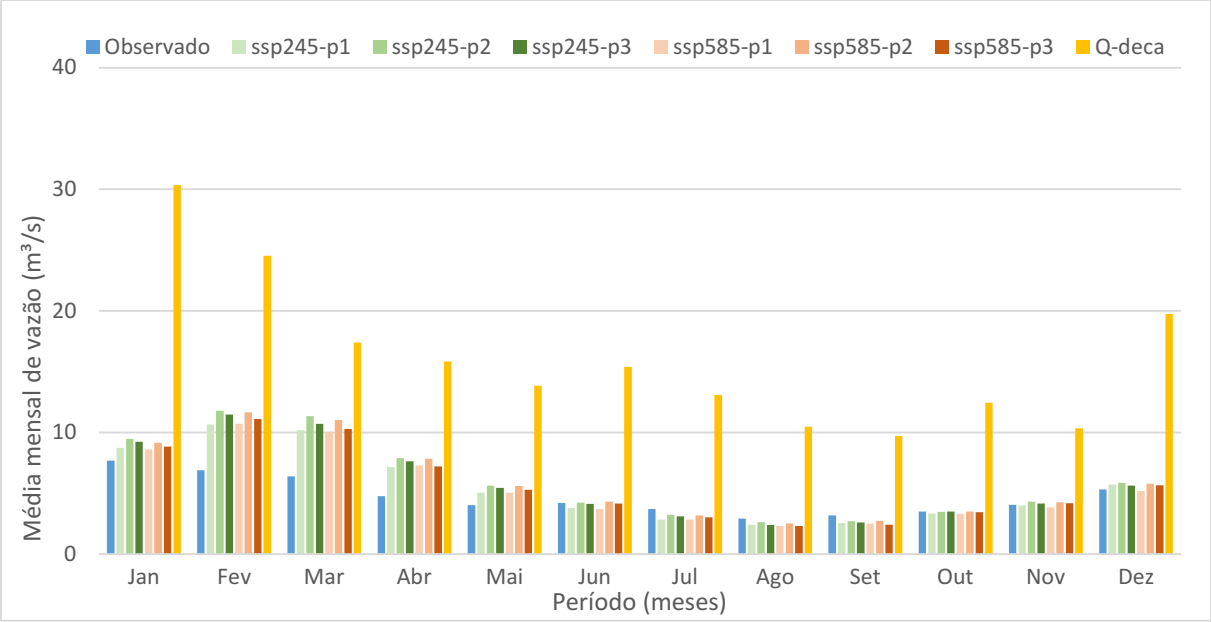
Fonte: O autor (2024)

Tabela 18 - Proporção relativa entre as vazões projetadas e observadas e a vazão decamilenar para a bacia do reservatório do Atibainha

	Observado	ssp2-4.5-p1	ssp2-4.5-p2	ssp2.4-5-p3	ssp5-8.5-p1	ssp5-8.5-p2	ssp5-8.5-p3
Jan	25%	27%	29%	29%	28%	28%	28%
Fev	26%	39%	43%	42%	39%	42%	41%
Mar	31%	47%	52%	48%	46%	50%	47%
Abr	27%	39%	43%	42%	40%	43%	39%
Mai	24%	31%	34%	33%	31%	34%	33%
Jun	23%	26%	29%	28%	25%	29%	29%
Jul	23%	21%	24%	23%	21%	23%	22%
Ago	26%	28%	30%	27%	26%	28%	26%
Set	26%	29%	30%	29%	28%	30%	27%
Out	23%	27%	28%	28%	27%	28%	28%
Nov	27%	33%	36%	34%	32%	35%	34%
Dez	27%	33%	34%	33%	31%	34%	33%

Fonte: O autor (2024)

Figura 42 - Comparação entre vazão decamilenar e vazões observadas e projetadas para ambos os cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) para a bacia do reservatório do Paiva Castro



Fonte: O autor (2024)

Tabela 19 - Proporção relativa entre as vazões projetadas e observadas e a vazão decamilenar para a bacia do reservatório do Paiva Castro

	Observado	ssp2-4.5-p1	ssp2-4.5-p2	ssp2.4-5-p3	ssp5-8.5-p1	ssp5-8.5-p2	ssp5-8.5-p3
Jan	25%	29%	31%	30%	28%	30%	29%
Fev	28%	43%	48%	47%	44%	48%	45%
Mar	37%	59%	65%	62%	58%	63%	59%
Abr	30%	45%	50%	48%	46%	50%	46%
Mai	29%	37%	41%	39%	37%	41%	38%
Jun	27%	25%	27%	27%	24%	28%	27%
Jul	28%	22%	25%	24%	22%	24%	23%
Ago	28%	23%	25%	23%	22%	24%	22%
Set	33%	26%	28%	27%	26%	28%	25%
Out	28%	27%	28%	28%	27%	28%	28%
Nov	39%	39%	42%	40%	37%	41%	40%
Dez	27%	29%	30%	29%	26%	29%	29%

Fonte: O autor (2024)

6 CONCLUSÃO

É notório que as mudanças climáticas exercem influência na segurança hídrica de reservatórios de abastecimento de água potável. Estudos tem observado e evidenciado os impactos decorrentes das mudanças climáticas, considerando não apenas períodos históricos, mas também projeções climáticas futuras. Alterações no regime de vazões dos rios, níveis de reservatórios e riscos associados a seca hidrológica são alguns impactos que representam ameaças à segurança hídrica.

Este trabalho buscou, por meio de metodologia técnica e científica, fornecer informações relevantes para serem utilizadas em estratégias de gestão de recursos hídricos, sendo uma metodologia simples e aplicável em qualquer bacia cujos impactos das mudanças climáticas possam oferecer riscos à segurança hídrica.

Esta metodologia foi aplicada para avaliar os impactos das mudanças climáticas na segurança hídrica do sistema Cantareira, principal sistema de abastecimento de água da região metropolitana de São Paulo (RMSP). Foram estimadas vazões para três horizontes: Curto prazo (P1: 2015-2040), médio prazo (P2: 2041-2070) e longo prazo (P3: 2071-2100) utilizando um modelo hidrológico conceitual e projeções climáticas geradas por um conjunto de 10 Modelos Climáticos Globais (MCGs), para dois cenários de emissão (SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

Os resultados indicam que os regimes estimados de vazão dos reservatórios do sistema Cantareira podem apresentar maiores variabilidades anuais em todos os cenários de emissão, de curto a longo prazo. São previstos significativos acréscimos nas vazões médias de dezembro até março e pequenos decréscimos nas vazões médias do período entre maio e julho.

Do ponto de vista dos índices de segurança hídrica, existe a perspectiva de insegurança hídrica, com condições mais pessimistas sob ambos os cenários em curto prazo e sob o cenário SSP 5-8.5 em longo prazo. Projeta-se agosto e setembro como os meses mais vulneráveis. Em contrapartida, o período de novembro a abril provavelmente permanecerá relativamente seguro em termos de escassez e vulnerabilidade hídrica.

Para o período entre janeiro e março são projetados os acréscimos mais significativos de vazão. A comparação entre as vazões simuladas, observadas e a vazão decamilar indicam possíveis ameaças à segurança hídrica no que se refere ao excesso de água. Estes resultados evidenciam a necessidade de trabalhos que analisem da segurança hídrica de reservatórios não apenas em termos de escassez hídrica, mas também do excesso hídrico, avaliando os riscos associados à segurança das barragens bem como à ocorrência de enchentes e inundações.

Essa variabilidade anual entre períodos de segurança e insegurança hídrica revela a fragilidade da região e indica caminhos que as estratégias de adaptação podem seguir. Há uma necessidade urgente de que a gestão dos recursos hídricos da RMSP seja realizada considerando os riscos futuros para a segurança hídrica, com a implementação de medidas de mitigação e adaptação eficientes que reconheçam o padrão anual de variação entre períodos de escassez e excesso hídrico. Assim, os resultados deste trabalho podem fornecer informações de apoio aos gestores no desenvolvimento de políticas públicas que visem maximizar a segurança hídrica.

REFERÊNCIAS

AGYEKUM, Jacob; ANNOR, Thompson; QUANSAH, Emmanuel; LAMPTEY, Benjamin; AMEKUDZI, Leonard Kofitse; NYARKO, Benjamin Kofi. Extreme temperature indices over the Volta Basin: CMIP6 model evaluation. **Climate Dynamics**, v. 61, n. 1–2, p. 203–228, 2023. DOI: 10.1007/s00382-022-06503-x.

AHN, So Ra; JEONG, Jae Hak; KIM, Seong Joon. Assessing drought threats to agricultural water supplies under climate change by combining the SWAT and MODSIM models for the Geum River basin, South Korea. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 15, p. 2740–2753, 2016. a. DOI: 10.1080/02626667.2015.1112905. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2015.1112905>.

AHN, So Ra; JEONG, Jae Hak; KIM, Seong Joon. Assessing drought threats to agricultural water supplies under climate change by combining the SWAT and MODSIM models for the Geum River basin, South Korea. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 15, p. 2740–2753, 2016. b. DOI: 10.1080/02626667.2015.1112905.

ALKHAWAGA, Abdalmonem; ZEIDAN, Bakenaz; ELSHEMY, Mohamed. Climate change impacts on water security elements of Kafr El-Sheikh governorate, Egypt. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 259, p. 107217, 2022. a. DOI: 10.1016/J.AGWAT.2021.107217.

ALKHAWAGA, Abdalmonem; ZEIDAN, Bakenaz; ELSHEMY, Mohamed. Climate change impacts on water security elements of Kafr El-Sheikh governorate, Egypt. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 259, p. 107217, 2022. b. DOI: 10.1016/J.AGWAT.2021.107217. Acesso em: 14 ago. 2022.

ALMAGRO, André; OLIVEIRA, Paulo Tarso S.; ROSOLEM, Rafael; HAGEMANN, Stefan; NOBRE, Carlos A. Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. **Atmospheric Research**, [S. l.], v. 244, n. May, p. 105053, 2020. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105053. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105053>.

ANA, Agência Nacional de Águas. **Diretrizes para Elaboração de Projetos de Barragens**. Brasília, 2016.

ASGARI, Marjan; YANG, Wanhong; LINDSAY, John; TOLSON, Bryan; DEHNAVI, Maryam Mehri. A review of parallel computing applications in calibrating watershed hydrologic models. **Environmental Modelling and Software**, [S. l.], v. 151, n. March, p. 105370, 2022. DOI: 10.1016/j.envsoft.2022.105370. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105370>.

BALLARIN, André S. et al. Brazilian Water Security Threatened by Climate Change and Human Behavior. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 59, n. 7, 2023. a. DOI: 10.1029/2023WR034914.

BALLARIN, André Simões; SONE, Jullian Souza; GESUALDO, Gabriela Chiquito; SCHWAMBACK, Dimaghi; REIS, Alan; ALMAGRO, André; WENDLAND, Edson Cezar. CLIMBra - Climate Change Dataset for Brazil. **Scientific Data**, v. 10, n. 1, 2023. b. DOI: 10.1038/s41597-023-01956-z.

BEVEN, Keith. Towards a methodology for testing models as hypotheses in the inexact sciences. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, [S. l.], v. 475, n. 2224, 2019. DOI: 10.1098/rspa.2018.0862.

BIONDI, Daniela; FRENI, Gabriele; IACOBELLIS, Vito; MASCARO, Giuseppe; MONTANARI, Alberto. Validation of hydrological models: Conceptual basis, methodological approaches and a proposal for a code of practice. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, [S. l.], v. 42–44, p. 70–76, 2012. DOI: 10.1016/j.pce.2011.07.037.

BLÖSCHL, Günter et al. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH)—a community perspective. **Hydrological Sciences Journal**, [S. l.], v. 64, n. 10, p. 1141–1158, 2019. DOI: 10.1080/02626667.2019.1620507.

BLÖSCHL, Günter; SIVAPALAN, Murugesu. Scale issues in hydrological modelling: A review. [S. l.], 1995.

CALIXTO, Kalyl Gomes. **Relações causais e persistências na dinâmica da disponibilidade hídrica para a formulação de modelos hidrológicos conceituais**. 2020. EESC - Escola de, [S. l.], 2020.

CARDOSO DE SALIS, H. Hugo; MONTEIRO DA COSTA, Adriana; MOREIRA VIANNA, H. João; AZENETH SCHULER, Marysol; KÜNNEN, Annika; SANCHES FERNANDES, F. Luís; LEAL PACHECO, A. Fernando. **Hydrologic Modeling for Sustainable Water Resources Management in Urbanized Karst Areas**. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 2019. DOI: 10.3390/ijerph16142542.

CLARK, Martyn P.; KAVETSKI, Dmitri; FENICIA, Fabrizio. Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 47, n. 9, 2011. DOI: 10.1029/2010WR009827.

CLARK, Martyn P.; SLATER, Andrew G.; RUPP, David E.; WOODS, Ross A.; VRUGT, Jasper A.; GUPTA, Hoshin V.; WAGENER, Thorsten; HAY, Lauren E. Framework for Understanding Structural Errors (FUSE): A modular framework to diagnose differences between hydrological models. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 44, n. 12, 2008. DOI: 10.1029/2007WR006735.

CORREA FILHO, Carlos Roberto Ruchiga. **Avaliação de conflitos de usos múltiplos de água na bacia hidrográfica do Rio Jaguari - SP, através de simulação computacional**. 2004. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. DOI: 10.11606/D.18.2016.tde-02062016-160338.

CUSTÓDIO, Vanderli. A Crise Hídrica na Região Metropolitana de São Paulo (2014-2015). **GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)**, [S. l.], v. 19, n. 3, p. 445, 2015. DOI: 10.11606/issn.2179-0892.geousp.2015.102136.

DAVID, Paula C.; OLIVEIRA, Debora Y.; GRISON, Fernando; KOBIYAMA, Masato; CHAFFE, Pedro L. B. Systematic increase in model complexity helps to identify dominant

streamflow mechanisms in two small forested basins. **Hydrological Sciences Journal**, [S. l.], v. 64, n. 4, p. 455–472, 2019. DOI: 10.1080/02626667.2019.1585858.

DEVIA, Gayathri K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, [S. l.], v. 4, p. 1001–1007, 2015. a. DOI: 10.1016/j.aqpro.2015.02.126.

DEVIA, Gayathri K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, [S. l.], v. 4, p. 1001–1007, 2015. b. DOI: 10.1016/j.aqpro.2015.02.126.

DHAMI, Bir Singh; PANDEY, Ashish. Comparative review of recently developed hydrologic models. **Journal of Indian Water Resources Society**, [S. l.], v. 33, n. 3, p. 34–42, 2013. a. Disponível em: <http://www.iwrs.org.in/journal/jul2013/6jul.pdf>.

DHAMI, Bir Singh; PANDEY, Ashish. Comparative review of recently developed hydrologic models. **Journal of Indian Water Resources Society**, [S. l.], v. 33, n. 3, p. 34–42, 2013. b.

DIAS, Cássia Gabriele; MARTINS, Fabrina Bolzan; MARTINS, Minella Alves. Climate risks and vulnerabilities of the Arabica coffee in Brazil under current and future climates considering new CMIP6 models. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 907, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167753.

DIAS, Cássia Gabriele; REBOITA, Michelle Simões. Assessment of cmip6 simulations over tropical south america. **Revista Brasileira de Geografia Fisica**, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 1282–1295, 2021. DOI: 10.26848/rbgf.v14.3.p1282-1295.

DONG, Zhiqiang; LIU, Hui; BAIYINBAOLIGAO; HU, Hongchang; KHAN, Mohd Yawar Ali; WEN, Jie; CHEN, Lajiao; TIAN, Fuqiang. Future projection of seasonal drought characteristics using CMIP6 in the Lancang-Mekong River Basin. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 610, p. 127815, 2022. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2022.127815.

DOS SANTOS SILVA, Fabrício Daniel et al. Intercomparison of Different Sources of Precipitation Data in the Brazilian Legal Amazon. **Climate**, [S. l.], v. 11, n. 12, 2023. DOI: 10.3390/cli11120241.

EYRING, Veronika; BONY, Sandrine; MEEHL, Gerald A.; SENIOR, Catherine A.; STEVENS, Bjorn; STOUFFER, Ronald J.; TAYLOR, Karl E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, [S. l.], v. 9, n. 5, p. 1937–1958, 2016. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016.

FENICIA, Fabrizio; KAVETSKI, Dmitri; SAVENIJE, Hubert H. G. Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. Motivation and theoretical development. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 47, n. 11, 2011. DOI: 10.1029/2010WR010174.

FENICIA, Fabrizio; KAVETSKI, Dmitri; SAVENIJE, Hubert H. G.; CLARK, Martyn P.; SCHOUPS, Gerrit; PFISTER, Laurent; FREER, Jim. Catchment properties, function, and conceptual model representation: Is there a correspondence? **Hydrological Processes**, [S. l.], v. 28, n. 4, p. 2451–2467, 2014. DOI: 10.1002/hyp.9726.

FERREIRA, Glauber Willian de Souza; REBOITA, Michelle Simões; RIBEIRO, João Gabriel Martins; DE SOUZA, Christie André. Assessment of Precipitation and Hydrological Droughts in South America through Statistically Downscaled CMIP6 Projections. **Climate**, [S. l.], v. 11, n. 8, 2023. DOI: 10.3390/cli11080166.

FONSECA, André; ANDRADE, Cristina; SANTOS, João A. Agricultural Water Security under Climate Change in the Iberian Peninsula. **Water (Switzerland)**, [S. l.], v. 14, n. 5, 2022. DOI: 10.3390/w14050768.

GELFAN, A. N. **Climate Change and Threats to Water Security: A Review**. **Water Resources**, 2023. DOI: 10.1134/S0097807823600547.

GESUALDO, Gabriela Chiquito; OLIVEIRA, Paulo Tarso; RODRIGUES, Dulce Buchala Bicca; GUPTA, Hoshin Vijai. Assessing water security in the São Paulo metropolitan region under projected climate change. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 23, n. 12, p. 4955–4968, 2019. DOI: 10.5194/hess-23-4955-2019.

GREY, David; SADOFF, Claudia W. Sink or Swim? Water security for growth and development. **Water Policy**, [S. l.], v. 9, n. 6, p. 545–571, 2007. DOI: 10.2166/wp.2007.021.

GUO, Yuxue; YU, Xinting; XU, Yue Ping; WANG, Guoqing; XIE, Jingkai; GU, Haiting. A comparative assessment of CMIP5 and CMIP6 in hydrological responses of the Yellow River Basin, China. **Hydrology Research**, [S. l.], v. 53, n. 6, p. 867–891, 2022. DOI: 10.2166/nh.2022.001.

HALIK, Gusfan; PUTRA, Victorious Setiaji; WIYONO, Retno Utami Agung. Assessment of climate change impact on drought disaster in Sampean Baru watershed, East Java, Indonesia based on IPCC-AR5. **Natural Hazards**, [S. l.], v. 112, n. 2, p. 1705–1726, 2022. a. DOI: 10.1007/s11069-022-05245-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05245-7>.

HALIK, Gusfan; PUTRA, Victorious Setiaji; WIYONO, Retno Utami Agung. Assessment of climate change impact on drought disaster in Sampean Baru watershed, East Java, Indonesia based on IPCC-AR5. **Natural Hazards**, [S. l.], v. 112, n. 2, p. 1705–1726, 2022. b. DOI: 10.1007/s11069-022-05245-7.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. Geneva, Switzerland.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. Geneva, Switzerland, 2014.

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** [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan,]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. DOI: 10.1017/9781009157896.001.

IPCC. **Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Di. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.**

IPCC. **IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 2023. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.**

JARAMILLO, Pablo; NAZEMI, Ali. Assessing urban water security under changing climate: Challenges and ways forward. **Sustainable Cities and Society**, [S. l.], v. 41, p. 907–918, 2018. DOI: 10.1016/j.scs.2017.04.005.

KAVETSKI, Dmitri; FENICIA, Fabrizio. Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 2. Application and experimental insights. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 47, n. 11, 2011. DOI: 10.1029/2011WR010748.

KIM, Jeong Bae; HABIMANA, Jean de Dieu; KIM, Seon Ho; BAE, Deg Hyo. Assessment of climate change impacts on the hydroclimatic response in burundi based on cmip6 esms. **Sustainability (Switzerland)**, [S. l.], v. 13, n. 21, p. 1–21, 2021. a. DOI: 10.3390/su132112037.

KIM, Jeong Bae; HABIMANA, Jean de Dieu; KIM, Seon Ho; BAE, Deg Hyo. Assessment of climate change impacts on the hydroclimatic response in burundi based on cmip6 esms. **Sustainability (Switzerland)**, [S. l.], v. 13, n. 21, p. 1–21, 2021. b. DOI: 10.3390/su132112037.

KUMAR, Praveen. Water Resources Research. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 51, n. 7, p. 5827–5838, 2015. a. DOI: 10.1002/2015WR017342.

LIBRARY, Wiley Online; SHRESTHA, Manish; ACHARYA, Suwash Chandra; KUMAR SHRESTHA, Pallav. Bias correction of climate models for hydrological modelling-are simple methods still useful? **METEOROLOGICAL APPLICATIONS Meteorol. Appl**, [S. l.], v. 24, p. 531–539, 2017. DOI: 10.1002/met.1655.

LLOPART, Marta; SIMÕES REBOITA, Michelle; PORFÍRIO DA ROCHA, Rosmeri. Assessment of multi-model climate projections of water resources over South America CORDEX domain. **Climate Dynamics**, [S. l.], v. 54, n. 1–2, p. 99–116, 2020. DOI: 10.1007/s00382-019-04990-z. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00382-019-04990-z>.

MARCHEZEPE, Bruno K.; ALMAGRO, André; BALLARIN, André S.; OLIVEIRA, Paulo Tarso S. Streamflow prediction in ungauged catchments by using the Grunsky method. **International Soil and Water Conservation Research**, [S. l.], v. 11, n. 4, p. 700–712, 2023. DOI: 10.1016/j.iswcr.2023.06.004.

MARENGO, Jose A.; AMBRIZZI, Tercio; DA ROCHA, Rosmeri P.; ALVES, Lincoln M.; CUADRA, Santiago V.; VALVERDE, Maria C.; TORRES, Roger R.; SANTOS, Daniel C.; FERRAZ, Simone E. T. Future change of climate in South America in the late twenty-first

century: Intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, [S. l.], v. 35, n. 6, p. 1089–1113, 2010. DOI: 10.1007/s00382-009-0721-6.

MARQUES, Amanda Carneiro; VERAS, Carlos Eduardo; RODRIGUEZ, Daniel Andrés. Assessment of water policies contributions for sustainable water resources management under climate change scenarios. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 608, p. 127690, 2022. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2022.127690.

MARTINS, Magda Stella de Melo; VALERA, Carlos Alberto; ZANATA, Marcelo; SANTOS, Regina Maria Bessa; ABDALA, Vera Lúcia; PACHECO, Fernando Antônio Leal; FERNANDES, Luís Filipe Sanches; PISSARRA, Teresa Cristina Tarlé. Potential impacts of land use changes on water resources in a tropical headwater catchment. **Water (Switzerland)**, [S. l.], v. 13, n. 22, p. 1–21, 2021. DOI: 10.3390/w13223249.

MASSEY, Frank J. The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit. **Journal of the American Statistical Association**, [S. l.], v. 46, n. 253, p. 68–78, 1951. DOI: 10.1080/01621459.1951.10500769.

MEIRA NETO, Antonio A. **Análise de incertezas e ponderação bayesiana de modelos aplicadas à modelagem chuva-vazão da bacia do Ribeirão da Onça**. 2013. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. DOI: 10.11606/D.18.2013.tde-03102013-111621.

MEKONNEN, Mesfin M.; HOEKSTRA, Arjen Y. Four billion people facing severe water scarcity. **Science Advances**, [S. l.], v. 2, n. 2, 2016. DOI: 10.1126/sciadv.1500323.

MILANO, Marianne; REYNARD, Emmanuel; MUNIZ-MIRANDA, Grazielle; GUERRIN, Joana. Water Supply Basins of São Paulo Metropolitan Region: Hydro-Climatic Characteristics of the 2013–2015 Water Crisis. **Water**, [S. l.], v. 10, n. 11, p. 1517, 2018. DOI: 10.3390/w10111517.

MOGES, Edom; DEMISSIE, Yonas; LARSEN, Laurel; YASSIN, Fuad. Review: Sources of hydrological model uncertainties and advances in their analysis. **Water (Switzerland)**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 1–23, 2021. DOI: 10.3390/w13010028.

MONTEIRO, Pedro Benjamin; CABRAL, Jaime Joaquim da Silva Pereira. Groundwater management in the state of Piauí (Brazil) on the climate change context. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, [S. l.], v. 58, n. 1, p. 45–58, 2023. DOI: 10.5327/z2176-94781485.

NOVAIS, Rafael Rezende. **Avaliação dos impactos das mudanças climáticas no regime hidrológico do Sistema Cantareira**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

OLIVEIRA, Josimar Alves De; FRANÇA, Helton Carneiro; OLIVEIRA, Yagara Cristina Alves De. Avaliação da capacidade de vertedores em barragens existentes. **XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, [S. l.], 2023.

O'NEILL, Brian C.; KRIEGLER, Elmar; RIAHI, Keywan; EBI, Kristie L.; HALLEGATTE, Stephane; CARTER, Timothy R.; MATHUR, Ritu; VAN VUUREN, Detlef P. A new scenario

framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. **Climatic Change**, [S. l.], v. 122, n. 3, p. 387–400, 2014. a. DOI: 10.1007/s10584-013-0905-2.

PERRIN, Charles; MICHEL, Claude; ANDRÉASSIAN, Vazken. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 279, n. 1–4, p. 275–289, 2003. DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00225-7.

PONCELET, Carine; MERZ, Ralf; MERZ, Bruno; PARAJKA, Juraj; OUDIN, Ludovic; ANDRÉASSIAN, Vazken; PERRIN, Charles. Process-based interpretation of conceptual hydrological model performance using a multinational catchment set. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 53, n. 8, p. 7247–7268, 2017. DOI: 10.1002/2016WR019991.

QUAN, Zhongxian; TENG, Jianbiao; SUN, Wenchao; CHENG, Tao; ZHANG, Jie. Evaluation of the HYMOD model for rainfall-runoff simulation using the GLUE method. **IAHS-AISH Proceedings and Reports**, [S. l.], v. 368, n. August 2014, p. 180–185, 2015. DOI: 10.5194/piahs-368-180-2015.

RAJU, Komaragiri Srinivasa; KUMAR, Dasika Nagesh. **Impact of Climate Change on Water Resources**. Singapore: Springer Singapore, 2018. DOI: 10.1007/978-981-10-6110-3.

REBOITA, Michelle Simões; FERREIRA, Glauber Willian de Souza; RIBEIRO, João Gabriel Martins; DA ROCHA, Rosmeri Porfírio; RAO, Vadlamudi Brahmananda. South American Monsoon Lifecycle Projected by Statistical Downscaling with CMIP6-GCMs. **Atmosphere**, [S. l.], v. 14, n. 9, 2023. DOI: 10.3390/atmos14091380.

REILLY, Christine F.; KROLL, Charles N. Estimation of 7-day, 10-year low-streamflow statistics using baseflow correlation. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 39, n. 9, 2003. DOI: 10.1029/2002WR001740.

RIAHI, Keywan et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. **Global Environmental Change**, [S. l.], v. 42, p. 153–168, 2017. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.

RODRIGUES, Dulce B. B.; GUPTA, Hoshin V.; MENDIONDO, Eduardo M. A blue/green water-based accounting framework for assessment of water security. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 50, n. 9, p. 7187–7205, 2014. DOI: 10.1002/2013WR014274.

SABESP. **Portal dos Mananciais**. 2024. Disponível em: <https://mananciais.sabesp.com.br/Home>. Acesso em: 4 fev. 2024.

SANTOS, R. M. B.; SANCHES FERNANDES, L. F.; MOURA, J. P.; PEREIRA, M. G.; PACHECO, F. A. L. The impact of climate change, human interference, scale and modeling uncertainties on the estimation of aquifer properties and river flow components. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 519, n. PB, p. 1297–1314, 2014. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.001.

SÃO PAULO, Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. **Plano das Bacias PCJ 2020-2035**. São Paulo, 2020.

SÃO PAULO, Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. Coordenadoria de Recursos Hídricos. **Plano Estadual de Recursos Hídricos: PERH 2020-2023**. São Paulo, 2020.

SAVENIJE, H. H. G. HESS Opinions “The art of hydrology”. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 157–161, 2009. DOI: 10.5194/hess-13-157-2009.

SHAMSHIRBAND, Shahabbodin et al. Predicting Standardized Streamflow index for hydrological drought using machine learning models. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 339–350, 2020. DOI: 10.1080/19942060.2020.1715844.

SHRESTHA, Alen; RAHAMAN, Md Mafuzur; KALRA, Ajay; JOGINEEDI, Rohit; MAHESHWARI, Pankaj. Climatological Drought Forecasting Using Bias Corrected CMIP6 Climate Data: A Case Study for India. **Forecasting**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 59–84, 2020. DOI: 10.3390/forecast2020004.

SILVA DIAS, Maria A. F.; DIAS, Juliana; CARVALHO, Leila M. V.; FREITAS, Edmilson D.; SILVA DIAS, Pedro L. Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil. **Climatic Change**, [S. l.], v. 116, n. 3–4, p. 705–722, 2013. DOI: 10.1007/s10584-012-0504-7.

SINGH, Vijay P. Hydrologic modeling: progress and future directions. **Geoscience Letters**, [S. l.], v. 5, n. 1, 2018. DOI: 10.1186/s40562-018-0113-z.

SIQUEIRA, Paula Prado; OLIVEIRA, Paulo Tarso S.; BRESSIANI, Danielle; MEIRA NETO, Antonio A.; RODRIGUES, Dulce B. B. Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, [S. l.], v. 37, p. 100931, 2021. DOI: 10.1016/J.EJRH.2021.100931. Acesso em: 14 ago. 2022.

SONE, Jullian S. et al. Water security in an uncertain future: Contrasting realities from an availability-demand perspective. **Water Resources Management**, v. 36, n. 8, p. 2571-2587, 2022.

SUI, Xinxin; VAN DE VEN, Frans H. M. The influence of Low Impact Development (LID) on basin runoff in a half-urbanized catchment: A case study in San Antonio, Texas. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 616, 2023. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128793.

SUN, Jinqiu; YAN, Haofang; BAO, Zhenxin; WANG, Guoqing. Investigating Impacts of Climate Change on Runoff from the Qinhuai River by Using the SWAT Model and CMIP6 Scenarios. **Water (Switzerland)**, [S. l.], v. 14, n. 11, 2022. a. DOI: 10.3390/w14111778.

SUN, Jinqiu; YAN, Haofang; BAO, Zhenxin; WANG, Guoqing. Investigating Impacts of Climate Change on Runoff from the Qinhuai River by Using the SWAT Model and CMIP6 Scenarios. **Water (Switzerland)**, [S. l.], v. 14, n. 11, 2022. b. DOI: 10.3390/w14111778.

TIWARI, Amar Deep; MISHRA, Vimal. Sub-Seasonal Prediction of Drought and Streamflow Anomalies for Water Management in India. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [S. l.], v. 127, n. 3, p. 1–20, 2022. DOI: 10.1029/2021JD035737.

VAN ESSE, W. R.; PERRIN, C.; BOOIJ, M. J.; AUGUSTIJN, D. C. M.; FENICIA, F.; KAVETSKI, D.; LOBLIGEOIS, F. The influence of conceptual model structure on model performance: A comparative study for 237 French catchments. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 17, n. 10, p. 4227–4239, 2013. DOI: 10.5194/hess-17-4227-2013.

VAN VUUREN, Detlef P. et al. A new scenario framework for Climate Change Research: scenario matrix architecture. **Climatic Change**, [S. l.], v. 122, n. 3, p. 373–386, 2014. a. DOI: 10.1007/s10584-013-0906-1.

VAN VUUREN, Detlef P. et al. A new scenario framework for Climate Change Research: scenario matrix architecture. **Climatic Change**, [S. l.], v. 122, n. 3, p. 373–386, 2014. b. DOI: 10.1007/s10584-013-0906-1.

WAGENER, Thorsten; BOYLE, Douglas P.; LEES, Matthew J.; WHEATER, Howard S.; GUPTA, Hoshin V.; SOROOSHIAN, Soroosh. A framework for development and application of hydrological models. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 13–26, 2001. DOI: 10.5194/hess-5-13-2001.

WHATELY, Marussia; CUNHA, Pilar. **Cantareira 2006: Um olhar sobre o maior manancial de água da Região Metropolitana de São Paulo**. São Paulo.

XAVIER, Alexandre C.; KING, Carey W.; SCANLON, Bridget R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, [S. l.], v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016. DOI: 10.1002/joc.4518.

YIN, Guodong; WANG, Guoqiang; ZHANG, Xuan; WANG, Xiao; HU, Qiuhong; SHRESTHA, Sangam; HAO, Fanghua. Multi-scale assessment of water security under climate change in North China in the past two decades. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 805, p. 150103, 2022. DOI: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.150103. Acesso em: 14 ago. 2022.

ZHAO, Panpan; LÜ, Haishen; YANG, Huicai; WANG, Wenchuan; FU, Guobin. Impacts of climate change on hydrological droughts at basin scale: A case study of the Weihe River Basin, China. **Quaternary International**, [S. l.], v. 513, p. 37–46, 2019. a. DOI: 10.1016/J.QUAINT.2019.02.022.

ZHAO, Panpan; LÜ, Haishen; YANG, Huicai; WANG, Wenchuan; FU, Guobin. Impacts of climate change on hydrological droughts at basin scale: A case study of the Weihe River Basin, China. **Quaternary International**, [S. l.], v. 513, p. 37–46, 2019. b. DOI: 10.1016/J.QUAINT.2019.02.022. Acesso em: 23 set. 2022.