

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA HIDRÁULICA E SANEAMENTO

EDNA LIZETH HIGUERA-CASTRO

Avaliação dos impactos das mudanças climáticas e das mudanças no uso da terra na bacia do rio Piracicaba, utilizando modelagem hidrológica

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos
2022

EDNA LIZETH HIGUERA-CASTRO

Avaliação dos impactos das mudanças climáticas e das mudanças no uso da terra na bacia do rio Piracicaba, utilizando modelagem hidrológica

VERSÃO CORRIGIDA

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Área de Concentração: Hidráulica e Saneamento.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Mercedes Gamboa Medina.

São Carlos

2022

Autorizo a reprodução total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

H634	Higuera-Castro, Edna Lizeth Avaliação dos impactos das mudanças climáticas e das mudanças no uso da terra na bacia do rio Piracicaba, utilizando modelagem hidrológica / Edna Lizeth Higuera-Castro; orientadora Maria Mercedes Gamboa-Medina. São Carlos, 2022. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2022. 1. Caminhos Socioeconômicos Compartilhados. 2. SWAT. 3. Modelo semidistribuído. 4. Vazão. 5. Sistema Cantareira. 6. Bacia do rio Piracicaba. 7. CMIP6. I. Título.
------	--

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **EDNA LIZETH HIGUERA CASTRO**.

Título da dissertação: "Avaliação dos impactos das mudanças climáticas e das mudanças no uso da terra na bacia do rio Piracicaba, utilizando modelagem hidrológica".

Data da defesa: 12/05/2022.

Comissão Julgadora

Resultado

Profa. Dra. **Maria Mercedes Gamboa Medina**
(Orientadora)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Aprovada

Profa. Dra. **Danielle de Almeida Bressiani**
(Universidade Federal de Pelotas/UFPEL)

Aprovada

Profa. Dra. **Dulce Buchala Bicca Rodrigues**
(Universidade Federal de Mato Grosso do Sul/UFMS)

Aprovada

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Prof. Dr. **Luiz Antonio Daniel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

Dedico este trabalho aos meus pais Luz Castro e Segundo Higuera, e meu irmão Alejandro, com todo meu amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida, saúde e coragem por lutar por minhas metas.

Agradeço aos meus pais, Luz Castro e Segundo Higuera, e meu irmão Alejandro Higuera, pelo carinho, motivação, por sempre me apoiar-me desde minha decisão de postular-me ao processo seletivo de mestrado. Amo vocês, são meu exemplo e minha motivação.

Agradeço à minha orientadora, a Profa. Dra. Maria Mercedes Gamboa Medina, pela oportunidade, a orientação, a confiança depositada em mim, a ajuda, a motivação e pelos ensinamentos durante o mestrado. Sou muito grata por acolher-me, pelo contínuo acompanhamento no desenvolvimento da pesquisa e pelas oportunidades brindadas. Muito obrigada!

Agradeço à Profa. Dra. Danielle de Almeida Bressiani, pela disposição, disponibilidade e pela confiança depositada em mim, para continuar com sua pesquisa, disponibilizando gentilmente o modelo hidrológico base da bacia do rio Piracicaba que ela elaborou na sua tese, para ser utilizado nesta pesquisa de mestrado. Também agradeço sua disposição para resolver minhas dúvidas, sua ajuda e pelas oportunidades brindadas. Muito obrigada!

Agradeço a Xiomara Quispe, pela amizade, apoio, assim como a companhia durante a pandemia em São Carlos, sem você não teria sido o mesmo nesse período. Também agradeço os ensinamentos com o Python. Obrigada pela grande amizade e seu apoio no mestrado. Também agradeço a Alex, por sua amizade e apoio na fase final do mestrado, assim como sua ajuda com os equipamentos na preparação da defesa de mestrado. Também agradeço aos amigos do Perú, que me acompanharam no final do mestrado.

Agradeço a Andrey Jimenez, pelo seu apoio sempre, a torcida, a grande amizade e em especial, agradeço sua valiosa ajuda nos últimos dias do mestrado, pelos seus conselhos na apresentação e na formatação do documento, assim como sua ajuda com o teste e ajuste dos equipamentos antes da defesa, muito obrigada!

Agradeço a Juan David Domínguez, pelo apoio, os conselhos, a torcida, a grande amizade, e em especial, agradeço sua valiosa ajuda nos últimos dias do mestrado, pelos conselhos valiosos e acertados na apresentação. Assim mesmo, agradeço a Heidi Pascagaza, Stefanny Sanchez, Santiago Bermúdez e Kathe Hernández, por seu apoio incondicional sempre e seus conselhos. Obrigada pela grande amizade.

Agradeço ao meu namorado, Juan Camilo Álvarez, pelo seu apoio, carinho, suas palavras de motivação e sua companhia na fase final do mestrado, também agradeço a sua ajuda com os resumos em inglês e a apresentação da defesa. Amo você!

Agradeço a Tassiana H. Oliveira, Karen Zambrano e César Fialho, pela amizade, o apoio e a companhia, por mostrar-me coisas da cultura da sua região e do Brasil. Agradeço a Gabriela Gesualdo, pela sua gentil ajuda na resolução de dúvidas para mexer com SWAT e SWAT-CUP. Agradeço aos colegas do Programa, pela parceria.

Agradeço aos colegas do LabSiN, Fabrizio e Ianca, que conheci e compartilhamos na última fase do mestrado, pela ajuda e conversas.

Agradeço às secretárias do Programa de Pós-graduação, Sá, Priscila e Rose pela disponibilidade, resolução de dúvidas e ajuda desde o processo seletivo até o final do mestrado. Muito obrigada!

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento da EESC-USP.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado e a Universidade de São Paulo pela infraestrutura e os equipamentos informáticos.

RESUMO

HIGUERA-CASTRO, E. L. **Avaliação dos impactos das mudanças climáticas e das mudanças no uso da terra na bacia do rio Piracicaba, utilizando modelagem hidrológica.** 2022. 123 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo, São Carlos, 2022.

Alterações nos componentes do ciclo hidrológico, decorrentes das mudanças climáticas, afetam a produção agrícola, a disponibilidade hídrica, a intensificação e frequência de eventos extremos, comprometendo a segurança hídrica e alimentar. Os impactos das mudanças climáticas junto com mudanças no uso da terra têm sido estudados e a avaliação desses impactos seria um insumo importante para o planejamento dos recursos hídricos, ainda mais em bacias onde os diversos usos simultâneos do recurso incrementam a complexidade econômica, técnica e social do gerenciamento, como a bacia do rio Piracicaba, no sudeste do Brasil. O objetivo da pesquisa de mestrado consistiu em avaliar os efeitos, nas vazões e nas principais variáveis climáticas, decorrentes das mudanças climáticas e mudanças no uso da terra na bacia do rio Piracicaba. A metodologia foi desenvolvida em quatro etapas: i) reformulação, calibração e validação do modelo hidrológico da bacia do rio Piracicaba no SWAT e SWAT-CUP para o período 1979-2011; ii) Obtenção das vazões futuras nos reservatórios do Sistema Cantareira, mediante simulação hidrológica da bacia e simulação simplificada da operação dos reservatórios; iii) Obtenção e redução de escala das projeções de mudanças climáticas, provenientes do modelo climático global GFDL-ESM4 do CMIP6; iv) Definição e simulação da resposta hidrológica da bacia para os cenários de mudanças climáticas com e sem mudanças no uso da terra. Primeiramente, quatro projeções de mudanças climáticas foram definidas, para dois Caminhos Socioeconômicos Compartilhados do CMIP6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5, avaliados a médio (2021-2050) e longo prazo (2051-2080). Em segundo lugar, cinco tipos de mudanças no uso da terra foram definidos, com e sem desmatamento e simulados em conjunto com cenários de mudanças climáticas, considerando 70% de mudança de área e simulados para as piores condições de cobertura do solo. Finalmente, vinte cenários de mudanças no uso da terra foram obtidos para todas as combinações de cenários de mudanças climáticas. Nos resultados, os cenários de mudanças climáticas CC2 (SSP2-4.5 para o período 2051-2080) e CC4 (SSP5-8.5 para o período 2051-2080) apresentaram maior variabilidade na precipitação e tiveram os maiores valores na temperatura máxima e mínima, ao longo do tempo. Para os cenários de mudanças climáticas, a vazão na bacia do rio Piracicaba teve diminuição entre 36% e 50% nos valores mínimos e aumento entre 16% e 72% nos valores máximos, em relação os valores históricos. As temperaturas máxima e mínima das projeções climáticas das emissões altas de gases de efeito estufa (SSP5-8.5) a médio e longo prazo, tiveram aumento temporal significativo ($p < 0.05$). Conclui-se: i) O modelo hidrológico simula adequadamente as

condições da bacia para o período histórico e infere-se que é robusto para fazer previsões hidrológicas. ii) Impactos de mudanças climáticas são intensificados com mudanças no uso da terra, aumentando a probabilidade de ter vazões máximas superiores e vazões mínimas inferiores, com relação às vazões históricas, favorecendo a ocorrência de possíveis eventos extremos, e possíveis panoramas de escassez hídrica e inundações. iii) Estudos de avaliação de mudanças climáticas e de mudanças no uso da terra são necessários para facilitar o gerenciamento do recurso hídrico.

Palavras-chave: Caminhos Socioeconômicos Compartilhados. SWAT. Modelo semidistribuído. Vazão. Sistema Cantareira. Bacia do rio Piracicaba. CMIP6.

ABSTRACT

HIGUERA-CASTRO, E. L. **Assessment of the climate change and land use change impacts in the Piracicaba watershed, using hydrological modeling.** 2022. 123 p Dissertation (Master of Science) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2022.

Changes in the components of the hydrological cycle, resulting from climate change, affect agricultural production, water availability, the intensification and frequency of extreme events, compromising water and food security. The impacts of climate change together with land use changes have been studied and the assessment of these impacts would be an important input for the planning of water resources, even more in watersheds where the various simultaneous uses of the resource increase the economic, technical, and social complexity of management, like the Piracicaba watershed in southeastern Brazil. The objective of the master's research was to assess the effects, of streamflow on the main climatic variables, derivate from climate change, and land use changes in the Piracicaba watershed. The methodology was developed in four stages: i) reformulation, calibration, and validation of the hydrological model of the Piracicaba watershed in SWAT and SWAT-CUP for the period 1979-2011; ii) Obtaining future streamflow in the reservoirs of the Cantareira System, through a hydrological simulation of the watershed and a simplified simulation of the operation of the reservoirs; iii) Obtaining and downscaling of climate change projections, from a global climate model GFDL-ESM4 from CMIP6; iv) Definition and simulation of the basin's hydrological response for future climate change scenarios, with and without land use change scenarios in the SWAT model. Firstly, four climate change projections were defined, for two CMIP6 Shared Socioeconomic Pathways, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 evaluated for mid-term (2021-2050) and long-term (2051-2080). Secondly, five land use change scenarios were defined, with and without deforestation, and simulated together with climate change scenarios, considering 70% area change and simulated for the worst land cover conditions. Finally, twenty land use change scenarios were obtained for all combinations of climate change scenarios. In the results, climate change scenarios CC2 (SSP2-4.5 for the period 2051-2080) and CC4 (SSP5-8.5 for the period 2051-2080) presented greater variability in precipitation and had the highest values in the maximum and minimum temperature, over time. Streamflow in climate change scenarios in the Piracicaba watershed has a increase between 16% and 72% in maximum streamflow values, and a decrease between 36% and 50% in minimum streamflow values. Maximum and minimum temperatures of the climatic projections for high emissions of greenhouse gases (SSP5-8.5) in the mid and long term, had a significant temporal increase ($p < 0.05$). It is concluded that: i) the hydrological model is adequate for simulating the watershed conditions for the historical period, and it is inferred that is robust to make future predictions. ii) climate change impacts are intensified with land use changes, increasing the probability of higher maximum and

lower minimum streamflow, favoring the occurrence of possible extreme events and scenarios of water scarcity and floods. iii) Climate change and land use change evaluation studies are necessary for facilitating water resources management.

Keywords: Shared Socioeconomic Pathways. SWAT. Semidistributed Model. Streamflow. Cantareira System. Piracicaba Watershed. CMIP6.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mudanças na temperatura da superfície global.....	28
Figura 2 – Definição dos Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSP) e desafios a ser percorridos pelos SSP.	32
Figura 3 – Etapas da metodologia.....	41
Figura 4 – Localização da bacia do rio Piracicaba.	42
Figura 5 – Mapa das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí...	43
Figura 6 – Esquema do funcionamento do Sistema Cantareira.....	46
Figura 7 – Localização das estações meteorológicas e fluviométricas selecionadas para a área de estudo.	54
Figura 8 - Esquema do Sistema Cantareira.	61
Figura 9 – Delimitação das bacias que contém os reservatórios Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro, pertencentes ao Sistema Cantareira.	62
Figura 10 – Diagrama da análise de sensibilidade dos parâmetros escolhidos para a calibração e validação no SWAT-CUP.....	82
Figura 11 – Vazões observadas, calibradas e validadas de frequência mensal e estatísticas de rendimento para as estações fluviométricas de Artemis, Jaguariúna e Rio Abaixo.	83
Figura 12 – Dispersão dos dados de vazão mensal (m^3/s) observada e simulada nas estações fluviométricas Artemis, Jaguariúna e Rio Abaixo, para o período 1984-2011.....	85
Figura 13 - Usos da terra no Sistema Cantareira.	87
Figura 14 – Gráfico do comportamento das vazões futuras a jusante dos reservatórios do Sistema Cantareira que são destinadas à bacia do rio Piracicaba.	89
Figura 15 - Gráfico do comportamento do volume total dos reservatórios do Sistema Cantareira.	90
Figura 16 – Precipitação mensal [mm/mês] na bacia do rio Piracicaba.....	92
Figura 17 – Diagramas de caixa dos dados de precipitação mensal para os dados observados (1975-2011) e os cenários futuros definidos na Tabela 29.....	93
Figura 18 – Média da temperatura máxima mensal [°C] na bacia do rio Piracicaba.	94
Figura 19 – Diagramas de caixa da média dos dados da temperatura máxima para os dados observados (1975-2011) e os cenários futuros definidos na Tabela 29. ...	95
Figura 20 – Média da temperatura mínima mensal [°C] na bacia do rio Piracicaba..	97

Figura 21 – Diagrama de caixa da média dos dados da temperatura mínima para os dados observados (1975-2011) e os cenários futuros definidos na Tabela 29.	98
Figura 22 – Gráfico do comportamento da vazão mensal futura no exutório da bacia do rio Piracicaba, sob quatro cenários de mudanças climáticas com relação a vazão mensal histórica simulada.	100
Figura 23 – Diagrama de caixa das vazões mensais obtidas das simulações dos cenários futuros de mudanças climáticas.	101
Figura 24 - Vazões mensais futuras no exutório na bacia do rio Piracicaba dos cenários de mudanças no uso da terra, tendo como referência o cenário de mudanças climáticas CC1.	103
Figura 25 – Diagramas de caixa das vazões futuras no exutório da bacia do rio Piracicaba para os cenários de referência, de mudanças climáticas, CC1, CC2, CC3 e CC4.	106
Figura 26 – Vazões mensais futuras no exutório da bacia do rio Piracicaba sob cenários de mudanças no uso da terra e de mudanças climáticas.	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de entrada do modelo hidrológico base no SWAT da bacia do rio Piracicaba, elaborado por Bressiani (2016).....	49
Tabela 2 - Usos e ocupações dos solos na bacia do rio Piracicaba, definidos no SWAT.	51
Tabela 3 – Métricas de desempenho do modelo na calibração diária para a bacia inteira.	52
Tabela 4 – Métricas de desempenho do modelo na validação diária para a bacia inteira.	52
Tabela 5 – Coordenadas das estações meteorológicas selecionadas.	54
Tabela 6 – Contagem de falhas no posto meteorológico da ESALQ.	57
Tabela 7 - Detalhes das estações fluviométricas para ingressar como entradas de descargas das vazões a jusante do Sistema Cantareira na bacia do rio Piracicaba.	57
Tabela 8 – Resultados das métricas de rendimento do modelo.	59
Tabela 9 – Detalhes das estações fluviométricas usadas na nova calibração e validação do modelo do rio Piracicaba.	59
Tabela 10 - Parâmetros selecionados para a nova calibração e validação do modelo SWAT.	60
Tabela 11 – Dados de entrada no modelo SWAT para a modelagem hidrológica da bacia do Sistema Cantareira.	63
Tabela 12 – Especificações de operação dos reservatórios do Sistema Cantareira.	65
Tabela 13 - Retirada d'água de acordo com classificação por faixas para operação do Sistema Cantareira segundo o artigo 4.1 da resolução ANA/DAEE nº925 de 2017.....	65
Tabela 14 – Vazões de restrição para os reservatórios do Sistema Cantareira.....	67
Tabela 15 – Nomeação dos cenários futuros de mudanças climáticas.	69
Tabela 16 – Parâmetros e pesos ingressados na ferramenta GCMeval.....	71
Tabela 17 – Características e fatores de conversão das variáveis de interesse do modelo climático global.	72
Tabela 18 – Filtros aplicados para obter dados climáticos do CMIP6 do site do WCRP.....	73
Tabela 19 – Descrição dos parâmetros do clima do modelo SWAT.	74
Tabela 20 – Cenários de mudanças no uso da terra simulados no SWAT.	77

Tabela 21 – Valores de curva número extraídos do método SCS-CN (MISHRA; SINGH, 2003) e Marin <i>et al.</i> (2008)	79
Tabela 22 – Análise de sensibilidade obtida na calibração no SWAT-CUP.	81
Tabela 23 – Parâmetros selecionados, faixas dos valores calibrados e validados, melhores valores ajustados obtidos da melhor simulação e valores inseridos no modelo SWAT.	82
Tabela 24 - Resultados das métricas de rendimento da calibração para o período 1984-1999.	84
Tabela 25 - Resultados das métricas de rendimento da validação para o período 2000-2011.	84
Tabela 26 - Usos da terra e suas correspondentes áreas nas bacias que contém os reservatórios do Sistema Cantareira.	88
Tabela 27 – Tipos de solos nas bacias que contém os reservatórios do Sistema Cantareira.	88
Tabela 28 – Classes de declividade nas bacias dos reservatórios do Sistema Cantareira.	88
Tabela 29 – Identificação e descrição dos cenários futuros de mudanças climáticas.	90
Tabela 30 – Classificação dos melhores modelos climáticos globais, utilizando a ferramenta GCMeval (PARDING <i>et al.</i> , 2020).	91
Tabela 31 – Resultados do teste de tendência Mann-Kendall na precipitação dos cenários de mudanças climáticas e dos históricos.	94
Tabela 32 – Resultados do teste de tendência Mann-Kendall na temperatura máxima dos cenários de mudanças climáticas e dos históricos.	96
Tabela 33 – Resultados do teste de tendência Mann-Kendall na temperatura mínima dos cenários de mudanças climáticas e dos históricos.	99
Tabela 34 – Resultados do teste de tendência Mann-Kendall para séries das vazões históricas simuladas e dos cenários futuros de mudanças climáticas.	102
Tabela 35 – Estatísticas das simulações dos cenários de mudanças no uso da terra para o cenário de referência de mudanças climáticas CC1 (SSP 2 - 4.5 para o período 2021-2050).	103
Tabela 36 – Resultados do teste de tendência Mann-Kendall para as vazões dos cenários de mudanças no uso da terra para o cenário de mudanças climáticas de referência CC1 (SSP2-4.5 para o período 2021-2050).	104

Tabela 37 – Resultados do teste de tendência Mann-Kendall para as vazões dos cenários de mudanças no uso da terra para o cenário de mudanças climáticas de referência CC2 (SSP2-4.5 para o período 2051-2080).....	104
Tabela 38 – Resultados do teste de tendência Mann-Kendall para as vazões dos cenários de mudanças no uso da terra para o cenário de mudanças climáticas de referência CC3 (SSP5-8.5 para o período 2021-2050).....	105
Tabela 39 – Resultados do teste de tendência Mann-Kendall para as vazões dos cenários de mudanças no uso da terra para o cenário de mudanças climáticas de referência CC4 (SSP5-8.5 para o período 2051-2080).....	105
Tabela 40 – Estatísticas das simulações dos cenários de mudanças no uso da terra para o cenário de referência de mudanças climáticas CC2 (SSP 2 - 4.5 para o período 2051-2080).....	109
Tabela 41 – Estatísticas das simulações dos cenários de mudanças no uso da terra para o cenário de referência de mudanças climáticas CC3 (SSP 5 - 8.5 para o período 2021-2050).....	109
Tabela 42 - Estatísticas das simulações dos cenários de mudanças no uso da terra para o cenário de referência de mudanças climáticas CC4 (SSP 5 - 8.5 para o período 2051-2080).....	110

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	23
2.	OBJETIVOS.....	26
2.1.	Objetivo geral	26
2.2.	Objetivos específicos.....	26
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.1.	Mudanças climáticas.....	27
3.1.1.	Modelos climáticos.....	29
3.1.2.	Modelos climáticos globais do CMIP6.....	29
3.1.3.	Redução de escala dos modelos climáticos.....	33
3.1.4.	Mudanças climáticas em estudos hidrológicos.....	34
3.2.	Modelagem hidrológica	35
3.3.	Mudanças no uso da terra	37
4.	MATERIAL E MÉTODOS.....	41
4.1.	Área de estudo	42
4.1.1.	Bacia do rio Piracicaba	42
4.1.2.	Sistema Cantareira	45
4.2.	Modelagem hidrológica da bacia do rio Piracicaba para o período histórico.....	47
4.2.1.	Modelo hidrológico base para a bacia.....	47
4.2.2.	Entrada de dados climáticos para o período histórico 1979-2011	53
4.2.3.	Simulação, calibração e validação do modelo para o período histórico ...	57
4.2.4.	Obtenção de vazões futuras a jusante dos reservatórios do Sistema Cantareira destinadas para a bacia do rio Piracicaba	60
4.2.4.1.	Delimitação e simulação hidrológica dos reservatórios do Sistema Cantareira.	61
4.2.4.2.	Cálculo de vazões a jusante dos reservatórios do Sistema Cantareira	64
4.3.	Simulações dos cenários futuros de mudanças climáticas.....	68

4.3.1.	Obtenção dos dados climáticos futuros provenientes do modelo climático global	69
4.3.2.	Redução de escala dos dados climáticos do modelo climático global e geração de estatísticas.....	73
4.3.3.	Teste de tendência de Mann-Kendall	74
4.4.	Simulações dos cenários de mudanças no uso da terra.....	76
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	80
5.1.	Modelagem hidrológica da bacia do rio Piracicaba para o período histórico.....	80
5.2.	Obtenção de vazões futuras a jusante dos reservatórios do Sistema Cantareira destinadas para a bacia de Piracicaba	87
5.2.1.	Simulação hidrológica dos reservatórios do Sistema Cantareira	87
5.2.2.	Cálculo de vazões a jusante dos reservatórios do Sistema Cantareira destinadas para a bacia do rio Piracicaba	89
5.3.	Cenários futuros de mudanças climáticas	90
5.3.1.	Seleção do modelo climático global	90
5.3.2.	Avaliação das variáveis climáticas provenientes do modelo climático global	91
5.3.3.	Simulações dos cenários de mudanças climáticas no SWAT.....	99
5.4.	Simulações dos cenários de mudanças no uso da terra no SWAT	102
	CONCLUSÕES.....	111
	REFERÊNCIAS.....	113

1. INTRODUÇÃO

A temperatura superficial global tem aumentado a uma taxa considerável nos últimos 2000 anos por conta da influência humana. Globalmente, espera-se que para cada 1°C de aquecimento global, os eventos de precipitação extrema aumentam-se 7% (IPCC, 2021). Este aumento na temperatura global deve-se as consequências das mudanças climáticas, impactando nos ecossistemas, pessoas, infraestruturas e assentamentos (IPCC, 2022a). As mudanças climáticas são definidas como alterações no clima por um longo período, caracterizadas pela variabilidade na média e nas propriedades climáticas (IPCC, 2014). Alguns dos impactos é o aumento na frequência e na intensidade de eventos extremos climáticos, como secas, precipitações intensas e incêndios (IPCC, 2022a).

Estes impactos das mudanças climáticas têm reduzido a segurança alimentar e hídrica, impedindo atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. A vulnerabilidade, os riscos climáticos e o desenvolvimento sustentável estão fortemente conectados (IPCC, 2022b).

Segundo o IPCC (2019), chuvas mais intensas levam a uma redistribuição da água superficial e subterrânea, o que resulta em um aumento de inundações e erosão do solo, causando estresse hídrico nas plantas e diminuindo a segurança hídrica. Existe uma correlação positiva entre o aquecimento global e o risco de inundações futuras e a cobertura do solo, podendo ser impactados negativamente, especialmente, perto dos rios e várzeas (ALFIERI *et al.*, 2017; ALFIERI; FEYEN; DI BALDASSARRE, 2016; ARNELL; GOSLING, 2016; WINSEMIUS *et al.*, 2016; WOBUS *et al.*, 2017).

As mudanças climáticas podem afetar a variabilidade na vazão anual (DE OLIVEIRA *et al.*, 2019), no escoamento superficial (FARIAS *et al.*, 2020; GRACELLI *et al.*, 2020; LUCAS-BORJA *et al.*, 2020) e na erosão do solo. Abou *et al.* (2022) pesquisaram a influência das mudanças climáticas e das mudanças no uso da terra na bacia do Alto Paraná e encontraram que as mudanças climáticas foram a principal causa no aumento da vazão anual.

A variabilidade na produção de água em uma bacia está influenciada pelo reflorestamento e o desmatamento. Cenários com diminuição das áreas florestais podem gerar inundações como resultado do aumento dos picos da vazão. Uma

solução viável às inundações resulta ser a conservação das áreas florestais, no entanto, o potencial de mitigação é limitado pela intensidade das chuvas e a saturação do solo como é afirmado por Ellison et al. (2017) e Pilaš et al. (2010).

Para avaliar os impactos das mudanças climáticas na vazão, a abordagem mais usada são os modelos hidrológicos junto com o uso de modelos climáticos globais ou regionais (VIOLA *et al.*, 2014). Os modelos hidrológicos permitem a avaliação da quantidade e qualidade de água, carga de poluentes, produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica (SRINIVASAN; ARNOLD, 1994), como é o modelo SWAT, um dos modelos mais utilizados no mundo (SHI *et al.*, 2011). O modelo SWAT tem a capacidade de simular e avaliar diversos cenários de uso da terra e cobertura do solo, assim como mudanças climáticas.

O modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é útil para simular e avaliar diversos cenários, em áreas grandes e complexas (MACHADO, 2002). Este é um modelo hidrológico semidistribuído que simula os processos hidrológicos, sedimentos, propriedades do solo, crescimento de culturas, nutrientes, pesticidas, manejo agrícola e transporte nos canais, desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), em conjunto com a Universidade Texas A&M (SRINIVASAN; ARNOLD, 1994).

A região Sudeste do Brasil é propensa a eventos de enchentes e secas severas (Bressiani, 2016). Destacando a seca de 2014 e os alagamentos de 2011, que geraram impactos negativos, registrando valores fora dos limites das vazões monitoradas, decorrentes de déficits e excessos na precipitação (MARENGO; ALVES, 2016).

Há uma necessidade de avaliar os impactos futuros das mudanças climáticas e das mudanças no uso da terra em bacias relevantes no desenvolvimento econômico, agrícola e industrial como é o caso específico da bacia do rio Piracicaba localizada na região Sudeste, que representa 5% do Produto Interno Bruto do Brasil e responsável pelo abastecimento de quase 6 milhões de pessoas nesta área e a 9 milhões na Região Metropolitana de São Paulo através do Sistema Cantareira (CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA, 2020).

De acordo com a SABESP (2020), enfatiza a priorização do fortalecimento da segurança hídrica e robustez na infraestrutura do abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo, sendo o Sistema Cantareira, um dos sistemas produtores de água responsáveis pelo abastecimento da Região.

Estudos de impactos de mudanças climáticas e mudanças no uso da terra são considerados um insumo para o planejamento dos recursos hídricos e em especial, em bacias relevantes como é o caso da bacia do rio Piracicaba (CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA, 2020; MARTINS *et al.*, 2021). Martins *et al.* (2021) enfatiza a importância do desenvolvimento de estudos de impactos de mudanças climáticas nas bacias PCJ, ante as preocupações pelo cumprimento das metas do plano de planejamento de recursos hídricos das bacias PCJ. A partir das anteriores premissas, a área de estudo foi a bacia do rio Piracicaba.

A hipótese deste estudo baseou-se que ante as mudanças climáticas e as mudanças no uso da terra, com cenários que envolvem as piores condições de cobertura do solo, espera-se a possível intensificação na frequência e severidade de secas e chuvas intensas ao obter valores inferiores e superiores aos históricos de vazão.

O objetivo principal desta pesquisa consistiu em avaliar os impactos decorrentes das mudanças climáticas e mudanças no uso da terra, a médio e longo prazo, nas vazões e nas principais variáveis climáticas (precipitação e temperatura) da bacia do rio Piracicaba, utilizando o modelo hidrológico semidistribuído SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar os impactos futuros a médio e longo prazo, nas vazões e nas principais variáveis climáticas (precipitação e temperatura) da bacia do rio Piracicaba, em consequência de mudanças climáticas e mudanças no uso da terra, mediante modelagem hidrológica semidistribuída.

2.2. Objetivos específicos

- i. Reconfigurar, calibrar e validar o modelo hidrológico da bacia do rio Piracicaba no SWAT.
- ii. Estimar as vazões futuras dos reservatórios do Sistema Cantareira mediante a simulação simplificada da sua operação.
- iii. Obter e analisar as projeções climáticas das variáveis de precipitação, umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento e temperatura mínima e máxima na bacia do rio Piracicaba, de um modelo climático global.
- iv. Estimar e analisar os impactos hidrológicos das mudanças no uso da terra e das mudanças climáticas na bacia do rio Piracicaba, mediante simulações no SWAT.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Mudanças climáticas

As mudanças climáticas são definidas como um grupo de alterações nas condições climáticas que persistem por um período extenso, por décadas ou mais e podem ser identificadas pelas variações nas médias e na variabilidade das propriedades do clima. Processos internos naturais ou forçamentos externos como, erupções vulcânicas, modulações dos ciclos solares e mudanças antropogênicas constantes que alteram a composição atmosférica e do uso do solo podem ser as causas das mudanças climáticas (IPCC, 2014).

Com o objetivo de fornecer avaliações científicas sobre os impactos, possíveis riscos futuros e apresentar alternativas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas, mediante a publicação de uma série de relatórios, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (em inglês conhecido como *Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) foi criado em 1988, pela Organização Meteorológica Mundial (em inglês *World Meteorological Organization*, WMO) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (em inglês *United Nations Environment Programme*, UNEP) (IPCC, 2022c).

O quinto relatório de avaliação do IPCC (AR5) foi publicado em 2014. Neste relatório de Avaliação do IPCC foram apresentados quatro cenários de influência humana, conhecidos como Trajetórias de Concentração Representativa (RCP, pelas siglas em inglês, *Representative Concentration Pathway*) e são expressos em termos das concentrações de gases de efeito estufa. Cada RCP está associado a uma quantidade determinada de energia térmica adicional, armazenada no sistema terrestre, decorrente das emissões de gases de efeito estufa pela ação humana. Estes cenários foram desenvolvidos considerando fatores como, tipo e uso do solo, crescimento econômico e opções da tecnologia. 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).

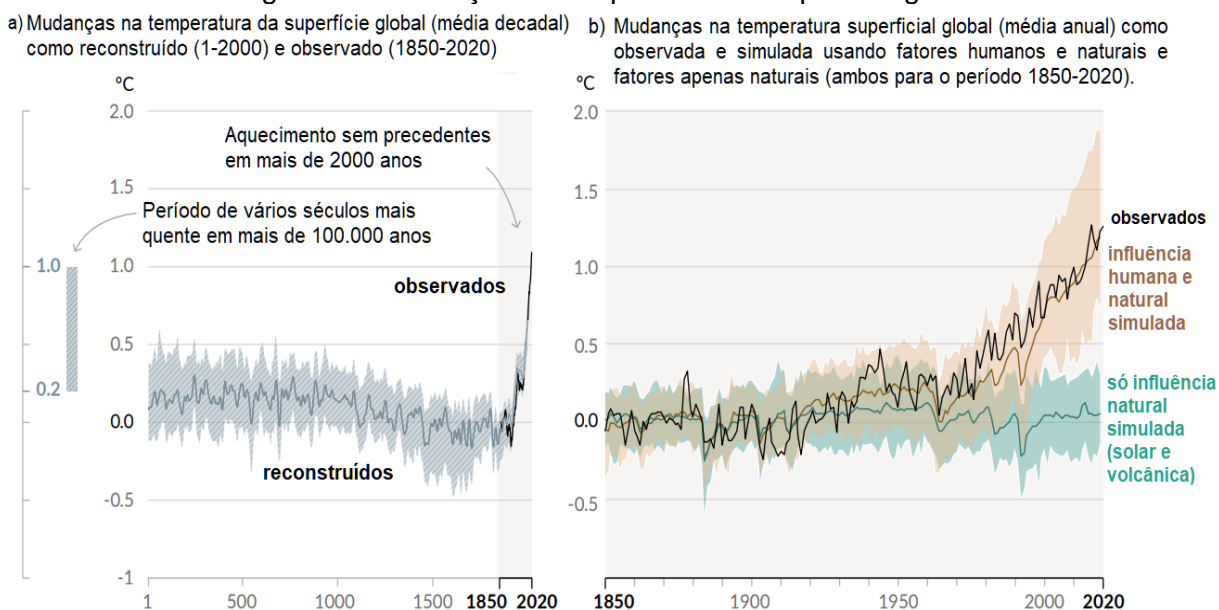
O último relatório do IPCC, o Sexto Relatório de Avaliação (AR6) será publicado em setembro de 2022. Este é um relatório síntese que integra uma série de contribuições de três Grupos de Trabalho do IPCC e de relatórios especiais. Cada grupo de trabalho é encarregado de diversos tópicos. O primeiro grupo de trabalho estuda as bases físicas das mudanças climáticas, o segundo grupo de trabalho estuda os impactos, a adaptabilidade e a vulnerabilidade das mudanças

climáticas e o terceiro grupo de trabalho estuda a mitigação das mudanças climáticas (IPCC, 2022d).

De acordo com 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 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 mudança na temperatura superficial global tem aumentado a uma taxa sem precedentes (Figura 1a).

Desde 1970, a temperatura da superfície global aumentou rapidamente, comparando para qualquer período de 50 anos nos últimos 2000 anos (IPCC, 2021). As mudanças na temperatura da superfície global nos últimos 170 anos em relação a 1850-1900 e a média anual, comparados com as simulações da resposta da temperatura a fatores humanos e naturais (linha marrom na Figura 1b) e apenas para fatores naturais pela influência da atividade solar e vulcânica (linha verde na 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.



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. Outros efeitos na hidrologia, evidenciam-se na qualidade da água, afetada pelo aquecimento de rios e lagos (RAJU; KUMAR, 2018).

3.1.1. 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 a escala anual, decadal e centenária (IPCC, 2012). Estes modelos pesquisam a influência da variabilidade natural, atividade humana ou a combinação das duas, nas mudanças climáticas observadas. Os resultados dos modelos facilitam a tomada de decisões relacionadas ao gerenciamento dos recursos hídricos, agricultura, transporte e planejamento urbano (GFDL, 2022).

Um modelo climático global (em inglês *Global Climate Model* ou também conhecido como *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 (em inglês *Regional Climate Model* RCM) é um modelo numérico que simula processos atmosféricos e da superfície terrestre, para escalas menores em comparação com os GCM (GARIANO; GUZZETTI, 2022a; IPCC, 2012, 2014).

Os GCM contêm vieses devido à resolução grosseira dos modelos climáticos globais e não fornecem informações em escala regional ou local. Por isso, é preciso reduzir o tamanho dos GCM para conseguir obter informações a escala local que permitam obter resultados confiáveis e ajustados às condições locais da área de estudo (POGGIO; GIMONA, 2015a; SHRESTHA *et al.*, 2020). Os modelos climáticos globais contêm diferentes tipos de incertezas, especialmente em escalas regionais provenientes de incertezas relacionadas aos cenários de forçamento, ao uso de diferentes GCM, às previsões de diferentes realizações de um mesmo cenário e GCM (FU *et al.*, 2009; TOUMA *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2019a).

3.1.2. Modelos climáticos globais do CMIP6

O Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (conhecido em inglês como *Coupled Model Intercomparison Project*, CMIP) é uma estrutura experimental padrão para estudar os modelos climáticos globais e compreender melhor as

mudanças climáticas passadas, presentes e futuras. Além disso, experimentos são realizados para avaliar a previsibilidade do sistema climático em várias escalas de tempo e espaço, assim como fazer previsões do estado do clima observado. A primeira fase do CMIP começou em 1995 (WCRP, 2020).

O último CMIP publicado em 2016, foi a Fase 6 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP6, das suas siglas em inglês *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*) do Programa Mundial de Pesquisa do Clima (conhecido em inglês como *World Climate Research Programme*).

Esta fase 6 em comparação com os modelos climáticos das fases anteriores, possuem uma melhor representação dos processos físicos, químicos e biológicos, assim como uma maior resolução. Nesta fase 6 houve uma melhora na simulação da maioria dos indicadores de mudanças climáticas e outros aspectos do sistema climático, em grande escala (IPCC, 2021). No CMIP6, para avaliar as mudanças climáticas foi definida uma nova estrutura de cenários que combina caminhos de força radiativa futura associadas a caminhos de desenvolvimento socioeconômico (O'NEILL *et al.*, 2014) (IPCC, 2021).

No Grupo de Trabalho III no relatório de mitigação das mudanças climáticas, como contribuição ao sexto relatório de avaliação do IPCC (2022a), relatam que os caminhos e cenários de emissões são projeções quantitativas que incluem a evolução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), a partir de um serie de suposições relacionadas às condições socioeconômicas e medidas de mitigação. Os cenários são divididos em cenários com abordagens econômicas que envolvem opções de baixo custo de redução de emissões e outros cenários com abordagens que contemplam as políticas e ações atuais, mas a maioria não contém suposições sobre a justiça ambiental, equidade global ou distribuição de renda intrarregional (IPCC, 2022b).

Estes cenários são conhecidos como Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (conhecidos em inglês como *Shared Socio-economic Pathways*, SSP), representam cenários de mudanças socioeconômicas globais projetadas até 2100 e descrevem evoluções alternativas futuras da sociedade, sob mudanças climáticas ou políticas climáticas (IPCC, 2022b).

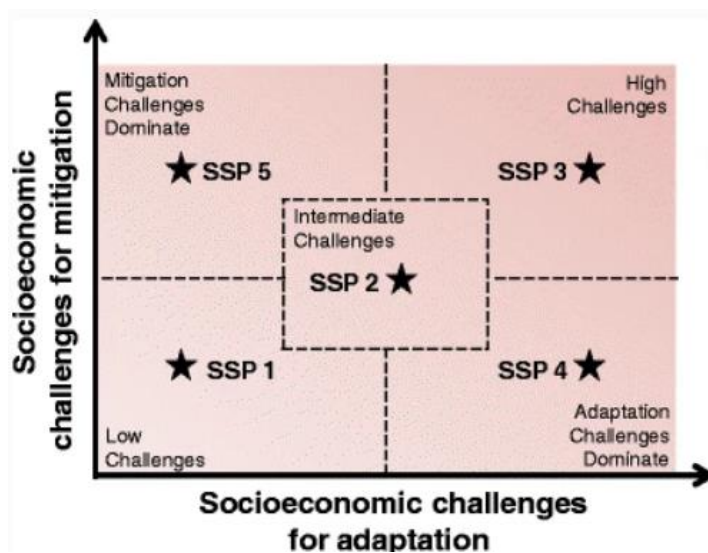
Na definição da estrutura de cenários para a avaliação das mudanças climáticas, os Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSP) foram estabelecidos a partir de uma série de narrativas que descrevem os

desenvolvimentos alternativos (Figura 2) e os desafios a serem atingidos para cada um dos cinco SSP definidos a seguir:

- SSP1: Chamado de *Sustentabilidade – Tomando o caminho verde*. Considera baixos desafios na mitigação e adaptação às mudanças climáticas. A abordagem para este cenário considera que o desenvolvimento sustentável percorre um ritmo alto, as desigualdades estão diminuídas e considera que a mudança tecnológica é rápida e direcionada para processos ecologicamente corretos, considera adoção de fontes de energias de baixo carbono.
- SSP2: Chamado de *Meio do Caminho*. Considera desafios moderados na mitigação e adaptação às mudanças climáticas. É um caso médio entre SSP1 e SSP3. Considera que as tendências econômicas, tecnológicas e sociais mantem-se. O desenvolvimento tecnológico e o crescimento econômico são desiguais, com alguns países evoluindo bem. Os sistemas ambientais sofrem degradação e a intensidade do uso de recursos e energia diminui.
- SSP3: Chamado de *Rivalidade Regional – Um Caminho Rochoso*. Desafios altos para mitigação e adaptação. Considera um crescimento econômico moderado, um rápido crescimento populacional e uma lenta mudança tecnológica para energias sustentáveis, desacelerando a mitigação, resultando em emissões altas não mitigadas.
- SSP4: Chamado de *Desigualdade – Um Caminho Dividido*. Desafios altos para adaptação e baixos para mitigação. Considera um desenvolvimento econômico rápido nas fontes de energia de baixo carbono, nas principais regiões emissoras do mundo, elevando a capacidade de mitigação nestas áreas e considera em outras regiões que o desenvolvimento avança lentamente, desigualdade alta, economias isoladas e regiões altamente vulneráveis às mudanças climáticas.
- SSP5: Chamado de *Desenvolvimento de Combustíveis fósseis – Tomando a Estrada*. Considera desafios baixos para adaptação e altos para mitigação. É caracterizado pela ausência de políticas climáticas, demanda de energia alta e a principal fonte é a partir de combustíveis à base de carbono. Considera poucas opções disponíveis para mitigação e prevê poucos investimentos em tecnologias alternativas. Desenvolvimento econômico rápido e considera uma distribuição

equitativa dos recursos, instituições mais fortes e lento crescimento populacional, influenciando a ter menor vulnerabilidade e capacidade adaptativas aos impactos climáticos (O'NEILL *et al.*, 2014; RIAHI *et al.*, 2017).

Figura 2 – Definição dos Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSP) e desafios a ser percorridos pelos SSP.



Fonte: O'Neill *et al.* (2014).

Os cenários de nível 1 do século XXI definidos pelo (IPCC, 2021):

- **SSP1-2.6:** Este cenário representa o limite inferior do conjunto de caminhos futuros e atualiza o cenário RCP2.6 do CMIP5. Considera uma média de aquecimento menor a 2°C até 2100. Este cenário combina baixos desafios de mitigação e de vulnerabilidade, sendo de baixas emissões de efeito estufa. Considera o aumento das áreas florestais a nível global.
- **SSP2-4.5:** Atualiza o cenário RCP4.5 do CMIP5. Representa o intermédio dos caminhos futuros. Combina a vulnerabilidade social com emissões de efeito estufa intermediárias. Simula um forçamento radiativo de 4.5 W/m².
- **SSP3-7.0:** Este cenário representa um nível de emissões médias a altas. Este cenário preenche uma lacuna nos cenários do CMIP5, com um nível de forçamento similar ao SSP2. Considera a diminuição das áreas florestais, a nível global. Este cenário também combina a vulnerabilidade social com um forçamento alto.
- **SSP5-8.5:** Atualiza o cenário RCP8.5 do CMIP5. Representa o limite superior do conjunto de caminhos futuros. É caracterizado por ser um caminho forçado com emissões altas, o suficiente para produzir um forçamento radiativo de 8.5 W/m² em 2100.

3.1.3. Redução de escala dos modelos climáticos

A redução de escala, ou downscaling, é definida como um processo de transferência de informação climática de um GCM, com resolução grosseira em uma escala global para uma resolução mais fina, a escala regional ou local, por exemplo, sendo exigida como entrada em modelos hidrológicos que abordam o clima em uma escala mais detalhada. Autores afirmam que a seleção dos modelos climáticos globais e o método de downscaling afetam as projeções obtidas (CIABATTA *et al.*, 2016; GARIANO; GUZZETTI, 2022b; SHRESTHA *et al.*, 2020). A redução de escala ou downscaling inclui processos complexos como a correção de viés e a desagregação espacial (POGGIO; GIMONA, 2015b).

Existem dois tipos de downscaling, dinâmico e estatístico. O downscaling dinâmico proporciona um modelo climático com alta resolução e muitas vezes é utilizado para obter modelos climáticos regionais (RCM). No entanto, uma desvantagem do downscaling dinâmico é a grande capacidade computacional requerida (POGGIO; GIMONA, 2015b).

O downscaling estatístico (em inglês, *statistical downscaling*), converte variáveis atmosféricas de grande escala, provenientes de um GCM em variáveis de escala local. Abrange geradores climáticos, esquemas de classificação climáticos e funções de transferências. As funções de transferência podem ser aplicadas usando redes neurais artificiais, regressões lineares e não lineares, fator de mudança e mínimos quadrados (RAJU; KUMAR, 2018).

Uma das técnicas mais utilizadas é o *quantile mapping* (QM) (SHRESTHA *et al.*, 2020). Esta técnica considera dados observados da região de interesse e ajusta a distribuição de saída do modelo mediante a criação de uma função de transferência para deslocar os quantis das variáveis climáticas (SHRESTHA; ACHARYA; SHRESTHA, 2017). Este método utiliza uma equação para corrigir os dados históricos (Equação 1) e outra para os dos dados futuros, a partir dos resultados do modelo climático global (Equação 2).

$$X_{hist}(d)^* = X_{hist}(d) * \left[\frac{\mu_m\{X_{obs}(d)\}}{\mu_m\{X_{hist}(d)\}} \right] \quad (1)$$

$$X_{sim}(d)^* = X_{sim}(d) * \left[\frac{\mu_m\{X_{obs}(d)\}}{\mu_m\{X_{hist}(d)\}} \right] \quad (2)$$

$[X_{hist}(d)^*]$: Variável climática histórica corrigida, de frequência diária.

$[X_{hist}(d)]$: Variável climática histórica, de frequência diária, proveniente do GCM.

$[\mu_m]$: Média mensal a longo prazo.

$[X_{obs}(d)]$: Variável climática observada, de frequência diária.

$[X_{sim}(d)]$: Variável climática futura, de frequência diária, proveniente do GCM.

$[X_{sim}(d)^*]$: Variável climática futura corrigida, de frequência diária.

3.1.4. Mudanças climáticas em estudos hidrológicos

Estudos realizados em diversos países nos últimos anos abordam as mudanças climáticas. Shrestha *et al.* (2020) simularam cenários de seca em várias regiões da Índia para o período 2015-2044, utilizaram dados de temperatura e precipitação de modelos climáticos globais do CMIP6 e encontraram que todas as regiões avaliadas podem sofrer de secas severas no futuro. Além disso, eles indicam que a produção agrícola pode ser afetada pela falta de umidade do solo e que processos hidrológicos como o escoamento e armazenamento de água podem ser interrompidos. Shrestha *et al.* (2020) ressaltam que é eficaz fazer uso de projeções climáticas, utilizando vários modelos climáticos globais sob diferentes cenários de emissão de gases efeito estufa (GEE).

Em um estudo realizado por Zhao *et al.* (2019b), pesquisaram as possíveis mudanças na probabilidade de ocorrência, duração e intensidade das secas na bacia do rio Weihe na China. Eles analisaram 40 modelos climáticos do projeto CMIP5, com o fim de escolher somente 3 GCM, o cenário seco com as maiores quedas na precipitação (CSIRO-Mk3-6.0), o cenário úmido com os valores mais altos de precipitação (MIROC5) e o cenário com uma mudança média na precipitação (FGOALS-g2) para vários períodos futuros de 2010-2054, 2030-2074 e 2055-2099, tendo como período histórico 1960-2004. O viés foi corrigido pela técnica mudança Delta (em inglês *Delta Change*).

Outro estudo realizado por Son *et al.*, (2022), analisa o efeito das mudanças climáticas e mudanças no uso da terra em uma bacia do noroeste do Vietnã, utilizando cinco modelos climáticos regionais, PRECIS, MRI-AGCM, CCAM, RegCM, CLWRF (RCP 4.5), para o período de análise compreendido entre 2016 e 2030. Nos cenários de mudanças climáticas identificam problemas na escassez hídrica significativos e recomendam a incorporação de programas para mitigar os efeitos das mudanças climáticas na gestão dos recursos hídricos. No entanto, eles recomendam recopilar mais modelos climáticos para conseguir concluir e analisar

períodos de tempos mais longos, sendo o período de análise deles de 15 anos. Nesse estudo as mudanças climáticas tiveram efeitos maiores aos das mudanças no uso da terra e cobertura do solo. Resultado semelhante foi obtido por Ross e Randhir (2022) .

Um estudo realizado por Ross e Randhir (2022) simula um conjunto de bacias costeiras da Baía de Narragansett, com o fim de analisar os efeitos das mudanças climáticas e mudanças no uso da terra na quantidade e qualidade da água . Eles encontraram mudanças significativas que influenciam na carga de sedimentos, nitratos, nitrogênio e fosforo orgânico. Na definição dos cenários das mudanças climáticas, eles baseiam-se nas tendências de temperatura e precipitação projetadas do IPCC, no cenário intermédio RCP 4.5, com forçamento radiativo de 4.5 W/m^2 , sendo um aumento da temperatura de $+3^\circ\text{C}$ e na precipitação de $+10\%$ em relação aos níveis da linha base.

Ahn, Jeong e Kim (2016) pesquisaram sobre os impactos na capacidade agrícola no abastecimento hídrico em uma bacia de Coreia do Sul e integraram a modelagem hidrológica no SWAT, simulando as mudanças climáticas com dados provenientes de um modelo climático HadGEM3-RA para os cenários de emissões RCP4.5 e RCP8.5 e encontraram que a taxa máxima de escassez hídrica para usos agrícolas foi de 38%.

Especificamente Martins *et al.* (2021) analisaram os impactos nos recursos hídricos, na disponibilidade e na qualidade nas bacias PCJ, a partir de projeções climáticas e encontraram cenários de escassez hídrica nesta região, que abrange a bacia do rio Piracicaba. Eles ressaltam a importância de realizar estudos para avaliar os impactos das mudanças climáticas nestas bacias, a médio e longo prazo, argumentando a preocupação pelo não cumprimento das metas definidas nos planos de planejamento dos recursos hídricos nas bacias PCJ.

3.2. Modelagem hidrológica

Um modelo hidrológico descreve o ciclo hidrológico e representa de forma simples sistemas reais complexos, incluindo algumas suposições nas leis de energia, e nas equações de continuidade e de momento que suportam os fenômenos hidrológicos. A modelagem hidrológica é usada para predição de vazões e de qualidade de água, em estudos de operação de reservatórios, prevenção de secas e cheias, gerenciamento das águas superficiais e subterrâneas, na avaliação da disponibilidade hídrica, transporte de poluentes, estudos de impactos de

mudanças climáticas e mudanças no uso da terra (DHAMI; PANDEY, 2013; SINGH; WOOLHISER, 2003; TAN *et al.*, 2020).

Um modelo apropriado é aquele que garante uma simulação ou previsão realista das variáveis analisadas, mas a acurácia das simulações das vazões depende da disponibilidade e qualidade nas medições dos dados de entrada ao modelo hidrológico (RAJU; KUMAR, 2018). Adicionalmente, é responsabilidade do modelador definir a estrutura e quantificação das incertezas do modelo mais adequadas, a partir da discretização no tempo e no espaço, além de incorporar o conhecimento dos componentes hidrológicos que participam no modelo hidrológico (ANDERSON, 2005; BRESSIANI *et al.*, 2015; RAJU; KUMAR, 2018).

Para avaliar os impactos das mudanças climáticas são utilizados modelos hidrológicos e têm o potencial para obter predições confiáveis na quantificação do escoamento superficial além do transporte de sedimentos ou outras variáveis relacionadas (SETEGN *et al.*, 2010).

Um dos modelos hidrológicos mais conhecidos é o modelo semidistribuído SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), que simula os processos hidrológicos, sedimentos, propriedades do solo, crescimento de culturas, nutrientes, pesticidas, manejo agrícola e transporte em canais (ARROIO JUNIOR, 2016; TAN *et al.*, 2020).

O modelo SWAT foi desenvolvido por Arnold *et al.* (1998) para o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) em conjunto com a Universidade Texas A&M (SRINIVASAN; ARNOLD, 1994). Este modelo está baseado em uma estrutura de comandos mediante a determinação de parâmetros hidrológicos, a difusão de escoamento, sedimentos e agroquímicos pela bacia hidrográfica (Arroio Junior, 2016). Durante a modelagem, a bacia é subdivida em sub-áreas com características de declividade, tipo e uso do solo, denominadas Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's) (Neitsh *et al.*, 2011) e é executado em uma escala de tempo diário ou subdiário, com a capacidade de simular continuamente para um longo período (GASSMAN *et al.*, 2007).

O SWAT realiza o balanço hídrico diário com base na equação (3).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{k=1}^t (P_{dia} - Q_{sup} - E_a - w_{perc} - Q_{sub}) \quad (3)$$

$[SW_t]$: Teor de água do solo no dia t.

$[SW_0]$: Teor de água inicial do solo no dia $i = 1$, mm.

$[t]$: tempo, dias.

$[P_{dia}]$: Precipitação no dia i , mm.

$[Q_{sup}]$: Escoamento superficial no dia i , mm.

$[E_a]$: Evapotranspiração no dia i , mm.

$[w_{perc}]$: Água que entra na zona vadosa no perfil do solo no dia i , mm.

$[Q_{sub}]$: Fluxo de retorno (fluxo subsuperficial) no dia i , mm.

Para garantir que os modelos hidrológicos forneçam previsões confiáveis e representem adequadamente os processos modelados, é preciso realizar a calibração e validação do modelo, com o objetivo de obter valores estatísticos bons, do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), o coeficiente de determinação (R^2), a porcentagem bias (Pbias), entre outros (BRESSIANI, 2016).

3.3. Mudanças no uso da terra

As mudanças no uso da terra são uma das principais causas da variabilidade do escoamento superficial em uma bacia. Nos últimos anos no Brasil, como em muitas regiões do planeta, as áreas de bosques tem diminuído devido ao desenvolvimento agropecuário, a construção de usinas hidroelétricas, a mineração e à expansão do setor urbano-industrial (GRACELLI *et al.*, 2020). Vetorrazzi (2006) afirma que as mudanças no uso da terra por culturas agrícolas, incluindo práticas de manejo inadequadas, podem modificar as relações entre escoamento superficial e infiltração da água, ocasionando erosão do solo e transporte de sedimentos acima do normal aos canais de drenagem. Assim, a variabilidade no escoamento superficial é influenciada pelo uso da terra e as mudanças climáticas (FARIAS *et al.*, 2020; GRACELLI *et al.*, 2020; LUCAS-BORJA *et al.*, 2020).

Bradshaw *et al.* (2007) demonstraram a correlação entre o desmatamento de bosques com o aumento da frequência e severidade de inundações, com estudos feitos no período de 1990 a 2000 usando dados de 56 países em desenvolvimento. Nos resultados, observaram a diminuição de 10% na área de mata nativa e a ocorrência de inundações aumentou entre 4% e 28% nos países analisados. Também Abe *et al.* (2018) sugerem que o aumento do desmatamento intensificará as inundações e eventos de baixas vazões. Segundo Gracelli *et al.* (2020), uma solução para mitigar os efeitos ocasionados pelas inundações é o reflorestamento, sendo uma solução adequada e de baixo custo, que reduz o escoamento superficial e controla a erosão.

Um dos estudos que abordam as mudanças no uso da terra é a pesquisa realizada por Gracelli *et al.* (2020), que avaliaram o comportamento da vazão do rio Velhas no sudeste do Brasil, sob diferentes cenários de reflorestamento e desmatamento, utilizando análise multicritério e o modelo SWAT. Criaram dois cenários de reflorestamento e um de desmatamento. Para os cenários de reflorestamento, o primeiro, substituiu a cobertura atual da terra por vegetação, sendo um 9.2% de reflorestamento da área da bacia, e o segundo um 34.3% da área. No cenário de reflorestamento substituiu a vegetação arbórea por vegetação rasteira. Nos cenários de desmatamento houve um incremento na vazão da bacia.

Son *et al.* (2022) argumentam que o uso do modelo SWAT foi adequado para obter predições nas mudanças no uso da terra e de mudanças climáticas. Os autores analisaram a variabilidade climática e as mudanças climáticas, as mudanças no uso da terra e mudanças na cobertura do solo, no período de 1992 a 2015, utilizando teledetecção e o modelo SWAT para simular as respostas hidrológicas na bacia Nam Rom no Vietnã. Os efeitos das mudanças no uso da terra e da cobertura sobre os componentes do balanço hídrico resultaram no aumento de 1.8 %, 5.8 %, 5.8 % y 2.3 % da evapotranspiração, a percolação, as águas subterrâneas e a produção de água, respectivamente e com uma diminuição na vazão de 4.3% devido ao aumento da área florestada. Além disso, eles fizeram uma simulação hidrológica para o cenário 2030. Concluíram que a evapotranspiração e a vazão são as respostas hidrológicas mais sensíveis no futuro. Os cenários de mudanças no uso da terra e de mudanças climáticas em conjunto, teriam levado a uma diminuição significativa nas águas subterrâneas (-5.7%), a vazão (-16.9%) e rendimento da água (-9.2%).

Lucas-Borja *et al.* (2020) avaliaram os impactos do uso da terra e das mudanças climáticas no escoamento superficial na microbacia do Parque Estadual da Serra do Mar, localizada no Estado de São Paulo, usando o modelo SWAT. Eles simularam diversos cenários de mudanças climáticas e de mudanças no uso do solo em conjunto, modificaram os valores da curva número para a cobertura florestal. Eles encontraram que nos cenários com uso do solo de mata nativa substituída por culturas ou pastagens, a resposta hidrológica da microbacia não seria afetada significativamente. Quando ocorre um desmatamento completo pode aumentar ligeiramente a capacidade de gerar escoamento. Para os outros cenários climáticos, a capacidade de geração de escoamento pode diminuir.

Abe *et al.* (2018) fizeram predições sobre os efeitos das mudanças no uso da terra na bacia alta do rio Crepori, localizada na Amazônia brasileira. Estes autores encontraram que nos cenários futuros o escoamento superficial e, em menor medida, a vazão aumentariam, enquanto reduziriam as águas subterrâneas e a evapotranspiração. De acordo com os *resultados*, eles sugeriram que o incremento do desmatamento intensificará os eventos de inundações e de baixas vazões.

Em outro estudo, Dos Santos *et al.* (2018) encontraram que a mudança no uso da terra, substituindo floresta por pastagem, pode alterar consideravelmente os componentes do balanço hídrico da bacia do rio Xingu, localizada na região amazônica. Quanto maiores as áreas com mudanças, maiores foram os efeitos. Quando houve uma mudança de 57% da área de floresta para pastagem, houve um aumento na vazão de 6.5%.

Guimberteau *et al.* (2017) analisaram cenários de desmatamento e mudanças climáticas na bacia Amazônica, nas áreas ocupadas da Bolívia e do Brasil. Os cenários de mudanças climáticas foram construídos com base em três modelos climáticos globais do 4º Relatório de Avaliação (AR4) do IPCC. Na definição dos cenários das mudanças no uso da terra, eles seguiram a abordagem de “história e simulação” (conhecida em inglês como *story and simulation* (SAS)). Esta abordagem amplamente utilizada em estudos ambientais (ALCAMO, 2008). Determinaram quatro eixos principais no futuro da Amazônia brasileira, recursos naturais, desenvolvimento social, atividades econômicas e contexto institucional. Os cenários foram modelados usando o modelo LuccME que permite a simulação de cenários de mudanças no uso da terra, combinando três componentes, de demanda, potencial e alocação. Segundo eles ao final deste século, a área florestada terá diminuído em 7% no cenário mais otimista e 34% no cenário mais pessimista.

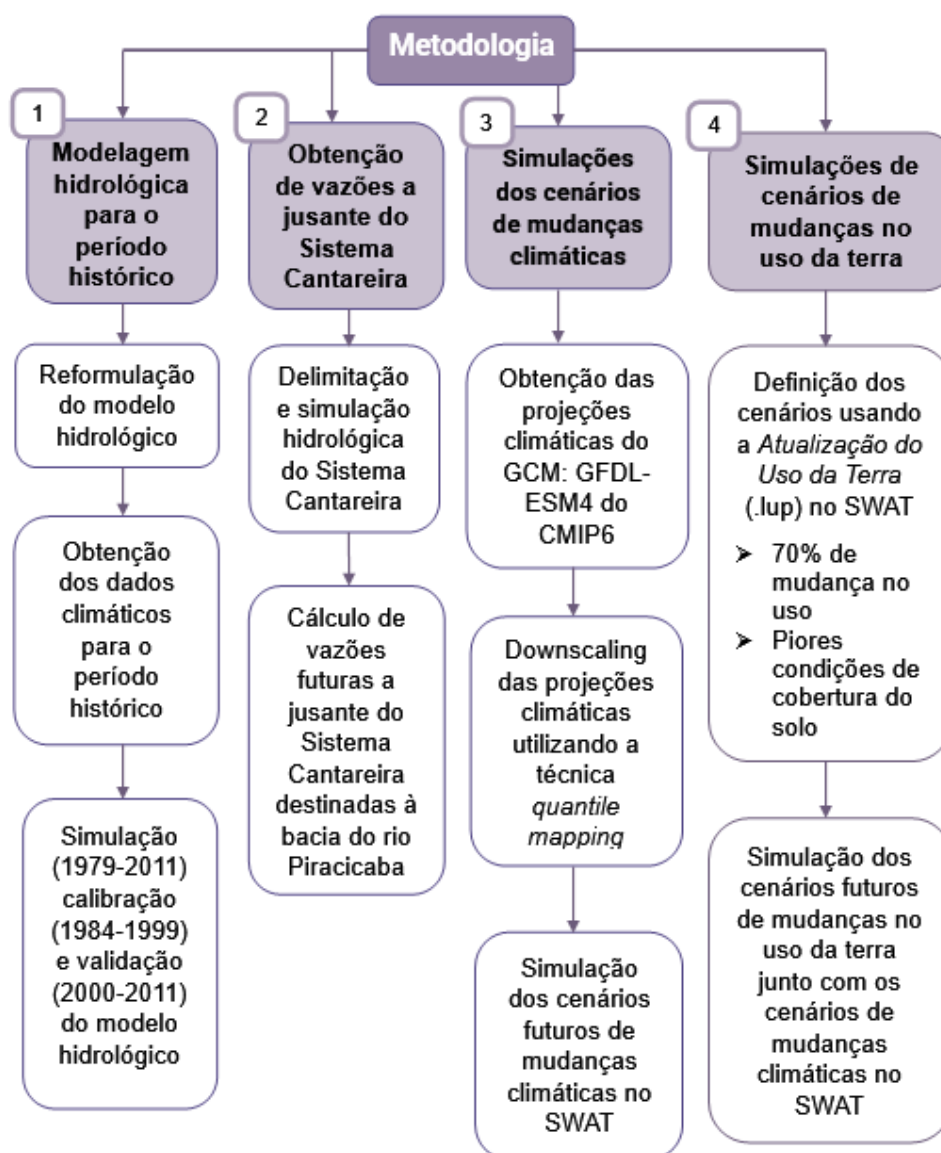
Por outro lado, Ross e Randhir, (2022) avaliaram os efeitos das mudanças climáticas e do uso da terra, nos aspectos de qualidade e quantidade, nas bacias costeiras de Narragansett em Estados Unidos. Eles fizeram a modelagem hidrológica e a simulação de bacias dos cenários no SWAT. Para a construção dos cenários de mudanças climáticas foram adicionadas as tendências de temperatura (+3°C) e de precipitação (+10%), baseadas no 5º Relatório de Avaliação do IPCC. Para simular as mudanças no uso da terra foram substituídos os valores com dados raster projetado para 2080 do Modelo Nacional de Transformação da Terra do Laboratório de Modelagem e Análise do Ambiente Humano.

Os resultados evidenciaram um aumento no escoamento superficial, na vazão e na carga de nutrientes. Quando os cenários de mudanças climáticas e de mudanças no uso da terra foram combinados, os cenários de mudanças climáticas foram mais significativos em relação aos cenários de mudanças no uso da terra. No entanto, nos cenários de mudanças no uso da terra apresentaram uma maior variabilidade regional. Quando os cenários de mudanças climáticas e de mudanças no uso da terra foram combinados, Ross e Randhir, (2022) consideram que provavelmente terão um impacto negativo no sistema costeiro, e adicionalmente os resultados evidenciam o potencial do uso solo oferece para mitigar a severidade dos impactos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia desenvolvida está sintetizada na Figura 3. Visando a simulação hidrológica da bacia do Rio Piracicaba no... SWAT, foram analisadas as informações climáticas históricas para a bacia e as vazões de entrada nela desde os reservatórios do sistema Cantareira, e foi construído o modelo com base no desenvolvido por Bressiani (2016). Após realizar as alterações no modelo base, foi realizada uma recalibração, validação, análise de sensibilidade e de incertezas ao modelo hidrológico modificado. A partir de modelos climáticos globais, e aplicando as correções necessárias, foram construídas e integradas as bases de dados climáticos necessárias para a simulação de cenários futuros. Finalmente, foram realizadas as simulações dos cenários futuros integrando mudanças no uso da terra.

Figura 3 – Etapas da metodologia.



Fonte: Autora.

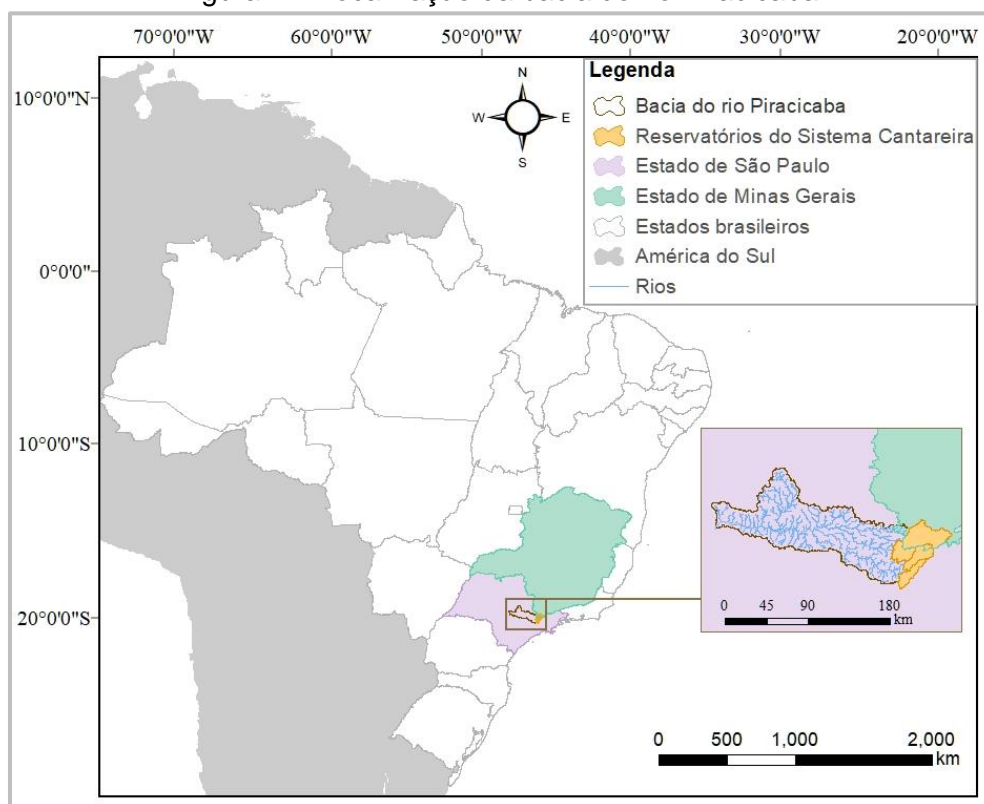
4.1. Área de estudo

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Piracicaba. A seguir é realizada uma descrição detalhada desta bacia e do Sistema Cantareira, que está parcialmente localizado nesta bacia, pela relevância que tem no abastecimento urbano da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e na disponibilidade hídrica da bacia do rio Piracicaba.

4.1.1. Bacia do rio Piracicaba

Esta bacia possui uma área de 12655 Km² (CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA, 2020), está localizada na Região Sudeste do Brasil, especificamente no centro-oeste do Estado de São Paulo (90.82% da sua área) e no sudoeste do Estado de Minas Gerais (9.17% restante) (COMITÊS PCJ, 2021a). Situa-se entre as coordenadas 45°50'0" e 48°25'00" Oeste e 22°00'00" e 23°15'00" Sul (Figura 4).

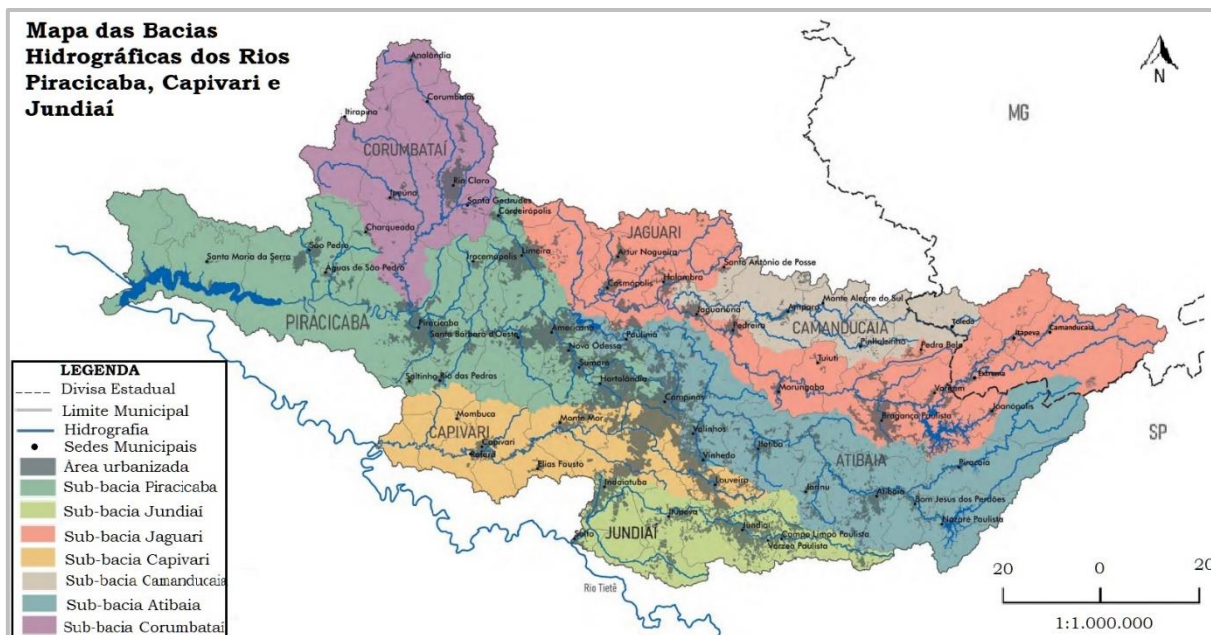
Figura 4 – Localização da bacia do rio Piracicaba.



Fonte: Autora.

A bacia do rio Piracicaba, como todas as bacias PCJ (bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá), é afluente do Rio Tietê e faz parte da bacia hidrográfica do Paraná. A bacia do rio Piracicaba se divide nas sub-bacias de Atibaia, Camanducaia, Corumbataí, Jaguari e Piracicaba (Figura 3) (CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA, 2020).

Figura 5 – Mapa das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí.



Fonte: Adaptado de (COMITÊS PCJ, 2021b).

A região das bacias PCJ destaca-se economicamente porque representa aproximadamente 5% do Produto Interno Bruto do Brasil e é responsável pelo abastecimento de água para mais de 5,8 milhões de habitantes que residem em 76 municípios desta região, e para aproximadamente 9 milhões de habitantes da Região Metropolitana de São Paulo a través do Sistema Cantareira (CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA, 2020).

Quanto ao uso e ocupação do solo nas bacias PCJ há campo (25.30% da área total), mata nativa (20.35%), plantações de cana-de-açúcar (19.01%), área urbana (12.11%), silvicultura (6.43%) e em porcentagens menores estão os usos destinados a lavouras temporárias e permanentes, corpos d'água, afloramento rochoso, pivôs e mineração (AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ, 2019; CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA, 2020).

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas da bacia, especialmente nas regiões de Limeira e de Piracicaba, localizada em altitudes inferiores a 800 m, em locais de menor elevação e baixas declividades. Além da cultura, fortaleceu-se como complexo agroindustrial de açúcar e álcool (SIMA, 2011). As principais demandas de água da bacia são nos setores de abastecimento urbano, indústria, irrigação e dessedentação animal. De acordo com o Relatório Final do Plano das Bacias PCJ 2020 a 2035, as demandas superficiais nas Bacias PCJ totalizam aproximadamente 35,68 m³/s para o ano 2016 (CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA, 2020).

De acordo com a avaliação realizada por CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA (2020) sobre a disponibilidade hídrica superficial da bacia PCJ, as cabeceiras da sub-bacia do Rio Atibaia são as que produzem mais água na bacia porque é uma área caracterizada pelos altos valores de precipitação, entre 1800 a 1900 milímetros por ano.

A disponibilidade hídrica subterrânea depende do balanço entre entradas e saídas, destinada para os usos de abastecimento público e industrial, tendo uma demanda hídrica de 2.46m³/s nas bacias PCJ, sendo o maior volume captada da sub-bacia do rio Piracicaba de 0,62 m³/s. Os principais aquíferos localizados na bacia são os aquíferos Cristalino, Guarani, Tubarão e da Serra (CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA, 2020).

Um dos problemas da bacia é a diminuição da quantidade de água por habitante como consequência do crescimento populacional. Também, a disponibilidade hídrica da bacia não está em sua totalidade a disposição para uso na própria região, devido a regularização de uma parcela considerável que é revertida, através do Sistema Cantareira, à Bacia do Alto Tietê (AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ, 2018). O Sistema Cantareira que está parcialmente localizado nas bacias PCJ e é explicado detalhadamente no seguinte numeral. É de salientar que a relação entre demanda e disponibilidade hídrica na bacia do rio Piracicaba é considerada muito crítica (QUEIROZ, 2014).

Segundo o mapa de classificação climática de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013), a bacia está localizada na região do clima subtropical úmido. A precipitação média anual é de 1432 mm, sendo o período chuvoso entre os meses de outubro a março (QUEIROZ, 2014). O regime de chuvas no período de verão tem influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), as frentes frias e o Jato de Baixo Níveis (JBN) que transporta umidade da Amazônia para o Sul e o Sudeste do Brasil e, produzem condições termodinâmicas de baixa estabilidade atmosférica (MARENGO; ALVES, 2016).

A formação da precipitação na bacia é favorecida pelo desnível topográfico acentuado que possui a bacia, atingindo a 1400m ao longo de uma extensão de 250 km (Caram, 2010). Esta variação topográfica possibilita o aumento da turbulência do ar pela ascendência orográfica durante a circulação das correntes perturbadas. A variação topográfica também favorece a ocorrência de diferenças locais de temperatura (NIMER, 1989).

Esta bacia é propensa à ocorrência de eventos extremos, como secas e enchentes (BRESSIANI, 2016). Entre os eventos mais relevantes foram as enchentes acontecidas no ano 2011 e a seca severa nos anos 2014 e 2015 (DOBROVOLSKI; RATTIS, 2015; SALEMI *et al.*, 2021), quando os reservatórios atingiram os níveis mais baixos (MARENGO; ALVES, 2016). Mudanças das variáveis meteorológicas derivadas de mudanças climáticas globais, e das mudanças no uso da terra e ocupação do solo, poderiam influenciar na ocorrência de eventos extremos. Essa última hipótese é testada na presente dissertação.

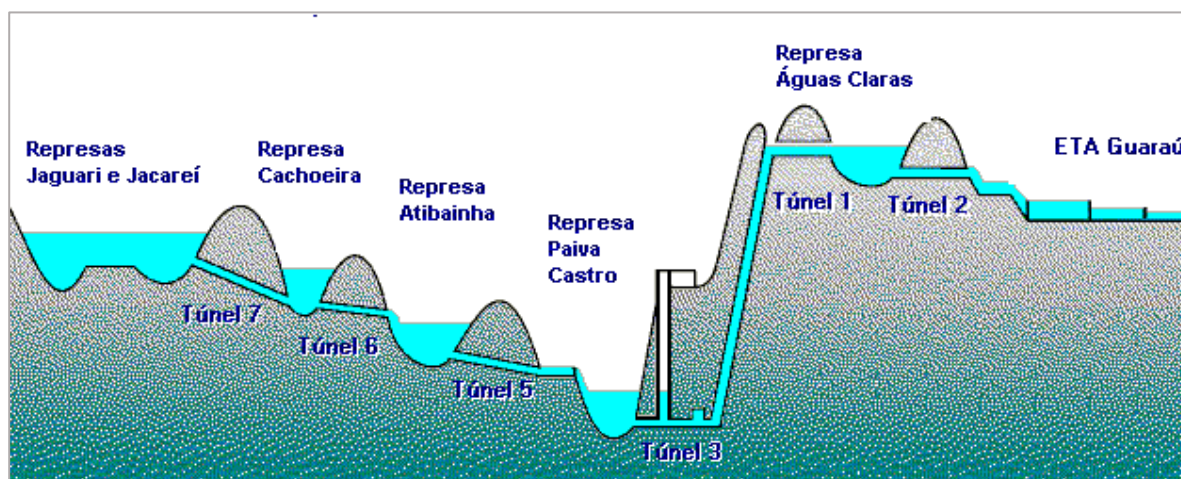
4.1.2. Sistema Cantareira

O Sistema Produtor Cantareira é o principal consumidor de água das bacias PCJ e o maior sistema de abastecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), abastece aproximadamente nove milhões de pessoas nesta região (AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ, 2019). Este sistema é operado pela Sabesp (*Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo*). Sua construção foi na década de 1970, concebido para suprir parte da Região Metropolitana de São Paulo e gerar oferta hídrica frente às mudanças ambientais e uso da terra, estresse hídrico e poluição.

Desde sua construção, o sistema foi bem-sucedido, no entanto, nos anos 2014 e 2015 houve uma seca intensa provocando algumas dificuldades no gerenciamento do Sistema Cantareira. Isto, evidenciou a vulnerabilidade do Sistema Cantareira às mudanças climáticas e à degradação ambiental (WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2018).

O Sistema Cantareira possui a estação elevatória Santa Inês, a estação de tratamento de água do Guaraú e seis reservatórios. Quatro reservatórios estão localizados na bacia do Rio Piracicaba: Jaguari, Jacareí, Cachoeira e Atibainha, enquanto os outros dois, Paiva Castro e Águas Claras, estão localizadas na bacia de Alto Tietê (SABESP, 2020, 2021). As seis barragens do Sistema Cantareira estão interligadas por tuneis subterrâneos e canais, com comprimento total de 28 km aproximadamente (SABESP, 2021), encarregados de captar e desviar água como é apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Esquema do funcionamento do Sistema Cantareira.



Fonte: Comitês das bacias PCJ (2021).

Algumas das características dos reservatórios que compõem o Sistema Cantareira são descritas a seguir. Os reservatórios Jaguari e Jacareí estão localizados na sub-bacia Jaguari, no município de Vargem e têm uma área de contribuição de 203 km². Estes estão conectados por um canal que permite a formação de um único reservatório. O reservatório Cachoeira está localizado na sub-bacia Atibaia, no município de Piracaia e está ligado a jusante ao reservatório Atibainha. A sua área de contribuição é de 392 km². Por último, o reservatório Atibainha está localizado na sub-bacia Atibaia, no município de Nazaré Paulista e tem uma área de contribuição de 312 km² (CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA, 2020).

Para os reservatórios localizados na bacia do Alto Tietê, o reservatório de Paiva Castro é o último do sistema de derivações por gravidade, formado por um barramento no rio Juquerí no município de Franco de Rocha e a recepção de água dos demais reservatórios a montante. Possui uma área de drenagem de 314 km² (GIATTI, 2000).

A outorga do Sistema Cantareira foi dada para a Sabesp e está estabelecida pela Resolução Conjunta ANA/DAEE n° 926 de 29/5/2017 (ANA/DAEE, 2017a). As condições de operação dos reservatórios estão definidas na Resolução n° 925 de 29/5/2017 (ANA/DAEE, 2017b; CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA, 2020).

Foram definidas as novas regras de outorga válidas por dez anos, desde 2017 até 2027, estipulando diferentes faixas de vazão retirada do Sistema de acordo com o volume útil acumulado (ANA/DAEE, 2017a; SABESP, 2018). As regras de operação foram utilizadas nesta pesquisa para simular as vazões de saída dos

reservatórios e inseri-las como vazões de entrada à bacia do rio Piracicaba no modelo hidrológico.

4.2. Modelagem hidrológica da bacia do rio Piracicaba para o período histórico

Para analisar os efeitos das mudanças climáticas e os efeitos das mudanças no uso da terra no futuro a médio e longo prazo, na bacia do rio Piracicaba é construído um modelo hidrológico semidistribuído, utilizando SWAT. O modelo é calibrado e validado para um período passado (1979 a 2011) e posteriormente utilizado simular os cenários futuros a médio prazo de 2021 a 2050 e a longo prazo de 2051 a 2080. O modelo SWAT tem como entradas os dados das variáveis climáticas, além de todos os parâmetros que descrevem o terreno da bacia, isto é, que estão relacionados com sua topografia, tipos de solos, uso da terra e ocupação do solo, etc.

Para o anterior foi utilizado como base o modelo no SWAT elaborado para a mesma bacia do rio Piracicaba por Bressiani (2016), gentilmente disponibilizado pela autora para esta pesquisa.

4.2.1. Modelo hidrológico base para a bacia

O modelo hidrológico do Rio Piracicaba tem como base o desenvolvido por Bressiani (2016), na interface ArcSWAT. A seguir apresentam-se as características desse modelo base e os passos principais na construção do modelo atualizado para este estudo.

O modelo hidrológico base da bacia do rio Piracicaba foi realizado por Bressiani (2016), e gentilmente disponibilizado pela autora para uso nesta pesquisa. O modelo, construído na interface ArcSWAT em ArcGIS 10.0., precisou de dados da topografia, solos, usos da terra e dados climáticos, assim como dados de estações fluviométricas disponíveis para a calibração e a validação do modelo e são detalhados na Tabela 1. Para os dados topográficos foi utilizado (pela autora original) o Modelo Digital de Elevação ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), com resolução de 30 metros e que foi produzido pela NASA (*United States National Aeronautics and Space Administration*) em conjunto com o METI (*Ministry of Economy, Trade, and Industry of Japan*) (NASA, 2011).

Para obter o mapa dos usos da terra, Bressiani (2016) obteve imagens do satélite do Landsat 5 TM 2010, em escala 1:50.000 (MOLIN *et al.*, 2015). O mapa dos solos do Estado de São Paulo foi obtido de Oliveira (1999) em escala 1:500,000. Os dados das estações fluviométricas e meteorológicas foram obtidos dos sites da ANA (2012) e (DAEE, 2012).

Tabela 1 – Dados de entrada do modelo hidrológico base no SWAT da bacia do rio Piracicaba, elaborado por Bressiani (2016).

Dado de entrada	Detalhes dos dados	Fonte
Modelo Digital de Elevação (DEM)	Resolução de 30 m	ASTER Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (NASA, 2011)
Usos da terra	Escala 1:50,000 Resolução de 30 m-pixel	Imagens do Landsat 5 TM 2010 (MOLIN <i>et al.</i> , 2015)
Mapa dos solos	Escala 1:500,000	(OLIVEIRA, 1999)
Características dos solos	Textura, profundidades e matéria orgânica	(OLIVEIRA, 1999)
	Grupo hidrológico	(SARTORI; NETO; GENOVEZ, 2005)
	Outros parâmetros dos solos estimados por equações de Pedo-transferência	(SAXTON; RAWLS, 2006)
Dados climáticos (temperatura máxima e mínima, umidade relativa, velocidade do vento e insolação total (convertida a radiação solar))	Média diária Período de 1975-2011	(ANA, 2012) (DAEE, 2012) (ESALQ/USP, 2020)
Dados de precipitação	Dados diários em milímetros, interpolados de 189 estações com dados para diferentes períodos.	(ANA, 2012) (DAEE, 2012)
Dados fluviométricos	Média diária para o período 1975-2011. Unidades em m ³ /s	(ANA, 2012) (DAEE, 2012)
Parâmetros e manejo agrícola e florestal	Cana-de-açúcar Mata Atlântica, Eucalipto e plantações de cítricos	Agricultores da área Especialistas da indústria e equipe SWAT

Fonte: Adaptado de Bressiani (2016).

Na delimitação da bacia do rio Piracicaba realizada em ArcSWAT por Bressiani (2016), com uma área de 10454 km², com 7420 HRUs (Unidades de Resposta Hidrológica), com 523 sub-bacias e cada sub-bacia tem uma área média de 20 Km². Os reservatórios do Sistema Cantareira e as áreas à montante destes não foram considerados dentro da modelagem da bacia do rio Piracicaba, mas as vazões a jusante dos reservatórios destinadas a esta bacia foram inseridas como entradas de descargas ao modelo SWAT. Estas vazões foram obtidas de estações fluviométricas e para os dados faltantes com menos de 10 dias consecutivos foram usadas regressões polinomiais, em caso contrário, uma média mensal do período foi usada Bressiani (2016).

As características dos solos, tais como, profundidades, textura e matéria orgânica, estavam baseadas nos perfis do solo de São Paulo (OLIVEIRA, 1999) e os grupos hidrológicos foram adotados seguindo a classificação dos solos de Sartori, Neto e Genovez (2005). Os outros parâmetros do solo necessários para ingressar no SWAT foram obtidos de funções de Pedo-transferência (SAXTON; RAWLS, 2006).

O modelo SWAT precisava de dados climáticos de frequência diária de precipitação, temperatura máxima e mínima, velocidade do vento, umidade relativa e insolação total, obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da estação meteorológica da Universidade de São Paulo em Piracicaba (ESALQ/USP, 2020). Os valores de radiação solar foram estimados partir dos dados de insolação solar (BRESSIANI, 2016).

Os usos e ocupações dos solos na bacia definidos no SWAT foram cana-de-açúcar, pastagem, eucalipto, floresta, plantações de cítricos e água. As áreas e porcentagens aportadas a cada uso e ocupação do solo da bacia estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Usos e ocupações dos solos na bacia do rio Piracicaba, definidos no SWAT.

Nomenclatura SWAT	Uso e ocupação do solo	Area (km²)	Porcentagem de ocupação de área
SUGC	Cana-de-açúcar	3143.26	30.2%
FRSE	Mata nativa	1793.60	17.2%
PINE	Silvicultura	301.95	2.9%
WATR	Água	133.77	1.3%
PAST	Pastagem	3631.98	34.8%
URBN	Area urbana	899.97	8.6%
ORAN	Laranja	520.79	5.0%

Fonte: Autora.

Para plantações de cítricos, eucalipto e floresta, os parâmetros das culturas (IAF, biomassa, número total de unidades de calor) foram ajustados às condições climáticas tropicais do Brasil. Para a cana-de-açúcar, Bressiani (2016) definiu uma rotação de 5 anos, com adubação nitrogenada e fosforosa, baseada em conversas com agricultores da área.

Bressiani (2016) simulou o modelo para o período de 1975 a 2011, sendo os primeiros 5 anos destinados ao 'aquecimento' do modelo ou *warm-up*.

Também Bressiani (2016) realizou análise de sensibilidade, calibração, validação, validação cruzada e análise de incertezas para o modelo hidrológico, brevemente comentados a seguir. Considerando um conjunto de parâmetros especificado, fez uma análise de sensibilidade, com o objetivo de reduzir o número de faixas e de parâmetros para facilitar a calibração, mediante o software SWAT-CUP, usando o algoritmo SUFI-2. Esta análise foi baseada na aplicação de um sistema de regressão múltipla desde a abordagem de hipercubo latino dos parâmetros contra os valores da função objetivo. Os valores de maior magnitude de t-stat representaram uma maior sensibilidade. Os p-valores mais perto do zero determinaram o nível de significância da sensibilidade dos parâmetros.

Bressiani (2016) realizou a calibração dividindo a bacia em três regiões. Em primeiro lugar, ela realizou uma calibração mensal para ajustar os volumes e melhorar as diferenças entre os hidrogramas observados e simulados e depois realizou uma calibração diária.

Bressiani (2016) avaliou diferentes métodos de calibração automática utilizando dois métodos diferentes (SUFI-2 e PSO) inseridos no software SWAT-CUP

para dois casos: um com dados de uma estação fluviométrica para a bacia inteira e o outro caso com dados fluviométricos de 3 estações fluviométricas dividindo a bacia em três regiões. Os melhores resultados foram obtidos utilizando o método SUFI-2, dividindo a bacia em três regiões.

As estatísticas de desempenho do modelo hidrológico de Bressiani (2016), de acordo com a classificação de Moriasi *et al.* (2007) após a calibração e validação diária das vazões são apresentadas na Tabela 3 – Métricas de desempenho do modelo na calibração diária para a bacia inteira. Tabela 3. De acordo com a classificação das métricas para a calibração e validação, para estação localizada a jusante da bacia, próxima ao exutório (Estação 16), o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) é classificado como o desempenho como muito bom, enquanto às outras duas estações (12 e 4) localizadas a montante da bacia são classificadas com desempenho bom.

Tabela 3 – Métricas de desempenho do modelo na calibração diária para a bacia inteira.

Estação fluviométrica	Area de drenagem (km²)	NSE	bR²	Pbias
4	2308	0.75	0.81	-7.98
12	1581	0.61	0.68	-13.6
16	11040	0.83	0.91	2.46

Fonte: Adaptado e traduzido de Bressiani (2016).

As métricas de desempenho da validação diária são apresentadas na Tabela 4. Após, Bressiani (2016) realizou a validação cruzada para 13 estações fluviométricas e foi avaliada para o período de 1975-2011, no entanto, algumas estações só apresentaram dados disponíveis para o período 2000-2011. Todos os coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) estiveram acima de 0.65, os coeficientes de determinação multiplicado pelos coeficientes de regressão linear (bR²) e os coeficientes de determinação (R²), estiveram acima de 0.69.

Tabela 4 – Métricas de desempenho do modelo na validação diária para a bacia inteira.

Estação	Area de drenagem (Km²)	NSE	RMSE	bR²	R²	Pbias	NMSE	RSR
4	2308	0.8	11.06	0.82	0.92	-7.98	0.09	0.20
12	1581	0.7	0.70	0.81	0.85	-13.61	0.16	0.30
16	11040	0.67	0.67	0.73	0.94	2.46	0.12	0.33

Fonte: Adaptado e traduzido de Bressiani (2016).

Para a análise de incertezas do modelo hidrológico, foram avaliadas mediante diagrama de caixa das faixas dos parâmetros calibrados e validados e com a avaliação das curvas de duração de vazões com a banda de predição de incertezas 95%. Bressiani (2016) encontrou que os parâmetros SURLAG (tempo de retardo do escoamento superficial) e ESCO (fator de compensação da evaporação do solo) tiveram menor incerteza devido à pequena dispersão ao redor da mediana e o pequena faixa de variabilidade que tiveram.

Para simular os cenários futuros de mudanças climáticas são utilizados dados climáticos originados de modelos globais que precisam de correções (como será descrito no item 5.2.1), e por tanto informações climáticas históricas são necessárias. Assim, foi necessário ingressar um conjunto compatível de dados climáticos para o período histórico e das vazões a jusante dos reservatórios destinadas à bacia do rio Piracicaba, que foram inseridas como entradas de descargas ao modelo SWAT.

4.2.2. Entrada de dados climáticos para o período histórico 1979-2011

Os dados meteorológicos da série histórica para o período compreendido entre 1979 a 2011, foram obtidos de duas fontes, do posto meteorológico da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ) e dos dados de Reanálise do Sistema de Previsão Climática, conhecido em inglês como *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR), do Centro Nacional para Previsão Ambiental (NCEP) e disponibilizados na página web do modelo SWAT (TAMU, 2021), na seção dos Dados Climáticos Globais para SWAT, em inglês *Global Weather Data for SWAT* (SWAT, 2021). As variáveis climáticas obtidas foram precipitação, temperatura mínima e máxima, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento, de frequência diária, que foram ingressadas no modelo da bacia do rio Piracicaba no SWAT.

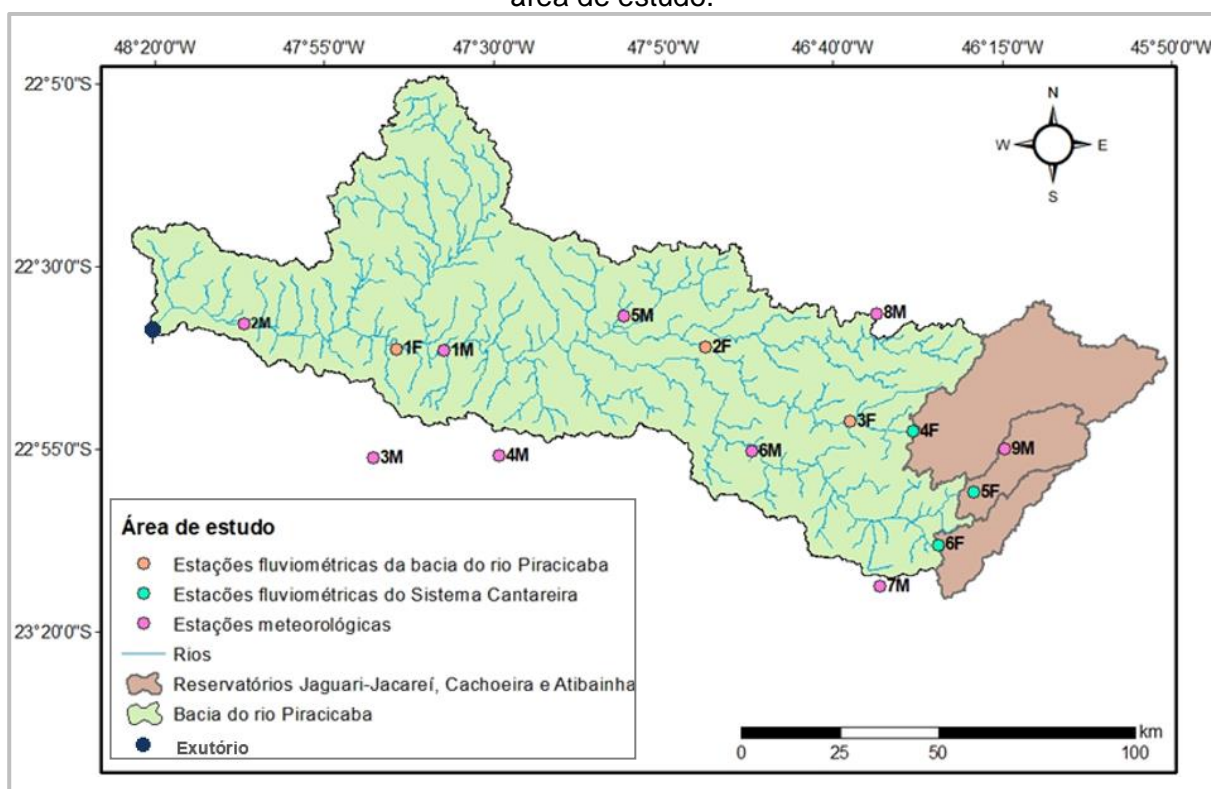
As coordenadas de delimitação para obter os dados de reanálise do CFSR estavam compreendidas entre as latitudes -22.1044 e -23.9244 e as longitudes -45.6418 e -48.7948 . Na Tabela 5 são apresentadas as coordenadas das estações selecionadas e na Figura 7 apresenta-se a localização destas na bacia do rio Piracicaba.

Tabela 5 – Coordenadas das estações meteorológicas selecionadas.

Estação	Latitude	Longitude
Piracicaba	-22.708	-47.633
226-481	-22.637	-48.125
229-478	-22.949	-47.813
229-475	-22.949	-47.5
226-472	-22.637	-47.188
229-469	-22.949	-46.875
233-466	-23.261	-46.563
226-466	-22.637	-46.563
229-463	-22.949	-46.25

Fonte: ESALQ/USP (2020) e TAMU (2021).

Figura 7 – Localização das estações meteorológicas e fluviométricas selecionadas para a área de estudo.



Fonte: Autora.

Os dados de Reanálise do Sistema de Previsão Climática (CFSR) do Centro Nacional para Previsão Ambiental, disponíveis na base de dados do clima global (SWAT, 2021), consistem em um conjunto de dados interpolados em uma grade de 38 km de resolução, baseado em informações obtidas da rede global de estações meteorológicas e produtos provenientes de satélites, para a geração de previsões horárias (RADCLIFFE; MUKUNDAN, 2017). É considerado um sistema de reanálise global baseado em um modelo acoplado da atmosfera, do oceano, da superfície

terrestre e do gelo marino, concebido para gerar a melhor estimativa do clima (SAHA *et al.*, 2014). Estes dados são considerados uma fonte confiável e razoável para caracterizar o clima de uma área determinada e resultam ser uma alternativa viável e satisfatória ante a escassez de dados nas estações meteorológicas (DAO *et al.*, 2021; DILE; SRINIVASAN, 2014; FUKA *et al.*, 2013; LOPES, 2018; MONTEIRO *et al.*, 2016).

As vantagens de usar os dados de reanálise do CFSR é que oferecem uma resolução espacial e duração nas séries de tempo adequadas para serem usados como entrada na modelagem de bacias hidrográficas no SWAT (MONTEIRO *et al.*, 2016). Alguns estudos relatam o uso dos dados de reanálise do CFSR em modelos hidrológicos, como o estudo realizado por Fuka *et al.* (2013), simularam a vazão em cinco bacias hidrográficas com diferentes regimes climáticos, localizadas na Etiópia e nos Estados Unidos, com o fim de determinar a confiabilidade dos dados de reanálise do CFSR, comparados com os dados de estações meteorológicas locais, para as variáveis de precipitação e temperatura. Eles encontraram que as vazões simuladas obtidas do modelo SWAT foram muito boas ou melhores, usando os dados de reanálise do CFSR em relação aos dados das estações meteorológicas *in situ*. FUKA *et al.* (2013) argumentam que o bom desempenho destes dados pode ser atribuído a adequada representação das médias das variáveis de precipitação e temperatura em áreas maiores em comparação aos dados de estações meteorológicas.

No entanto, Dile e Srinivasan (2014) avaliaram o rendimento da modelagem de vazão para a bacia do lago Tana em Etiópia, usando o modelo SWAT, inserindo os dados de precipitação do CFSR e de estações meteorológicas. Eles obtiveram resultados satisfatórios para os dois tipos de dados de precipitação, mas os dados de reanálise do CFSR foram inferiores em comparação aos dados das estações meteorológicas. Assim, eles concluíram que os dados de reanálise do CFSR são uma alternativa adequada em regiões com escassez de dados.

Outro estudo desenvolvido por Bressiani *et al.* (2015), pesquisaram o desempenho dos dados meteorológicos provenientes de estações meteorológicas *in situ*, de dados de reanálise do CFSR e a combinação destes. Estes diferentes conjuntos de dados foram concebidos como entradas para a modelagem hidrológica para a bacia Jaguaribe, localizada no estado do Ceará no nordeste do Brasil, utilizando o modelo SWAT. Eles concluíram que os melhores resultados foram

obtidos quando a combinação das estações pluviométricas in situ com os dados de reanálise do CFSR foi utilizada.

Nesse sentido, no presente estudo foi decidido utilizar a combinação dos dados de reanálise do CFSR junto com os dados do posto meteorológico da ESALQ para o período histórico entre 1979 e 2011. Estes dados foram utilizados para serem ingressados ao modelo base no SWAT feito por Bressiani (2016), da bacia do rio Piracicaba para modificar as estações meteorológicas. Também estes dados meteorológicos foram utilizados para o corrigir os vieses dos dados obtidos do modelo climático GFDL-ESM4 do conjunto CMIP6.

A decisão de utilizar estes dados está suportada na falta de estações meteorológicas, com registros para as variáveis de temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar ou insolação total, na área de estudo e que as estações existentes possuíam uma quantidade significativa de falhas, maior a 10% em relação ao total dos dados requeridos para o período de análise. Outra justificativa é a espacialização das estações dos dados de reanálise do CFSR, que permitiu uma melhor distribuição e uma adequada representação do clima na bacia do rio Piracicaba. Também é considerada a possibilidade de obter bons resultados na modelagem hidrológica quando os dados de reanálise forem combinados com estações meteorológicas localizadas in situ. No entanto, uma desvantagem do uso dos dados de reanálise do CFSR é que a série temporal disponível é para o período de janeiro de 1979 até julho de 2014.

O tratamento dos dados obtidos do posto meteorológico da ESALQ (ESALQ/USP, 2020) consistiu no preenchimento de falhas, conversão de unidades para os dados de velocidade do vento e organização dos dados no formato adequado para serem inseridos no modelo SWAT. A estação apresentou uma baixa quantidade de falhas menores a 1% do total dos dados obtidos (Tabela 6) e foram preenchidas com a média dos dados. As variáveis de radiação solar foram convertidas de unidades de $Cal/cm * dia$ a $MJ/m^2 * dia$, a velocidade do vento de km/h a m/s e a umidade relativa de porcentagem a número decimal.

Tabela 6 – Contagem de falhas no posto meteorológico da ESALQ.

Variável	Número de falhas	Porcentagem de falhas
Precipitação	13	0.10 %
Temperatura mínima	3	0.023%
Temperatura máxima	3	0.023%
Umidade relativa	93	0.73%
Radiação solar	44	0.34%
Velocidade do vento	13	0.10%

Fonte: ESALQ/USP (2020).

Para obter os dados fluviométricos, que representam as vazões a jusante do Sistema Cantareira destinadas à bacia do Rio Piracicaba, foram adquiridos da plataforma Hidroweb da Agência Nacional de águas e Saneamento Básico (ANA) e do Departamento de águas e Energia Elétrica (DAEE), selecionando as estações descritas na Tabela 7. Para preencher dos dados faltantes foi realizada uma regressão polinomial.

Tabela 7 - Detalhes das estações fluviométricas para ingressar como entradas de descargas das vazões a jusante do Sistema Cantareira na bacia do rio Piracicaba.

Nome da estação	Rio	Area de drenagem (km ²)
Guaripocaba	Jaguari	1353
Captação de Piracaia	Cachoeira	396
Mascate	Atibainha	340

Fonte: ANA (2021) & DAEE (2021).

4.2.3. Simulação, calibração e validação do modelo para o período histórico

Depois de obter os dados de entrada climáticos e dados fluviométricos que representam as vazões a jusante do Sistema Cantareira destinadas à bacia do Rio Piracicaba, o modelo foi simulado para o período histórico de 1979-2011, com um período de aquecimento de 5 anos (1979-1983). As métricas de desempenho para avaliar o modelo foram o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), o coeficiente de determinação (R^2) e a porcentagem bias (PBIAS) e seguindo a classificação de acordo com Moriasi *et al.* (2007).

O coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) é uma estatística normalizada que compara os hidrogramas simulados ou preditivos em comparação com os observados e indica este digrama se ajusta a uma linha 1:1. É amplamente usado para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos. O intervalo dos valores de NSE é de -

∞ a 1, sendo que os valores próximos a 1 indicam um melhor desempenho do modelo (MORIASI *et al.*, 2007; SHI *et al.*, 2011). O cálculo do coeficiente de Nash-Sutcliffe está baseado na equação (4).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_s^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (4)$$

Onde $[Q_o^t]$ é a vazão observada no tempo t, $[Q_s^t]$ é a vazão simulada no tempo t, e $[\bar{Q}_o]$ é a média dos valores observados.

A percentagem bias (PBIAS) mede a tendencia média dos dados simulados se são maiores ou menores em comparação aos dados observados. Valores perto de zero indicam bom desempenho na predição do modelo. Valores positivos indicam superestimação dos valores simulados e valores negativos indicam subestimação (GUPTA *et al.*, 1999; SHI *et al.*, 2011). O cálculo de PBIAS é baseado na equação 5.

$$PBIAS = \left(\frac{\sum_{t=1}^T (Q_s^t - Q_o^t)}{Q_o^t} \right) * 100 \quad (5)$$

Onde $[Q_o^t]$ é a vazão observada no tempo t, e $[Q_s^t]$ é a vazão simulada no tempo t.

O coeficiente de determinação (R^2) representa a proporção do desvio nos dados observados que são previsíveis no modelo. O intervalo dos valores de NSE é de 0 a 1, sendo que os valores próximos a 1 indicam um melhor desempenho do modelo (SHI *et al.*, 2011). O cálculo de R^2 é baseado na equação (6).

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o) (Q_s^t - \bar{Q}_s)}{(\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2)^{0.5} (\sum_{t=1}^T (Q_s^t - \bar{Q}_s)^2)^{0.5}} \right\} \quad (6)$$

Onde $[Q_o^t]$ é a vazão observada no tempo t, $[Q_s^t]$ é a vazão simulada no tempo t, $[\bar{Q}_o]$ é a média dos valores observados, $[\bar{Q}_s]$ é a média dos valores observados.

Inicialmente, as métricas do modelo foram avaliadas após realizar as alterações mencionadas e são apresentadas na Tabela 8. Os resultados permitem evidenciar que nas estações das sub-bacias 339 e 133 obtiveram coeficientes de Nash-Sutcliffe menores a 0.5, classificando o modelo com desempenho não satisfatório de acordo com Moriasi *et al.* (2007). Estes resultados podem dever-se à alteração das bases de dados e foi necessário recalibrar o modelo para simular os cenários futuros.

Tabela 8 – Resultados das métricas de rendimento do modelo.

Estação	Sub-bacia	NSE	R²	PBIAS
4	339	0.19	0.54	-17.4
12	133	0.38	0.44	2.4
16	221	0.71	0.69	-10.2

Fonte: Autora.

A nova calibração foi realizada no software SWAT-CUP, utilizando o método SUFI-2 para a bacia inteira, devido à dificuldade de dividir a bacia em três regiões como foi realizado por Bressiani (2016). Portanto, para a nova calibração foram escolhidas três estações descritas na Tabela 9 que representaram as condições da bacia e calibradas em conjunto. A estação Artemis, localizada perto do exutório, na sub-bacia 221, foi considerada relevante pela área de drenagem e pela localização.

A calibração abrangeu o período de 1984 a 1999 (15 anos), de frequência mensal, com 500 simulações no SWAT-CUP para três estações fluviométricas em conjunto. A validação abrangeu o período 2000-2011 (12 anos).

Tabela 9 – Detalhes das estações fluviométricas usadas na nova calibração e validação do modelo do rio Piracicaba.

Nome da estação	Sub-bacia	Area de drenagem (km²)	Dados Faltantes	Fonte
Artemis	221	10900	2	DAEE
Jaguariúna	265	2187	0	ANA
Rio Abaixo	415	1690	0	ANA

Fonte: Elaborado pela autora e informações provenientes de ANA (2012) e DAEE (2012).

Para a nova calibração foi preciso fazer modificações nos parâmetros calibrados em relação ao intervalo dos valores dos parâmetros e adição e supressão de alguns. Para selecionar os parâmetros que foram calibrados foi realizada uma análise de sensibilidade global dos parâmetros e na Tabela 10 são apresentados os parâmetros selecionados.

Tabela 10 - Parâmetros selecionados para a nova calibração e validação do modelo SWAT.

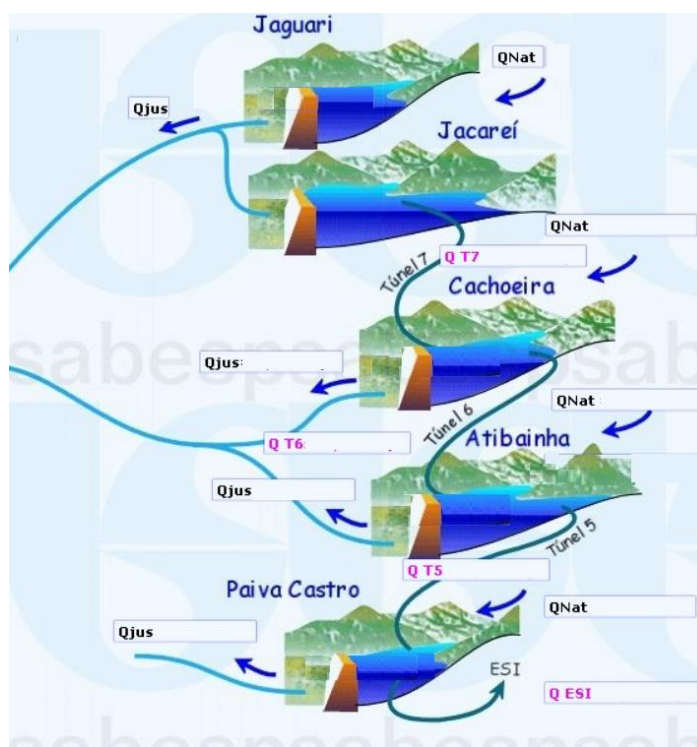
Parâmetro	Descrição do parâmetro
ALPHA_BF.gw	Fator de recessão do escoamento de base
CANMX.hru	Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação
CH_K2.rte	Condutividade hidráulica efetiva do canal
CH_N2.rte	Coeficiente de Manning do canal
CN2.mgt	Valor da curva-número para a condição de solo úmido
ESCO.hru	Coeficiente de compensação da evaporação de água no solo
GW_DELAY.gw	Tempo de recarga do aquífero
GW_REVAP.gw	Coeficiente de controle do fluxo da água entre as zonas saturada e não saturada
GWQMN.gw	Profundidade da água subterrânea necessária para ocorrer fluxo de retorno
RCHRG_DP.gw	Fração de água percolada para o aquífero profundo
REVAPMN.gw	Limite de água no solo para ocorrência da ascensão capilar na zona saturada
SLSUBBSN.hru	Comprimento da declividade média
SOL_AWC.sol	Capacidade de armazenamento de água no solo
SOL_K.sol	Condutividade hidráulica saturada do solo
SOL_Z.sol	Profundidade do solo
SURLAG.bsn	Tempo de retardo do escoamento superficial
USLE_C.plant.dat	Fator C da equação universal de perda do solo

Elaborado pela autora e informações extraídas de Arnold *et al.* (2012a).

4.2.4. Obtenção de vazões futuras a jusante dos reservatórios do Sistema Cantareira destinadas para a bacia do rio Piracicaba

Para obter os dados das vazões a jusante dos reservatórios destinadas à bacia do rio Piracicaba, sendo uma das entradas ao modelo hidrológico. Cálculos foram realizados seguindo a resolução ANA/DAEE n° 925 de 2017 (ANA/DAEE, 2017b). Por tanto, foi necessário obter previamente as vazões naturais, correspondentes as vazões a montante dos reservatórios do Sistema Cantareira e para obtê-las foi realizada a delimitação e simulação hidrológica dos reservatórios do Sistema Cantareira, usando o modelo SWAT.

Figura 8 - Esquema do Sistema Cantareira.

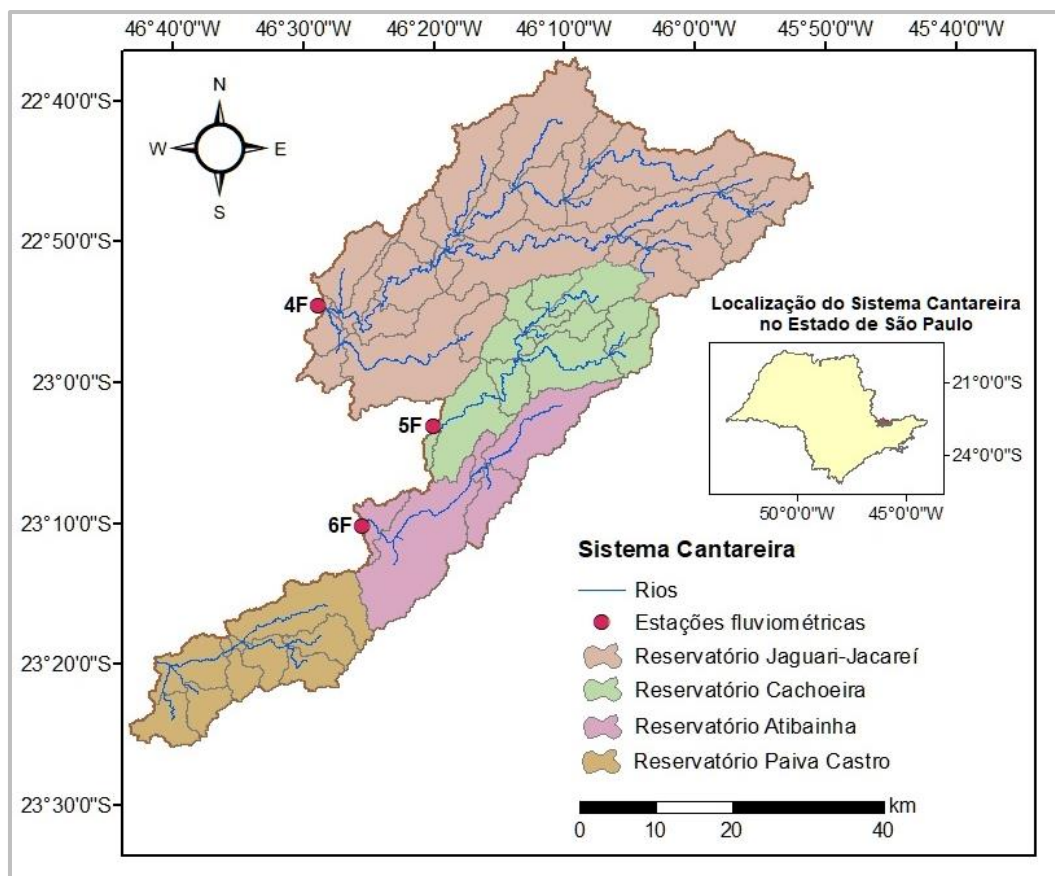


Fonte: SABESP (2014).

4.2.4.1. Delimitação e simulação hidrológica dos reservatórios do Sistema Cantareira.

Para obter as vazões a montante dos reservatórios do Sistema Cantareira ou vazões naturais dos reservatórios, foi realizada a delimitação e simulação hidrológica dos reservatórios Jaguarí-Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro, pertencentes ao Sistema Cantareira, usando o modelo SWAT.

Figura 9 – Delimitação das bacias que contêm os reservatórios Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro, pertencentes ao Sistema Cantareira.



Fonte: Autora.

A configuração do modelo das bacias que contém o Sistema Cantareira foi construída na interface ArcSWAT 2012.10.24 em ArcGIS 10.5. Os dados de entrada ao modelo foram o Modelo Digital de Elevação, trechos de drenagem das bacias PCJ, o mapa de solos e o mapa de cobertura e uso do solo. Na Tabela 11, os detalhes dos dados de entrada no modelo SWAT são apresentados.

Tabela 11 – Dados de entrada no modelo SWAT para a modelagem hidrológica da bacia do Sistema Cantareira.

Dado de entrada	Características	Fonte
Modelo Digital de Elevação (DEM)	Resolução de 12.5 m	(ASF DAAC, 2015)
Usos da terra	Resolução de 30 m	(MAPBIOMAS, 2019)
Tipos de solos	Escala 1:5000000	Elaborado por (SANTOS et al., 2011) de acordo com (EMBRAPA, 2006)
Dados climáticos (precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento)	Dados de reanálise do CFSR (resolução de 38 km)	(SWAT, 2021)

Fonte: Autora.

O Modelo Digital de Elevação, conhecido em inglês como *Digital Elevation Model* (DEM), foi obtido da base de dados ALOS PASAR do site de *Alaska Satellite Facility* (ASF DAAC, 2015), apoiado pela NASA. Este Modelo Digital de Elevação possui uma resolução de 12.5 m. No processo de seleção do DEM foi filtrado, indicando as coordenadas da área de estudo, escolhendo o tipo de arquivo como terreno de alta resolução corrigido e o tipo de modo selecionado como, *Fine Beam Single (FBS)* (PRADO, 2009).

Os dados de cobertura do solo e uso da terra foram obtidos do MapBiomas da coleção 5 do ano 2019, para os Estados de São Paulo e Minas Gerais (MAPBIOMAS, 2019), usando a ferramenta Google Earth Engine.

Os dados dos tipos de solos foram obtidos do Mapa de solos do Brasil em escala 1:5000000, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006) que foi elaborado por Santos *et al.* (2011). As características dos solos foram extraídas do modelo hidrológico da bacia do rio Piracicaba elaborado por Bressiani (2016).

Os dados das variáveis climáticas de precipitação, temperatura mínima e máxima, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento foram utilizados os dados de reanálise do CFSR obtidos no numeral 4.2.2.

Após delimitar a bacia e ingressar os dados de entrada, o modelo foi utilizado para simular o período compreendido entre 1979 e 2011, sendo que os primeiros 5 anos foram destinados para o aquecimento ou *warm-up* do modelo. Das saídas obtidas do modelo, foram extraídas as vazões a montante das sub-bacias que contém os reservatórios de interesse. Estas vazões foram assumidas como as vazões naturais dos reservatórios.

4.2.4.2. Cálculo de vazões a jusante dos reservatórios do Sistema Cantareira

Para obter as vazões a jusante do Sistema Cantareira que são destinadas às bacias PCJ, foram feitos cálculos em uma planilha de cálculo, incluindo as prioridades e especificações das condições de operação dos reservatórios que compõem o Sistema Cantareira, baseados na resolução ANA/DAEE n° 925 de 2017 (ANA/DAEE, 2017b).

As especificações das condições de operação dos reservatórios incluem os valores dos volumes mínimos e máximos permitidos nos reservatórios, os limites máximos de retirada d'água permitidos destinados para a RMSP, de acordo com a classificação por faixas de operação do Sistema Cantareira estipulado no artigo 4 dessa resolução.

Na Tabela 12 estão especificados os volumes mínimos e máximos permitidos em cada reservatório, de acordo com o inciso 1 do artigo 1° da resolução ANA/DAEE n° 925 de 2017. O volume inicial do primeiro mês para cada reservatório foi definido como igual ao volume mínimo de cada reservatório. Os volumes máximos de cada um dos reservatórios foram utilizados como condição máxima de preenchimento. A resolução considera que o período úmido compreende o período de 1° de dezembro a 31 de maio e o período seco compreende o período de 1° de junho a 30 de novembro.

Tabela 12 – Especificações de operação dos reservatórios do Sistema Cantareira.

Dado	Reservatório Jaguari - Jacareí	Reservatório Cachoeira	Reservatório Atibainha	Reservatório Paiva Castro	Total Sistema Cantareira
Volume mínimo (hm ³)	239.45	46.92	199.2	25.32	510.89
Volume máximo (hm ³)	1047.49	116.57	295.46	32.93	1492.45
Volume útil (hm ³)	808.04	69.65	96.26	7.61	981.56
Período úmido	1° de dezembro a 31 de maio				
Período seco	1° de junho a 30 de novembro				

Fonte: ANA/DAEE (2017b).

A resolução no artigo 4.1 também define as vazões limites de retirada máximos mensais para a Região Metropolitana de São Paulo e classificando o volume do Sistema Cantareira em faixas de operação seguindo as condições indicadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Retirada d'água de acordo com classificação por faixas para operação do Sistema Cantareira segundo o artigo 4.1 da resolução ANA/DAEE nº925 de 2017.

Faixa	Condição da faixa	Volume limite mínimo para classificação (Hm ³)	Limite de retirada máximo mensal para RMSP (m ³ /s)
1: Normal	Volume útil acumulado igual ou maior que 60%	588.94	33
2: Atenção	Volume útil acumulado igual ou maior que 40% e menor que 60%	392.62	31
3: Alerta	Volume útil acumulado igual ou maior que 30% e menor que 40%	294.47	27
4: Restrição	Volume útil acumulado igual ou maior que 20% e menor que 30%	196.31	23
5: Especial	Volume acumulado inferior a 20% do volume útil	196.31	15.5

Fonte: Elaborado pela autora e informações de ANA/DAEE (2017b).

Os cálculos foram baseados em um balanço de maneira individual para cada reservatório e de maneira geral do Sistema Cantareira, que contabilizou as somatórias das vazões destinadas para as bacias PCJ e as vazões de retirada para a RMSP. Estes balanços permitiram simular as condições de operação dos reservatórios do Sistema Cantareira para obter as vazões a jusante destinadas as bacias PCJ.

Perante a indisponibilidade de alguma regra de operação dos reservatórios, uma ordem de prioridades para o uso da água nos reservatórios foi definida da seguinte maneira:

1. Garantir a liberação da vazão máxima permitida para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) na Estação Elevatória Santa Inês, de acordo com o inciso I do artigo 1 da resolução ANA/DAEE n° 925 de 2017 (ANA/DAEE, 2017b). Esta vazão é a somatória das vazões defluentes dos reservatórios Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro, transferidas por tuneis entre os reservatórios do Sistema Cantareira. Esta vazão de retirada máxima mensal para a RMSP varia de acordo com a classificação do volume mensal em uma faixa de operação (Tabela 13). Supusemos a condição mais crítica, garantindo que a vazão máxima na Estação fosse o limite de retirada máximo mensal para RMSP de acordo com a classificação por faixas (Tabela 13).
2. Garantir a liberação das vazões mínimas permitidas para as bacias PCJ, de acordo com o artigo 5 da resolução (ANA/DAEE, 2017b), que depende das condições de armazenamento do Sistema Cantareira, o período hidrológico e as faixas de operação definidas nos incisos I a V do artigo 4 da resolução. Para o reservatório de Paiva Castro, a vazão jusante para o rio Juquerí sempre será a mínima de acordo com a Deliberação CBH-AT n° 01 de 28/01/2008 de 0.5 m³/s.
3. Garantir que cada um dos reservatórios tenha um volume inicial para cada mês, maior ou igual ao volume mínimo.
4. Garantir que a vazão jusante destinada para as bacias PCJ não ultrapasse as vazões de restrição em cada um dos reservatórios de acordo com a Nota Técnica Conjunta n° 8/2019/SRE/DAEE, apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Vazões de restrição para os reservatórios do Sistema Cantareira.

Reservatório	Vazão de restrição para o período julho até novembro	Vazão de restrição para o período dezembro até junho
	(m ³ /s)	(m ³ /s)
Jaguari-Jacareí	40	100
Cachoeira	5	7
Atibainha	5	11
Paiva Castro	1	1 (até fevereiro/2011)
		10 (março até junho)

Fonte: SRE/DAEE (2019)

Nos cálculos foram incorporados os dados das vazões naturais de cada um dos reservatórios, mediante a simulação hidrológica no modelo SWAT.

Os cálculos partiram da ordem de prioridades anteriormente descrita e procurou-se manter o nível dos reservatórios na condição crítica, esvaziando os reservatórios até o volume mínimo e o volume esvaziado é chamado de volume sobranete.

O volume final por reservatório foi calculado utilizando a equação (7).

$$V_f = V_i - V_{sobranete} + V_{adic} - (Q_{jus_PCJ_Final} * conversão\ de\ unidades) \quad (7)$$

Onde V_f é o volume final de cada reservatório, $V_{sobranete}$ é o volume sobranete obtida da diferença entre o volume inicial e o volume mínimo do reservatório de interesse, V_{adic} é o volume adicional para preencher o reservatório até o volume mínimo, no caso o reservatório tivesse um volume menor, e $Q_{jus_PCJ_Final}$ é a vazão jusante dos reservatórios do Sistema Cantareira destinada às bacias PCJ.

Para calcular a vazão a jusante dos reservatórios do Sistema Cantareira destinada as bacias PCJ, a equação [8] foi utilizada.

$$Q_{jus_PCJ_Final} = Q_{jus_min_resol} + Q_{supl_PCJ} \quad (8)$$

Onde $Q_{jus_PCJ_Final}$ é a vazão total a jusante dos reservatórios do Sistema Cantareira destinada as bacias PCJ, Q_{supl_PCJ} é a vazão suplementar a jusante dos reservatórios do Sistema Cantareira destinada às bacias PCJ e $Q_{jus_min_resol}$ é a vazão mínima a jusante dos reservatórios que varia de acordo com a resolução ANA/DAEE n° 925 de 2017.

Quando houvesse volume sobranete ($V_{sobranete}$), este volume foi adicionado à vazão suplementar a jusante dos reservatórios do Sistema Cantareira destinada às

bacias PCJ, seguindo os limites máximos permitidos de acordo com a a Nota Técnica Conjunta nº 8/2019/SRE/DAEE (Tabela 14).

4.3. Simulações dos cenários futuros de mudanças climáticas

Para executar o objetivo principal desta pesquisa, cenários futuros de mudanças climáticas e de mudanças no uso da terra na bacia do rio Piracicaba foram simulados no SWAT. A seguir são descritos cada um dos processos realizados para obter estes cenários futuros. Cabe ressaltar que a ordem de simulação foi simular os cenários futuros de mudanças climáticas e depois, simular os cenários futuros de mudanças no uso da terra em conjunto com os cenários de mudanças climáticas.

Cenários futuros de mudanças climáticas foram definidos e simulados no SWAT, a partir de valores futuros estimados de variáveis climáticas (precipitação, radiação solar, umidade relativa, velocidade do vento, temperatura mínima e máxima), obtidos de um modelo climático (GCM) provenientes da Fase 6 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP6, pelas siglas em inglês *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*) do Programa Mundial de Pesquisa do Clima (conhecido em inglês como *World Climate Research Programme*).

A definição dos cenários futuros de mudanças climáticas consistiu na agrupação dos cenários conhecidos como Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSP), obtidos de um modelo climático global pertencente ao CMIP6, para os períodos de médio (2021-2050) e longo prazo (2051-2080). Neste estudo, os Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSP) analisados foram o cenário de emissões intermédias, SSP2-4.5 e o cenário de emissões altas ou chamado SSP8-5.8 que foram explicados detalhadamente no numeral 3.1.2.

A definição dos cenários futuros de mudanças climáticas que foram inseridos no SWAT consistiu na obtenção, organização e correção de viés dos dados climáticos corrigidos do modelo climático global (GCM) selecionado para os cenários dos Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSP) de emissões intermédias (SSP2-4.5) e de emissões altas (SSP8-5.8) que foram explicados detalhadamente no numeral 3.1.2, para dois períodos a médio (2021-2050) e longo prazo (2051-2080). Para facilitar a identificação da construção dos diferentes cenários de mudanças climáticas, estes foram nomeados como aparece na Tabela 15. O procedimento realizado para obter os dados futuros do modelo climático global (GCM) é explicado no numeral 4.3.1.

Tabela 15 – Nomeação dos cenários futuros de mudanças climáticas.

Nome do cenário	Descrição
CC1	SSP 2 - 4.5 para o período 2021-2050
CC2	SSP 2 - 4.5 para o período 2051-2080
CC3	SSP 5 - 8.5 para o período 2021-2050
CC4	SSP 5 - 8.5 para o período 2051-2080

Fonte: Autora.

4.3.1. Obtenção dos dados climáticos futuros provenientes do modelo climático global

Para simular os cenários futuros de mudanças climáticas no SWAT, dados das variáveis climáticas futuras (precipitação, radiação solar, umidade relativa, velocidade do vento, temperatura mínima e máxima), de frequência diária, organizados para os períodos de médio (2021-2050) e longo prazo (2051-2080) foram inseridos no modelo hidrológico.

De maneira geral, a metodologia para obter os dados climáticos futuros consistiu na seleção do modelo climático mediante a ferramenta GCMeval (PARDING *et al.*, 2020), obtenção dos dados climáticos da página do CMIP6 (GUO *et al.*, 2018; WCRP, 2020) em arquivos netCDF, unidos utilizando o software CDO e extraídos mediante um código em Python. Depois, os vieses destes dados foram corrigidos mediante uma técnica de correção de viés estatístico (em inglês *statistical downscaling*) pelo método *quantile mapping*, e finalmente, as estatísticas dos dados climáticos futuros foram geradas mediante a ferramenta *WGN Parameters Estimation Tool* do SWAT.

A seleção do modelo climático global requer uma alta capacidade computacional devido à quantidade de modelos climáticos disponíveis. Há diversos métodos para selecionar um ou vários modelos climáticos globais (LUTZ *et al.*, 2016).

Existem dois enfoques na seleção de modelos climáticos globais. O enfoque conhecido como enfoque do desempenho do passado, que consiste na seleção de um modelo climático global, em função da sua habilidade para simular o clima presente e passado próximo (BIEMANS *et al.*, 2013; LUTZ *et al.*, 2016; PIERCE *et al.*, 2009), sendo esta abordagem utilizada no estudo. Outro enfoque conhecido como enfoque envolvente, consiste na seleção de um conjunto de modelos

climáticos para uma ou diversas variáveis climatológicas, que representam e cobrem os possíveis futuros (LUTZ *et al.*, 2016).

Para selecionar o modelo climático global foi utilizada uma ferramenta interativa que permite a classificação e comparação dos modelos climáticos dos projetos CMIP5 e CMIP6, conhecida como GCMeval, desenvolvida por Parding *et al.* (2020) e está disponível na página web: <https://gcmeval.met.no/>.

Esta ferramenta consiste na avaliação e ponderação de diversos parâmetros, para facilitar a escolha de um conjunto de modelos climáticos que preservam as características estatísticas da mudança climática e na exclusão dos modelos com desempenho ruim. Esta ferramenta permite a avaliação de alguns cenários de emissão, como, RCP4.5 e RCP8.5 do conjunto CMIP5 e SSP5-8.5 do conjunto CMIP6. Para este estudo, somente foi selecionado o cenário SSP5-8.5 do conjunto CMIP6.

O procedimento realizado na ferramenta GCMeval consistiu na escolha das regiões de foco principal e secundária, assim como a definição de importância das variáveis climáticas (precipitação e temperatura), as estações do ano e as pontuações de rendimento do GCM, em relação ao viés, correlação espacial, razão de desvio padrão espacial e RMSE do ciclo anual. Esta definição é realizada mediante a seleção dos pesos, que variam de 0 a 2, sendo 0 como “Não considerado”, 1 como “Importante” e 2 como “Muito Importante”. A partir disso, a ferramenta realizou um ranking dos melhores GCM de acordo com a escolha das regiões de foco e a definição dos pesos dos parâmetros. Para este estudo, as características e os pesos estabelecidos na ferramenta GCMeval (PARDING *et al.*, 2020) foram estabelecidos de acordo com a Tabela 16.

Tabela 16 – Parâmetros e pesos ingressados na ferramenta GCMeval.

Parâmetro	Peso	Definição do peso
Regiões de foco		
Região de foco primária: Sudeste da América do Sul	2	Muito importante
Região de foco secundária: Global	1	Importante
Variáveis		
Temperatura	1	Importante
Precipitação	1	Importante
Estações		
Anual	2	Muito importante
Inverno	1	Importante
Primavera	1	Importante
Verão	1	Importante
Outono	1	Importante
Pontuações das habilidades do GCM		
Viés	1	Importante
Correlação espacial	1	Importante
Razão de desvio padrão espacial	1	Importante
RMSE do ciclo anual	1	Importante

Fonte: Autora.

Depois de selecionar o modelo climático global utilizando a ferramenta GCMeval de (PARDING *et al.* (2020) foram obtidos os dados climáticos futuros para dois períodos de tempo, um período compreendido entre 2021 a 2050 e outro período compreendido entre 2051 a 2080. A escolha dos períodos está fundamentada em analisar os possíveis impactos a médio e longo prazo.

Os dados do modelo climático global selecionado são obtidos para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, para as variáveis de precipitação, temperatura mínima e máxima próxima da superfície, umidade relativa, radiação de onda curta descendente superficial e velocidade do vento próxima da superfície. O cenário SSP2-4.5 representa as emissões intermediárias de gases de efeito estufa e o cenário SSP5-8.5 representa as emissões altas de gases de efeito estufa. Na Tabela 17 são apresentadas as características e fatores de conversão aplicados para que sejam compatíveis as unidades com as requeridas no modelo SWAT.

Tabela 17 – Características e fatores de conversão das variáveis de interesse do modelo climático global.

Variável	Abreviatura	Unidade	Fator de conversão
Precipitação	pr	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{pr [mm/dia]} = \text{pr [kg m}^{-2} \text{s}^{-1}] * 86400$
Temperatura mínima diária do ar próxima da superfície	tasmin	K	$\text{tasmin [C]} = \text{tasmin [K]} - 273.15$
Temperatura máxima diária do ar próxima da superfície	tasmax	K	$\text{tasmin [C]} = \text{tasmax [K]} - 273.15$
Umidade relativa	hurs	%	$\text{hurs [unidade]} = \text{hurs [%]} / 100$
Radiação de onda curta descendente superficial	rsds	W m^{-2}	$\text{rsds [MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}] = \text{rsds [W m}^{-2}] * 0.0864$
Velocidade do vento próxima da superficial	sfcWind	m s^{-1}	-

Fonte: Autora.

Os dados futuros do modelo climático global selecionado foram obtidos da Fase 6 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP6, das suas siglas em inglês *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*), da página web do Programa Mundial de Pesquisas Climáticas (WCRP, das suas siglas em inglês *World Climate Research Programme*), disponível em <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>. Para facilitar a busca dos dados climáticos do modelo selecionado (precipitação, radiação solar, umidade relativa, velocidade do vento, temperatura mínima e máxima) alguns filtros foram aplicados e são detalhados na Tabela 18.

Tabela 18 – Filtros aplicados para obter dados climáticos do CMIP6 do site do WCRP.

Filtro	Opção escolhida
ID da fonte	GFDL-ESM4
ID do experimento	SSP245, SSP585
Frequência	day
Variável	pr, tasmin, tasmax, hurs, rsds, sfcWind
Etiqueta da variante	r1i1p1f1

Fonte: Autora.

O GCM selecionado foi GFDL-ESM4 (GUO et al., 2018), desenvolvido pelo *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (ou também conhecido pelo seu acrônimo GFDL e que aparece na primeira parte do nome do GCM). Eles têm produzido vários modelos numéricos dinâmicos para realizar projeções do comportamento da atmosfera, os oceanos e o clima, com o fim de facilitar a compreensão dos processos físicos e biogeoquímicos que governam o clima da Terra e determinar se as causas das mudanças do clima são antropogênicas ou naturais. Na segunda parte do nome do modelo climático global, ESM4 faz referência à abordagem do modelo, é voltado à compreensão das interações do sistema terrestre. De maneira geral, o modelo GFDL-ESM4 é definido como um modelo acoplado do sistema terrestre de quarta geração e a principal diferença deste modelo em relação aos modelos anteriores produzidos por GFDL, consiste em uma melhor representação dos padrões médios climáticos e da variabilidade, assim como melhor acoplamento da química, carbono e poeira (DUNNE et al., 2020).

Após baixar os dados futuros do modelo climático global em arquivos netCDF, foi preciso unir os arquivos e extrair as informações. Para unir os arquivos da mesma variável nos períodos de análise foi utilizado o software CDO (em inglês *Climate Data Operators*) e para extrair as informações contidas nestes arquivos foi preciso fazer um código em Python, aplicando filtros de latitude e longitude de acordo com a localização da bacia.

4.3.2. Redução de escala dos dados climáticos do modelo climático global e geração de estatísticas

Para corrigir os dados fornecidos do modelo climático global foi utilizada uma técnica de redução de escala, com o fim de adequar a resolução dos dados e passar de uma escala global a regional. Foi utilizado um código pronto em RStudio elaborado por Shrestha (2017). O código realiza a redução de escala (em inglês

statistical downscaling), mediante o método *quantile mapping*, usando o pacote *qmap* (GUDMUNDSSON, 2016) e o referencial teórico do método de downscaling está explicado no numeral 3.1.3. Os dados de entrada no código foram os dados climáticos futuros e históricos obtidos do GCM e os dados observados do período histórico compreendido de 1979 a 2011, de frequência diária, para obter como saídas os dados climáticos futuros corrigidos, dispostos de acordo com os cenários definidos na Tabela 15.

Para inserir os dados climáticos futuros corrigidos ao modelo SWAT, foi preciso organizar os dados de acordo com as especificações (ARNOLD *et al.*, 2012a) e gerar as estatísticas climáticas requeridas no modelo SWAT, descritas na Tabela 19, utilizando a ferramenta *WGN Parameters Estimation Tool*, disponível na página web do modelo SWAT.

Tabela 19 – Descrição dos parâmetros do clima do modelo SWAT.

Parâmetro	Descrição
TMPMX	Temperatura máxima diária de cada mês, °C
TMPMN	Temperatura mínima diária de cada mês, °C
TMPSTDMX	Desvio padrão para temperatura máxima de cada mês, °C
TMPSTDMN	Desvio padrão para temperatura mínima de cada mês, °C
PCPMM	Precipitação total diária média de cada mês, mm H ₂ O
PCPSTD	Desvio padrão para precipitação total diária, mm H ₂ O
PCPSKW	Coeficiente de assimetria para a precipitação diária
PR_W1	Probabilidade de haver chuva após um dia sem chuva
PR_W2	Probabilidade de haver chuva após um dia com chuva
PCPD	Número médio de dias com chuva, num determinado mês
RAINHHMX	Chuva máxima com duração de 30 minutos, mm H ₂ O
SOLARAV	Radiação solar diária para cada mês, MJ/m ² /dia
DEWPT	Ponto de orvalho diário para cada mês, °C
WNDVAV	Velocidade do vento diária para cada mês, m/s

Fonte: Elaborado pela autora e informações obtidas de Arnold *et al.* (2012a).

4.3.3. Teste de tendência de Mann-Kendall

Com o fim de analisar a tendência das séries dos dados das variáveis climáticas, dos cenários de mudanças climáticas e dos cenários de mudanças no uso da terra, foi aplicado o teste de tendência de Mann-Kendall (KENDALL, 1948; MANN, 1945) para cada uma das séries de dados, utilizando o software estatístico *Past3*. Este é um teste não paramétrico, caracterizado por sua nula sensibilidade

aos dados atípicos, além disso, os dados analisados não precisam ter uma distribuição normal (TABARI *et al.*, 2011). Também, este teste é utilizado para analisar se uma série de dados tem tendência temporal estatisticamente significativa e é amplamente usado em séries hidrológicas e climáticas (ZHANG *et al.*, 2001).

O teste de tendência de Mann-Kendall é baseado no cálculo dos parâmetros S, Z e p-valor. A seguir é explicado a fundamentação teórica deste teste como é explicado por Ashraf *et al.* (2021). S é o sinal do teste e valores positivos de S indicam tendência crescente e valores negativos indicam tendência decrescente. O cálculo do sinal (S) é baseado na equação (9)

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{ sinal}(S_j - S_k) \quad (9)$$

$$\text{ sinal}(S_j - S_k) = \begin{cases} \text{ se } f(S_j - S_k) < 0 & ; n \quad -1 \\ \text{ se } f(S_j - S_k) = 0 & ; n \quad 0 \\ \text{ se } f(S_j - S_k) > 0 & ; n \quad 1 \end{cases}$$

Onde Y_k e Y_j são os valores de dados consecutivos das séries temporais ao longo do tempo k e j , n é o número de dados.

Outro parâmetro é Z, correspondente ao valor estatístico do teste padronizado e é usado na verificação da hipótese nula. O cálculo deste parâmetro é baseado na equação (10).

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}, & \text{ se } S > 0 \\ 0, & \text{ se } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}, & \text{ se } S < 0 \end{cases} \quad (10)$$

Onde $\text{VAR}(S)$ é a variância do valor do sinal, S.

Finalmente, o p-valor indica a significância do teste, sendo que o nível de significância é quando p-valor é menor a 0.05. Valores de p-valor menores a 0.05 indicam tendencia estatisticamente significativa.

Neste estudo, a hipótese nula e a hipótese alternativa foram definidas assim:

- Hipótese nula (H_0): As séries de dados temporais de vazão e as variáveis climáticas (precipitação e as temperaturas máxima e mínima) não apresentam uma tendência crescente, nem decrescente ao longo do tempo.

- Hipótese alternativa (H_a): As séries de dados temporais de vazão e as variáveis climáticas (precipitação e as temperaturas máxima e mínima) apresentam uma tendência crescente ou decrescente estatisticamente significativa, ao longo do tempo.

4.4. Simulações dos cenários de mudanças no uso da terra

Para simular os cenários de mudanças futuras no uso da terra foram definidos cenários que abordaram diversas possibilidades, como a expansão da cana-de-açúcar, aumento das áreas agropecuárias, aumento da mata nativa e das áreas com eucalipto, com e sem consideração de desmatamento, para avaliar os possíveis impactos nas vazões e nas variáveis climáticas na área de estudo e foram definidos 5 tipos de mudanças no uso da terra como são estipulados na Tabela 20. Estes cenários de mudanças no uso da terra foram simulados para cada um dos cenários de mudanças climáticas. Finalmente, vinte cenários de mudanças no uso da terra foram estabelecidos para serem simulados no modelo hidrológico, SWAT.

Cada cenário de mudanças no uso da terra foi definido com mudança de 70% da área do uso da terra atual para o novo uso definido na Tabela 20. Além disso, foram modificadas as condições de cobertura do solo para os usos da terra avaliados, modificando os valores da curva número atuais correspondentes à cobertura regular para as piores condições ou nulas de cobertura dos solos avaliados. Estes valores da curva número foram modificados de acordo com os valores definidos pela USDA-SCS (MISHRA; SINGH, 2003).

Tabela 20 – Cenários de mudanças no uso da terra simulados no SWAT.

Cenário	Descrição	Uso da terra inicial	Uso da terra final
LUC 1	Cenário de aumento das áreas agropecuárias, com desmatamento	Floresta (FRSE)	❖ Cana-de-açúcar (SUGC) ❖ Laranja (ORAN) ❖ Pastagem (PAST)
LUC 2	Cenário de expansão da cana-de-açúcar, com desmatamento	Floresta (FRSE)	Cana-de-açúcar (SUGC)
LUC 3	Cenário de aumento das áreas com eucalipto, sem desmatamento	Pastagem (PAST)	Eucalipto (EUCA)
LUC 4	Cenário de reflorestamento	Pastagem (PAST)	Floresta (FRSE)
LUC 5	Cenário de expansão da cana-de-açúcar, sem desmatamento	Pastagem (PAST)	Cana-de-açúcar (SUGC)

Fonte: Autora.

A metodologia desenhada para definir os cenários de mudanças no uso da terra, em relação aos novos usos da terra, a porcentagem de mudança das áreas dos usos da terra e as modificações dos valores da curva número foram baseadas nas metodologias realizadas por Mompremier *et al.* (2022), Viola *et al.* (2014), Lucas-Borja *et al.* (2020) e Siqueira *et al.* (2021). Os estudos que ajudaram na tomada de decisão da metodologia são detalhados a seguir.

Para definir a porcentagem de mudança dos cenários do uso da terra foi definida de acordo com as metodologias realizadas por Mompremier *et al.* (2022), Viola *et al.* (2014). Viola *et al.* (2014) realizaram um estudo hidrológico nas cabeceiras da bacia do Rio Grande no sudeste do Brasil, definiram cinco cenários de mudanças da terra, contemplando cenários de reflorestamento com eucalipto em áreas de pastagens, em porcentagens de 20% e 50% e cenários de desmatamento em áreas florestais substituídas por pastagens, em porcentagens de 30% e 70%. De maneira similar, cenários de mudanças no uso da terra foram definidos por Mompremier *et al.* (2022), simularam cenários de desmatamento e de reflorestamento com porcentagens de mudança da área da cobertura do solo de 25%, 50%, 75% e 100%. Os cenários de reflorestamento consistiram na substituição de cerrado por mata nativa em boa condição, com cobertura do solo com pastagem,

resíduos vegetais e mato. Em contraste, com os cenários de desmatamento, eles simularam como pastagens na pior condição com cobertura nula ou menor ao 50%.

Para definir a modificação dos valores da curva número para simular as piores condições de cobertura de solo foram definidos e argumentados de acordo com as metodologias de autores como Lucas-Borja *et al.* (2020) que modificaram os valores de curva número para as áreas de floresta de acordo com os valores pela USDA-SCS para o grupo hidrológico C. Siqueira *et al.* (2021) também modificaram os valores de curva número para os usos da terra no SWAT da classificação do USDA-SCS, de ruim ou regular para bom para simular as mudanças no uso da terra e simular as adaptações de práticas de conservação de água e solo.

Portanto, neste estudo os valores da curva número foram modificados da boa a pior condição seguindo a Tabela 21, extraídas do estudo do método SCS-CN, desenvolvido pelo Serviço de Conservação dos Solos (em inglês, *Soil Conservation Service*) da USDA (MISHRA; SINGH, 2003). No modelo SWAT, o parâmetro CN2 foi modificado para cada uso da terra.

Resumindo, a metodologia definida neste estudo consistiu em simular cenários de mudanças no uso da terra com porcentagem de 70% de mudança da área do uso atual, considerando as piores condições de cobertura do solo. Estas mudanças no uso da terra foram realizadas, tomando como base os cenários de mudanças climáticas simulados no numeral 5.2.3. Ao final, foram obtidos e simulados 20 cenários de mudanças no uso da terra.

Tabela 21 – Valores de curva número extraídos do método SCS-CN (MISHRA; SINGH, 2003) e Marin *et al.* (2008)

Uso da terra	Grupo hidrológico	Boa condição	Pior condição
Pastagem	A	39	68
	B	61	79
	C	74	86
	D	80	89
Cana-de-açúcar	A	39	77
	B	61	86
	C	74	91
	D	80	94
Laranja	A	67	72
	B	78	81
	C	85	88
	D	89	91
Mata nativa e eucalipto	A	25	45
	B	55	66
	C	70	77
	D	77	83

Fonte: Elaboração própria, dados extraídos de Mishra & Singh (2003).

A ferramenta de SWAT de Atualização do Uso da Terra (em inglês conhecida como *Land Use Update*) foi usada para a construção dos cenários. Esta ferramenta permite modificar as frações de área da sub-bacia contida na unidade de resposta hidrológica (HRU) existente e não prevê a inclusão de novas HRUs. Todas as frações de HRU devem somar igual a 1. Esta ferramenta é útil para avaliar medidas de conservação durante a simulação (ARNOLD *et al.*, 2012b; LAMPARTER *et al.*, 2018).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Modelagem hidrológica da bacia do rio Piracicaba para o período histórico

Como explicado no numeral 4, as análises de impactos de mudanças na bacia do rio Piracicaba estão baseadas no modelo hidrológico semidistribuído da bacia no SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*). A partir da versão do modelo elaborada por Bressiani (2016) o modelo foi reconfigurado, calibrado e validado. Na reconfiguração do modelo hidrológico no SWAT foram inseridos dados climáticos e das vazões a jusante do Sistema Cantareira destinadas para a bacia do rio Piracicaba.

Os parâmetros utilizados na calibração e validação do modelo hidrológico da bacia do rio Piracicaba, foram selecionados a partir da análise de sensibilidade global dos parâmetros no software SWAT-CUP. Os parâmetros selecionados e a análise de sensibilidade estão sintetizados na Tabela 22.

Na Figura 10 é apresentado o diagrama da análise de sensibilidade global dos parâmetros que foram selecionados para a calibração e a validação e a classificação dos valores do teste t e de p-valor. Os resultados indicam que os parâmetros mais sensíveis (maiores valores absolutos de teste t) e de maior significância da sensibilidade (menores valores de p-valor) foram os parâmetros de valor da curva número para a condição de solo úmido (CN2.mgt), tempo de recarga do aquífero (GW_DELAY.gw) e profundidade do solo (SOL_Z.sol). No entanto, os valores de teste t podem variar entre iterações de calibrações e obter diferentes análises de sensibilidade, como é explicado por Bressiani (2016).

As primeiras letras dos parâmetros denotados na Figura 10 e na Tabela 23 está relacionado como é modificado o parâmetro, sendo que *v* indica que o parâmetro foi substituído e *r* indica uma mudança relativa aos valores predeterminados no SWAT.

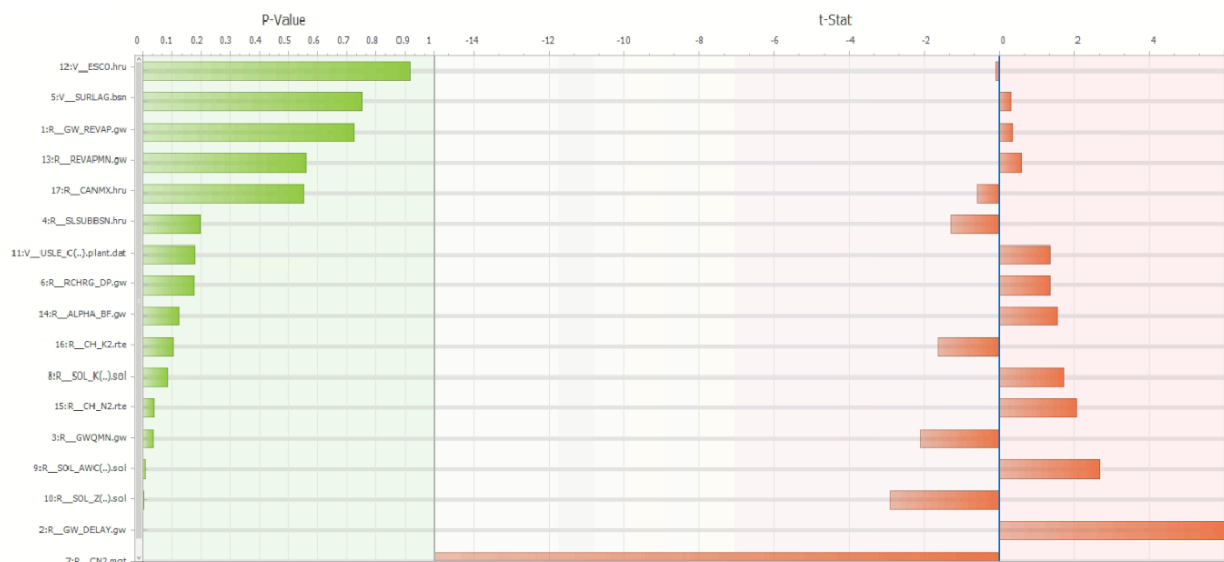
Tabela 22 – Análise de sensibilidade obtida na calibração no SWAT-CUP.

Parâmetro	Descrição	Teste t	P-valor
CN2.mgt	Valor da curva número para a condição de solo úmido	-15.0395	3.43E-42
GW_DELAY.gw	Tempo de recarga do aquífero	6.2982	6.79E-10
SOL_Z.sol	Profundidade do solo	2.0633	0.0396
SOL_AWC.sol	Capacidade de armazenamento de água no solo	2.6747	0.0077
GWQMN.gw	Profundidade da água subterrânea necessária para ocorrer fluxo de retorno	-2.1102	0.0354
CH_N2.rte	Coeficiente de Manning do canal	2.0633	0.0396
SOL_K.sol	Condutividade hidráulica saturada do solo	1.7217	0.0858
CH_K2.rte	Condutividade hidráulica efetiva do canal	-1.6317	0.1034
ALPHA_BF	Fator de recessão do escoamento de base	1.5399	0.1242
RCHRG_DP	Fração de água percolada para o aquífero profundo	1.3549	0.1761
USLE_C.plant.dat	Fator C da equação universal de perda do solo	1.3505	0.1775
SLSUBBSN.hru	Comprimento da declividade média	-1.2886	0.1982
CANMX.hru	Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação	-0.5929	0.5535
REVAPMN.gw	Limite de água no solo para ocorrência da ascensão capilar na zona saturada	0.5825	0.5605
GW_REVAP.gw	Coeficiente de controle do fluxo da água entre as zonas saturada e não saturada	0.3511	0.7256
SURLAG.bsn	Tempo de retardo do escoamento superficial	0.3164	0.7518
ESCO.hru	Coeficiente de compensação da evaporação de água no solo	-0.103	0.918

Fonte: Autora.

Depois de realizar a calibração, obteve-se um conjunto dos melhores valores ajustados da melhor simulação, assim como as faixas dos valores mínimos e máximos dos parâmetros calibrados, apresentados na Tabela 23.

Figura 10 – Diagrama da análise de sensibilidade dos parâmetros escolhidos para a calibração e validação no SWAT-CUP.



Fonte: Autora.

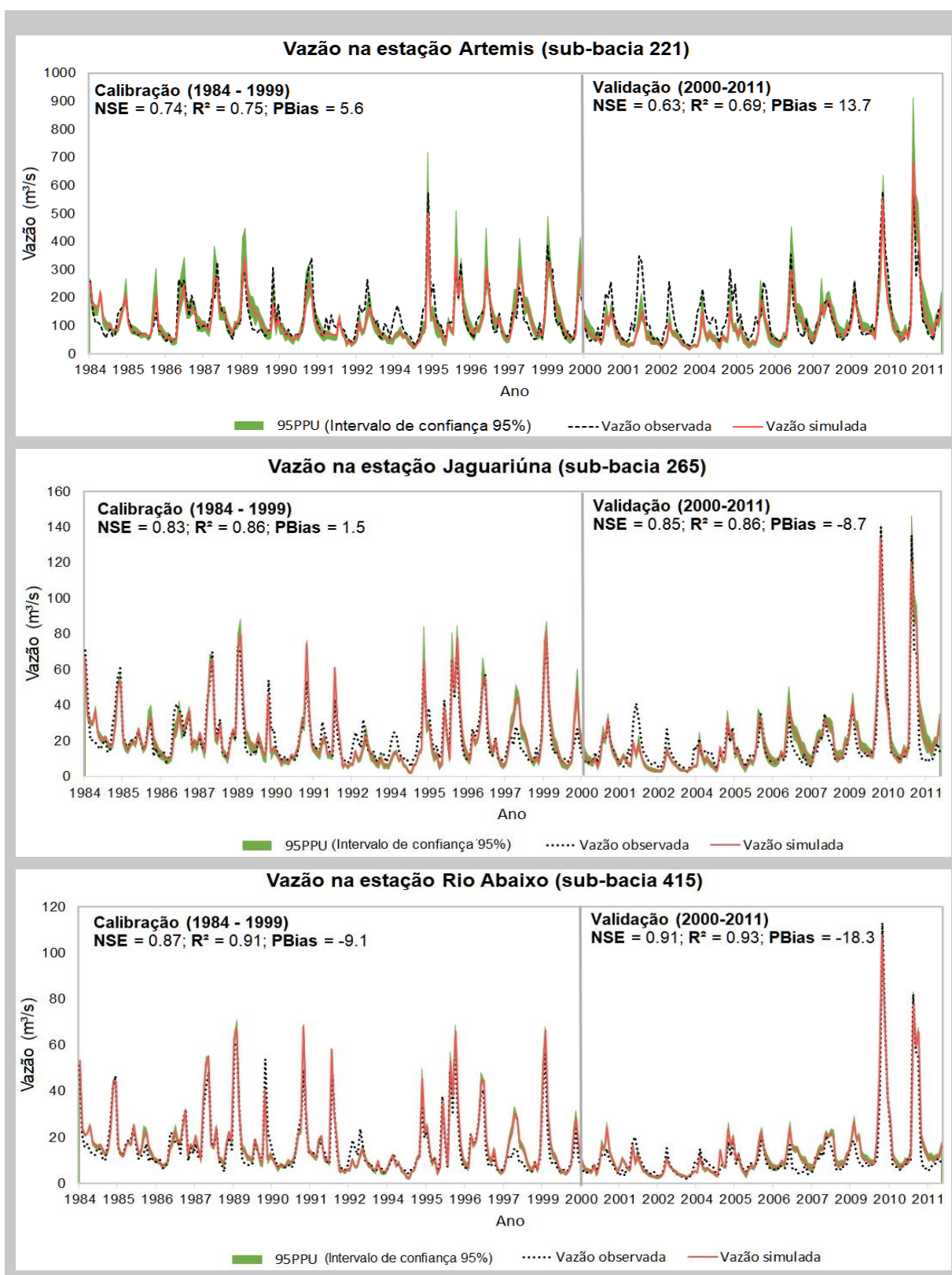
Tabela 23 – Parâmetros selecionados, faixas dos valores calibrados e validados, melhores valores ajustados obtidos da melhor simulação e valores inseridos no modelo SWAT.

Nome do parâmetro	Valor mínimo	Valor máximo	Melhor valor ajustado no SWAT-CUP	Valor inserido no SWAT
r__GW_REVAP.gw	1	2.5	1.410	2.410
r__GW_DELAY.gw	0.25	0.75	0.746	1.746
r__GWQMN.gw	-0.1	0.15	-0.010	0.990
r__SLSUBBSN.hru	-0.25	0.02	-0.183	0.817
v__SURLAG.bsn	0.3	0.6	0.521	0.521
r__RCHRG_DP.gw	0.15	0.5	0.304	1.304
r__CN2.mgt	-0.22	0.01	-0.167	0.833
r__SOL_K().sol	0.2	0.55	0.536	1.536
r__SOL_AWC().sol	-0.45	0.02	-0.119	0.881
r__SOL_Z().sol	-0.45	-0.01	-0.225	0.775
v__USLE_C(26).plant.dat	0.3	0.33	0.324	0.324
v__ESCO.hru	0.15	0.55	0.238	0.238
r__REVAPMN.gw	-0.3	0.15	-0.197	0.803
r__ALPHA_BF.gw	-0.25	0.03	-0.008	0.992
r__CH_N2.rte	-0.3	0.05	-0.156	0.844
r__CH_K2.rte	-0.3	0.2	-0.031	0.970
r__CANMX.hru	0.01	0.2	0.036	1.036

Fonte: Autora.

Na Figura 11 são apresentados hidrogramas das vazões calibradas e validadas, com o intervalo de confiança de 95% (faixa de cor verde).

Figura 11 – Vazões observadas, calibradas e validadas de frequência mensal e estatísticas de rendimento para as estações fluviométricas de Artemis, Jaguariúna e Rio Abaixo.



Fonte: Autora.

A função objetivo para a calibração e a validação definida no SWAT-CUP foi o coeficiente de Nash-Sutcliffe. De acordo com as estatísticas de desempenho na calibração, de acordo com Moriasi *et al.* (2007), o modelo da bacia do rio Piracicaba é classificado como bom (estação Artemis) e muito bom (estação Jaguariúna e Rio Abaixo). As estatísticas de desempenho para a calibração do modelo são apresentadas na Tabela 24.

Tabela 24 - Resultados das métricas de rendimento da calibração para o período 1984-1999.

Estação	Sub-bacia	NSE	R²	Pbias
Artemis	221	0.74	0.75	5.6%
Jaguariúna	265	0.83	0.86	1.5%
Rio Abaixo	415	0.87	0.91	-9.1%

Fonte: Autora.

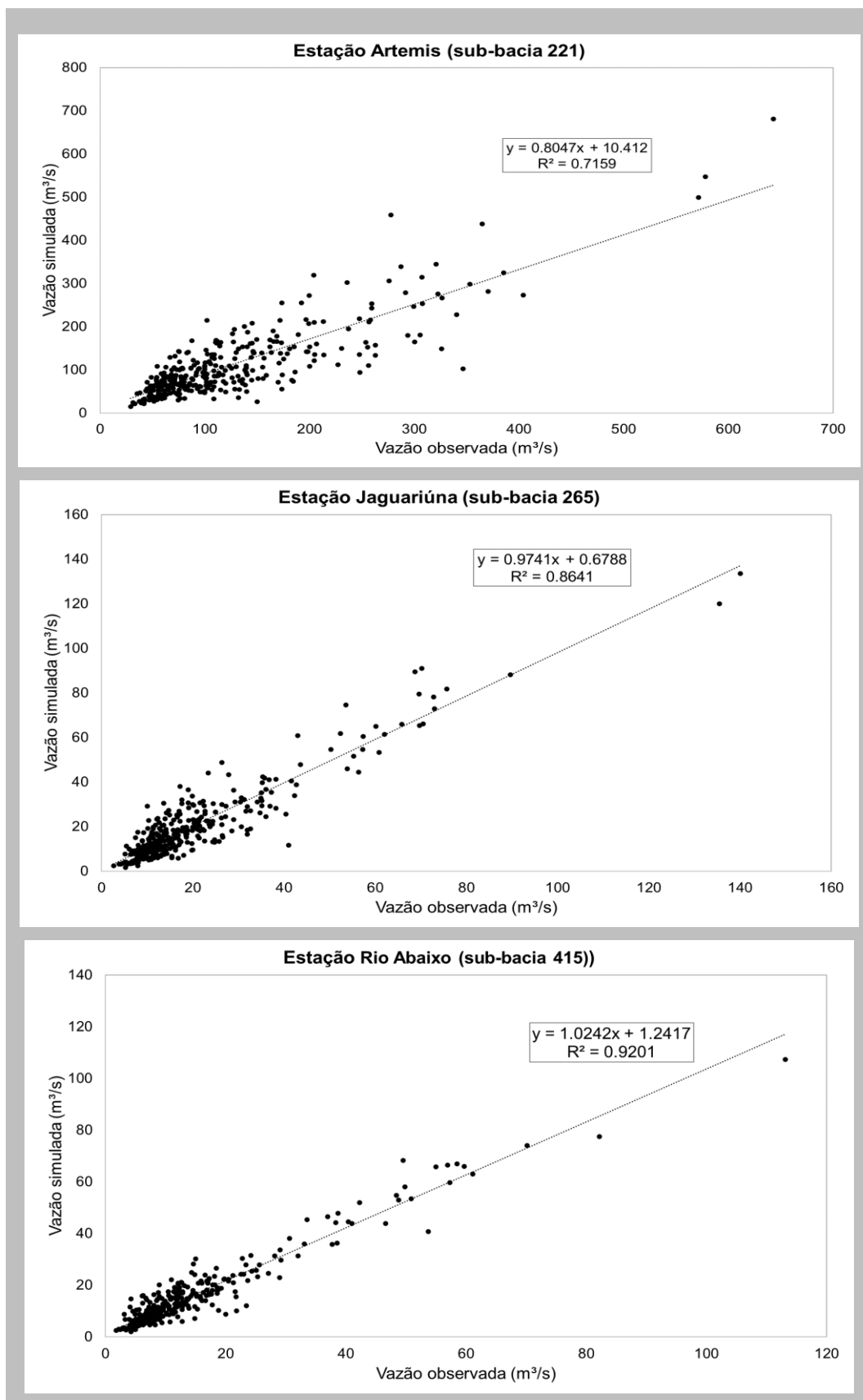
De acordo com a Tabela 25, para a validação, o modelo é classificado como satisfatório (estação Artemis) e muito bom (estação Jaguariúna e Rio Abaixo). As diferenças na classificação das estações atribuem-se à grande área de drenagem que abrange a estação Artemis (10900 Km²), mais de 90% da área de drenagem da bacia do rio Piracicaba, além da heterogeneidade nas características físicas da bacia. O anterior é confirmado na Figura 12, é possível observar que a dispersão da vazão nas estações fluviométricas calibradas e validadas de Rio Abaixo e Jaguariúna é pequena em comparação da estação Artemis. Os resultados obtidos do coeficiente de Nash-Sutcliffe, indicam que o modelo hidrológico tem um desempenho eficiente para simular as condições da bacia do rio Piracicaba.

Tabela 25 - Resultados das métricas de rendimento da validação para o período 2000-2011.

Estação	Sub-bacia	NSE	R²	Pbias
Artemis	221	0.63	0.69	13.7%
Jaguariúna	265	0.85	0.86	-8.7%
Rio Abaixo	415	0.91	0.93	-18.3%

Fonte: Autora.

Figura 12 – Dispersão dos dados de vazão mensal (m³/s) observada e simulada nas estações fluviométricas Artemis, Jaguariúna e Rio Abaixo, para o período 1984-2011.



Fonte: Autora.

Outra estatística de desempenho avaliada no modelo hidrológico foi a porcentagem PBIAS, é uma métrica apropriada para avaliar a robustez do modelo para fazer previsões porque descreve a tendência dos dados simulados (DA SILVA *et al.*, 2015; MORIASI *et al.*, 2007). Para a calibração, o modelo foi classificado como muito bom para as três estações fluviométricas calibradas ($PBIAS < \pm 10\%$). Para a validação foi classificado como bom, muito bom e satisfatório, para as estações fluviométricas, Artemis, Jaguariúna e Rio Abaixo, respectivamente. Estas estatísticas na porcentagem PBIAS indicam a robustez do modelo hidrológico para prever o comportamento hidrológico na área de estudo para períodos futuros.

Molin (2014) obteve valores de PBIAS semelhantes na porcentagem BIAS, para a calibração e validação do modelo hidrológico da bacia do rio Piracicaba, sendo menores a 15.81%. Também Queiroz (2014) obteve resultados semelhantes para a porcentagem BIAS na simulação da bacia do rio Piracicaba, com valores de 14.9% para a calibração e de 6.9% para a validação, confirmando a semelhança nos resultados obtidos neste estudo.

Comparando as estatísticas de desempenho do modelo calibrado com resultados da literatura em estudos de modelos hidrológicos no SWAT na bacia do rio Piracicaba, Molin (2014) obteve valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe superiores a 0.66 para as estações fluviométricas calibradas na bacia do rio Piracicaba e argumentou que o modelo hidrológico foi eficiente para simular as condições da bacia. Também Laurentis (2012) encontrou resultados semelhantes no desempenho do modelo hidrológico da bacia do rio Piracicaba, o coeficiente de Nash-Sutcliffe, reportando valores entre 0.53 e 0.90 nas estações fluviométricas calibradas e validadas. Estes resultados indicam que o modelo hidrológico da bacia do rio Piracicaba deste estudo, pode ser usado para predição das influências individuais e combinadas das mudanças climáticas e mudanças no uso da terra e da cobertura do solo.

Para a análise de incertezas foi analisado o hidrograma das vazões calibradas e validadas com o intervalo de confiança de 95% (faixa de cor verde) apresentado na Figura 11. Outro indicativo da abrangência do intervalo de confiança para as sub-bacias 221, 265 e 415 foi avaliado mediante o p-valor. Na calibração, os valores de p-valor para as sub-bacias 221, 265 e 415 foram de 0.68, 0.58 e 0.59. Estes resultados confirmam que mais da metade dos valores estão inclusos na faixa de confiança de 95% (95PPU).

A partir dos resultados obtidos, o modelo hidrológico da bacia do rio Piracicaba resulta ser eficiente para simular adequadamente as condições da bacia para o período histórico. Portanto, considera-se um modelo adequado para fazer previsões futuras na simulação das mudanças climáticas e nas mudanças no uso da terra.

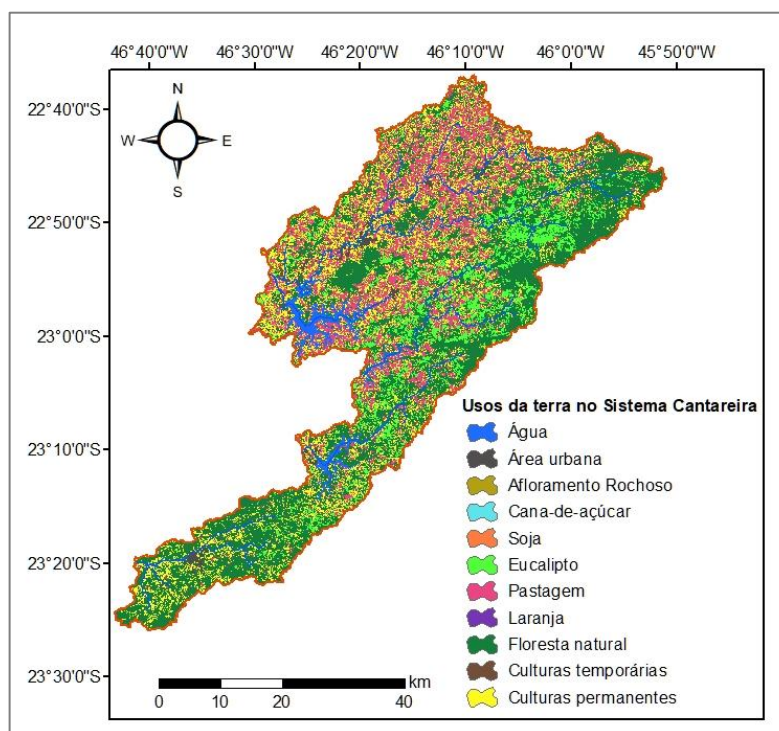
5.2. Obtenção de vazões futuras a jusante dos reservatórios do Sistema Cantareira destinadas para a bacia de Piracicaba

5.2.1. Simulação hidrológica dos reservatórios do Sistema Cantareira

Na delimitação das bacias que contém os reservatórios do Sistema Cantareira no modelo hidrológico SWAT, foram obtidas 57 sub-bacias, sendo de interesse as sub-bacias localizadas a montante de cada um dos reservatórios, para obter as vazões naturais afluentes a cada um deles.

Para a delimitação e simulação das bacias que contém reservatórios do Sistema Cantareira foram obtidos os mapas com as classes do uso da terra, as classes dos tipos de solos e as classes da declividade nesta área. De acordo com a Figura 13 e a Tabela 26, os principais usos da terra e ocupações dos solos nas bacias do Sistema Cantareira definidos no SWAT foram área florestal (44.7%), culturas perenes (21.34%), pastagem (19.23%) e eucalipto (9.58%).

Figura 13 - Usos da terra no Sistema Cantareira.



Fonte: Autora.

Tabela 26 - Usos da terra e suas correspondentes áreas nas bacias que contém os reservatórios do Sistema Cantareira.

Uso da terra	Uso da terra no SWAT	Area (ha)	Area (%)
Area Urbana	URBN	3130.5	1.3
Mata nativa	FRSE	108539.8	44.7
Eucalipto	PINE	23267.3	9.58
Pastagem	PAST	46696.1	19.23
Cana-de-açúcar	SUGC	26.8	0.01
Culturas perenes	AGRL	51805.4	21.34
Afloramento rochoso	SWRN	243.9	0.1
Água	WATR	7309.9	3.01
Laranja	ORAN	3.05	0.001
Soja	SOYB	180.9	0.07
Culturas temporárias	AGRRL	1568.7	0.65

Fonte: Autora.

Os tipos de solos das bacias que contém os reservatórios do Sistema Cantareira são Latossolo Vermelho-Amarelo (70.26%), Argissolo Vermelho-Amarelo (28.9%) e Latossolo Vermelho (0.84%) (Tabela 27).

Tabela 27 – Tipos de solos nas bacias que contém os reservatórios do Sistema Cantareira.

Nome no SWAT	Descrição	Area (%)
LVA	Latossolo Vermelho-Amarelo	70.26
LV	Latossolo Vermelho	0.84
PVA	Argissolo Vermelho-Amarelo	28.9

Fonte: Autora.

As classes de declividade das bacias do Sistema Cantareira de acordo com o modelo SWAT, 39.19% da área da bacia tem declividade entre 30% e 100%, seguida por 25.84% da área da bacia tem declividade entre 20 e 30%, evidenciando que as áreas do Sistema Cantareira têm altas declividades (Tabela 28).

Tabela 28 – Classes de declividade nas bacias dos reservatórios do Sistema Cantareira.

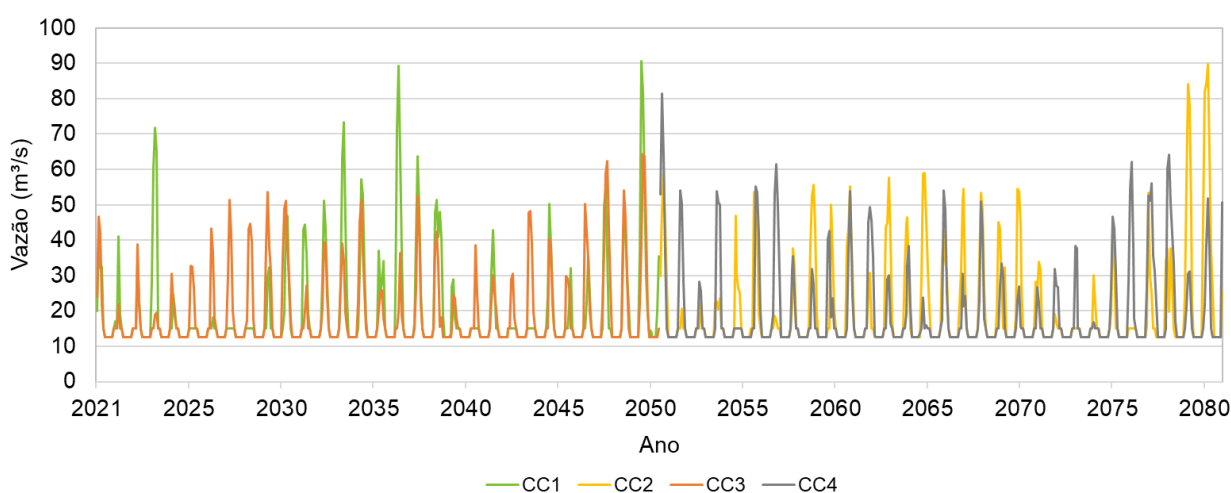
Declividade (%)	Area (ha)	Area (%)
0-5	13665.7	5.63
5-10	18259.8	7.52
10-20	52972.6	21.82
20-30	62742.7	25.84
30-100	95161.5	39.19

Fonte: Autora.

5.2.2. Cálculo de vazões a jusante dos reservatórios do Sistema Cantareira destinadas para a bacia do rio Piracicaba

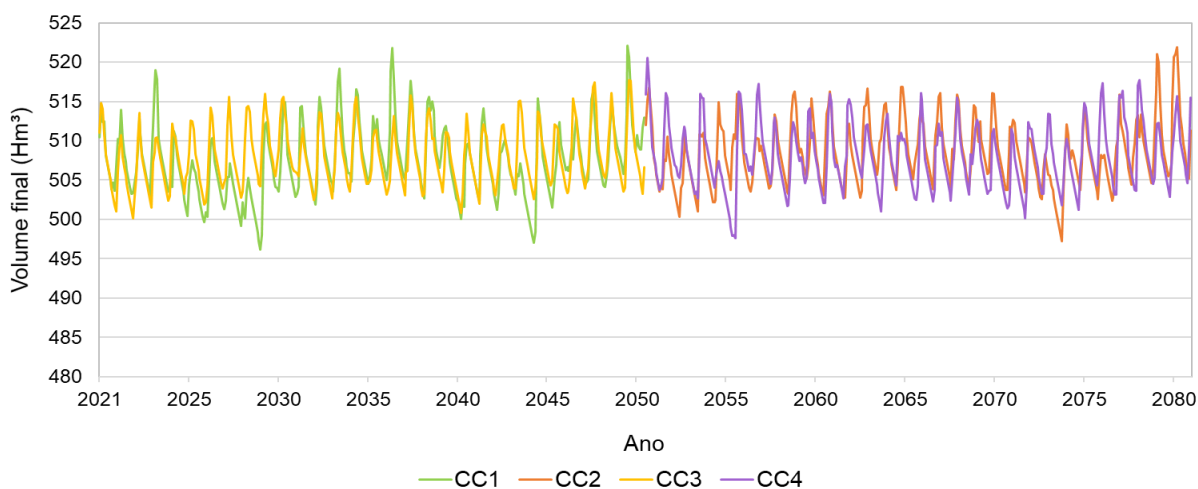
Na Figura 14 é apresentado o gráfico do comportamento das vazões futuras a jusante dos reservatórios do Sistema Cantareira que são destinadas à bacia do rio Piracicaba para todos os cenários de mudanças climáticas com as regras de operação atuais. Os picos mais altos das vazões encontram-se nos cenários CC1 e CC2, de forçamento médio de SSP2-4.5, evidenciando uma maior quantidade de água liberada para a bacia do rio Piracicaba proveniente dos reservatórios do Sistema Cantareira.

Figura 14 – Gráfico do comportamento das vazões futuras a jusante dos reservatórios do Sistema Cantareira que são destinadas à bacia do rio Piracicaba.



Na Figura 15 é apresentado o gráfico do comportamento do volume total dos reservatórios do Sistema Cantareira para todos os cenários futuros de mudanças climáticas. O gráfico evidencia que não tem diferenças significativas ($p > 0.05$) entre os cenários avaliados.

Figura 15 - Gráfico do comportamento do volume total dos reservatórios do Sistema Cantareira.



5.3. Cenários futuros de mudanças climáticas

Para executar o objetivo geral desta pesquisa, cenários de mudanças climáticas sem mudanças no uso da terra, na bacia do rio Piracicaba foram simulados no SWAT e os resultados obtidos são descritos no numeral 5.2.3. Depois de simular estes cenários, foram simulados cenários de mudanças no uso da terra para cada cenário de mudanças climáticas e os resultados são descritos no numeral 5.3. A identificação dos cenários é definida na Tabela 29 para facilitar a apresentação dos resultados.

Tabela 29 – Identificação e descrição dos cenários futuros de mudanças climáticas.

Nome do cenário	Descrição
CC1	SSP 2 - 4.5 para o período 2021-2050
CC2	SSP 2 - 4.5 para o período 2051-2080
CC3	SSP 5 - 8.5 para o período 2021-2050
CC4	SSP 5 - 8.5 para o período 2051-2080

Fonte: Autora.

5.3.1. Seleção do modelo climático global

A ferramenta GCMeval (PARDING *et al.*, 2020) avaliou 178 modelos climáticos globais do conjunto CMIP6 e realizou a classificação dos melhores modelos climáticos globais, apresentada na Tabela 30, sendo o modelo climático global GFDL-ESM4, com etiqueta da variante r1i1p1f1, classificado como o melhor modelo climático global. Esta etiqueta da variante refere-se à composição de quatro índices relacionados com atributos globais (TAYLOR *et al.*, 2018).

Tabela 30 – Classificação dos melhores modelos climáticos globais, utilizando a ferramenta GCMeval (PARDING *et al.*, 2020).

Nome do GCM	Ranking do GCMeval
GFDL-ESM4 (r1i1p1f1)	1
MPI-ESM1-2-HR (r2i1p1f1)	2
MPI-ESM1-2-HR (r1i1p1f1)	3
HadGEM3-GC31-LL (r2i1p1f3)	4
HadGEM3-GC31-MM (r3i1p1f3)	5
HadGEM3-GC31-MM (r4i1p1f3)	6
HadGEM3-GC31-LL (r4i1p1f3)	7
HadGEM3-GC31-MM (r1i1p1f3)	8
HadGEM3-GC31-LL (r3i1p1f3)	9
HadGEM3-GC31-LL (r1i1p1f3)	10

Fonte: Autora.

De acordo com a anterior classificação, foi escolhido só o modelo climático global da primeira posição do ranking, sendo o GCM identificado como, GFDL-ESM4 (GUO *et al.*, 2018), desenvolvido pelo *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (ou também conhecido pelo seu acrônimo GFDL).

A escolha deste modelo é consistente e é confirmado por Luo *et al.* (2022). Eles avaliaram a confiabilidade de seis modelos do CMIP5 e na versão correspondente desses modelos do CMIP6, para representar as características climáticas e a precipitação na China e encontraram que os modelos com melhor representação foram GFDL-CM e GFDL-ESM. Embora a área de estudo de Luo *et al.* (2022) é diferente, os resultados confirmam a confiabilidade para utilizar o modelo GFDL-ESM nas simulações das mudanças climáticas futuras na bacia do rio Piracicaba.

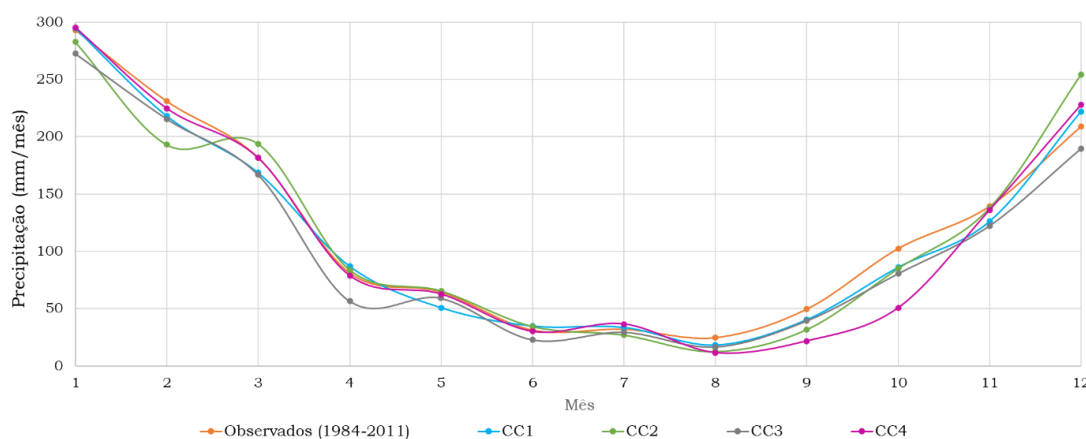
5.3.2. Avaliação das variáveis climáticas provenientes do modelo climático global

Variáveis climáticas futuras de precipitação, radiação solar, umidade relativa, velocidade do vento, temperatura mínima e máxima foram obtidas do modelo climático global, identificado como GFDL-ESM4 e foi realizada uma correção por redução de escala nos dados obtidos para ajustá-los às condições da área de estudo. A precipitação, a temperatura mínima e a temperatura máxima foram analisadas, sendo as variáveis de maior influência nos processos hidrológicos.

❖ Precipitação

Na Figura 15 é apresentado o gráfico da precipitação mensal na bacia do rio Piracicaba para os dados históricos no período 1984-2011 e para os dados dos cenários futuros de mudanças climáticas, definidos na Tabela 29. A partir dos valores históricos de precipitação, os meses com valores de precipitação altos foram desde outubro até março e os meses com valores de precipitação baixos foram desde abril até setembro. O mês com o valor máximo de precipitação dos dados observados foi no mês de janeiro, com um valor de 293.15 mm/mês, enquanto o valor mínimo de precipitação foi no mês de agosto, com um valor de 24.86 mm/mês. O cenário CC3 apresenta menores valores de precipitação que os dados observados e os cenários CC1 e CC4. O cenário CC2 e CC4 apresentam maior variabilidade ao longo do tempo, que correspondem ao mesmo período de 2051-2080, com cenários de emissões diferentes.

Figura 16 – Precipitação mensal [mm/mês] na bacia do rio Piracicaba.

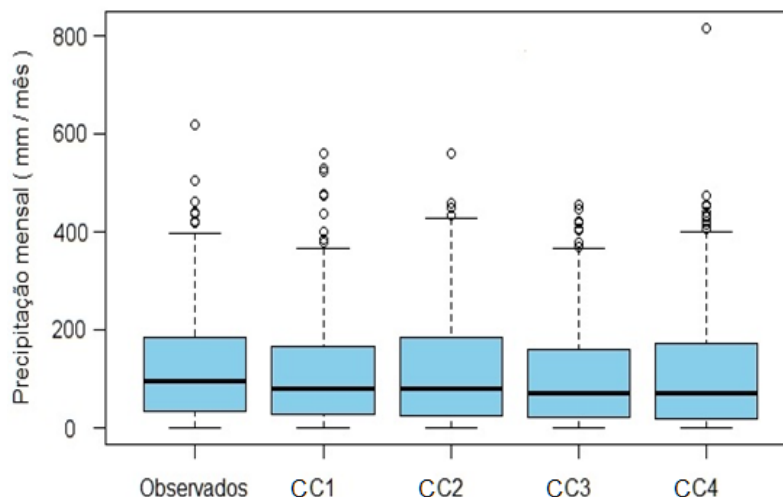


Fonte: Autora.

De maneira geral, para todas as series analisadas na Figura 15, o valor mínimo de precipitação foi observado no mês de agosto para o cenário CC4 (11.61 mm/mês) e o valor máximo de precipitação foi observado no mês de janeiro para o mesmo cenário CC4 (295.38 mm/mês). Este cenário CC4 corresponde ao cenário de emissões pessimista a longo prazo (SSP 5-8.5 para o período 2051-2080). No entanto, pelo teste de Tukey não foram encontradas diferenças significativas ($p < 0.05$) nas series avaliadas como são observados na Tabela X.

A Figura 17 apresenta os diagramas de caixa dos dados de precipitação mensal dos dados históricos e dos cenários de mudanças climáticas, definidos na Tabela 29.

Figura 17 – Diagramas de caixa dos dados de precipitação mensal para os dados observados (1975-2011) e os cenários futuros definidos na Tabela 29.



Fonte: Autora.

Analisando a série dos dados observados, a precipitação média foi de 126.4 mm/mês e a mediana foi de 109.7 mm/mês. Enquanto as médias dos cenários CC1, CC2, CC3 e CC4 foram de 117.76 mm/mês, 119.3 mm/mês, 109.3 mm/mês e 115.3 mm/mês, respectivamente e as medianas foram de 86.3 mm/mês, 85 mm/mês, 76.6 mm/mês e 73.9 mm/mês, respectivamente. As médias para todos os cenários futuros foram maiores às medianas, evidenciando que os diagramas de caixa são assimétricos para baixo e demonstrando que a maioria dos dados de precipitação são menores às médias dos cenários.

Estes resultados permitem apreciar que a precipitação dos cenários futuros em comparação à precipitação observada diminuiu em 17.1 mm/mês e pelo teste de Tukey, a precipitação mensal dos cenários de mudanças climáticas não teve diferenças significativas ($p < 0.05$).

A longitude da caixa e dos bigodes dos cenários CC2 e CC4 foram maiores, evidenciando uma maior variabilidade dos dados de precipitação nestes cenários, devido a presença de valores maiores de precipitação nestes cenários, além dos valores atípicos.

Observou-se que todos os cenários possuíam valores atípicos acima do quartil superior. Também é possível observar que o cenário CC3 apresenta valores atípicos menores aos dos outros cenários. O cenário CC4 apresenta o maior valor atípico, com um valor de 830.1 mm/mês.

Por último, o teste de Mann-Kendall foi aplicado nas séries de precipitação com o fim de avaliar a tendência ao longo do tempo destas séries e os resultados

são apresentados na Tabela 31. As séries de precipitação para os cenários de mudanças climáticas e da série dos dados históricos não tiveram tendências significativas ao longo do tempo, evidenciando que a precipitação média na bacia não teve incremento ou diminuição significativa ao longo do tempo.

Tabela 31 – Resultados do teste de tendência Mann-Kendall na precipitação dos cenários de mudanças climáticas e dos históricos.

Cenário	SSP	Período	S	Z	p-valor	Tendência
Históricos	-	1984-2011	934	0.355	0.723	Não há
CC1	SSP2-4.5	2021-2050	707	0.309	0.757	Não há
CC2	SSP2-4.5	2051-2080	334	0.146	0.884	Não há
CC3	SSP5-8-5	2021-2050	-2119	0.928	0.353	Não há
CC4	SSP5-8-5	2051-2080	-4308	1.888	0.059	Não há

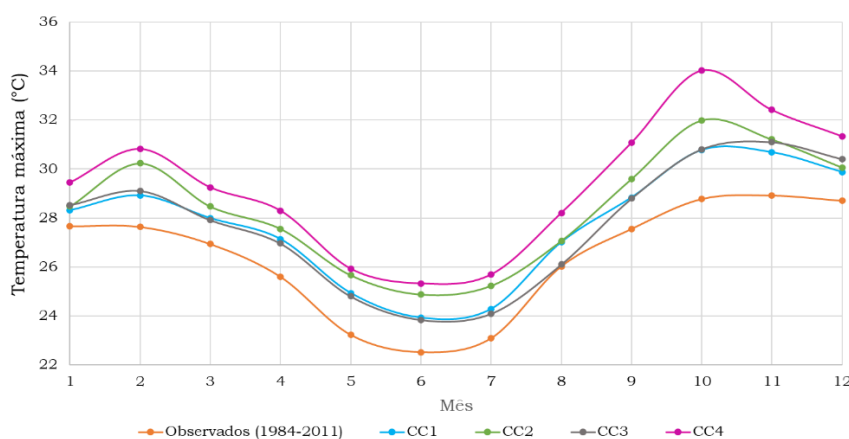
Fonte: Autora.

Assim, é possível concluir que a precipitação mensal dos cenários futuros de mudanças climáticas não teve diferenças significativas e não teve mudanças na tendência dos dados ao longo do tempo. No entanto, entre os cenários futuros e os dados históricos de precipitação mensal houve uma diminuição máxima não significativa, na precipitação mensal de 17.1 mm/mês e os cenários CC2 e CC4 tiveram maior variabilidade dos dados devido a presença de valores maiores de precipitação.

❖ Temperatura máxima

Na Figura 18 é apresentado o gráfico da média da temperatura máxima na bacia do rio Piracicaba para os dados históricos no período 1984-2011 e para os dados dos cenários futuros de mudanças climáticas, definidos na Tabela 29.

Figura 18 – Média da temperatura máxima mensal [°C] na bacia do rio Piracicaba.



Fonte: Autora.

Analisando as series dos cenários de mudanças climáticas, a série que apresentou os maiores valores de temperatura máxima mensal foi o cenário CC4 correspondente ao cenário de emissões pessimista a longo prazo (SSP 5-8.5 para o período 2051-2080), seguido pelo cenário CC2 correspondente ao cenário de emissões intermédio a longo prazo (SSP 5-8.5 para o período 2051-2080). Enquanto aos cenários CC1 e CC3, correspondentes aos cenários do período a médio prazo, observou-se que estas series ficaram muito próximas entre si.

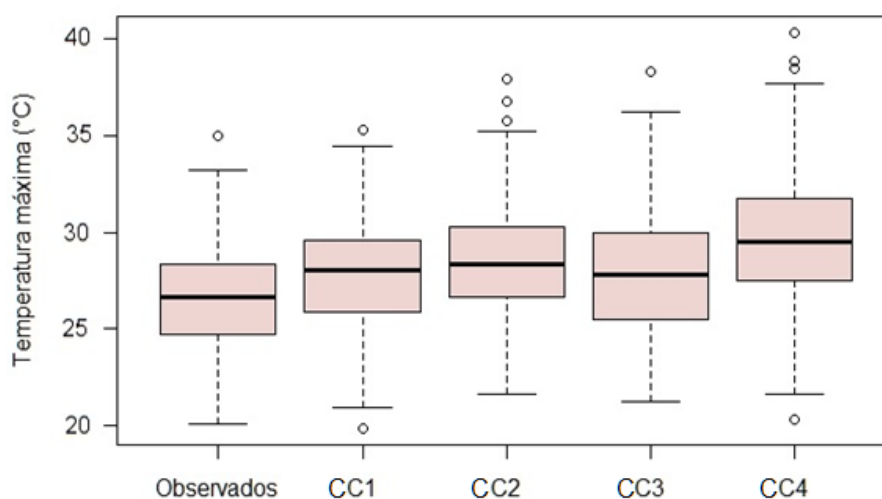
O valor máximo de temperatura máxima para o cenário CC4 foi de 34.04°C no mês de outubro e o valor mínimo deste cenário foi de 25.32°C no mês de junho.

A partir dos valores históricos de temperatura máxima, o valor máximo foi de 28.92°C em novembro e o valor mínimo foi de 22.52°C em junho. A serie dos valores observados de temperatura máxima foram os valores mais baixos em comparação as series dos cenários futuros definidos na Tabela 29.

Entre os dados observados e o cenário CC4, as diferenças dos valores mínimos atingidos ao longo do tempo foi de 2.8°C e as diferenças nos valores máximos destas duas series ao longo do tempo foi de 5.1°C. A partir do teste de Tukey, verificou-se que houve diferenças significativas ($p < 0.05$) entre os cenários CC4 e os dados observados para esta variável.

A Figura 19 apresenta os diagramas de caixa a média dos dados de temperatura máxima mensal dos dados observados e dos cenários de mudanças climáticas, definidos na Tabela 29.

Figura 19 – Diagramas de caixa da média dos dados da temperatura máxima para os dados observados (1975-2011) e os cenários futuros definidos na Tabela 29.



Fonte: Autora.

Da serie dos dados históricos, a média da temperatura máxima foi de 26.5°C e a mediana foi de 26.7°C. Enquanto as médias dos cenários CC1, CC2, CC3 e CC4 foram de 27.9°C, 28.5°C, 27.9°C e 29.5°C, respectivamente e as medianas foram de 28.0°C, 28.37°C, 27.81°C e 29.51°C, respectivamente. As médias e as medianas tiveram valores muito próximos entre si, evidenciando que os diagramas de caixa são simétricos para cada série. Os maiores valores das médias da temperatura máxima foram nos cenários CC2 e CC4

A diferença da temperatura máxima dos cenários futuros em relação à observada aumentou em 1.4°C para os cenários futuros a médio prazo (2021-2050) e aumentou em 3°C para os cenários futuros a longo prazo (2051-2080).

Observou-se que todos os cenários possuíam valores atípicos e o cenário CC4 apresentou novamente o maior valor atípico, com um valor de 40.29°C.

Por último, o teste de Mann-Kendall foi aplicado nas séries de temperatura máxima com o fim de avaliar a tendência ao longo do tempo destas séries e os resultados são apresentados na Tabela 32. As séries de temperatura máxima dos dados históricos e das séries dos cenários de mudanças climáticas CC3 e CC4, correspondentes aos cenários de emissões altas de gases de efeito estufa, SSP5-8.5, a médio e longo prazo, tiveram uma tendência crescente significativa ao longo do tempo, evidenciando um aumento da temperatura máxima.

No entanto, as séries dos cenários de mudanças climáticas CC1 e CC2, correspondentes aos cenários de emissões intermediárias de gases de efeito estufa, SSP2-4.5, a médio e longo prazo, evidenciaram que a temperatura máxima na bacia para estas séries não teve incremento ou diminuição significativa ao longo do tempo.

Tabela 32 – Resultados do teste de tendência Mann-Kendall na temperatura máxima dos cenários de mudanças climáticas e dos históricos.

Cenário	SSP	Período	S	Z	p-valor	Tendência
Históricos	-	1984-2011	5085	2.228	0.0259	Crescente
CC1	SSP2-4.5	2021-2050	2591	1.135	0.2563	Não há
CC2	SSP2-4.5	2051-2080	1332	0.583	0.5596	Não há
CC3	SSP5-8-5	2021-2050	6135	2.689	0.0072	Crescente
CC4	SSP5-8-5	2051-2080	8430	3.694	2.20E-04	Crescente

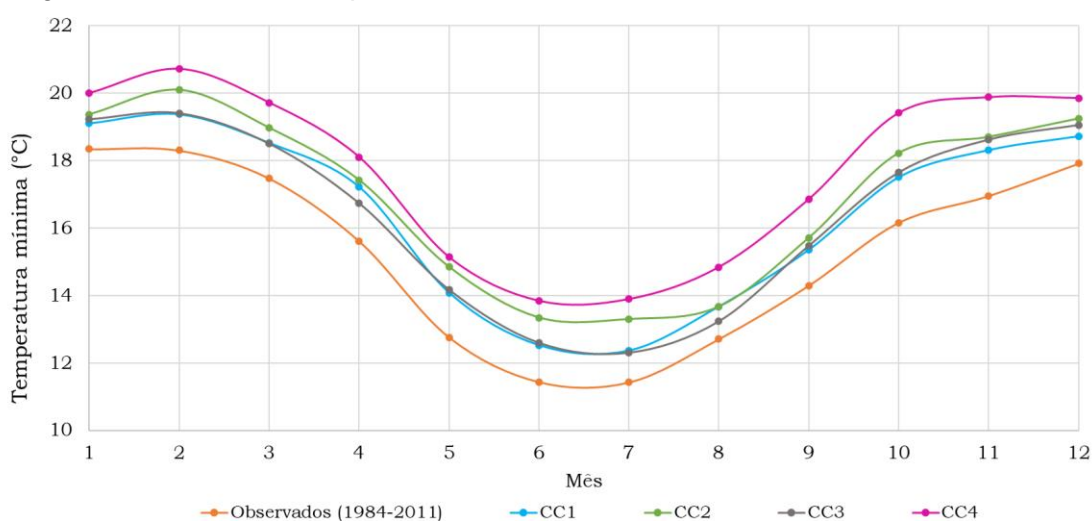
Fonte: Autora.

Assim, é possível concluir que os cenários com maiores valores da temperatura máxima foram CC2 e CC4, evidenciando um aumento não significativo na temperatura máxima de 1.4°C a médio prazo (2021-2050) e um aumento significativo de 3°C a longo prazo (2051-2080) na bacia do rio Piracicaba.

❖ Temperatura mínima

Na Figura 20 é apresentado o gráfico da média da temperatura mínima na bacia do rio Piracicaba para os dados observados no período 1984-2011 e para os dados dos cenários futuros de mudanças climáticas, definidos na Tabela 29.

Figura 20 – Média da temperatura mínima mensal [°C] na bacia do rio Piracicaba.



Fonte: Autora.

Das séries dos cenários de mudanças climáticas, CC2 e CC4 foram as que tiveram os maiores valores de temperatura mínima ao longo do tempo. Estes cenários correspondem ao período de análise ao longo prazo (2051-2080). Enquanto, a série com os menores valores de temperatura mínima ao longo do tempo, foi a série dos dados observados. Também é possível observar que as séries dos cenários CC1 e CC3, correspondentes ao período a médio prazo, ficaram muito próximas entre si. Sendo repetido o comportamento observado para a média da temperatura máxima mensal.

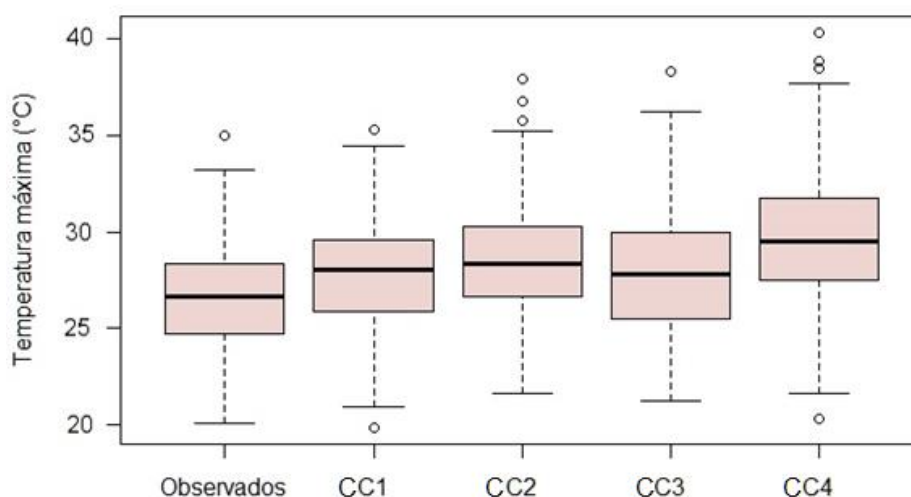
O valor mínimo da média da temperatura mínima para o cenário CC4 foi de 13.84°C no mês de junho e o valor máximo desta série, CC4 foi de 20.72°C no mês de fevereiro.

A partir dos valores observados de temperatura mínima, o valor mínimo foi de 11.43°C em julho e o valor máximo foi de 18.35°C em janeiro. A série dos valores observados de temperatura mínima foram os valores mais baixos em comparação as séries dos cenários futuros definidos na Tabela 29.

Entre os dados observados e o cenário CC4, as diferenças dos valores mínimos e máximos atingidos ao longo do tempo foi de 2.4°C.

A Figura 21 apresenta os diagramas de caixa da média dos dados de temperatura mínima mensal dos dados históricos e dos cenários de mudanças climáticas.

Figura 21 – Diagrama de caixa da média dos dados da temperatura mínima para os dados observados (1975-2011) e os cenários futuros definidos na Tabela 29. -2080).



Fonte: Autora.

Da série dos dados históricos do diagrama de caixa da Figura 21, a média da temperatura mínima foi de 15.2°C e a mediana foi de 15.8 °C. Enquanto as médias dos cenários CC1, CC2, CC3 e CC4 foram de 16.5°C, 17.0°C, 16.5°C e 17.8°C, respectivamente e as medianas foram de 17.1°C, 17.6°C, 17.2°C e 18.6°C, respectivamente. Os maiores valores das médias e medianas da temperatura mínima foram nos cenários CC2 e CC4, repetindo o mesmo comportamento observado na temperatura máxima. No entanto, esta variável não possuía valores atípicos na Figura 20.

A diferença da temperatura mínima dos cenários futuros em relação à histórica aumentou em 1.3°C para os cenários futuros a médio prazo (2021-2050) e aumentou em 2.6°C para os cenários futuros a longo prazo (2051-2080).

Por último, o teste de Mann-Kendall foi aplicado nas séries de temperatura mínima com o fim de avaliar a tendência ao longo do tempo destas séries e os resultados são apresentados na Tabela 33. As séries de temperatura mínima dos dados históricos e das séries dos cenários de mudanças climáticas CC3 e CC4, correspondentes aos cenários de emissões altas de gases de efeito estufa, SSP5-

8.5, a médio e longo prazo, tiveram uma tendência crescente significativa ao longo do tempo, evidenciando um aumento significativo na temperatura mínima.

No entanto, as séries dos cenários de mudanças climáticas CC1 e CC2, correspondentes aos cenários de emissões intermediárias de gases de efeito estufa, SSP2-4.5, a médio e longo prazo, evidenciaram que a temperatura mínima na bacia para estas séries não teve incremento ou diminuição significativa ao longo do tempo.

Tabela 33 – Resultados do teste de tendência Mann-Kendall na temperatura mínima dos cenários de mudanças climáticas e dos históricos.

Cenário	SSP	Período	S	Z	p-valor	Tendência
Históricos	-	1984-2011	2556	1.120	0.2628	Não há
CC1	SSP2-4.5	2021-2050	1464	0.641	0.5214	Não há
CC2	SSP2-4.5	2051-2080	2556	1.1199	0.26277	Não há
CC3	SSP5-8-5	2021-2050	5638	2.471	0.0135	Crescente
CC4	SSP5-8-5	2051-2080	7354	3.223	1.27E-03	Crescente

Fonte: Autora.

Em resumo, é possível afirmar que para as variáveis climáticas analisadas, nos cenários CC2 e CC4 apresentaram maior variabilidade na precipitação e tiveram os maiores valores na temperatura máxima e mínima, ao longo do tempo. Estes cenários têm em comum o período de análise, correspondente ao período a longo prazo, 2051-2080, apresentando mudanças nas variáveis climáticas a longo prazo. A média da temperatura mínima mensal aumentou 1.3°C a médio prazo e 2.6°C a longo prazo. Enquanto a média da temperatura máxima mensal aumentou 1.4°C a médio prazo e 3°C a longo prazo na bacia do rio Piracicaba.

5.3.3. Simulações dos cenários de mudanças climáticas no SWAT

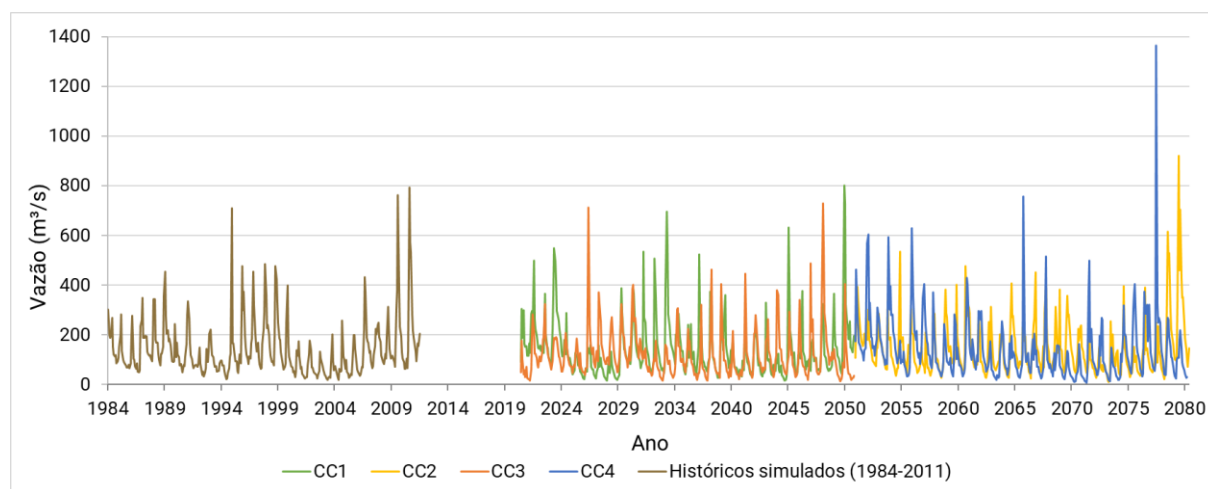
As variáveis climáticas são consideradas elementos de entrada no modelo hidrológico no SWAT, que influenciam consideravelmente nos processos hidrológicos da bacia. Depois de avaliar as variáveis climáticas no numeral anterior 5.2.2, foram avaliadas as vazões da bacia do rio Piracicaba, a partir dos cenários de mudanças climáticas (Tabela 29).

A Figura 21 apresenta o comportamento da vazão mensal futura na sub-bacia localizada no exutório da bacia do rio Piracicaba. As médias das vazões dos cenários CC1, CC2, CC3 e CC4 foram de 142.1 m³/s, 144.8 m³/s, 120.8 m³/s e 140.1 m³/s, respectivamente. Enquanto as medianas para os cenários CC1, CC2, CC3 e

CC4 foram de 107.7 m³/s, 109.7 m³/s, 94.7 m³/s e 101.3 m³/s, respetivamente. Observou-se que as médias dos cenários futuros foram maiores às medianas, evidenciando que os diagramas de caixa são assimétricos para baixo e demonstrando que a maioria dos dados de vazão são menores às médias dos cenários. Este comportamento é similar ao observado na análise de precipitação destes cenários no numeral 915.2.2.

A média dos valores das vazões simuladas para o período histórico foi de 141.7 m³/s e a mediana foi de 107.7 m³/s. Estes valores são muito semelhantes com os valores obtidos dos cenários de mudanças climáticas.

Figura 22 – Gráfico do comportamento da vazão mensal futura no exutório da bacia do rio Piracicaba, sob quatro cenários de mudanças climáticas com relação a vazão mensal histórica simulada.



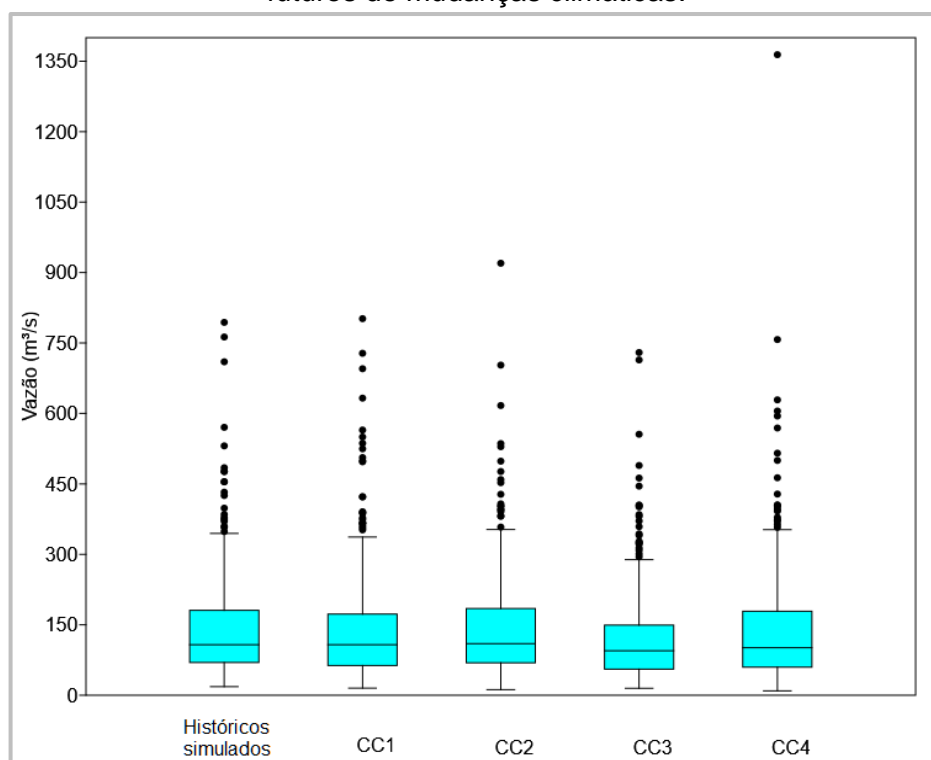
Fonte: Autora.

Também foi possível evidenciar na Figura 22, valores altos de vazões nos cenários CC2 e CC4, pertencentes ao período a longo prazo (2051-2080), sendo muito maiores ao valor máximo atingido dos valores simulados no período histórico de 794 m³/s, enquanto os cenários CC1 e os valores simulados históricos tem valores máximos de vazão muito próximos. O cenário CC3 apresenta um valor máximo de vazão de 729.8 m³/s, sendo menor ao valor máximo atingido pelos simulados no período histórico.

Com relação aos valores mínimos atingidos nas series analisadas, foi observado em todos os cenários de mudanças climáticas simulados atingiram valores inferiores ao valor mínimo atingido pela serie dos valores de vazões simulados para o período histórico.

Na Figura 23 foi possível observar os diagramas de caixa das vazões mensais futuras dos cenários de mudanças climáticas simulados no SWAT. Os cenários CC2 e CC4 apresentaram uma maior longitude da caixa e do bigode, além da existência de maiores valores atípicos, evidenciando uma variabilidade maior nestes cenários. Aplicando o teste de Tukey somente apresentam-se diferenças significativas entre os cenários CC2 e CC3 ($p - \text{valor} = 0.02738$).

Figura 23 – Diagrama de caixa das vazões mensais obtidas das simulações dos cenários futuros de mudanças climáticas.



Fonte: Autora.

Na Tabela 34 são apresentados os resultados obtidos do teste de Mann-Kendall para as vazões no exutório da bacia para os cenários futuros de mudanças climáticas e para as vazões históricas simuladas em SWAT. Os cenários CC3 e CC4, correspondentes ao cenário mais pessimista de emissões de gases de efeito estufa (SSP5-8.5), a médio e longo prazo, tiveram tendência decrescente significativa ($p < 0.05$) ao longo do tempo, confirmando a diminuição da vazão ao longo do tempo para o cenário de emissões mais pessimista.

Tabela 34 – Resultados do teste de tendência Mann-Kendall para séries das vazões históricas simuladas e dos cenários futuros de mudanças climáticas.

Cenário	SSP	Período	S	Z	p-valor	Tendência
Históricas simuladas	-	1984-2011	-3012	1.463	0.1434	Não há
CC1	SSP2-4.5	2021-2050	-4274	1.873	0.0611	Não há
CC2	SSP2-4.5	2051-2080	-4247	1.861	0.0627	Não há
CC3	SSP5-8-5	2021-2050	-6468	2.835	0.0046	Decrescente
CC4	SSP5-8-5	2051-2080	-10975	4.810	1.51E-06	Decrescente

Fonte: Autora.

Recapitulando, os cenários CC2 e CC4 tiveram maior variabilidade na precipitação e nas vazões no exutório da bacia, apresentando valores superiores e inferiores aos valores históricos destas variáveis. Outro comportamento semelhante foi a distribuição dos dados sendo que a maioria dos dados foram menores à média da precipitação e das vazões, respectivamente. É de ressaltar que em todos os cenários de mudanças climáticas foram obtidos valores mínimos inferiores ao obtido dos valores simulados do período histórico. Identificou-se diminuição na vazão para o cenário de emissões mais pessimista a médio e longo prazo.

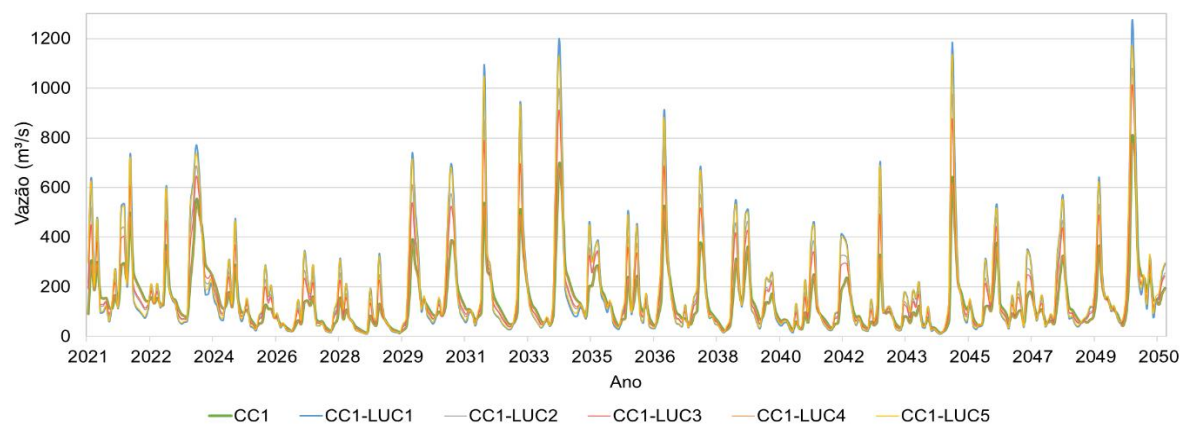
5.4. Simulações dos cenários de mudanças no uso da terra no SWAT

Cinco cenários futuros de mudanças no uso da terra foram simulados no SWAT, mantendo como referência, os cenários de mudanças climáticas obtidos e avaliados no numeral 5.2.3, com o fim de analisar as vazões na bacia do rio Piracicaba. Em total, foram simulados 20 cenários, com uma porcentagem de mudança de 70% da área para os usos da terra analisados e simulados nas piores condições de cobertura dos solos. Para identificação dos cenários foram nomeados pelo cenário de referência de mudanças climáticas, seguido pelo cenário de mudanças no uso da terra. Os cenários de mudanças no uso da terra definidos são descritos na Tabela 20.

Na Figura 24 observa-se o gráfico de vazões mensais futuras no exutório da bacia do rio Piracicaba para todos os cenários de referência de mudanças climáticas, CC1. Observa-se que os cenários CC1-LUC1 e CC1-LUC5 tiveram picos de vazões mais altos, sendo que os maiores foram atingidos no período a longo prazo (2051-2080). Também estes cenários tiveram diferenças significativas

($p < 0.05$) quando foram relacionados com o cenário de referência de mudanças climáticas CC1.

Figura 24 - Vazões mensais futuras no exutório na bacia do rio Piracicaba dos cenários de mudanças no uso da terra, tendo como referência o cenário de mudanças climáticas CC1.



Fonte: Autora.

Na Tabela 35 estão sintetizadas as estatísticas dos cenários de mudanças no uso da terra avaliados para o cenário de referência de mudanças climáticas CC1. A média de todos os cenários de mudanças no uso da terra foram maiores ao valor da média das vazões do cenário de referência de mudanças climáticas CC1 e ao valor da média da vazão simulada para o período histórico, aumentou 31%.

Tabela 35 – Estatísticas das simulações dos cenários de mudanças no uso da terra para o cenário de referência de mudanças climáticas CC1 (SSP 2 - 4.5 para o período 2021-2050).

Cenário	Média	Mediana	Mínimo	Máximo
CC1	142.1	107.7	15.11	801.8
CC1 - LUC1	185.9	109.25	10.42	1268
CC1 - LUC2	170.8	116.3	12.73	1068
CC1 - LUC3	161.7	11.65	12.99	1002
CC1 - LUC4	155.2	106.1	12.75	1015
CC1 - LUC5	186.4	113.45	11.17	1166

Fonte: Autora.

Assim como houve um aumento de 31% na média das vazões nos cenários das mudanças do uso na terra, também houve um incremento de 58% nos valores máximos de vazões e uma diminuição 31% dos valores mínimos das vazões dos cenários das mudanças no uso da terra. Este comportamento evidencia vazões máximas superiores às históricas e vazões mínimas inferiores às históricas, favorecendo a ocorrência de possíveis eventos extremos, traduzindo em possíveis panoramas de escassez hídrica e de inundações. Também é possível afirmar que os

efeitos das mudanças climáticas são intensificados com as mudanças no uso da terra.

Na Tabela 38 são apresentados os resultados obtidos do teste de Mann-Kendall para as vazões no exutório da bacia para os cenários futuros de mudanças no uso da terra para o cenário de mudanças climáticas CC1 (SSP2-4.5 para o período 2021-2050), simulados no SWAT. Todos os cenários não apresentaram tendências significativas ($p < 0.05$) ao longo do tempo, evidenciando que não houve incremento ou diminuição significativa ao longo do tempo, na vazão para cada uma das séries dos cenários avaliados.

Tabela 36 – Resultados do teste de tendência Mann-Kendall para as vazões dos cenários de mudanças no uso da terra para o cenário de mudanças climáticas de referência CC1 (SSP2-4.5 para o período 2021-2050).

Cenário	SSP	Período	S	Z	p-valor	Tendência
CC1-LUC1	SSP2-4.5	2021-2050	-919	0.402	0.6874	Não há
CC1-LUC2	SSP2-4.5	2021-2050	-2279	0.998	0.3181	Não há
CC1-LUC3	SSP2-4.5	2021-2050	-2701	1.183	0.2367	Não há
CC1-LUC4	SSP2-4.5	2021-2050	-3163	1.386	0.1658	Não há
CC1-LUC5	SSP2-4.5	2021-2050	-1037	0.454	0.6498	Não há

Fonte: Autora.

Na Tabela 37 são apresentados os resultados obtidos do teste de Mann-Kendall para as vazões no exutório da bacia para os cenários futuros de mudanças no uso da terra para o cenário de referência de mudanças climáticas CC2 (SSP2-4.5 para o período 2051-2080), simulados no SWAT. Os cenários avaliados na Tabela 37 não apresentaram tendências significativas ($p < 0.05$) ao longo do tempo, evidenciando que não houve incremento ou diminuição significativa na vazão.

Tabela 37 – Resultados do teste de tendência Mann-Kendall para as vazões dos cenários de mudanças no uso da terra para o cenário de mudanças climáticas de referência CC2 (SSP2-4.5 para o período 2051-2080).

Cenário	SSP	Período	S	Z	p-valor	Tendência
CC2-LUC1	SSP2-4.5	2051-2080	-1931	0.846	0.3976	Não há
CC2-LUC2	SSP2-4.5	2051-2080	-2759	1.209	0.2267	Não há
CC2-LUC3	SSP2-4.5	2051-2080	-2625	1.150	0.2501	Não há
CC2-LUC4	SSP2-4.5	2051-2080	-3041	1.332	0.1827	Não há
CC2-LUC5	SSP2-4.5	2051-2080	-1832	0.803	0.4223	Não há

Fonte: Autora.

Na Tabela 38 são apresentados os resultados do teste de Mann-Kendall para as vazões no exutório da bacia para os cenários de mudanças no uso da terra para o cenário de referência de mudanças climáticas CC3 (SSP5-8.5 para o período 2021-2050), simulados no SWAT. Os cenários avaliados na Tabela 38 apresentaram tendências decrescentes significativas ($p < 0.05$) ao longo do tempo, evidenciando que houve uma diminuição significativa na vazão.

Tabela 38 – Resultados do teste de tendência Mann-Kendall para as vazões dos cenários de mudanças no uso da terra para o cenário de mudanças climáticas de referência CC3 (SSP5-8.5 para o período 2021-2050).

Cenário	SSP	Período	S	Z	p-valor	Tendência
CC3-LUC1	SSP5-8-5	2021-2050	-5317	2.330	0.0198	Decrescente
CC3-LUC2	SSP5-8-5	2021-2050	-6031	2.643	0.0082	Decrescente
CC3-LUC3	SSP5-8-5	2021-2050	-6330	2.774	0.0055	Decrescente
CC3-LUC4	SSP5-8-5	2021-2050	-6722	2.946	0.0032	Decrescente
CC3-LUC5	SSP5-8-5	2021-2050	-5445	2.386	0.0170	Decrescente

Fonte: Autora.

Na Tabela 39 são apresentados os resultados do teste de Mann-Kendall para as vazões no exutório da bacia para os cenários de mudanças no uso da terra para o cenário de referência de mudanças climáticas CC4 (SSP5-8.5 para o período 2051-2080), simulados no SWAT. Estes cenários de mudanças no uso da terra apresentaram tendências decrescentes significativas ($p < 0.05$) ao longo do tempo, evidenciando que houve uma diminuição significativa na vazão.

Tabela 39 – Resultados do teste de tendência Mann-Kendall para as vazões dos cenários de mudanças no uso da terra para o cenário de mudanças climáticas de referência CC4 (SSP5-8.5 para o período 2051-2080).

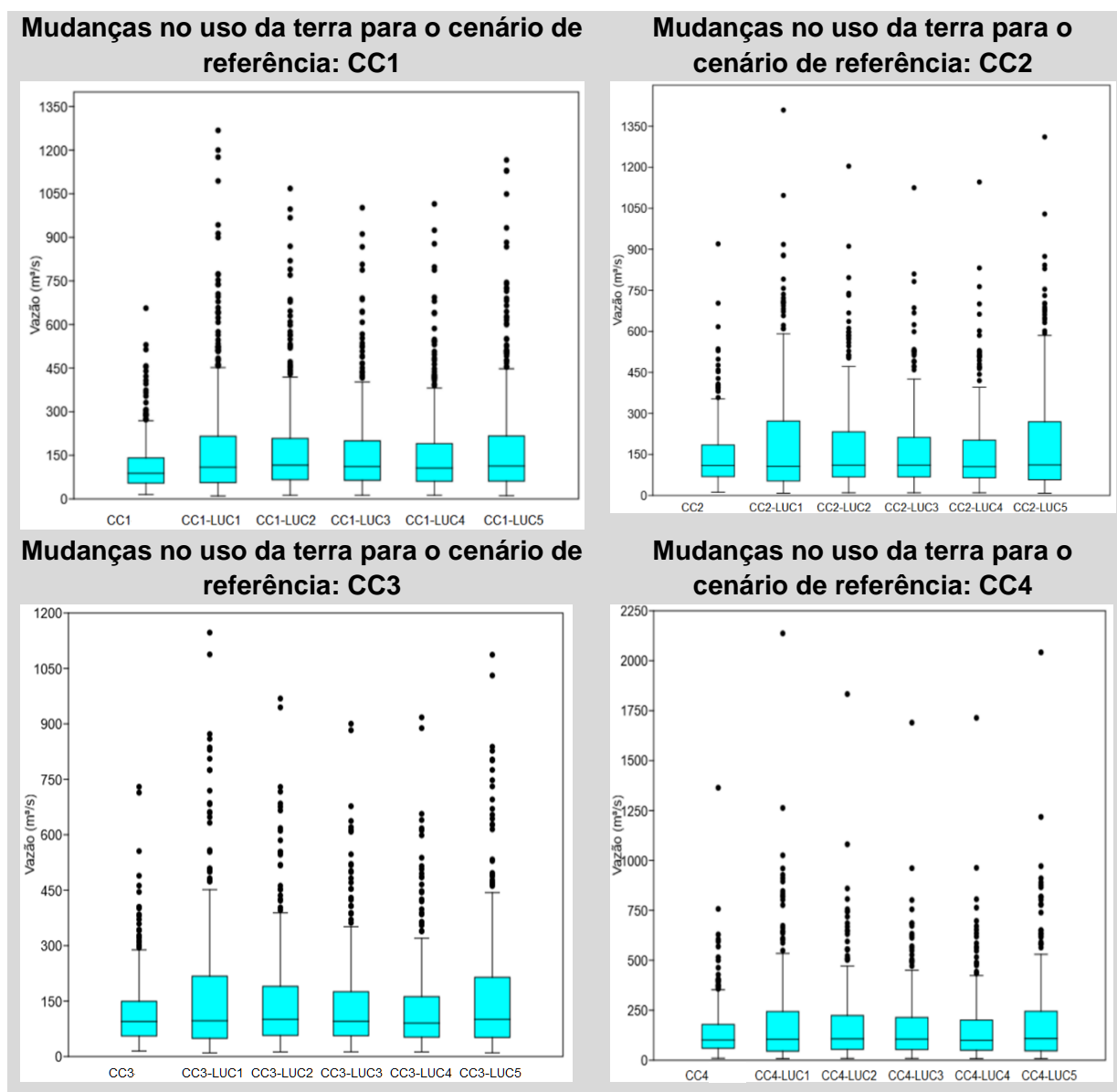
Cenário	SSP	Período	S	Z	p-valor	Tendência
CC4-LUC1	SSP5-8-5	2051-2080	-8070	3.5366	0.000405	Decrescente
CC4-LUC2	SSP5-8-5	2051-2080	-9245	4.0516	5.09E-05	Decrescente
CC4-LUC3	SSP5-8-5	2051-2080	-9211	4.0367	5.42E-05	Decrescente
CC4-LUC4	SSP5-8-5	2051-2080	9613	4.2129	2.52E-05	Decrescente
CC4-LUC5	SSP5-8-5	2051-2080	-8177	3.5835	0.000339	Decrescente

Fonte: Autora.

Os diagramas de caixa das mudanças no uso da terra para os cenários de referência CC1 (

Figura 25), confirmam que os maiores valores de vazão são os correspondentes aos cenários CC1-LUC1 (Cenário de aumento das áreas agropecuárias, com desmatamento) e CC1-LUC5 (Cenário de expansão da cana-de-açúcar, em áreas de pastagem).

Figura 25 – Diagramas de caixa das vazões futuras no exutório da bacia do rio Piracicaba para os cenários de referência, de mudanças climáticas, CC1, CC2, CC3 e CC4.



Fonte: Autora.

Na Tabela 40, Tabela 41 e na Tabela 42 são apresentadas as estatísticas dos cenários de mudanças no uso da terra para os cenários de referência de mudanças

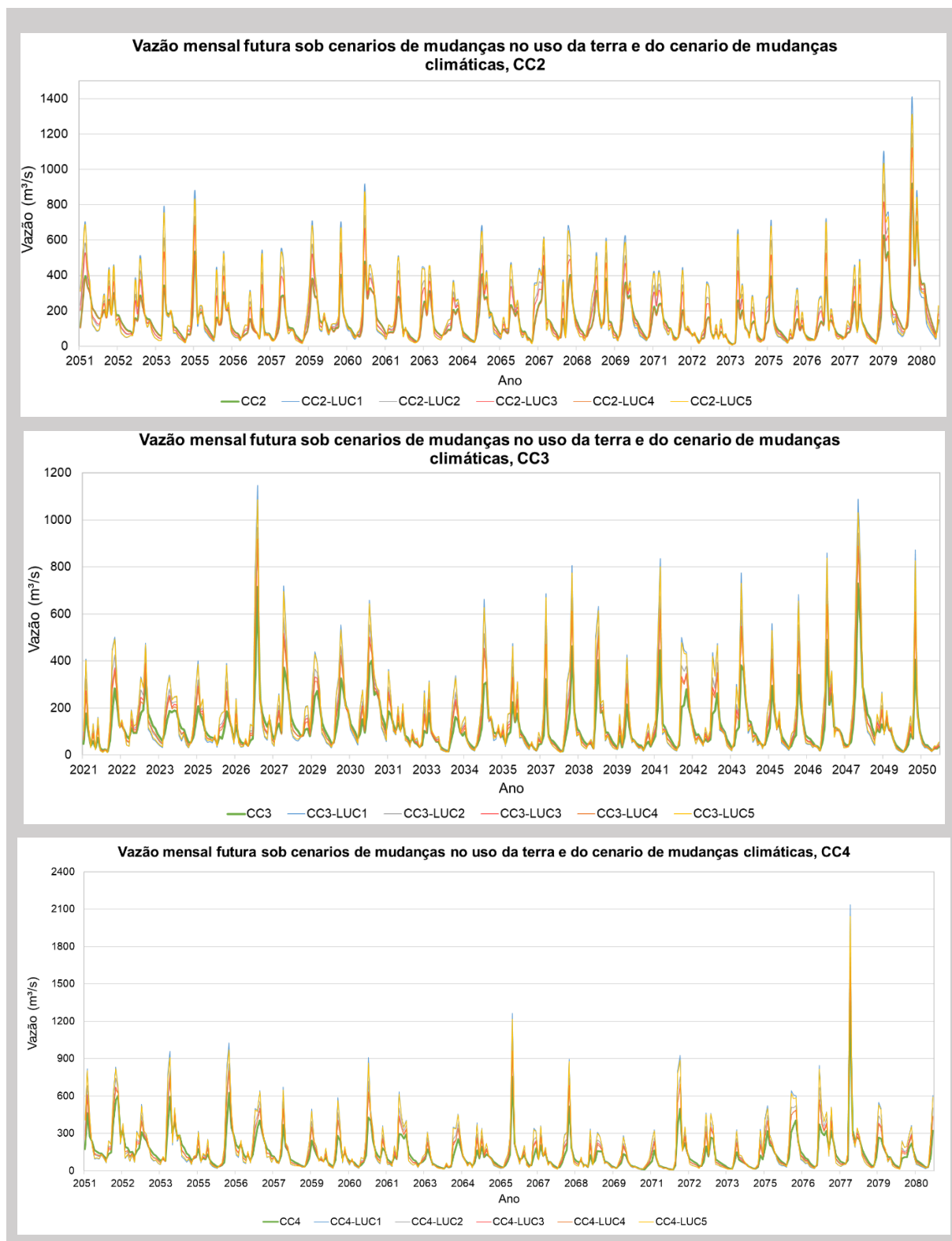
climáticas CC2, CC3 e CC4. As máximas diferenças na média dos cenários de mudanças no uso da terra, para os cenários de referência CC2, CC3 e CC4 foram de 31%, 36.8% e 33.1% respectivamente.

De maneira geral, o comportamento observado nos cenários de mudanças no uso da terra para o cenário de referência de mudanças climáticas CC1 foi semelhante para os outros cenários restantes.

De acordo com a Figura 26, em todos os cenários de mudanças no uso da terra, em combinação com os cenários de mudanças climáticas, observou-se que os cenários LUC1 e LUC5 tiveram diferenças significativas ($p < 0.05$), em relação a todos os cenários de referência de mudanças climáticas. Essas diferenças significativas estão representadas em um aumento nos valores das vazões mensais desses cenários, LUC1 e LUC5, como é possível identificar nos diagramas de caixa da Figura 25. Também os picos dos valores de vazão nos cenários LUC1 e LUC5, em todos os cenários de mudanças no uso da terra sempre foram superiores aos dos outros cenários (Figura 24).

Este comportamento está influenciado pela combinação das mudanças no uso da terra e as condições da cobertura do solo que foram simuladas nas piores condições. Também este comportamento é esperado no cenário de aumento das áreas agropecuárias com desmatamento (LUC1) devido à diminuição das áreas florestais. (ABE *et al.*, 2018; BRADSHAW *et al.*, 2007) encontraram um aumento nas vazões quando foram diminuídas as áreas florestais e argumentaram que o desmatamento favorece a intensificação das inundações.

Figura 26 – Vazões mensais futuras no exutório da bacia do rio Piracicaba sob cenários de mudanças no uso da terra e de mudanças climáticas.



Fonte: Autora.

Nos cenários CC3-LUC1 e CC3-LUC4, tiveram diferenças significativas ($p < 0.05$). No diagrama de caixa da

Figura 25, para o cenário de referência de mudanças climáticas CC3 (SSP 5 - 8.5 para o período 2021-2050), é possível apreciar uma menor variabilidade do cenário CC3-LUC4, em comparação com o cenário CC3-LUC1 e valores atípicos menores no cenário CC3-LUC4. Este comportamento do cenário CC3-LUC4, de reflorestamento, na mudança de pastagem para floresta em comparação ao cenário CC3-LUC1, de aumento das áreas agropecuárias, na mudança de floresta para cana-de-açúcar, laranja e pastagem, indica uma diminuição da vazão. A média do cenário CC3-LUC1 é 165.3 m³/s e CC3-LUC4 é 133.6 m³/s (Tabela 41), tendo menores valores de vazão no cenário de reflorestamento (LUC4).

Tabela 40 – Estatísticas das simulações dos cenários de mudanças no uso da terra para o cenário de referência de mudanças climáticas CC2 (SSP 2 - 4.5 para o período 2051-2080).

Cenário	Média	Mediana	Mínimo	Máximo
CC2	144.8	109.7	11.74	919.9
CC2 - LUC1	190.6	106.8	8.137	1409
CC2 - LUC2	174.4	110.9	9.92	1204
CC2 - LUC3	164.4	110.65	9.828	1125
CC2 - LUC4	157.8	105.45	9.739	1146
CC2 - LUC5	189.8	111.75	8.198	1311

Fonte: Autora.

Tabela 41 – Estatísticas das simulações dos cenários de mudanças no uso da terra para o cenário de referência de mudanças climáticas CC3 (SSP 5 - 8.5 para o período 2021-2050).

Cenário	Média	Mediana	Mínimo	Máximo
CC3	120.8	94.7	14.72	729.8
CC3 - LUC1	165.3	96.79	9.703	1147
CC3 - LUC2	149.4	100.95	12.24	968.6
CC3 - LUC3	139.9	95.185	12.58	900.4
CC3 - LUC4	133.6	90.63	12.34	917.7
CC3 - LUC5	164.6	100.9	9.958	1087

Fonte: Autora.

Tabela 42 - Estatísticas das simulações dos cenários de mudanças no uso da terra para o cenário de referência de mudanças climáticas CC4 (SSP 5 - 8.5 para o período 2051-2080).

Cenário	Média	Mediana	Mínimo	Máximo
CC4	140.1	101.3	9.284	1364
CC4 - LUC1	186.6	105.1	8.142	2137
CC4 - LUC2	170.1	106.95	8.759	1833
CC4 - LUC3	159.7	105.45	8.647	1690
CC4 - LUC4	153.4	99.0	8.473	1714
CC4 - LUC5	185.3	108.3	8.2	2042

Fonte: Autora.

CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foi reformulado, calibrado e validado um modelo hidrológico no SWAT para a bacia do rio Piracicaba. O modelo simulou adequadamente as condições da bacia para o período histórico (1979-2011). Os resultados permitem inferir que trata-se um modelo robusto para fazer previsões futuras a médio e longo prazo, na simulação das mudanças climáticas e nas mudanças no uso da terra.

Quatro cenários de mudanças climáticas foram definidos, para dois Caminhos Socioeconômicos Compartilhados do CMIP6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5 avaliados para períodos a médio e longo prazo. Nos resultados, os cenários de mudanças climáticas CC2 (SSP2-4.5 para o período 2051-2080) e CC4 (SSP5-8.5 para o período 2051-2080) apresentaram maior variabilidade na precipitação e tiveram os maiores valores na temperatura máxima e mínima, ao longo do tempo. As variáveis climáticas de temperatura máxima e mínima, nos cenários de mudanças climáticas a médio prazo (2021-2050) tiveram aumento de 1.4°C e 1.3°C respectivamente. Para o longo prazo (2051-2080) a temperatura máxima aumentou em 3°C e a mínima 2.6°C. Enquanto à precipitação mensal, houve uma pequena diminuição não significativa de até 17.1mm/mês, para o cenário mais desfavorável.

Identificou-se aumento temporal na temperatura máxima para as séries dos dados históricos e nas projeções climáticas de mudanças climáticas das emissões de gases de efeito estufa altas (SSP5-8.5) a médio e longo prazo. Também identificou-se aumento temporal na temperatura mínima nas projeções climáticas de mudanças climáticas das emissões de gases de efeito estufa altas (SSP5-8.5) a médio e longo prazo. Enquanto as séries de precipitação, não houve tendência temporal.

Os modelos climáticos globais como entradas de clima futuro em modelos hidrológicos resultam ser um recurso útil, sempre que os dados sejam corrigidos a uma escala local ou regional.

Cinco tipos de mudanças no uso da terra foram definidos, com e sem desmatamento e simulados em conjunto com cenários de mudanças climáticas, considerando 70% de mudança de área e simulados para as piores condições de cobertura do solo. Os cenários LUC1 (cenário de aumento das áreas agropecuárias)

e LUC5 (cenário de expansão da cana-de-açúcar em áreas de pastagem) tiveram um aumento significativo nas vazões da bacia ($p < 0.05$). Houve diminuição significativa e menor variabilidade nas vazões do cenário CC3-LUC4 (cenário de reflorestamento), com relação ao cenário CC3-LUC1 (aumento das áreas agropecuárias, com desmatamento), para o cenário CC3 (SSP5-8.5 a médio prazo).

A vazão na bacia do rio Piracicaba teve diminuição entre 36% e 50% nos valores mínimos e aumento nos valores máximos entre 16% e 72%, em relação os valores históricos.

Identificou-se diminuição temporal nas séries de vazão para os cenários de mudanças climáticas de emissões mais pessimista a médio e longo prazo e nos cenários de mudanças no uso da terra para os cenários de referência de mudanças climáticas de emissões mais pessimista a médio e longo prazo.

Conclui-se que os impactos das mudanças climáticas na bacia são intensificados com as mudanças no uso da terra, principalmente em cenários que envolvem as piores condições de cobertura do solo, aumentando a probabilidade de maiores vazões máximas e menores vazões mínimas, o que pode favorecer a ocorrência de possíveis eventos extremos, e possíveis panoramas de escassez hídrica e de inundações. Os impactos futuros decorrentes das mudanças climáticas e das mudanças no uso da terra são refletidos no incremento das vazões máximas e na diminuição das vazões mínimas mensais que afetam a severidade e frequência de eventos extremos, tornando-se em possíveis panoramas de escassez hídrica e de inundações na bacia do rio Piracicaba, principalmente ao considerar longo prazo.

Como recomendação para trabalhos futuros sugere-se a análise mais detalhada das características hidrológicas dos solos e diferentes coberturas, de forma a melhor representar as parcelas do ciclo hidrológico relativas ao solo e cobertura vegetal. Também sugere-se a inclusão na análise das possibilidades de implementação futura de sistemas de irrigação e drenagem agrícola.

REFERÊNCIAS

- ABE, C. A.; LOBO, F. de L.; DIBIKE, Y. B.; COSTA, M. P. de F.; DOS SANTOS, V.; NOVO, E. M. L. M. Modelling the effects of historical and future land cover changes on the hydrology of an Amazonian basin. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 7, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w10070932>
- ABOU RAFEE, S. A.; UVO, C. B.; MARTINS, J. A.; MACHADO, C. B.; FREITAS, E. D. Land Use and Cover Changes versus climate shift: Who is the main player in river discharge? A case study in the Upper Paraná River Basin. **Journal of Environmental Management**, v. 309, n. February, p. 114651, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114651>
- AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. Primeira Revisão do Plano das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá para o período de 2010 a 2020. Relatório Final. Tomo III - Plano de Ações. v. III, p. 201, 2018. Disponível em: https://www.comitespcj.org.br/index.php?option=com_content&view=article&id=851:p_rimeira-revisao-pb-relatorio-final-etapa-1&catid=148:plano-das-bacias&Itemid=332
- AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. **Relatório Institucional da Agência das bacias PCJ - 2019: 10 Anos de Compromissos**. Piracicaba, SP: [s. n.], 2019.
- AHN, S. R.; JEONG, J. H.; KIM, S. J. 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1112905>
- ALCAMO, J. Chapter Six The SAS Approach: Combining Qualitative and Quantitative Knowledge in Environmental Scenarios. In: ALCAMO, J. (org.). **Environmental Futures**. [S. l.]: Elsevier, 2008. (Developments in Integrated Environmental Assessment).v. 2p. 123–150. *E-book*. Disponível em: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1574-101X\(08\)00406-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1574-101X(08)00406-7)
- ALFIERI, L.; BISSELINK, B.; DOTTORI, F.; NAUMANN, G.; DE ROO, A.; SALAMON, P.; WYSER, K.; FEYEN, L. Global projections of river flood risk in a warmer world. **Earth's Future**, v. 5, n. 2, p. 171–182, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2016EF000485>
- ALFIERI, L.; FEYEN, L.; DI BALDASSARRE, G. Increasing flood risk under climate change: a pan-European assessment of the benefits of four adaptation strategies. **Climatic Change**, v. 136, n. 3–4, p. 507–521, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1641-1>
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ANA/DAEE. **Resolução Conjunta ANA/DAEE N°926 de 29 de maio de 2017**Brasil: [s. n.], 2017 a.p. 7.
- ANA/DAEE. **Resolução Conjunta ANA/DAEE N° 925, de 29 de maio de 2017**. Dispõe sobre as condições de operação para o Sistema Cantareira - SC, delimitado,

para os fins desta Resolução, como o conjunto dos reservatórios Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro. Brasil: [s. n.], 2017 b.p. 7.

ANA. **Agência Nacional de Águas**. [s. l.], 2021. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em: mar. 2021.

ANA. **Base Hidrográfica Ottocodificada das Bacias Hidrográficas do Piracicaba, Capivari e Jundiá**. Brasília, DF: [s. n.], 2013. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/9a761447-7aa2-470e-a5f0-9ad63468fa3c>

ANDERSON, M. **Encyclopedia of Hydrological Sciences**. [S. l.]: John Wiley & Sons Ltd, 2005.

ARNELL, N. W.; GOSLING, S. N. The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. **Climatic Change**, v. 134, n. 3, p. 387–401, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1084-5>

ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E. B.; NEITSCH, S. L. **Soil Water Assessment Tool: SWAT Input/Output Documentation, Version 2012**. [S. l.]: Texas Water Resources Institute, 2012 a. *E-book*. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/docs/>

ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E. B.; NEITSCH, S. L. Chapter 37: SWAT Input Data: lup.dat. *In: Soil Water Assessment Tool: SWAT Input/Output Documentation, Version 2012*. [S. l.]: Texas Water Resources Institute, 2012 b. p. 4.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment Part I: Model Development. **American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73–89, 1998.

ARROIO JUNIOR, P. P. **Aprimoramento das Rotinas e Parâmetros dos Processos Hidrológicos do Modelo Computacional Soil and Water Assessment Tool - SWAT**. 2016. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2016.

ASF DAAC. **Alaska Satellite Facility: ASF Data Search**. [s. l.], 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>. Acesso em: 3 ago. 2021.

ASHRAF, M. S.; AHMAD, I.; KHAN, N. M.; ZHANG, F.; BILAL, A.; GUO, J. Streamflow Variations in Monthly, Seasonal, Annual and Extreme Values Using Mann-Kendall, Spearman's Rho and Innovative Trend Analysis. **Water Resources Management**, v. 35, n. 1, p. 243–261, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02723-0>

BIEMANS, H.; SPEELMAN, L. H.; LUDWIG, F.; MOORS, E. J.; WILTSHIRE, A. J.; KUMAR, P.; GERTEN, D.; KABAT, P. Future water resources for food production in five South Asian river basins and potential for adaptation - A modeling study. **Science of the Total Environment**, v. 468–469, p. S117–S131, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.092>

BRADSHAW, C. J. A.; SODHI, N. S.; PEH, K. S. H.; BROOK, B. W. Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity in the developing world. **Global Change Biology**, v. 13, n. 11, p. 2379–2395, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/J.1365-2486.2007.01446.X>

BRESSIANI, D. de A. **Coping with hydrological risks through flooding risk index, complex watershed modeling, different calibration techniques, and ensemble streamflow forecasting**. 2016. - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Sao Carlos, SP, 2016.

BRESSIANI, D. de A.; SRINIVASAN, R.; JONES, C. A.; MENDIONDO, E. M. Effects of different spatial and temporal weather data resolutions on the stream flow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 1–16, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20150803.970>

CARAM, R. de O. **Mudanças no uso e cobertura do solo e resposta hidrológica da bacia do rio Piracicaba**. 2010. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2010.

CIABATTA, L.; CAMICI, S.; BROCCA, L.; PONZIANI, F.; STELLUTI, M.; BERNI, N.; MORAMARCO, T. Assessing the impact of climate-change scenarios on landslide occurrence in Umbria Region, Italy. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 285–295, 2016. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.007>

COMITÊS DAS BACIAS PCJ. **Comitês PCJ**. [s. l.], 2021. Disponível em: <http://www.comitespcj.org.br/>. Acesso em: 21 jul. 2021.

COMITÊS PCJ. **Relatório de Situação dos Recursos Hídricos 2020 (Ano Base 2019)**. Piracicaba, SP, Brasil: [s. n.], 2021 a. Disponível em: http://www.comitespcj.org.br/index.php?option=com_content&view=article&id=980&Itemid=340.

COMITÊS PCJ. **Orientações sobre a Constituição e o Funcionamento dos Plenários e das Câmaras Técnicas dos Comitês PCJ**. Piracicaba, SP, Brasil: [s. n.], 2021 b. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1DheK0aPwzu5iF6PulrTzAEch8Wq7HHwl/view>. Acesso em: 1 ago. 2021.

CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA. **Relatório Final - Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá 2020-2035**. Piracicaba, SP, Brasil: [s. n.], 2020.

DA SILVA, M. G.; DE AGUIAR NETTO, A. de O.; DE JESUS NEVES, R. J.; DO VASCO, A. N.; ALMEIDA, C.; FACCIOLI, G. G. Sensitivity Analysis and Calibration of Hydrological Modeling of the Watershed Northeast Brazil. **Journal of Environmental Protection**, v. 06, n. 08, p. 837–850, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/jep.2015.68076>

DAEE. **Departamento de Águas e Energia Elétrica**. [s. l.], 2012. Disponível em: <http://www.daee.sp.gov.br/>. Acesso em: mar. 2021.

DAO, D. M.; LU, J.; CHEN, X.; KANTOUSH, S. A.; VAN BINH, D.; PHAN, P.; TUNG, N. X. Predicting tropical monsoon hydrology using CFSR and CMADS data over the Cau river basin in Vietnam. **Water (Switzerland)**, v. 13, n. 9, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13091314>

DE OLIVEIRA, V. A.; DE MELLO, C. R.; BESKOW, S.; VIOLA, M. R.; SRINIVASAN, R. Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. **Ecological Engineering**, v. 133, p. 20–31, 2019. Disponível em:

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.021>

DHAMI, B. S.; PANDEY, A. Comparative review of recently developed hydrologic models. **Journal of Indian Water Resources Society**, v. 33, n. 3, p. 34–42, 2013.

DILE, Y. T.; SRINIVASAN, R. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: An application in the blue Nile river basin. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 50, n. 5, p. 1226–1241, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jawr.12182>

DOBROVOLSKI, R.; RATTIS, L. Water collapse in Brazil: The danger of relying on what you neglect. **Natureza e Conservação**, v. 13, n. 1, p. 80–83, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ncon.2015.03.006>

DOS SANTOS, V.; LAURENT, F.; ABE, C.; MESSNER, F. Hydrologic response to land use change in a large basin in eastern Amazon. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 4, p. 1–19, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w10040429>

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed. ed. Rio de Janeiro, RJ: [s. n.], 2006.

ESALQ/USP. **Posto Meteorológico “Professor Jesus Marden dos Santos” ESALQ - USP**. [s. l.], 2020. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/posto/>. Acesso em: 28 ago. 2020.

FARIAS, C. W. de A.; MONTENEGRO, M. S. G. L.; SRINIVASAN, R.; JONES, C. A. Journal of Environmental Modeling runoff response to land-use changes using the SWAT model in the. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 02, p. 194–206, 2020.

FU, G.; CHARLES, S. P.; YU, J.; LIU, C. Decadal climatic variability, trends, and future scenarios for the North China plain. **Journal of Climate**, v. 22, n. 8, p. 2111 – 2123, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2605.1>

FUKA, D. R.; WALTER, M. T.; MACALISTER, C.; DEGAETANO, A. T.; STEENHUIS, T. S.; EASTON, Z. M. Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 22, p. 5613–5623, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hyp.10073>

GARIANO, S. L.; GUZZETTI, F. 5.32 - Mass-Movements and Climate Change. In: SHRODER, J. (Jack) F. (org.). **Treatise on Geomorphology (Second Edition)**. Second Edi ed. Oxford: Academic Press, 2022 a. p. 546–558. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818234-5.00043-2>

GARIANO, S. L.; GUZZETTI, F. 5.32 - Mass-Movements and Climate Change. In: SHRODER, J. (Jack) F. (org.). **Treatise on Geomorphology (Second Edition)**. Second Edi ed. Oxford: Academic Press, 2022 b. p. 546–558. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818234-5.00043-2>

GFDL. **Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)**. [s. l.], 2022. Disponível em: <https://www.gfdl.noaa.gov/climate-modeling/>. Acesso em: 6 mar. 2022.

GIATTI, L. L. **Reservatório paiva castro - mairiporã - sp avaliação da qualidade da água sobre alguns parâmetros físicos químicos e biológicos (1987/1998)**. 2000. - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

GRACELLI, R. R.; MAGALHAES, I. B.; SANTOS, V. J.; CALIJURI, M. L. Effects on Streamflow Caused by Reforestation and Deforestation in A Brazilian Southeast Basin: Evaluation by Multicriteria Analysis and Swat Model. **2020 IEEE Latin American GRSS and ISPRS Remote Sensing Conference, LAGIRS 2020 - Proceedings**, p. 167–172, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/LAGIRS48042.2020.9165666>

GUDMUNDSSON, L. **Package “qmap”**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-16-3383-2012.bernexp>

GUIMBERTEAU, M. *et al.* Impacts of future deforestation and climate change on the hydrology of the Amazon Basin: A multi-model analysis with a new set of land-cover change scenarios. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 3, p. 1455–1475, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-21-1455-2017>

GUO, H. *et al.* **NOAA-GFDL GFDL-CM4 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP**. [S. l.]: Earth System Grid Federation, 2018. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.9242>

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. **Journal of Hydrological Engineering**, v. 4, n. 2, p. 135–143, 1999.

IPCC. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012.

IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. *In: Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge e New York: [s. n.], 2014.

IPCC. Land-climate interactions. *In: [P.R. SHUKLA, J. SKEA, E. CALVO BUENDIA, V. MASSON-DELMOTTE, H.-O. PÖRTNER, D. C. ROBERTS, P. ZHAI, R. SLADE, S. CONNORS, R. VAN DIEMEN, M. FERRAT, E. HAUGHEY, S. LUZ, S. NEOGI, M. PATHAK, J. PETZOLD, J. PORTUGAL PEREIRA, P. VYAS, E. HUNTLEY, K. KISSICK, (eds.) (org.). Climate Change and Land: An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. [S. l.: s. n.], p. 118. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2403158>*

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

IPCC. Summary for Policymakers. *In: H.-O. PÖRTNER, D.C. ROBERTS, E.S. POLOCZANSKA, K. MINTENBECK, M. TIGNOR, A.; ALEGRÍA, M. CRAIG, S. LANGSDORF, S. LÖSCHKE, V. MÖLLER, A. O. (eds. . (org.). Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability. [S. l.]: Cambridge University Press, 2022 a. p. 40.*

IPCC. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Summary for**

Policymakers. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [S. l.]: Cambridge University Press, 2022 b.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** [s. l.], 2022c. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/about/>. Acesso em: 22 mar. 2022.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** [s. l.], 2022d.

KENDALL, M. G. Rank correlation methods. 1948.

LAMPARTER, G.; NOBREGA, R. L. B.; KOVACS, K.; AMORIM, R. S.; GEROLD, G. Modelling hydrological impacts of agricultural expansion in two macro-catchments in Southern Amazonia, Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 18, n. 1, p. 91–103, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10113-016-1015-2>

LAURENTIS, G. L. de. **Modelo de transferência de riscos hidrológicos como estratégia de adaptação às mudanças globais segundo cenários de vulnerabilidade dos recursos hídricos.** 2012. - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2012.

LOPES, I. dos R. **Avaliação da performance da Reanálise CFSR para caracterizar o clima da bacia do Espírito Santo e parte norte da bacia de Campos.** 2018. - Universidade Federal do Rio de Janeiro, [s. l.], 2018.

LUCAS-BORJA, M. E.; CARRÀ, B. G.; NUNES, J. P.; BERNARD-JANNIN, L.; ZEMA, D. A.; ZIMBONE, S. M. Impacts of land-use and climate changes on surface runoff in a tropical forest watershed (Brazil). **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 11, p. 1956–1973, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1787417>

LUO, N.; GUO, Y.; CHOU, J.; GAO, Z. Added value of CMIP6 models over CMIP5 models in simulating the climatological precipitation extremes in China. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 2, p. 1148–1164, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.7294>

LUTZ, A. F.; TER MAAT, H. W.; BIEMANS, H.; SHRESTHA, A. B.; WESTER, P.; IMMERZEEL, W. W. Selecting representative climate models for climate change impact studies: an advanced envelope-based selection approach. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 12, p. 3988–4005, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.4608>

MACHADO, R. E. **Simulação de Escoamento e de Produção de Sedimentos em uma Microbacia Hidrográfica Utilizando Técnicas de Modelagem e Geoprocessamento.** 2002. [s. l.], 2002.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica: Journal of the econometric society**, p. 245–259, 1945.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas – Coleção 5 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil.** [s. l.], 2019. Disponível em: https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR. Acesso em: 3 ago. 2021.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. **Geusp – Espaço e Tempo (Online)**, v. 19, n. 3, p. 485–494, 2016. Disponível em: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.11606/issn.2179->

0892.geousp.2015.100879

MARIN, F. R.; LOPES-ASSAD, M. L.; ASSAD, E. D.; VIAN, C. E.; SANTOS, M. C. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 11, p. 1449–1455, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2008001100002>

MARTINS, M. S. de M.; VALERA, C. A.; ZANATA, M.; SANTOS, R. M. B.; ABDALA, V. L.; PACHECO, F. A. L.; FERNANDES, L. F. S.; PISSARRA, T. C. T. Potential impacts of land use changes on water resources in a tropical headwater catchment. **Water (Switzerland)**, v. 13, n. 22, p. 1–21, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13223249>

MISHRA, S. K.; SINGH, V. **Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology**. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2003. v. 42E-book. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-0147-1>

MOLIN, P. G. Dynamic modeling of native vegetation in the Piracicaba River basin and its effects on ecosystem services. p. 147, 2014. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-06012015-111535/>

MOLIN, P. G.; MIRANDA, F. T. S.; SAMPAIO, J. V.; FRANZOZI, A.; FERRAZ, S. **Mapeamento de uso e cobertura do solo da bacia do rio Piracicaba, SP: Anos 1990, 2000 e 2010**. [s. l.], 2015. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/edicoes.asp>. Acesso em: 1 abr. 2015.

MOMPRESIER, R.; HER, Y.; HOOGENBOOM, G.; SONG, J. Effects of deforestation and afforestation on water availability for dry bean production in Haiti. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 325, n. October 2021, p. 107721, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107721>

MONTEIRO, J. A. F.; STRAUCH, M.; SRINIVASAN, R.; ABBASPOUR, K.; GÜCKER, B. Accuracy of grid precipitation data for Brazil: Application in river discharge modelling of the Tocantins catchment. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 9, p. 1419–1430, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hyp.10708>

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/2013.23153>

NASA. **ASTER Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer**. [s. l.], 2011. Disponível em: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2 ed. ed. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989.

O'NEILL, B. C.; KRIEGLER, E.; RIAHI, K.; EBI, K. L.; HALLEGATTE, S.; CARTER, T. R.; MATHUR, R.; VAN VUUREN, D. P. A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. **Climatic Change**, v. 122, n. 3, p. 387–400, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>

OLIVEIRA, J. B. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto

Agronomico, 1999.

PARDING, K. M. *et al.* GCMeval – An interactive tool for evaluation and selection of climate model ensembles. **Climate Services**, v. 18, n. March, p. 100167, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2020.100167>

PIERCE, D. W.; BARNETT, T. P.; SANTER, B. D.; GLECKLER, P. J. Selecting global climate models for regional climate change. **Proceedings of the National Academy of the United States of America**, v. 106, n. 21, p. 8441–8446, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.0900094106>

POGGIO, L.; GIMONA, A. Downscaling and correction of regional climate models outputs with a hybrid geostatistical approach. **Spatial Statistics**, v. 14, p. 4–21, 2015 a. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.spasta.2015.04.006>

POGGIO, L.; GIMONA, A. Downscaling and correction of regional climate models outputs with a hybrid geostatistical approach. **Spatial Statistics**, v. 14, p. 4–21, 2015 b. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.spasta.2015.04.006>

PRADO, B. R. do. **Análise dos dados ALOS/PALSAR (modo de imageamento FBD) para identificação dos tipos de cobertura da terra na região norte do estado do Mato Grosso**. 2009. - INPE, São José dos Campos, 2009.

QUEIROZ, M. **A variabilidade climática e as mudanças de uso da terra: um estudo de caso da vazão e sedimentos da bacia do rio Piracicaba com modelage**. 2014. - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2014.

RADCLIFFE, D. E.; MUKUNDAN, R. PRISM vs. CFSR Precipitation Data Effects on Calibration and Validation of SWAT Models. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 53, n. 1, p. 89–100, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12484>

RAJU, K. S.; KUMAR, D. N. **Impact of Climate Change on Water Resources with Modeling Techniques and Case Studies**. [S. l.]: Springer Climate, 2018. v. 29 Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-10-6110-3>

RIAHI, K. *et al.* The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 153–168, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>

ROSS, E. R.; RANDHIR, T. O. Effects of climate and land use changes on water quantity and quality of coastal watersheds of Narragansett Bay. **Science of the Total Environment**, v. 807, p. 151082, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151082>

SABESP. **Manancias - Divulgação PCJ**. [s. l.], 2014. Disponível em: <http://www2.sabesp.com.br/mananciais/divulgacaopcj.aspx>.

SABESP. **Relatório de Sustentabilidade 2017**. [S. l.: s. n.].

SABESP. **Relatório de Sustentabilidade 2020**. [S. l.: s. n.].

SABESP. **SABESP**. [s. l.], 2021. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=31>. Acesso em: 17 nov.

2021.

SAHA, S. *et al.* The NCEP climate forecast system version 2. **Journal of Climate**, v. 27, n. 6, p. 2185–2208, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>

SALEMI, L. F.; DA COSTA SILVA, R. W.; FERNANDES, R. P.; FRACASSI, F.; DE CAMARGO, P. B.; DE MORAES, J. M.; MARTINELLI, L. A. Consequences of a Severe Drought on Dissolved Carbon Forms of a Tropical Mesoscale River Under High Human Influence. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 232, n. 2, p. 8, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05033-2>

SANTOS, H. G. dos; CARVALHO JUNIOR, W. de; DART, R. de O.; AGLIO, M. L. D.; SOUSA, J. S. de; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. da S.; OLIVEIRA, A. P. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3ABrasil_solos_5m_20201104#more. Acesso em: 3 ago. 2021.

SARTORI, A.; NETO, F.; GENOVEZ, A. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 5–18, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n4.p5-18>

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. **Soil Science Society of Agronomy Journal**, v. 70, n. 5, p. 1569–1578, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>

SETEGN, S. G.; DARGAHI, B.; SRINIVASAN, R.; MELESSE, A. M. Modeling of Sediment Yield From Anjeni-Gauged Watershed, Ethiopia Using SWAT Model 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 46, n. 3, p. 514–526, 2010.

SHI, P.; CHEN, C.; SRINIVASAN, R.; ZHANG, X.; CAI, T.; FANG, X.; QU, S.; CHEN, X.; LI, Q. Evaluating the SWAT Model for Hydrological Modeling in the Xixian Watershed and a Comparison with the XAJ Model. **Water Resources Management**, v. 25, n. 10, p. 2595–2612, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9828-8>

SHRESTHA, A.; RAHAMAN, M. M.; KALRA, A.; JOGINEEDI, R.; MAHESHWARI, P. Climatological Drought Forecasting Using Bias Corrected CMIP6 Climate Data: A Case Study for India. **Forecasting**, v. 2, n. 2, p. 59–84, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/forecast2020004>

SHRESTHA, M.; ACHARYA, S. C.; SHRESTHA, P. K. Bias correction of climate models for hydrological modelling – are simple methods still useful? **Meteorological Applications**, v. 24, n. 3, p. 531–539, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/met.1655>

SHRESTHA, P. **R code for auto looping over multiple climatic datasets for quantile mapping bias correction**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34954.26562>

SIMA. **Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente**. [s. l.], 2011. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/>. Acesso em: 30 jul. 2021.

SINGH, V. P.; WOOLHISER, D. A. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. **Perspectives in Civil Engineering: Commemorating the 150th Anniversary of the American Society of Civil Engineers**, v. 7, n. 4, p. 345–367, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(2002\)7:4\(270\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2002)7:4(270))

SIQUEIRA, P. P.; OLIVEIRA, P. T. S.; BRESSIANI, D.; MEIRA NETO, A. A.; RODRIGUES, D. B. B. Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 37, n. September 2020, p. 100931, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100931>

SON, N. T.; LE HUONG, H.; LOC, N. D.; PHUONG, T. T. Application of SWAT model to assess land use change and climate variability impacts on hydrology of Nam Rom Catchment in Northwestern Vietnam. **Environment, Development and Sustainability**, v. 24, n. 3, p. 3091–3109, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01295-2>

SRE/DAEE. **Nota Técnica Conjunta nº 8/2019/SRE/DAEE Brasil**: [s. n.], 2019.p. 16. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/sala-de-situacao/sistema-cantareira/documentos-relacionados-2019/08-nota-tecnica-conjunta-8-2019-sre-ana-dae-de-04-08-2019>

SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. Integration of a basin-scale water quality model with GIS 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 30, n. 3, p. 453–462, 1994.

SWAT. **Global Weather Data for SWAT**. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://globalweather.tamu.edu/>.

TABARI, H.; MAROFI, S.; AEINI, A.; TALAEI, P. H.; MOHAMMADI, K. Trend analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 2, p. 128–136, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.09.009>

TAMU. **SWAT (Soil & Water Assessment Tool) Website**. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/>. Acesso em: 24 jul. 2020.

TAN, M. L.; GASSMAN, P. W.; YANG, X.; HAYWOOD, J. A review of SWAT applications, performance and future needs for simulation of hydro-climatic extremes. **Advances in Water Resources**, v. 143, n. February, p. 103662, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103662>

TAYLOR, K. E. *et al.* **CMIP6 Global Attributes, DRS, Filenames, Directory Structure, and CV's**. [S. l.: s. n.]. *E-book*. Disponível em: <https://goo.gl/v1drZl>

TOUMA, D.; ASHFAQ, M.; NAYAK, M. A.; KAO, S.-C.; DIFFENBAUGH, N. S. A multi-model and multi-index evaluation of drought characteristics in the 21st century. **Journal of Hydrology**, v. 526, p. 196 – 207, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.011>

VETORRAZZI, C. A. Avaliação multicritérios, em ambiente SIG, na definição de áreas prioritárias à restauração florestal visando a conservação de recursos hídricos.

p. 151, 2006.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; BESKOW, S.; NORTON, L. D. Impacts of Land-use Changes on the Hydrology of the Grande River Basin Headwaters, Southeastern Brazil. **Water Resources Management**, v. 28, n. 13, p. 4537–4550, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0749-1>

WCRP. **CMIP Phase 6 (CMIP6)**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>.

WINSEMIUS, H. C.; AERTS, J. C. J. H.; VAN BEEK, L. P. H.; BIERKENS, M. F. P.; BOUWMAN, A.; JONGMAN, B.; KWADIJK, J. C. J.; LIGTVOET, W.; LUCAS, P. L.; VAN VUUREN, D. P.; WARD, P. J. Global drivers of future river flood risk. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 4, p. 381–385, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nclimate2893>

WOBUS, C.; GUTMANN, E.; JONES, R.; RISSING, M.; MIZUKAMI, N.; LORIE, M.; MAHONEY, H.; WOOD, A. W.; MILLS, D.; MARTINICH, J. Climate change impacts on flood risk and asset damages within mapped 100-year floodplains of the contiguous United States. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 17, n. 12, p. 2199–2211, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/nhess-17-2199-2017>

WORLD RESOURCES INSTITUTE. **Infraestrutura Natural para Água no Sistema Cantareira**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <https://wribrasil.org.br/pt/publication/infraestrutura-natural-para-agua-no-sistema-cantareira-em-sao-paulo>.

ZHANG, X.; HARVEY, D. K.; HOGG, W. D.; YUZYK, T. R. Trends in Canadian streamflow. **Water Resources Research**, v. 37, n. 4, p. 987–998, 2001. Disponível em: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1029/2000WR900357>; doi:10.1029/2000WR900357

ZHAO, P.; LÜ, H.; YANG, H.; WANG, W.; FU, G. Impacts of climate change on hydrological droughts at basin scale: A case study of the Weihe River Basin, China. **Quaternary International**, v. 513, n. February, p. 37–46, 2019 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.02.022>

ZHAO, P.; LÜ, H.; YANG, H.; WANG, W.; FU, G. Impacts of climate change on hydrological droughts at basin scale: A case study of the Weihe River Basin, China. **Quaternary International**, v. 513, n. February, p. 37–46, 2019 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.02.022>