

**TAMIRES LIMA DA SILVA**

**MODELAGEM DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS  
BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ  
CONSIDERANDO O NEXO ÁGUA- ENERGIA- ALIMENTO**

**Botucatu**

**2023**



**TAMIRES LIMA DA SILVA**

**MODELAGEM DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS BACIAS  
HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ  
CONSIDERANDO O NEXO ÁGUA- ENERGIA- ALIMENTO**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Irrigação e Drenagem)

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Máximo Sánchez Román

**Botucatu**

**2023**

S586m

Silva, Tamires Lima da

Modelagem dos impactos das mudanças climáticas nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá considerando o nexos água- energia- alimento / Tamires Lima da Silva. -- Botucatu, 2023

271 p. : il., tabs., mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Rodrigo Máximo Sánchez Román

1. Gestão de recursos hídricos. 2. Irrigação. 3. Produção agrícola. 4. Segurança hídrica, alimentar e energética. 5. ODS. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

## Impacto potencial desta pesquisa

Esta tese avaliou os impactos das alterações climáticas no regime hidrológico de uma bacia hidrográfica considerando o nexos (elo) entre os recursos água, energia e alimento, apresentando resultados cujas informações poderão impulsionar o debate e desenvolvimento de estratégias com vistas ao atendimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS):

- Objetivo 2: “acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhorar a nutrição e promover a agricultura sustentável”;
- Objetivo 6: “assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos”;
- Objetivo 7: “assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos”;
- Objetivo 11: “tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis”;
- Objetivo 12: “assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis”;
- Objetivo 13: “tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos”; e
- Objetivo 15: “proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da Terra e deter a perda de biodiversidade”;

uma vez que é possível a visualização de dados quantitativos do nexos existente entre poluição atmosférica, alterações no clima, disponibilidade hídrica, geração e uso de energia e produção de alimentos, podendo esses dados complementarem as informações presentes no Plano de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica. A compreensão desse nexos possibilita a integração entre gestão e governança e entre diferentes escalas e setores que ao atuarem em conjunto, poderão planejar políticas e ações em consonância com o desenvolvimento socioeconômico sustentável e em prol da mitigação e adaptação aos impactos das mudanças climáticas.

## Potential Impact of this research

This thesis assessed the impacts of climate change on the hydrological regime of a river basin, considering the nexus between water, energy and food resources, presenting results whose information could drive the debate and development of strategies to meet the Sustainable Development Goals (SDGs):

- Goal 2: "End hunger, achieve food security and improved nutrition, and promote sustainable agriculture";
- Goal 6: "Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all";
- Goal 7: "Ensure access to affordable, reliable, sustainable, modern energy for all";
- Goal 11: "Make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable";
- Goal 12: "Ensure sustainable consumption and production patterns";
- Goal 13: "Take urgent action to combat climate change and its impacts";
- Goal 15: "Protect, restore and promote sustainable use of terrestrial ecosystems, sustainably manage forests, combat desertification, and halt and reverse land degradation and halt biodiversity loss";

once it is possible to visualize quantitative data on the nexus among atmospheric pollution, climate change, water availability, energy generation and use, and food production, and this data can complement the information contained in the river basin's Water Resources Plan. Understanding this nexus enables integration between management and governance and between different scales and sectors which, by acting together, can plan policies and actions in line with sustainable socioeconomic development and in favor of mitigating and adapting to the impacts of climate change.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: MODELAGEM DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS BACIAS  
HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ CONSIDERANDO  
O NEXO ÁGUA-ENERGIA-ALIMENTO

AUTORA: TAMIRES LIMA DA SILVA

ORIENTADOR: RODRIGO MAXIMO SANCHEZ ROMAN

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Irrigação e Drenagem), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RODRIGO MAXIMO SANCHEZ ROMAN (Participação Presencial)  
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu UNESP

Professor Doutor WAYLSON ZANCANELLA QUARTEZANI (Participação Virtual)  
Diretoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Extensão / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo

Prof. Dr. JOÃO CARLOS CURY SAAD (Participação Presencial)  
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu UNESP

Dr. JOÃO GABRIEL THOMAZ QUELUZ (Participação Presencial)  
Químea Soluções Ambientais / Químea Inteligência Ambiental

Prof. Dr. ALEXANDRE BARCELLOS DALRI (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas DECEX / FCAV UNESP Jaboticabal

Botucatu, 14 de novembro de 2023



## AGRADECIMENTOS

À minha família pelo apoio incondicional.

Ao professor Rodrigo Máximo Sánchez Román, pela orientação, ensinamentos, paciência e exemplo de professor.

Ao professor Hessam Sarjoughian pela orientação durante o desenvolvimento da pesquisa na *Arizona State University*.

A todos os funcionários da FCA pelo auxílio e apoio.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Agronomia (Irrigação e Drenagem), agora denominado como Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, pelos conhecimentos repassados.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela bolsa de estudos concedida por meio do processo 143899/2019-8, que possibilitou a dedicação integral à pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.



*“Terra em aquecimento:  
Mudança de temperatura  
Seca, fome, tempestades  
Terremoto na estrutura  
Furacões e maremotos:  
Morte, medo e amargura...*

...

*Queima de derivados:  
Petróleo em combustão  
Preservem a biosfera  
Chega de poluição  
É hora da biomassa:  
Tempos de preservação...*

*Energia cinética dos rios:  
Eólica e hidroelétrica  
Energias renováveis  
Parem com a termelétrica  
Usem agroenergia:  
Salve a bioenergética...*

...

*Diminuição da cobertura do gelo:  
Desaparecimento da calota polar  
Retração do gelo e da neve  
Cresce a radiação solar  
Mudança dos padrões climáticos:  
Aumento do nível do mar...*

...

*Emissão de gases poluentes:  
Efeito estufa mortal  
Seca, fome, terremotos  
O homem provoca o mal  
Só progresso e consumismo  
Não preserva o natural...*

...

*Precisamos nos re.unir:  
Desaquecer átomos.fera...  
Evitar o con\$umismo:  
Não adorar a Be\$ta-feera...  
Abolir o ego.i\$mo:  
Fluir amor zenova era...”*

Gustavo Dourado

(Trechos do Cordel do Aquecimento Global)



## RESUMO

Devido à estreita relação existente no Brasil entre recursos hídricos, geração de energia e produção de alimentos, é essencial o desenvolvimento de estudos aplicando a abordagem *nexo água-energia-alimento* (AEA). Nesse contexto, esta pesquisa buscou avaliar os potenciais impactos das mudanças climáticas no regime hidrológico das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ) considerando o *nexo AEA*. Para tal, modelos foram criados nos programas *Water Evaluation and Planning* System (WEAP) e *Low Emissions Analysis Platform* (LEAP). A troca de dados entre os modelos WEAP e LEAP ocorreu por meio do *WEAP-KIB-LEAP framework*. O Modelo Climático Regional Eta-HadGEM2-ES na resolução de 5 km projeta decréscimos na precipitação, umidade relativa do ar e velocidade do vento, e aumento da temperatura e evapotranspiração potencial nos cenários de mudança climática RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070). As mudanças climáticas alteram a vazão média anual das bacias PCJ, que sofre redução de 79,6% e 84,9% nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente, em comparação ao cenário *Business as usual* (1995-2019). Nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, o Índice Padronizado de Precipitação indicou longos períodos de estiagem. Em virtude dos déficits de precipitação previstos, o aumento da produção agrícola, projetado em 21,3%, poderá ser alcançado por meio da agricultura irrigada. Todavia, a redução da vazão compromete a disponibilidade hídrica para irrigação, bem como para a dessedentação dos rebanhos e a geração de hidroelectricidade. Para garantir segurança hídrica e alimentar, o uso de fontes alternativas de água como águas pluviais e águas residuárias deve ser estimulado. Também, deve-se dar preferência ao uso de fontes de energia renováveis não dependentes de recursos hídricos como o biogás e a energia solar para garantia da segurança energética, podendo-se ampliar a geração de bioenergia por meio da biomassa do bagaço de cana-de-açúcar, pois há a possibilidade do uso de água residuária (vinhaça) para irrigação da cana-de-açúcar. A participação de 82,9% de fontes de energia renováveis na matriz elétrica das bacias PCJ em 2070 pode reduzir as emissões específicas de toneladas CO<sub>2</sub> equivalente em 49%. Os sistemas água, energia e alimentos das bacias PCJ coevoluem juntos e são afetados e capazes de afetar as mudanças climáticas.

**Palavras-chave:** WEAP; LEAP; WEAP-KIB-LEAP *framework*; *nexo AEA*; gestão.



## ABSTRACT

Because of the close relationship that exists in Brazil between water resources, energy generation, and food production, it is essential to develop studies applying the water-energy-food nexus (WEF) approach. In this context, this research sought to assess the potential impacts of climate change on the hydrological regime of the Piracicaba, Capivari, and Jundiaí (PCJ) river basins, considering the WEF nexus. To this end, models were created in the Water Evaluation and Planning" System (WEAP) and Low Emissions Analysis Platform (LEAP) software. Data was exchanged between the WEAP and LEAP models using the WEAP-KIB-LEAP framework. The Eta-HadGEM2-ES Regional Climate Model at 5 km resolution projects decreases in precipitation, relative humidity, and wind speed and increases in temperature and potential evapotranspiration in the RCP4.5 and RCP8.5 climate change scenarios (2020-2070). Climate change alters the average annual streamflow of the PCJ basins, which is reduced by 79.6% and 84.9% in the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, respectively, compared to the Business-as-Usual scenario (1995-2019). In the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, the Standardized Precipitation Index indicated long periods of drought. As a result of the precipitation deficits predicted, the increase in agricultural production, projected at 21.3%, could be achieved through irrigated agriculture. However, the reduction in streamflow compromises water availability for irrigation, as well as for livestock watering and the generation of hydroelectricity. To ensure water and food security, the use of alternative water sources such as rainwater and wastewater should be encouraged. Also, preference should be given to the use of renewable energy sources that are not dependent on water resources, such as biogas and solar energy, to ensure energy security, and bioenergy generation could be expanded using sugarcane bagasse biomass since there is the possibility of using wastewater (vinasse) to irrigate sugarcane. The 82.9% share of renewable energy sources in the electricity matrix of the PCJ basins in 2070 can reduce specific emissions of tons of CO<sub>2</sub> equivalent by 49%. The water, energy, and food systems of the PCJ basins co-evolve together and are affected by and capable of affecting climate change.

**Keywords:** WEAP; LEAP; WEAP-KIB-LEAP *framework*; WEF nexus; management.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 - Caminhos de Concentração Representativos- RCPs.....	37
Quadro 2 - Símbolos (elementos) presentes no WEAP para a criação do modelo.....	45
Quadro 3 - Estudos Acadêmicos desenvolvidos no Brasil por meio de modelos criados no programa WEAP.....	46
Quadro 4 - Categorias disponíveis no LEAP para a criação do modelo.....	47
Quadro 5 - Estudos Acadêmicos desenvolvidos no Brasil por meio de modelos criados no programa LEAP.....	48
Quadro 6 - Fonte de dados consultadas referentes ao clima, uso e cobertura da terra e demandas-uso da água.....	57
Quadro 7 - Classificação da performance do modelo hidrológico.....	61
Quadro 8 - Fonte de dados consultadas para alimentação do modelo LEAP.....	63
Quadro 9 - Categorias de grau de severidade de secas segundo intervalos do Índice Padronizado de Precipitação (SPI).....	69
Quadro 10 - Escala temporal do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e denominação do tipo de seca conforme os impactos gerados.....	70
Quadro 11 - Classificação do Índice de Falkenmark (IF).....	71
Quadro 12 - Classificação do Índice de Estresse Hídrico (IEH).....	71
Figura 1 - Representação de componentes, camadas e células de um modelo climático global.....	35
Figura 2 - Representação da estrutura de um modelo climático.....	36
Figura 3 - A) Emissão de gigatoneladas de carbono (GtC) por ano B) Concentração de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) C) Forçante radiativa e D) Aquecimento global da superfície dos RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5 .....	37
Figura 4 - Desenho conceitual do nexo água-energia-alimento sob alterações climáticas.....	40
Figura 5 - Número de trabalhos publicados utilizando o WEAP por	

país, considerando os vinte e cinco maiores resultados.....	44
Figura 6 - Número de trabalhos publicados utilizando o LEAP por país, considerando os vinte e cinco maiores resultados.....	44
Figura 7 - Representação do processo de execução do Modelo de Interação.....	50
Figura 8 - Localização das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí e Hidrografia Principal.....	51
Figura 9 - Classificação climática das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí.....	53
Figura 10 - Diagrama conceitual do <i>Soil Moisture Method</i> .....	55
Figura 11 - Dados de entrada no WEAP para modelagem do regime hidrológico das bacias PCJ.....	56
Figura 12 - Representação esquemática do modelo desenvolvido no WEAP para modelagem do regime hidrológico das bacias PCJ.....	58
Figura 13 - Caracterização dos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	59
Figura 14 - Fluxograma representando as categorias presentes no LEAP.....	61
Figura 15 - Modelo LEAP desenvolvido para as bacias PCJ.....	62
Figura 16 - Interações entre o WEAP e o LEAP.....	66
Figura 17 - Precipitação anual das bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	72
Figura 18 - Precipitação média mensal das bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	73
Figura 19 - Variação da precipitação média mensal das bacias PCJ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em relação ao cenário BAU.....	74
Figura 20 - Variabilidade espacial da precipitação nas bacias PCJ para os meses de janeiro e fevereiro para os cenários BAU (1995 a 2005), RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070).....	75
Figura 21 - Variabilidade espacial da precipitação nas bacias PCJ para os meses: março, abril, maio, junho e julho para os cenários BAU (1995 a 2005), RCP4.5 e RCP8.5 (2020-	

2070) .....	76
Figura 22 - Variabilidade espacial da precipitação nas bacias PCJ para os meses: agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro para os cenários BAU (1995 a 2005), RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070).....	77
Figura 23 - Índice Padronizado de Precipitação (SPI) para as bacias PCJ na escala temporal de 12 meses para a série histórica de dados (1980-2019, abrangência cenário BAU: 1995 a 2019) .....	79
Figura 24 - Índice Padronizado de Precipitação (SPI) para as bacias PCJ na escala temporal de 12 meses para a série prevista (2020-2070) para o cenário RCP4.5 .....	79
Figura 25 - Índice Padronizado de Precipitação (SPI) para as bacias PCJ na escala temporal de 12 meses para a série prevista (2020-2070) para o cenário RCP8.5.....	80
Figura 26 - Temperatura média mensal nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	82
Figura 27 - Aumento da temperatura média mensal das bacias PCJ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em relação à média mensal do cenário BAU.....	83
Figura 28 - Variabilidade espacial da temperatura nas bacias PCJ para os meses de janeiro, fevereiro, março, abril e maio para os cenários BAU (1995 a 2005), RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070).....	85
Figura 29 - Variabilidade espacial da temperatura nas bacias PCJ para os meses de junho, julho, agosto, setembro e outubro para os cenários BAU (1995 a 2005), RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070).....	86
Figura 30 - Variabilidade espacial da temperatura nas bacias PCJ para os meses de novembro e dezembro para os cenários BAU (1995 a 2005), RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070).....	87
Figura 31 - Umidade relativa do ar mensal média das bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	88

Figura 32 - Variação da umidade relativa do ar média mensal dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em relação ao cenário BAU....	88
Figura 33 - Velocidade do vento média mensal (2 m de altura) nas bacias nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	89
Figura 34 - Variação da velocidade do vento média mensal dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em relação ao cenário BAU....	89
Figura 35 - Evapotranspiração potencial (ETP) anual das bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	91
Figura 36 - Validação do modelo hidrológico desenvolvido para as bacias PCJ no WEAP com apresentação de métricas de desempenho.....	92
Figura 37 - Relação entre precipitação e vazão nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	93
Figura 38 - Vazão média mensal nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	94
Figura 39 - Curva de permanência da vazão simulada no WEAP para os cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	96
Figura 40 - Percentual de atendimento da vazão $Q_{95}$ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, período de jan. 2020 a dez. 2070.....	98
Figura 41 - Percentual de atendimento da vazão $Q_{95}$ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 considerando a média mensal.....	98
Figura 42 - Variação das vazões de referência $Q_{90}$ , $Q_{95}$ e $Q_{7,10}$ em comparação com as variações da demanda total de uso consuntivo da água nas bacias PCJ para o cenário BAU, período de jan. 1995 a dez. 2019.....	99
Figura 43 - Variação das vazões $Q_{90}$ e $Q_{95}$ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em comparação com as variações projetadas para a demanda total de uso consuntivo da água nas bacias PCJ, jan. 2020 a dez. 2070.....	100
Figura 44 - Demanda de uso consuntivo não atendida nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 (jan. 2020 a dez. 2070).....	101
Figura 45 - Vazão de retorno proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto prevista para os cenários RCP4.5 e RCP8.5	

	(jan. 2020 a dez. 2070).....	101
Figura 46 -	Demanda de uso consuntivo da água nos cenários BAU (jan. 1995 a dez. 1995), RCP4.5 e RCP8.5 (jan. 2020 a dez. 2070).....	102
Figura 47 -	Percentual de participação das demandas de uso consuntivo da água em relação à demanda total nas bacias PCJ para A) cenário BAU (1995-2019) e B) cenários RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070).....	103
Figura 48 -	Crescimento populacional nas bacias PCJ nos cenários BAU (1995-2019) e RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070).....	103
Figura 49 -	Índice de Falkenmark para as bacias PCJ nos cenários BAU (1995-2019), RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070).....	104
Figura 50 -	Índice de Estresse Hídrico (IEH) para as bacias PCJ nos cenários BAU (1995-2019), RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070).....	106
Figura 51 -	Vazão mensal transvasada das bacias PCJ para o Sistema Cantareira no cenário BAU (jan. 1995 a dez. 2019) .....	107
Figura 52 -	Vazão mensal transvasada das bacias PCJ para o Sistema Cantareira prevista para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 (jan. 2020 a dez. 2070).....	107
Figura 53 -	Área destinada à prática da agricultura nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	108
Figura 54 -	Área de pastagens nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	109
Figura 55 -	Área com formação florestal nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	110
Figura 56 -	Captura de tela do LEAP antes da acoplagem com o WEAP.....	111
Figura 57 -	Captura de tela do LEAP após a acoplagem com o WEAP	111
Figura 58 -	Produção anual nas bacias PCJ de A) cana-de-açúcar B) citros C) milho D) mandioca E) batata F) tomate G) uva H) abacate I) café J) banana K) manga e L) soja nos	

cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	114
Figura 59 - Produção anual nas bacias PCJ de A) Feijão B) Arroz nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	115
Figura 60 - Produção agrícola, em toneladas, nas bacias PCJ e a evolução da área destinada à agricultura, em hectares, nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5 .....	117
Figura 61 - Área irrigada das bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	119
Figura 62 - A) Contribuição percentual (%) dos tipos de métodos/sistemas de irrigação empregados em áreas irrigadas das bacias PCJ em relação ao todo nos cenários A) BAU (1995-2019) e B) RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070)..	121
Figura 63 - Demanda hídrica da atividade de irrigação nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5 e a precipitação anual do cenário BAU.....	123
Figura 64 - Demanda de energia elétrica, em gigajoules (GJ), da atividade de irrigação nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP.....	125
Figura 65 - Demanda energética, em gigajoules (GJ), referente ao uso de diesel na atividade de irrigação nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP.....	125
Figura 66 - Porcentagem do uso de energia elétrica e diesel na agricultura irrigada nos cenários BAU e RCP.....	126
Figura 67 - Toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente (GWP-100) resultante do uso de diesel em motobombas destinadas à irrigação nos cenários BAU e RCP.....	128
Figura 68 - Toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente (GWP-100) devido à geração de energia elétrica nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP.....	128
Figura 69 - Demanda energética, em gigajoules (GJ), referente ao uso de diesel em colheitadeiras de cana-de-açúcar nos cenários BAU e RCP.....	130
Figura 70 - Toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente (GWP-100) resultante do	

uso de diesel em colheitadeiras de cana-de-açúcar nos cenários BAU e RCP.....	131
Figura 71 - Área plantada e demanda energética referente ao uso de diesel no cultivo de citros nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP.....	133
Figura 72 - Área plantada e demanda energética relacionada ao uso de diesel no cultivo de café nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP.....	133
Figura 73 - Área plantada e demanda energética referente ao uso de diesel no manejo de pastagens nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP.....	133
Figura 74 - Toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente (GWP-100) resultante do uso de diesel no cultivo de citros nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP.....	135
Figura 75 - Toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente (GWP-100) resultante do uso de diesel no cultivo de café nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP.....	136
Figura 76 - Toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente (GWP-100) resultante do uso de diesel no manejo de pastagens nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP.....	136
Figura 77 - Área plantada e demanda energética referente ao uso de diesel em máquinas e equipamentos agrícolas empregados no cultivo da soja nos cenários BAU e RCP...	137
Figura 78 - Toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente (GWP-100) resultante do uso de diesel em máquinas e equipamentos empregados no cultivo da soja nos cenários BAU e RCP.....	138
Figura 79 - Demanda energética, em gigajoules (GJ), relacionada ao uso de diesel por tipo de preparo do solo no cultivo da soja nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP.....	140
Figura 80 - Toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente (GWP-100) resultante do tipo de preparo do solo empregado no cultivo da soja nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP.....	141
Figura 81 - Demanda hídrica, em metros cúbicos (m <sup>3</sup> ), da pecuária	

nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	143
Figura 82 - Rebanho, em número de cabeças, das bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	144
Figura 83 - Composição do rebanho das bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	145
Figura 84 - Número de equipamentos empregados na prática da pecuária nas bacias PCJ e sua demanda energética nos cenários BAU e RCP.....	147
Figura 85 - Volume de água tratada e demanda energética (energia elétrica) das ETAs localizadas nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP (modelo LEAP) e BAU, RCP4.5 e RCP8.5 (modelo WEAP).....	148
Figura 86 - Volume de esgoto tratado e demanda energética (energia elétrica) ETes localizadas nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP (modelo LEAP) e BAU, RCP4.5 e RCP8.5 (modelo WEAP).....	149
Figura 87 - Capacidade instalada, em megawatts (MW), de geração de energia elétrica nas bacias PCJ ao longo do cenário BAU (1995-2019) e cenário RCP (2020-2070).....	153
Figura 88 - Matriz elétrica das bacias PCJ nos anos 2019 e 2070.....	155
Figura 89 - Demanda hídrica considerando a pegada hídrica das usinas de biomassa das bacias PCJ nos cenários BAU e RCP.....	156
Figura 90 - Demanda hídrica considerando a pegada hídrica das usinas de gás natural das bacias PCJ nos cenários BAU e RCP.....	157
Figura 91 - Demanda hídrica das usinas a diesel das bacias PCJ nos cenários BAU e RCP considerando a pegada hídrica do óleo cru.....	157
Figura 92 - Demanda hídrica considerando a pegada hídrica (evaporação) das usinas hidrelétricas das bacias PCJ nos cenários BAU e RCP.....	157
Figura 93 - Toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente (GWP-100) emitidas	

devido ao uso das fontes de energia: A) biomassa bagaço de cana-de-açúcar, B) biogás, C) gás natural e D) diesel na geração de energia elétrica nas bacias PCJ nos cenários BAU e RC.....	159
Figura 94 - Emissão específica de CO <sub>2</sub> equivalente por fonte de energia.....	162
Figura 95 - Demanda pelo uso da água das termelétricas presentes nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	163
Figura 96 - Percentual de atendimento do potencial de geração de energia pelas hidrelétricas Americana, Jaguari e Salto Grande no cenário BAU.....	164
Figura 97 - Percentual de atendimento do potencial de geração de energia pelas hidrelétricas Americana, Jaguari e Salto Grande no cenário RCP4.5.....	164
Figura 98 - Percentual de atendimento do potencial de geração de energia pelas hidrelétricas Americana, Jaguari e Salto Grande no cenário RCP8.5 .....	165
Figura 99 - Demanda anual de energia elétrica, em terajoules (TJ), para uso residencial urbano nas bacias PCJ por finalidade de uso ao longo do cenário BAU (1995-2019) e cenário RCP (2020-2070).....	169
Figura 100 - Porcentagem de participação das finalidades de uso em relação à demanda de energia elétrica média anual residencial urbana nos cenários BAU e RCP.....	170



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variação da precipitação média anual entre os cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	73
Tabela 2 - Temperaturas mínima e máxima mensal nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	83
Tabela 3 - Variação da temperatura média anual entre os cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	84
Tabela 4 - Variação da umidade relativa do ar média anual entre os cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	90
Tabela 5 - Variação da velocidade do vento média anual entre os cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	90
Tabela 6 - Variação da evapotranspiração potencial média anual entre os cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	91
Tabela 7 - Vazão média mensal dos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	94
Tabela 8 - Variação da vazão média anual entre os cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	95
Tabela 9 - Variação da demanda média de uso consuntivo da água entre os cenários RCP4.5 e RCP8.5 e o cenário BAU.....	102
Tabela 10 - Produção anual média, em toneladas (t), das principais lavouras cultivadas nas bacias PCJ no cenário BAU.....	112
Tabela 11 - Produção anual média estimada, em toneladas (t), para as principais lavouras cultivadas nas bacias PCJ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5.....	113
Tabela 12 - Variação da área destinada à agricultura nas bacias PCJ entre o primeiro e último ano dos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	118
Tabela 13 - Variação da área irrigada média entre os cenários RCP4.5 e RCP8.5 e o cenário BAU.....	120
Tabela 14 - Porcentagem de área irrigada em relação à área total média destinada à agricultura nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	120

Tabela 15 - Variação da demanda hídrica para irrigação nas bacias PCJ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em relação ao cenário BAU.....	124
Tabela 16 - Variação da demanda energética média por energia elétrica e diesel, em gigajoules, da atividade de irrigação nas bacias PCJ entre os cenários BAU e RCP.....	126
Tabela 17- Variação da emissão de toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente entre as formas de plantio da soja nos cenários BAU e RCP	141
Tabela 18 - Variação do tamanho do rebanho e sua demanda hídrica nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em relação ao cenário BAU.....	144
Tabela 19 - Variação da demanda energética de maquinários empregados na prática da pecuária nas bacias PCJ no cenário RCP em relação ao cenário BAU.....	147
Tabela 20 - Variação do volume tratado nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) e Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) das bacias PCJ entre os cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.....	150
Tabela 21 - Variação da demanda energética (energia elétrica) das Estações de Tratamento de Água (ETAs) e Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) das bacias PCJ entre os cenários BAU e RCP.....	151
Tabela 22 - Comparação da capacidade instalada de geração de energia elétrica nas bacias PCJ entre os anos 2019 e 2070 por tipo de fonte de energia.....	154
Tabela 23 - Emissão de CO <sub>2</sub> equivalente (GWP-100) pelo setor de energia elétrica, geração de energia elétrica e emissões específicas de CO <sub>2</sub> equivalente nas bacias PCJ nos anos 2019 (cenário BAU) e 2070 (cenário RCP).....	161
Tabela 24 - Variação do percentual de atendimento do potencial de geração de energia pelas hidrelétricas Americana, Jaguari e Salto Grande nos cenários RCP4.5 e RCP8.5	

em relação ao cenário BAU.....	166
Tabela 25 - Demanda de energia elétrica média, em terajoules (TJ), das finalidades de uso residencial urbano nos cenários BAU e RCP.....	171



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>33</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>35</b>
<b>2.1</b>	<b>Modelagem hidrológica dos impactos das mudanças climáticas.....</b>	<b>35</b>
<b>2.2</b>	<b>O nexa água, energia, alimento sob a influência das mudanças climáticas no planejamento dos recursos hídricos.....</b>	<b>39</b>
<b>2.3</b>	<b>Abordagens e modelos desenvolvidos considerando o nexa clima-água- energia-alimento.....</b>	<b>41</b>
<b>2.4</b>	<b>Programas WEAP (“<i>Water Evaluation and Planning</i>” System) e LEAP (“<i>Low Emissions Analysis Platform</i>”) e o Modelo de Interação entre ambos.....</b>	<b>43</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>51</b>
<b>3.1</b>	<b>Características das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ).....</b>	<b>51</b>
<b>3.2</b>	<b>Classificação Climática de Köppen das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí... </b>	<b>52</b>
<b>3.3</b>	<b>Modelo WEAP.....</b>	<b>54</b>
<b>3.4</b>	<b>Modelo LEAP.....</b>	<b>61</b>
<b>3.5</b>	<b>Modelo de Interação.....</b>	<b>64</b>
<b>3.6</b>	<b>Verificação do nexa AEA no WEAP e no LEAP separadamente.....</b>	<b>66</b>
<b>3.7</b>	<b>Limitações dos Modelos.....</b>	<b>66</b>
<b>3.8</b>	<b>Variabilidade espacial da precipitação e temperatura....</b>	<b>68</b>
<b>3.9</b>	<b>Índice Padronizado de Precipitação (SPI) como indicador de mudança climática.....</b>	<b>69</b>
<b>3.10</b>	<b>Índices de Disponibilidade Hídrica.....</b>	<b>70</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>72</b>
<b>4.1</b>	<b>Alterações climáticas.....</b>	<b>72</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Precipitação.....</b>	<b>72</b>
<b>4.1.1.1</b>	<b>Variabilidade espacial da precipitação.....</b>	<b>75</b>

4.1.1.2	<i>Índice Padronizado de Precipitação.....</i>	78
4.1.2	Temperatura.....	81
4.1.2.1	<i>Variabilidade espacial da temperatura.....</i>	84
4.1.3	Umidade relativa do ar e velocidade do vento.....	88
4.1.4	Evapotranspiração potencial.....	91
<b>4.2</b>	<b>Disponibilidade hídrica e alterações na demanda dos recursos hídricos.....</b>	<b>92</b>
4.2.1	Validação do modelo hidrológico.....	92
4.2.2	Relação entre precipitação e vazão.....	93
4.2.3	Vazão média mensal e anual.....	94
4.2.4	Vazões de referência.....	96
4.2.5	Demanda versus disponibilidade.....	99
4.2.6	Índices de disponibilidade hídrica.....	104
4.2.6.1	<i>Índice de Falkenmark.....</i>	<i>104</i>
4.2.6.2	<i>Índice de Estresse Hídrico.....</i>	<i>105</i>
4.2.7	Sistema Cantareira.....	106
<b>4.3</b>	<b>Nexo água-energia-alimento.....</b>	<b>110</b>
4.3.1	Acoplagem WEAP-LEAP.....	110
4.3.2	Produção agrícola.....	112
4.3.3	Agricultura irrigada.....	119
4.3.3.1	<i>Área irrigada.....</i>	<i>119</i>
4.3.3.2	<i>Sistemas de irrigação.....</i>	<i>121</i>
4.3.3.3	<i>Demanda hídrica para irrigação.....</i>	<i>122</i>
4.3.3.4	<i>Demanda energética para irrigação.....</i>	<i>124</i>
4.3.3.5	<i>Emissões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente devido ao uso de energia na irrigação.....</i>	<i>127</i>
4.3.4	Mecanização agrícola.....	129
4.3.4.1	<i>Colheitadeiras de cana-de-açúcar: demanda energética e emissões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.....</i>	<i>129</i>
4.3.4.2	<i>Conjunto de máquinas empregadas no manejo de citros, café e pastagem: demanda energética e emissões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.....</i>	<i>132</i>
4.3.4.3	<i>Equipamentos e máquinas empregadas no manejo da</i>	

	<i>soja: demanda energética e emissões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.....</i>	137
4.3.5	Formas de plantio da soja: demanda energética e emissões de toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente.....	139
4.3.6	Pecuária.....	142
4.3.6.1	<i>Demanda hídrica para dessedentação animal.....</i>	143
4.3.6.2	<i>Demanda energética e emissões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente de maquinários empregados na pecuária.....</i>	146
4.3.7	Tratamento de água e esgoto.....	148
4.3.8	Matriz elétrica.....	152
4.3.8.1	<i>Demanda hídrica considerando a pegada hídrica.....</i>	156
4.3.8.2	<i>Geração de energia elétrica: emissões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.....</i>	159
4.3.9	Demanda pelo uso da água das termelétricas.....	162
4.3.10	Hidroeletricidade.....	164
4.3.11	Uso residencial de energia elétrica.....	168
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>172</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>179</b>
	<b>APÊNDICE A – Modelo WEAP.....</b>	<b>201</b>
	<b>APÊNDICE B – Modelo LEAP.....</b>	<b>221</b>
	<b>APÊNDICE C – Modelo de Interação WEAP-KIB-LEAP framework.....</b>	<b>234</b>
	<b>APÊNDICE D – Código do Modelo de Interação.....</b>	<b>238</b>
	<b>APÊNDICE E – Correção de Viés.....</b>	<b>251</b>
	<b>APÊNDICE F – Validação dos dados da Plataforma Nasa Power Project.....</b>	<b>256</b>
	<b>APÊNDICE G – Área das sub-bacias hidrográficas no cenário BAU.....</b>	<b>259</b>
	<b>APÊNDICE H – Área das sub-bacias hidrográficas nos cenários RCP4.5 e RCP8.5.....</b>	<b>261</b>
	<b>APÊNDICE I – Produção agrícola nas bacias PCJ.....</b>	<b>264</b>
	<b>APÊNDICE J – Toneladas de CO<sub>2</sub>e por megawatt-hora em função do uso de diesel na</b>	

agricultura irrigada.....	266
<b>APÊNDICE L – Toneladas de CO<sub>2</sub>e por megawatt-hora devido à geração de energia elétrica nas bacias PCJ.....</b>	<b>269</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Estudos de previsão sobre o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas sob cenários de mudanças climáticas são essenciais para a viabilização da gestão sustentável dos seus recursos hídricos. Na realização desses estudos, são empregados modelos matemáticos para a previsão da demanda e na simulação da resposta hidrológica da bacia frente às modificações no clima e mudanças no uso e cobertura da terra (Nóbrega *et al.*, 2011; Viola *et al.*, 2014; Silveira *et al.*, 2016).

Getirana, Libonati e Cataldi (2021) destacaram a importância da modelagem matemática da dinâmica hidroclimática local, indicando a estreita relação existente no Brasil entre disponibilidade hídrica, geração de energia e produção de alimentos, visto que a matriz energética brasileira é altamente dependente da hidroeletricidade e que episódios de seca afetam a produtividade agrícola.

Essa relação tem sido observada não só no Brasil como em outros países, o que levou ao surgimento de abordagens para a modelagem donexo água-energia-alimento (AEA) em diversas escalas geográficas: global, nacional, regional, estadual, municipal e em escala de bacia hidrográfica. Para esse propósito, abordagens qualitativas, quantitativas ou uma combinação de ambas foram empregadas (Davies; Simonovic, 2010; Wicaksono; Kang, 2019; Koundouri; Papadaki, 2020).

Ao considerar a área de drenagem de uma bacia hidrográfica na modelagem do nexos AEA de forma quantitativa, é necessário o uso de modelos abrangentes que permitam não apenas a simulação do comportamento hidrológico, como também a dinâmica de aspectos sociais, econômicos e ambientais. Nesse grupo, estão os modelos passíveis de criação no programa WEAP (*“Water Evaluation and Planning” System*) (Sieber, 2023), que ainda apresenta como vantagem a possibilidade de interação com o programa LEAP (*“Low Emissions Analysis Platform”*) (Heaps, 2022), ambos desenvolvidos pelo Instituto Ambiental de Estocolmo, apresentando acesso gratuito às instituições públicas, organizações sem fins lucrativos e pesquisadores atuantes em países em desenvolvimento.

O LEAP permite a criação de modelos que relacionam produção de energia, demanda energética e emissões atmosféricas de gases de efeito estufa (Leap, 2023b). A interação entre ambos possibilita a obtenção quantitativa do nexos AEA.

Entre as possibilidades de interação entre os programas WEAP e LEAP, está a desenvolvida por Fard e Sarjoughian (2020) que criaram um Modelo de Interação (MI) empregando a abordagem de modelagem *Knowledge Interchange Broker*. Uma estrutura de simulação em “RESTful”- *Representational State Transfer* (REST) em Web API (*Application Programming Interface*) permite o acoplamento e a troca de informações entre os programas WEAP e LEAP de forma síncrona e rápida. Nessa abordagem, o WEAP e LEAP foram compartimentalizados, recebendo as denominações C-WEAP e C-LEAP, respectivamente. O MI escrito em NodeJS no Vs Code também é uma ferramenta gratuita.

A modelagem do nexos AEA sob cenários de mudanças climáticas poderá integrar o Plano de Bacia Hidrográfica, também chamado de Plano de Recursos Hídricos, que é um dos instrumentos de gestão presentes na Lei N° 9.433 de 1997, que representa o arcabouço jurídico que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos do Brasil (Brasil, 1997).

Neste contexto, o objetivo geral desta pesquisa foi avaliar e compreender os potenciais impactos das mudanças climáticas no regime hidrológico das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ) considerando o nexos AEA. Constituíram como objetivos específicos:

- Identificar mudanças futuras na temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, evapotranspiração potencial e precipitação das bacias PCJ sob os Caminhos de Concentração Representativos RCP4.5 e RCP8.5;
- Avaliar as alterações na vazão nas bacias PCJ sob cenários de mudanças climáticas, verificando se a disponibilidade hídrica atende as demandas de consuntivo uso da água;
- Determinar, em termos quantitativos, a relação entre os recursos água e energia e a produção de alimentos considerando futuras alterações no clima;
- Examinar a demanda energética e emissão de gases de efeito estufa de máquinas agrícolas e pela atividade de irrigação;
- Investigar a emissão de gases de efeito estufa em virtude da produção de energia elétrica utilizando fontes renováveis e não renováveis de energia;
- Obter a demanda de energia elétrica das estações de tratamento de água e esgoto, de maquinários empregados na pecuária e para uso residencial; e
- Indicar medidas de adaptação/mitigação aos impactos das mudanças climáticas.

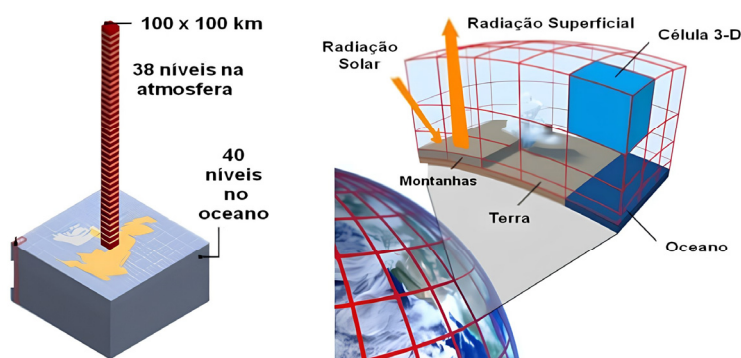
## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Modelagem hidrológica dos impactos das mudanças climáticas

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) define mudanças climáticas como alterações no clima identificadas por meio de testes estatísticos, alterações na média e/ou variabilidade dos dados que persistem por um período prolongado, normalmente décadas ou mais, seja devido à oscilação natural ou como resultado das atividades antrópicas (IPCC, 2007).

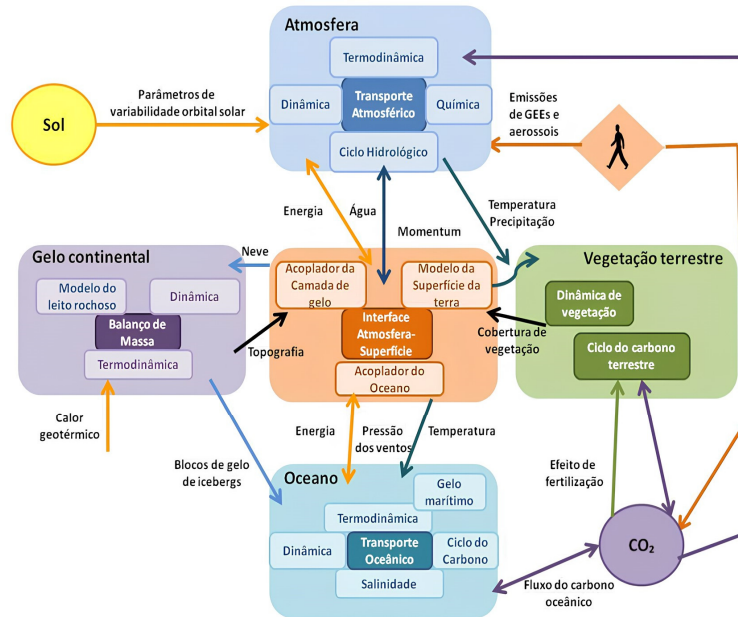
Aplicando modelos climáticos globais, o IPCC definiu cenários de emissões a fim de explorar futuros impactos ao meio ambiente, com especial referência à produção de gases de efeito estufa (GEE) e emissões de aerossóis. Nesses modelos climáticos globais, há a divisão do globo terrestre horizontalmente, em grades que apresentam células variando de 100 a 300 km que abrange toda a superfície terrestre, e verticalmente, em camadas de 19 a 38 níveis para a atmosfera e 20 a 40 níveis para os oceanos (Figura 1). Estruturalmente, um modelo climático é a junção de vários modelos acoplados que descrevem processos físicos que ocorrem na superfície terrestre, no oceano e na atmosfera (Figura 2). As interações entre esses processos definem o comportamento do sistema climático (Brasil, 2015).

**Figura 1 - Representação de componentes, camadas e células de um modelo climático global**



Fonte: Adaptado de Brasil (2015) e Goose (2015)

**Figura 2 - Representação da estrutura de um modelo climático**



Fonte: Brasil (2015) e Easterbrook e Johns (2009)

No Relatório de Avaliação (*Assessment Report-AR*, em inglês) de número 5 (AR5), que é o documento no qual o IPCC apresenta as mudanças climáticas previstas pelos modelos climáticos globais, suas causas e opções de resposta aos potenciais impactos, foi apresentada uma tipologia para os cenários de emissões, que passaram a serem chamados de Caminhos de Concentração Representativos (*Representative Concentration Pathways-RCPs*, em inglês) (IPCC, 2013).

Os RCPs foram desenvolvidos para representar as possíveis emissões e concentrações de GEE que levam diretamente a uma alteração climática e incluem uma trajetória de concentração de GEE ao longo do tempo até alcançar uma particular forçante radiativa em 2100. A forçante radiativa quantifica em unidades de  $W/m^2$ , mudanças no balanço de energia do sistema Terra-atmosfera, mais especificamente:

É a diferença no balanço da irradiância (solar mais ondas longas) na tropopausa após permitir que a temperatura estratosférica se reajuste a uma situação de equilíbrio radiativo, porém com a temperatura na troposfera e na superfície mantidas fixas com valores não perturbados (Forster *et al.*, 2007, p. 133)

Uma forçante radiativa positiva irá induzir um aquecimento global da superfície. O Quadro 1 apresenta os cenários RCPs e seus respectivos valores estimados de forçante radiativa. Já a Figura 3 apresenta as relações de causa-efeito dos RCPs, apresentando as emissões de carbono consideradas em cada Caminho

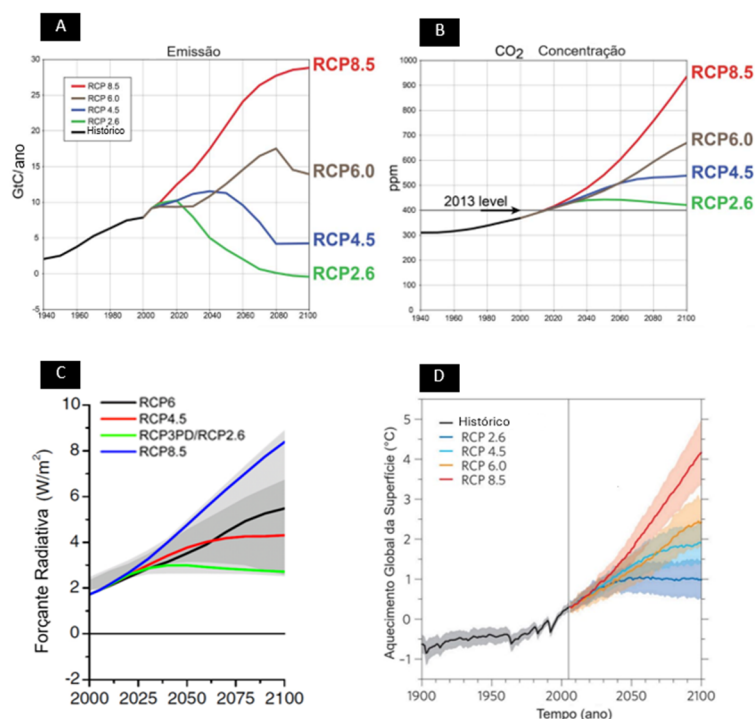
de Concentração Representativo (RCP) que levaram à determinada concentração de dióxido de carbono, que, por sua vez, resulta em uma forçante radiativa específica, que por serem positivas têm como consequência o aumento da temperatura em virtude do aquecimento global da superfície.

**Quadro 1 - Caminhos de Concentração Representativos- RCPs**

Cenário	Descrição
RCP 8.5	Forçante radiativa > 8,5 W/m <sup>2</sup> em 2100
RCP 6.0	Forçante radiativa é estabilizada em aproximadamente 6 W/m <sup>2</sup> após 2100
RCP 4.5	Forçante radiativa é estabilizada em aproximadamente 4,5 W/m <sup>2</sup> após 2100
RCP2.6	Pico na forçante radiativa em ~ 3 W / m <sup>2</sup> antes de 2100, depois declínio.

Fonte: IPCC (2013)

**Figura 3 - A) Emissão de gigatoneladas de carbono (GtC) por ano B) Concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) C) Forçante radiativa e D) Aquecimento global da superfície dos RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5**



Fonte: A) e B) Adaptado de USGS (2014); C) Adaptado de IPCC (2019); e D) Adaptado de Knutti e Sedláček (2012)

A sensibilidade hidrológica de uma bacia hidrográfica devido à influência de uma forçante radiativa positiva se deve a mudanças no aquecimento radiativo atmosférico (Andrews *et al.*, 2010).

Segundo o IPCC (2013), deverão ocorrer mudanças no ciclo hidrológico em função da variabilidade dos padrões de precipitação (diminuição ou aumento da intensidade). Estas alterações poderão afetar significativamente a distribuição temporal e a disponibilidade da vazão dos corpos d'água.

Na projeção dos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos, o IPCC (2013) utilizou médias anuais de seis variáveis hidrometeorológicas: umidade relativa, evaporação, umidade específica, escoamento, diferença entre evaporação, precipitação e umidade do solo. Para o Brasil, as projeções indicaram que os possíveis impactos das mudanças climáticas sobre as bacias hidrográficas podem variar de acordo com a região; por exemplo, foi previsto um potencial de intensificação das condições áridas (pouca precipitação) para algumas áreas da Região Nordeste e da Região Norte, enquanto para a Região Sul, foi projetado um aumento de precipitação e escoamento. Já para a Região Sudeste e Centro-oeste não foi possível a obtenção de tendências convergentes. Ressalta-se que devido à simplificação dos modelos, as projeções apresentam incertezas (ANA, 2016).

Tomando como escala a bacia hidrográfica, diversos estudos realizaram simulações para avaliar os impactos das mudanças climáticas no ciclo hidrológico por meio da aplicação de modelos climáticos e inserção de cenários de emissão (Nóbrega *et al.*, 2011; Silveira *et al.*, 2013; Viola *et al.*, 2014; Silveira *et al.*, 2016; Alvarenga *et al.*, 2016).

Contudo, a disponibilidade de recursos hídricos deve ser avaliada não apenas quanto a variabilidade climática ou por mudanças causadas por fenômenos naturais, mas também pela investigação da influência de fatores não climáticos, tais como: alterações no uso e cobertura do solo, mudanças no uso da água, mudança no regime de vazões em virtude da construção de barragens, entre outros (ANA, 2016). Portanto, um bom planejamento dos recursos hídricos deve conter estudos sobre os impactos cruzados dos sistemas naturais e sociais, como os estudos com a abordagem-nexo que procuram entender as inter-relações e interdependências complexas e não lineares entre clima-água-energia-alimento, levando em consideração possíveis impactos sociais e ambientais.

## **2.2 O nexu água, energia, alimento sob a influência das mudanças climáticas no planejamento dos recursos hídricos**

O processo de urbanização e desenvolvimento econômico do Brasil está diretamente relacionado à evolução dos usos da água (abastecimento humano, irrigação, aquicultura, fins industriais, mineração, lazer, navegação, geração de energia e turismo). De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico-ANA (ANA, 2019a), a demanda por setor usuário é crescente, tendo apresentado aumento de aproximadamente 80% no total de água retirada nas últimas duas décadas, sendo estimado um crescimento de 26% até 2030.

A água é essencial para a produção de alimentos e para a política energética do Brasil, uma vez que, a geração de energia por instalações hidrelétricas corresponde a 64,5% da matriz elétrica brasileira (ANA, 2017), e o consumo de água para irrigação equivale a aproximadamente 66,1% do consumo de água total (ANA, 2019a). Além disso, várias culturas agrícolas, dependentes da disponibilidade hídrica, têm influência na economia brasileira por apresentarem um bom desempenho na produção e exportações comerciais (Tomazela, 2019).

O crescimento das demandas hídricas devido ao aumento populacional e das atividades econômicas intensivas em uso de água podem contribuir para o aumento de crises hídricas.

Nesse contexto, o Fórum Econômico Mundial (2016), classificou a crise hídrica como o risco global de maior preocupação para as pessoas e as economias para os próximos dez anos. De acordo com o especialista em água do Banco Mundial, Thadeu Abicalil, a crise hídrica pode ocorrer devido a fenômenos climáticos ou de gestão, por exemplo, usar água do reservatório quando esta pode faltar no período seguinte, é uma questão de gestão, enquanto fenômenos climáticos podem gerar eventos extremos de seca, como as observadas em 2017, no Distrito Federal; em 2016, no Espírito Santo; e em 2014, em São Paulo (Kafruni, 2019). Assim, para o desenvolvimento social e econômico, é essencial a garantia da segurança hídrica, sendo imprescindível o desenvolvimento de estudos para a previsão dos prováveis impactos provocados por eventos climáticos extremos e o desenvolvimento de ferramentas que permitam uma melhor gestão dos recursos hídricos.

Ao longo da última década, a abordagem do nexu AEA emergiu como um campo de estudo capaz de construir maior compreensão em torno das

interconexões e interdependências entre recursos hídricos, geração e consumo de energia e produção de alimentos. Essa abordagem pode integrar gestão e governança em diferentes escalas e setores em prol do alcance de eficiência no uso de recursos e um desenvolvimento socioeconômico sustentável (Hoff, 2011; Albrecht; Crootof; Scott, 2018).

Problemáticas como mudanças no clima e alterações no uso e cobertura da terra também devem ser consideradas em estudos que aplicam a abordagem AEA, pois podem afetar as interdependências e interconexões entre os recursos água e energia e a produção de alimentos (Mariani *et al.*, 2016).

Para facilitar a compreensão da abordagem do nexo AEA, a Figura 4 apresenta um desenho conceitual representando algumas interconexões e interdependências que podem ser traçadas entre os recursos água, energia e alimento. A água é empregada na geração de energia (nexo água-energia), na irrigação de culturas agrícolas e na dessedentação animal (nexo água-alimento). Ao mesmo tempo, a energia é utilizada no bombeamento, distribuição e tratamento da água e na coleta e tratamento do esgoto e efluentes (nexo energia-água). Além disso, a energia é também um recurso essencial para a produção, processamento e transporte de alimentos (nexo energia-alimento). Por outro lado, a produção de culturas para geração de biocombustíveis utiliza água e energia e pode desencadear conflitos com preços de commodities agrícolas (nexo água-energia-alimento). O clima é um fator central que influencia os recursos hídricos, a geração e demanda de energia e a produção de alimentos.

**Figura 4 - Desenho conceitual do nexo água-energia-alimento sob alterações climáticas**



As interações do nexos AEA são frequentemente específicas para cada estudo, podendo variar de acordo com a localização geográfica, clima, economia, história, demanda de recursos e outros fatores contextuais. Por exemplo, para quantificar o nexos AEA para um determinado país, é necessário levar em consideração a água virtual, que representa a quantidade de água utilizada no processo produtivo, dos produtos agrícolas. Esse conteúdo virtual de água dos produtos agrícolas varia de país para país dependendo das práticas agrícolas adotadas. Também, é necessário quantificar a energia consumida no processamento e distribuição dos alimentos. Além disso, a captação e consumo de água por fontes de energia primária deve ser quantificada, como a água utilizada na produção de energia hidrelétrica, de energia térmica, ou na produção de culturas agrícolas destinadas a produção de biocombustíveis (Hoff, 2011).

Albrecht, Crootof e Scott (2018) realizaram uma revisão bibliográfica de estudos que aplicaram a abordagem do nexos AEA, identificando o uso de ferramentas analíticas, plataformas interativas de compartilhamento de dados, teoria geral de sistemas, combinação de modelos físicos, sociais e econômicos e integração de métodos qualitativos e quantitativos. Destaca-se que esses métodos e ferramentas supracitados são aplicáveis na modelagem do nexos AEA em escala de bacia hidrográfica.

O principal risco de utilizar a abordagem do nexos AEA sem considerar os dados de modelos climáticos é que as mudanças climáticas podem alterar gradualmente o equilíbrio entre os recursos envolvidos no nexos, e até mesmo a natureza das suas interações. Da mesma forma, ao desenvolver serviços climáticos para um setor (Ex.: água) sem considerar o nexos AEA, e tentar adaptar somente esse setor às mudanças climática, pode gerar consequências não intencionais e indesejáveis aos demais setores e escalas econômicas (Cremades *et al.*, 2019).

### **2.3 Abordagens e modelos desenvolvidos considerando o nexos clima-água-energia-alimento**

Diversas abordagens e modelos vêm sendo desenvolvidas para a modelagem do nexos AEA. No trabalho desenvolvido por Koundouri e Papadaki (2020), é apresentada a abordagem DAFNE, resultante de um projeto homônimo, DAFNE é

um acrônimo para “*Decision-Analytic Framework to explore the water-energy-food NEexus in complex and transboundary water resources systems of fast growing developing countries*”, em tradução livre, DAFNE é uma estrutura de decisão analítica para explorar o nexo água-energia-alimento em bacias hidrográficas transfronteiriças em países em desenvolvimento acelerado. Nesta abordagem, cenários de desenvolvimento econômico e mudanças climáticas foram gerados por meio da combinação de Caminhos Socioeconômicos Compartilhados, denominados em inglês como *Shared Socio-economic Pathways* (SSPs), e Caminhos de Concentração Representativos no horizonte de tempo de 2018 a 2060. O objetivo do trabalho foi desenvolver uma melhor compreensão do nexo AEA por meio do fornecimento de dados de entrada para um modelo de otimização de custo-benefício, cujo foco é alocar de forma otimizada os recursos água, energia e alimento ao longo do tempo e espaço.

A Dinâmica de Sistemas é uma abordagem que permite a construção de relações de causa e efeito entre as variáveis ao longo do tempo, análise de diferentes tempos de resposta e construção de retroalimentações. Por conta disso, tem sido utilizada na construção de modelos holísticos que incluem o nexos AEA.

Utilizando Dinâmica de Sistemas, Wicaksono e Kang (2019) desenvolveram um modelo de simulação, denominado em inglês como “*Water-Energy-Food Nexus Simulation Model (WEFSiM)*”, cuja tradução para português é: Modelo de Simulação do Nexos Água-Energia-Alimento. Levando em consideração as retroalimentações existentes, esse modelo aloca água, energia e alimento com valores iguais, sendo capaz de identificar os fatores críticos que afetam a disponibilidade de certos recursos (ex. produção de alimentos pode ser afetada pela disponibilidade de terra, água ou energia). No modelo, vários tipos de recursos hídricos, usinas para produção de energia e categorias de alimentos foram implementados com o intuito de promover um resultado mais preciso e uma simulação detalhada.

Também aplicando Dinâmica de Sistemas, Davies e Simonovic (2010) desenvolveram o modelo denominado *ANEMI*, um termo grego antigo para os quatro ventos, mensageiros das quatro estações. O ANEMI conecta sistemas físicos como o clima, hidrologia e ciclo do carbono, com sistemas socioeconômicos que alterarão e serão alterados por estes (economia, uso da terra, mudanças na população, uso e qualidade da água), explorando como as interações e retroalimentações entre os sistemas.

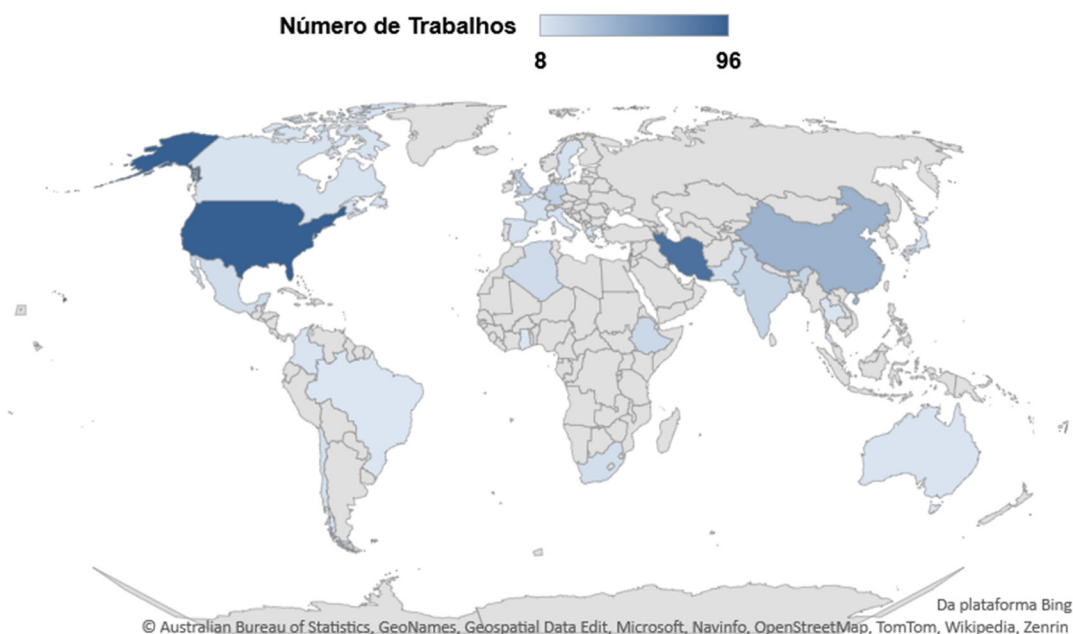
A abordagem DAFNE foi desenvolvida com foco de aplicação em bacias hidrográficas transfronteiriças de países em desenvolvimento acelerado, enquanto os modelos *WEFSiM* e *ANEMI* foram desenvolvidos para aplicação de análises considerando, dados de um país como um todo (*WEFSiM*) ou todos os países, numa análise global (*ANEMI*). Nota-se, portanto, a importância do desenvolvimento de estudos capazes de avaliar onexo AEA sob o contexto de mudanças climáticas em escalas reduzidas, abrangendo os impactos ao nível local, como uma área de drenagem de uma bacia hidrográfica banhada por rios estaduais ou federais.

#### **2.4 Programas WEAP (“*Water Evaluation and Planning*” System) e LEAP (“*Low Emissions Analysis Platform*”) e o Modelo de Interação entre ambos**

O WEAP e o LEAP são programas desenvolvidos na década de 80 (Weap, 2023a; Leap, 2023a). Desde então, ambos têm passado por atualizações contínuas. Instituições públicas, organizações sem fins lucrativos (como é o caso das Agências de Bacia) e pesquisadores de países em desenvolvimento têm acesso gratuito aos programas, sendo necessário apenas a criação de um cadastro para a obtenção da licença com validade de um (1) ano para o WEAP e de 1 ano e 6 (seis) meses para o LEAP, que poderão ser renovadas conforme solicitação do usuário.

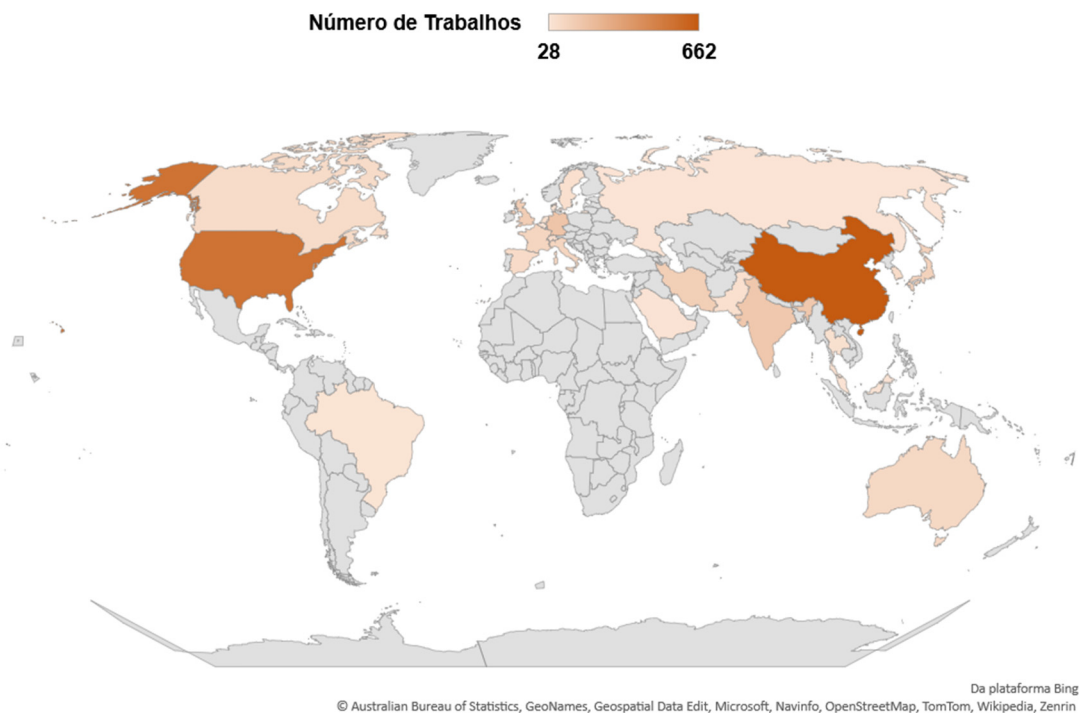
Uma análise bibliométrica utilizando a base de dados *Web of Science*, digitando como busca o termo “WEAP” e, posteriormente, o termo “LEAP”, revelou que em 26 de agosto de 2023, havia 509 trabalhos publicados utilizando o programa WEAP e 2.871 publicações que empregaram o programa LEAP em suas análises. Considerando os 25 maiores resultados obtidos na busca, as Figuras 5 e 6 foram geradas representando a distribuição geográfica desses trabalhos para o WEAP e o LEAP, respectivamente.

**Figura 5 - Número de trabalhos publicados utilizando o WEAP por país, considerando os vinte e cinco maiores resultados**



Fonte: Dados retirados de Analytics (2023)

**Figura 6 - Número de trabalhos publicados utilizando o LEAP por país, considerando os vinte e cinco maiores resultados**



Fonte: Dados retirados de Analytics (2023)

No WEAP, é possível a criação de modelos hidrológicos holísticos, capazes de integrar informações climáticas e de uso e cobertura da terra, com aspectos

socioeconômicos, permitindo também o desenvolvimento de cenários. A escala temporal é variável, podendo ser diária, mensal, sazonal ou anual. Ademais, apresenta a possibilidade de conexão com outros programas para a modelagem da qualidade da água (programa QUAL2K) e a dinâmica das águas subterrâneas (programas MODFLOW e MODPATH).

O processo de criação de um modelo no WEAP se dá por meio da inserção e conexão de elementos, os quais são apresentados no Quadro 2. Haverá a opção de inserção de dados para cada elemento adicionado. O usuário poderá adicionar quantos elementos julgar necessário, não sendo obrigatório o acréscimo de todos os elementos. A quantidade de cada elemento também ficará a critério do usuário.

**Quadro 2 - Símbolos (elementos) presentes no WEAP para a criação do modelo**

WEAP	
— River	Rio
— Diversion	Desvio
▲ Reservoir	Reservatório
■ Groundwater	Água subterrânea
◆ Other Supply	Outras fontes hídricas
● Demand Site	Demanda
● Catchment	Bacia ou sub-bacias hidrográficas
● Wastewater Treatment Plant	Estação de Tratamento de Esgoto
-- Runoff/Infiltration	Escoamento/Infiltração
— Transmission Link	Link de transmissão = retirada de água
— Return Flow	Vazão de retorno
■ Run of River Hydro	Hidrelétrica
⊕ Flow Requirement	Vazão requerida (ex.: $Q_{90}$ , $Q_{95}$ , $Q_{7,10}$ )
★ Streamflow Gauge	Estação Fluviométrica

No Brasil, o WEAP tem sido utilizado no desenvolvimento de pesquisas acadêmicas. O Quadro 3 apresenta alguns desses estudos que foram selecionados a fim de demonstrar como o programa pode ser empregado em estudos com objetivos diversos. Herrera (2013) e Silva (2015) empregaram o WEAP na avaliação da qualidade da água, enquanto o foco de Trigueiro (2016) e Silva (2019) foi a verificação da disponibilidade hídrica para os usos múltiplos. Já Arroyo (2012) e Souza (2018) avaliaram a disponibilidade hídrica para geração de energia por fontes

de energia não renováveis (carvão mineral e petróleo). Ao passo que, Gonçalves (2018), Moraes (2018) e Rezende (2021) exploraram diferentes cenários relativos às decisões quanto à alocação de recursos hídricos, enquanto Castro 2019 verificou o atendimento de índices e indicadores de sustentabilidade ligados à gestão de recursos hídricos.

**Quadro 3 - Estudos Acadêmicos desenvolvidos no Brasil por meio de modelos criados no programa WEAP**

<b>Título do estudo</b>	<b>Autor</b>
Proposta metodológica para avaliação da vulnerabilidade da geração termelétrica a carvão mineral no Brasil às mudanças climáticas	Arroyo (2012)
Integração de modelos de quantidade e qualidade da água para avaliação de cargas contaminantes em afluentes de mananciais de abastecimento	Herrera (2013)
Integração dos modelos QUAL2K e WEAP para modelagem da qualidade da água em corpos receptores de efluentes de ETEs em áreas de adensamento urbano no Distrito Federal	Silva (2015)
Estimativa da disponibilidade hídrica para usos múltiplos em reservatórios sob periódicas crises hídricas: estudo de caso	Trigueiro (2016)
Avaliação de medidas de gerenciamento da demanda no sistema hídrico do Descoberto e interligações com sistema Santa Maria/Torto	Gonçalves (2018)
Custo da escassez para a indústria em diferentes cenários de decisões do uso da água	Moraes (2018)
Modelagem da disponibilidade hídrica em refinarias de petróleo brasileiras: o caso da REPLAN	Souza (2018)
Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Paracatu: avaliação do modelo WEAP como ferramenta de planejamento e gestão de recursos hídricos	Silva (2019)
Emprego de indicadores e índices de sustentabilidade na avaliação de medidas emergenciais de gestão da água: caso da Bacia do Rio Descoberto, DF	Castro (2019)
Aplicação do modelo WEAP em cenários de alocação de água na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Baixo Pardo/Grande	Rezende (2021)

No programa LEAP, modelos podem ser desenvolvidos em escala geográfica nacional, regional, estadual ou local, sendo necessária a inserção de dados nas categorias apresentados no Quadro 4.

**Quadro 4 - Categorias disponíveis no LEAP para a criação do modelo**

LEAP	
<i>Key assumptions</i> (Pressupostos chaves)	São usados para indicar variáveis e dados (Ex.: Investimento, produção industrial, *PIB, população etc.) que não são gerados como resultados do LEAP. São usados como variáveis intermediárias que podem ser utilizadas em cálculos relacionados à demanda, transformação e recursos.
<i>Demand</i> (Demanda)	É o usuário de energia em uma área. Ex.: Residências, indústrias, máquinas agrícolas, meios de transporte, estações de tratamento de água etc. Ao inserir uma demanda é necessário informar o tipo de combustível requerido (eletricidade, diesel, gás natural etc.)
<i>Transformation</i> (Transformação)	Representa um setor de conversão de energia. Ex.: Geração, transmissão e distribuição de eletricidade, refino de petróleo, fabricação de carvão, entre outros.
<i>Process</i> (Processo)	Faz parte do módulo <i>Transformation</i> (Transformações). Representa as tecnologias individuais que convertem energia de uma forma para outra ou transmitem ou distribuem energia. Cada processo tem um ou mais combustíveis como matéria-prima. Ex.: Usina termelétrica movida a gás natural, máquina agrícola movida a diesel, bombas hidráulicas movidas por motores diesel ou por eletricidade etc.
<i>Resources</i> (Recursos)	São subdivididos em recursos primários (Ex.: água, gás natural, bagaço de cana-de-açúcar, madeira etc.) e secundários (Ex.: diesel, eletricidade, óleo residual). São adicionados automaticamente conforme o tipo de combustível escolhido na entrada de dados sobre a demanda e transformação.
<i>Multiple Effects</i> (Efeitos Múltiplos)	Ao adicionar efeitos múltiplos, as cargas ambientais de emissão de gases de efeito estufa para uma determinada tecnologia pode ser calculada. A seleção das cargas ambientais para o tipo de combustível deve ser realizada por meio da consulta ao banco de dados disponível no LEAP. Nele há fatores de emissão para centenas de tecnologias de consumo e produção de energia, incluindo os fatores de emissão padrão sugeridos pelo **IPCC para uso em análises de mitigação de mudanças climáticas.

\*PIB= Produto Interno Bruto; \*\*IPCC= Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

Fonte: Adaptado de Leap (2023b)

Os modelos criados permitem a obtenção de resultados quanto a quantificação da produção de energia por tipo de recurso utilizado (água, diesel, gás natural, biomassa, resíduos de madeira, entre outros), da demanda por tipo de combustível requerido e das emissões atmosféricas de gases de efeito estufa por

tipo de recurso utilizado. Destaca-se que a quantificação dessas emissões atmosféricas permite a obtenção de relatórios úteis para o planejamento sustentável do uso dos recursos energéticos com vistas a mitigação das mudanças climáticas. A escala temporal é anual, porém é possível dividir o tempo em partes (*time slices*) conforme o regime de operação, por exemplo, de uma usina de geração de energia.

O Quadro 5 apresenta alguns dos estudos desenvolvidos no Brasil utilizando o LEAP que foram selecionados com o intuito de demonstrar as possibilidades de uso do programa em estudos com diferentes finalidades. Udaeta *et al.* (2004) verificaram o planejamento integrado de recursos empregados na geração de energia em escala regional; por outro lado, Collaço (2019) avaliou o planejamento energético em escala local. Já Tavares *et al.* (2011) modelaram a eficiência energética de um setor gerador de energia, neste caso, a indústria de petróleo, gás e biocombustíveis. Nesse mesmo sentido, Scari (2011) avaliou cenários de consumo, considerando somente um setor consumidor, sendo esse o consumo residencial.

**Quadro 5 - Estudos Acadêmicos desenvolvidos no Brasil por meio de modelos criados no programa LEAP**

<b>Título do estudo</b>	<b>Autor (es)</b>
Proposição para o Interior Paulista do Planejamento Integrado de Recursos	Udaeta <i>et al.</i> (2004)
Eficiência Energética na Indústria do Petróleo, Gás e Biocombustíveis	Tavares <i>et al.</i> (2011)
Cenários de consumo de energia elétrica para o setor residencial de Belo Horizonte	Scari (2011)
Introdução de veículos elétricos e impactos sobre o setor energético brasileiro	Brajterman (2016)
Sinergias entre o planejamento energético e o planejamento urbano: estudo de caso do sistema de energia urbano da megacidade de São Paulo	Collaço (2019)
O papel das energias renováveis no processo de transição energética do estado de Minas Gerais: modelagem de sistemas energéticos para o horizonte 2030-2050	Anjos (2019)
Análise integrada do nexos água-energia-emissões e mitigação das externalidades para o estado de Minas Gerais	Melo (2020)

Brajterman (2016) e Anjos (2019), utilizando o LEAP, avaliaram o impacto gerado pela criação de políticas públicas; o primeiro verificou como uma política nacional de incentivo ao uso de veículos elétricos influenciaria o setor energético brasileiro, ao passo que, o segundo investigou a influência de uma política estadual de incentivo ao uso de energias renováveis no processo de transição energética do estado de Minas Gerais. Já Melo (2020) estudou o nexo água-energia-emissões no estado de Minas Gerais empregando além no LEAP, o WEAP, interligando os dois programas por meio do recurso *Link to LEAP Energy Model* presente no WEAP. O link entre os programas permitiu a avaliação dos impactos das alterações na disponibilidade hídrica na geração de energia por hidrelétricas localizadas no estado, contudo, a sua execução exige que os modelos criados no WEAP e no LEAP apresentem a mesma escala temporal, sendo essa uma limitação do uso dessa ferramenta.

Visando possibilitar o link dos programas WEAP e LEAP, empregando modelos com diferentes escalas temporais (diária, mensal ou anual), Fard e Sarjoughian (2020) desenvolveram um Modelo de Interação utilizando a abordagem *Knowledge Interchange Broker* (KIB). O algoritmo do modelo apresenta a componentização dos programas WEAP (C-WEAP) e LEAP (C-LEAP) em RESTful. Via APIs RESTful<sup>1</sup>, dados de entrada ou saída dos modelos criados nos programas WEAP e LEAP são acessados externamente, permitindo a troca desses dados entre eles por meio do estabelecimento de uma interação (Fard *et al.*, 2020). Essa abordagem recebeu a denominação de *WEAP-KIB-LEAP framework*.

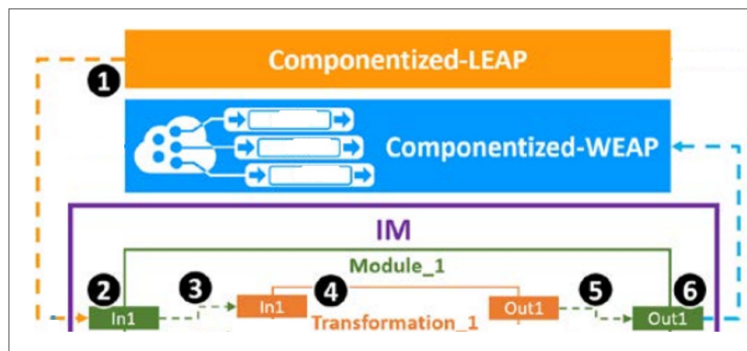
A Figura 7 apresenta como ocorre uma interação entre o WEAP e o LEAP durante a execução do algoritmo do Modelo de Interação. No passo **1**, um dado de entrada ou um resultado do modelo criado no LEAP é selecionado para ser um dado de entrada no programa WEAP (passo **2**), em seguida, deve-se fazer a transformação do dado proveniente do programa LEAP em um dado de entrada no programa WEAP, (passos **3** e **4**). Após a transformação, o dado proveniente do modelo LEAP deve ser acoplado ao local determinado no modelo WEAP, passando a ser um dado de entrada para o modelo criado no WEAP (passos **5** e **6**). Várias interações podem ser estabelecidas entre os programas com dados transformados

---

<sup>1</sup> API RESTful é uma interface em que dois sistemas de computador podem usar a fim de trocarem informações de maneira segura via internet (AMAZON, 2023).

do LEAP para o WEAP ou do WEAP para o LEAP, sendo elas executadas simultaneamente.

**Figura 7 - Representação do processo de execução do Modelo de Interação**



**Fonte:** Adaptado de Fard e Sarjoughian (2020)

Para melhor entendimento do funcionamento de uma interação, considere essa situação hipotética: a estação de tratamento de água de uma cidade utiliza 5 quilowatt-hora (kWh) de eletricidade para produzir 1 m<sup>3</sup> de água tratada, então temos a métrica 5 kWh/m<sup>3</sup> como uma medida de intensidade de uso de energia elétrica. A demanda por água tratada na cidade irá crescer conforme o crescimento populacional (habitantes) e o uso per capita (consumo, em m<sup>3</sup> por habitante). Nesse exemplo, a demanda da estação de tratamento (volume a ser tratado, em m<sup>3</sup>) seria um resultado calculado pelo modelo criado no WEAP baseado nas informações de entrada: números de habitantes e uso per capita. Esse valor, volume tratado em m<sup>3</sup>, pode ser um dado de entrada no modelo LEAP, categoria “demanda” (Quadro 4), a fim de se obter a variação do consumo energético da estação em questão que será calculada pelo modelo criado no programa LEAP. Dessa forma, temos a obtenção em termos quantitativos da ligação existente entre os recursos água e energia por meio da acoplagem de dados do modelo WEAP ao modelo LEAP.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Características das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ)

As bacias hidrográficas dos rios PCJ, também denominadas como bacias PCJ, totalizam uma área de drenagem de aproximadamente 15.378 km<sup>2</sup>, 92,5% desta área está localizada no estado de São Paulo e 7,5% no estado de Minas Gerais. Situa-se entre os meridianos 46° e 49° oeste e paralelos 22° e 23,5° sul (Agência das Bacias PCJ, 2023a). No estado de São Paulo, as bacias PCJ, todas afluentes do Rio Tietê, estendem-se por 14.250,1 km<sup>2</sup>. Já no estado de Minas Gerais, estendem-se por 1.125,9 km<sup>2</sup>. Em termos hidrográficos, há nove (9) rios principais contribuintes às bacias PCJ: Atibaia, Atibainha, Cachoeira, Camanducaia, Capivari, Corumbataí, Jaguari, Jundiá e Piracicaba (Figura 8) (Agência das Bacias PCJ, 2018).

**Figura 8 - Localização das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá e Hidrografia Principal**



Fonte: Consórcio PCJ (2023a)

De acordo com a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei 9.433 de 1997: “bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos” (Brasil, 1997). Dessa forma, cada bacia hidrográfica brasileira é uma Unidade de Gestão de Recursos Hídricos (UGRH).

As bacias PCJ caracterizam-se como uma UGRH cujo desenvolvimento econômico representa cerca de 5% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil (CBH-PCJ; CBH-PJ1, 2020); portanto, os impactos das mudanças climáticas nas bacias PCJ podem resultar em efeitos econômicos, que afetarão não somente a economia local, mas também a economia nacional.

Nos Planos de Recursos Hídricos das bacias PCJ 2010-2020 e 2020-2035, um dos instrumentos da PNRH, foram apresentados diagnósticos atuais, prognósticos e planos de ação, porém, nenhum destes apresentam questionamentos quanto aos possíveis impactos das mudanças climáticas no regime hidrológico das bacias e as consequências para os setores usuários.

Devido à sua importância econômica e pela não abordagem dos potenciais impactos das mudanças climáticas nos Planos de Recursos Hídricos das bacias PCJ, essa UGRH foi selecionada para o desenvolvimento da modelagem donexo AEA considerando, cenários de mudança climática.

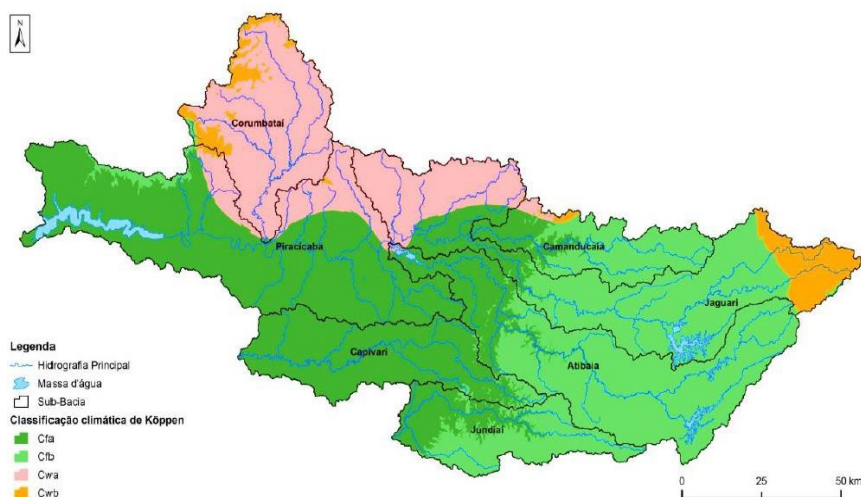
### **3.2 Classificação Climática de Köppen das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá**

Os tipos climáticos de Köppen são simbolizados por dois ou três caracteres, em que o primeiro caractere indica a zona climática e é definido pela temperatura e precipitação, o segundo considera a distribuição da precipitação, e o terceiro a variação sazonal da temperatura. Segundo a classificação de Köppen, as bacias PCJ estão localizadas em clima subtropical úmido (C), sendo dividida em quatro faixas: Cfa, Cfb, Cwa e Cwb (Figura 9), que apresentam as seguintes características:

- a) Cfa: clima subtropical sem estação seca (mês mais seco com precipitação > 40 mm) e com verão quente (temperatura média no

- verão  $\geq 22$  °C). Ocupa 41% da área das bacias PCJ e se estende pela faixa sul das bacias da porção central até o limite oeste da região.
- b) Cfb: clima subtropical sem estação seca (mês mais seco com precipitação  $> 40$  mm) e com verão ameno (temperatura média no verão  $< 22$  °C). É o segundo clima mais representativo, encontrado em 36% da área total, se estendendo da porção central das bacias PCJ até próximo às áreas de nascentes localizadas nos municípios de Itapeva e Camanducaia. Também é encontrado próximo ao divisor de águas no extremo oeste das bacias, nas porções localizadas nas encostas dos Patamares da Borda Oriental da Bacia do Rio Paraná.
- c) Cwa: clima subtropical com inverno seco (mês mais seco com precipitação  $< 40$  mm) e com verão quente (temperatura média no verão  $\geq 22$  °C). Corresponde a 19% da área total das bacias PCJ, estando concentrado na sub-bacia Corumbataí, no norte da bacia Piracicaba, e oeste da sub-bacia Jaguari.
- d) Cwb: clima subtropical com inverno seco (mês mais seco com precipitação  $< 40$  mm) e com verão ameno (temperatura média no verão  $< 22$  °C). Este clima está concentrado nas áreas mais altas das bacias PCJ, nos extremos leste e oeste, e ocupa apenas 4% da área total (Agência das Bacias PCJ, 2018).

**Figura 9 - Classificação climática das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí**



**Fonte:** Adaptado de Alvares *et al.* (2013) e Agência das Bacias PCJ (2018)

### 3.3 Modelo WEAP

No WEAP, o balanço hídrico dos recursos superficiais das bacias PCJ foi calculado pelo método *Rainfall Runoff Soil Moisture Method* (Método de Umidade do Solo Chuva Escoamento, em português), descrito na Equação 1.

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left( \frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2 \quad (1)$$

Em que,  $z_{1,j}$  [0 a 1] é o armazenamento relativo dado como uma fração do armazenamento total efetivo da zona radicular,  $Rd_j$  (mm), para a fração de ocupação do solo  $j$ ;  $P_e$  é a precipitação efetiva (mm);  $PET$  é a evapotranspiração potencial baseada no método de Penman-Monteith (mm);  $k_{c,j}$  é o coeficiente de cultivo para cada fração de ocupação do solo (adimensional);  $RRF_j$  é o fator de resistência ao escoamento superficial da cobertura do solo (adimensional);  $k_{s,j}$  é uma estimativa da condutividade saturada da zona radicular (mm/tempo) e  $f_j$  é um coeficiente de partição que fraciona a água na direção horizontal e vertical (adimensional).

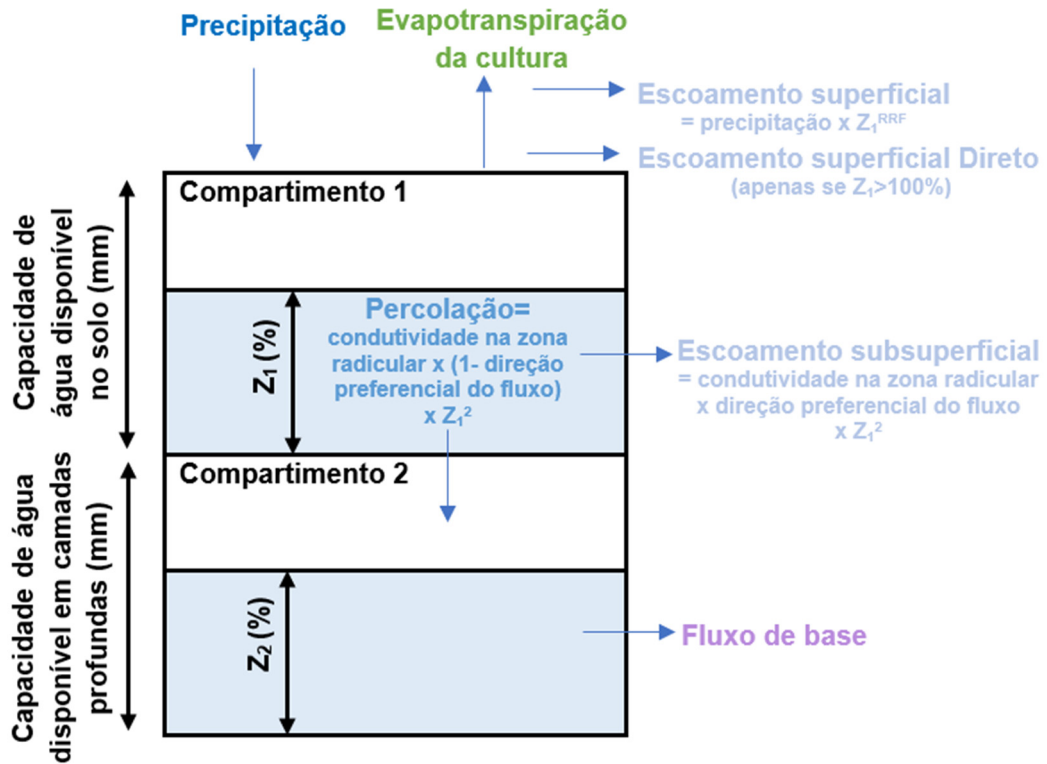
Dividindo os termos da Equação 1 conforme os componentes do ciclo hidrológico, temos:

- a)  $P_e(t)$  equivale à precipitação;
- b)  $PET(t)k_{c,j}(t)$  equivale à evapotranspiração da cultura;
- c)  $P_e(t)z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_{s,j} z_{1,j}^2$  equivale ao escoamento superficial e subsuperficial; e
- d)  $(1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2$  equivale ao escoamento subterrâneo.

Neste caso, o ciclo hidrológico é um ciclo fechado, com o balanço hídrico representando as entradas e saídas de água na bacia hidrográfica. Dessa forma, obtêm-se as alterações na quantidade de água disponível na bacia ao longo do tempo, ou seja, a variação do seu regime hidrológico.

Para melhor compreensão, a Figura 10 apresenta um diagrama conceitual do método selecionado.

Figura 10 - Diagrama conceitual do *Soil Moisture Method*



Fonte: Adaptado de Weap (2023b); x = símbolo de multiplicação

Em virtude do modelo desenvolvido para as bacias PCJ não apresentar fluxo de retorno para um aquífero, o que permitiria a modelagem da dinâmica das águas subterrâneas, o fluxo de base representando no modelo conceitual (Figura 10) foi determinado conforme a Equação 2.

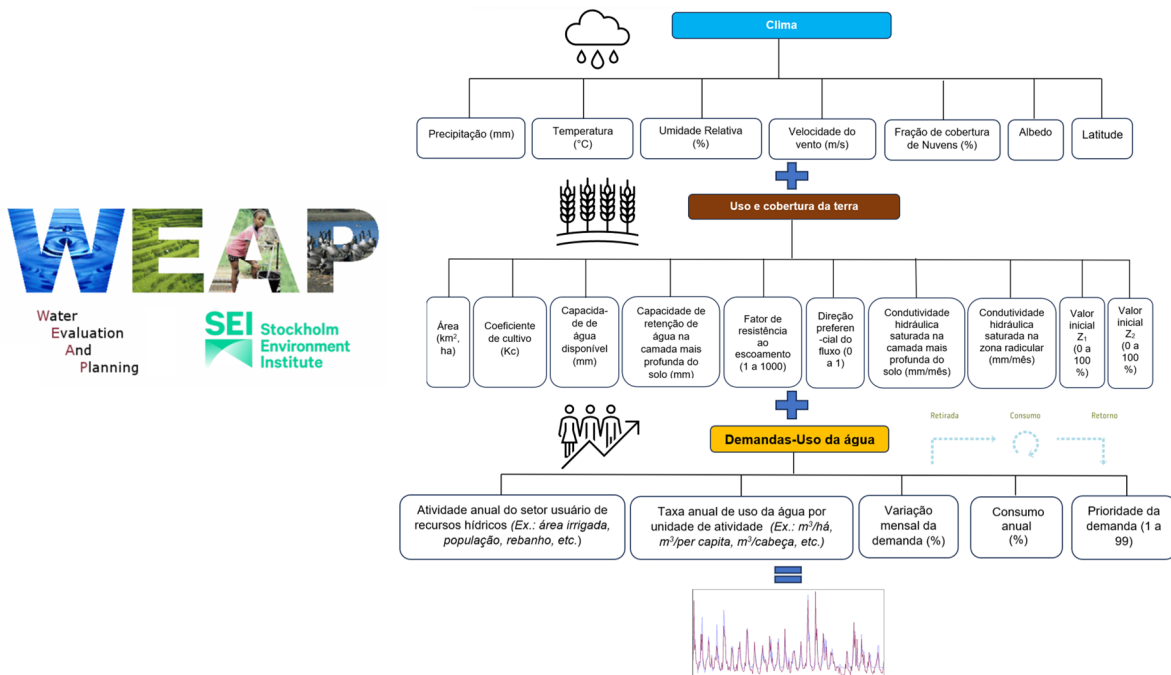
$$S_{\max} \frac{dz_2}{dt} = \left[ \sum_{j=1}^N (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2 \right] - k_{s,2} z_2^2 \quad (2)$$

Em que,  $S_{\max}$  representa a percolação de água advinda da camada superior  $Z_1$ , obtido por meio da Equação 1;  $f_j$  é um coeficiente de partição que fraciona a água na direção horizontal e vertical (adimensional);  $k_{s,j}$  é uma estimativa da condutividade saturada da zona radicular (mm/tempo);  $z_{1,j}$  [0 a 1] é o armazenamento relativo dado como uma fração do armazenamento total efetivo da zona radicular para a fração de ocupação do solo  $j$  (adimensional);  $k_{s,2}$  é a condutividade saturada da camada inferior de armazenamento (mm/tempo), sendo definido um único valor para a bacia hidrográfica e, portanto, não inclui um subscrito

$j$ ; e  $z_2$  é o armazenamento relativo dado como uma fração do armazenamento efetivo total na camada inferior do solo (adimensional).

Como o regime hidrológico de uma bacia é influenciado pelos usos consuntivos da água, ou seja, o uso no qual a vazão de retirada do recurso hídrico é total ou parcialmente consumida, as demandas de uso consuntivo devem ser consideradas. Por essa razão, no modelo desenvolvido para as bacias PCJ no WEAP, além da entrada de dados climáticos e de uso e cobertura da terra, também foram inseridos dados sobre as demandas de uso consuntivo (valores de retirada, consumo e retorno dos recursos hídricos) conforme a Figura 11.

**Figura 11 - Dados de entrada no WEAP para modelagem do regime hidrológico das bacias PCJ**



O Quadro 6 apresenta as fontes empregadas no preenchimento de dados referentes às variáveis constantes nos fluxogramas clima, uso e cobertura da terra e “demandas-uso da água” (Figura 11). Uma descrição mais detalhada desse processo pode ser encontrada no Apêndice A.

**Quadro 6 - Fonte de dados consultadas referentes ao clima, uso e cobertura da terra e demandas-uso da água**

<b>Dados</b>	<b>Fonte de dados</b>
Clima	DAEE (2023); CIIAGRO (2023); Nasa Power Project (2023); Holbig <i>et al.</i> (2018)
Uso e cobertura da terra	Área: Projeto Mapbiomas (2023); Coeficientes de cultivo: Silva <i>et al.</i> (2011)
Demandas-Usos da água	SNIRH (2022a, 2022b); SIDRA (2023); SEADE (2021)

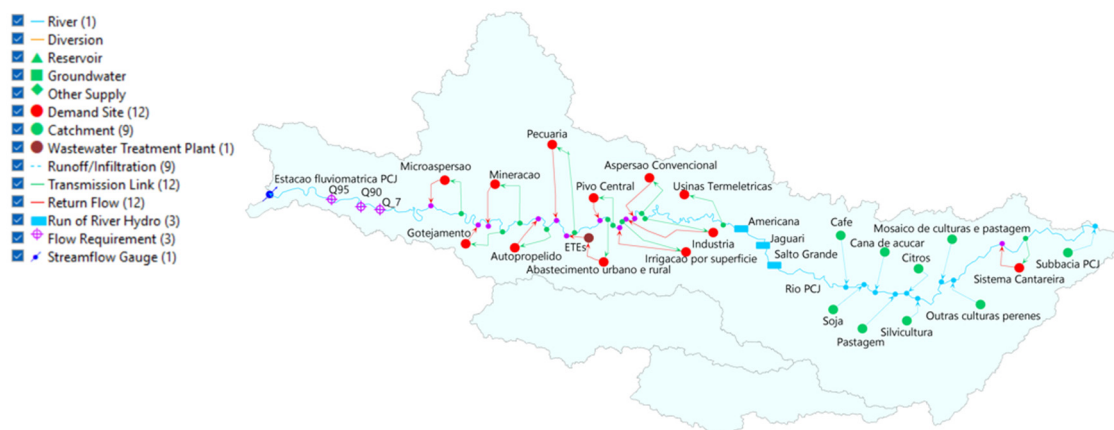
No modelo criado no WEAP para as bacias PCJ, cuja representação esquemática é apresentada na Figura 12, foram inseridos os elementos:

- 1) 1 “Rio” denominado como Rio PCJ;
- 2) 12 “demandas” denominadas como: 1) abastecimento urbano e rural; 2) mineração; 3) pecuária; 4) indústria; 5) irrigação por superfície; 6) aspersão convencional; 7) pivô central; 8) autoprovelido; 9) gotejamento; 10) microaspersão; 11) Usinas Termelétricas; 12) Sistema Cantareira;
- 3) 9 “sub-bacias hidrográficas” denominadas como: 1) pastagem; 2) café; 3) cana-de-açúcar; 4) soja; 5) citros; 6) silvicultura; 7) outras culturas perenes; 8) mosaico de culturas e pastagem e 9) sub-bacia PCJ;
- 4) 1 “Estação de Tratamento de Esgoto”, denominada como ETEs, que representa a capacidade de tratamento considerando todas as estações de tratamento existentes nas bacias hidrográficas PCJ;
- 5) 9 “escoamento/infiltração” referentes às nove sub-bacias hidrográficas criadas, todos eles direcionados ao Rio PCJ;
- 6) 12 “links de transmissão” referentes às retiradas para atender às doze demandas;
- 7) 12 “vazões de retorno”, representa o retorno de efluentes, 11 (onze) delas referentes às demandas: abastecimento urbano e rural; mineração; pecuária; indústria; irrigação por superfície; aspersão convencional; pivô central; autoprovelido; gotejamento; microaspersão e Sistema Cantareira; e 1 (uma) referente às ETEs. Com exceção da demanda abastecimento urbano e rural, todas as vazões de retorno foram direcionadas ao Rio PCJ. A vazão de retorno da demanda abastecimento urbano e rural foi direcionada às ETEs,

visto que nas bacias PCJ quase 100% do esgoto é coletado mesmo que ele não passe por tratamento adequado.

- 8) 3 “hidrelétricas” denominadas: Americana, Jaguari e Salto Grande, que são hidrelétricas que operam nas bacias PCJ;
- 9) 3 “vazões requeridas” denominadas: Q<sub>90</sub>, Q<sub>95</sub> e Q<sub>7\_10</sub>, que são as vazões usualmente adotadas como valor limite no processo decisório de emissão de outorgas de direito de uso da água.
- 10) 1 “estação fluviométrica” denominada Estação PCJ.

**Figura 12 - Representação esquemática do modelo desenvolvido no WEAP para modelagem do regime hidrológico das bacias PCJ**



O tratamento dos dados de entrada dos elementos inseridos no modelo desenvolvido no WEAP para a modelagem do regime hidrológico das bacias PCJ sob três cenários pode ser consultado no Apêndice A. Os cenários criados foram:

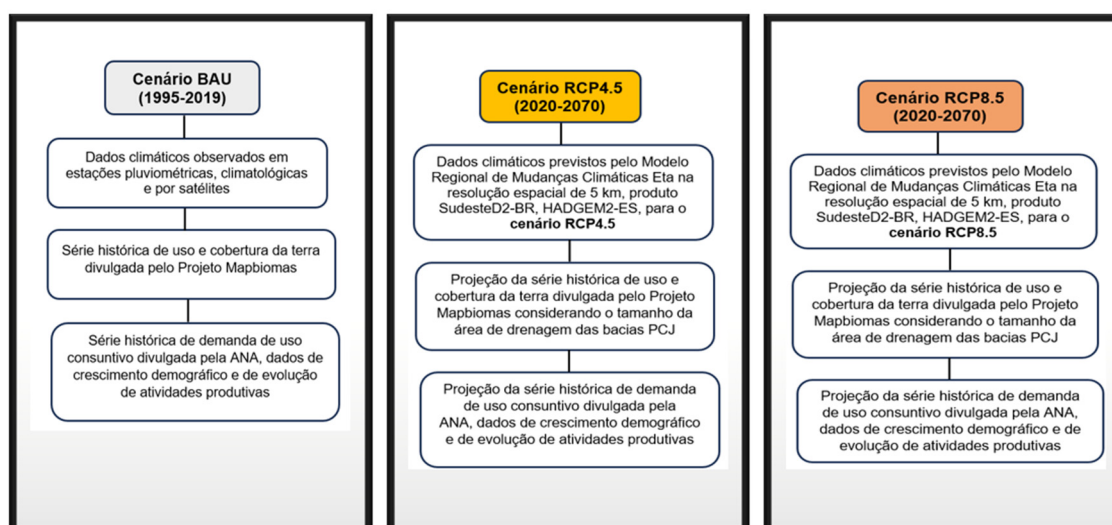
1. **Cenário *Business as usual* (BAU):** escala temporal mensal com dados de 1995 a 2019, representa as condições padrões nas bacias PCJ. Esse período foi escolhido a fim de acompanhar a evolução evidenciada pelo Censo Agropecuário, que é a principal investigação sobre a produção agropecuária no Brasil;
2. **Cenário RCP4.5:** escala temporal mensal com dados de 2020 a 2070, representa as alterações na bacia hidrográfica em virtude das mudanças climáticas ocasionadas pelo RCP4.5, que representa um cenário de médias emissões de gases de efeito estufa, no qual a forçante radiativa é estabilizada

em  $4,5 \text{ W m}^{-2}$  após 2100, com aumento da temperatura terrestre oscilando entre  $1,1^\circ\text{C}$  e  $2,6^\circ\text{C}$ .

3. **Cenário RCP8.5:** escala temporal mensal com dados de 2020 a 2070, representa as alterações na bacia hidrográfica em virtude das mudanças climáticas ocasionadas pelo RCP8.5, que representa um cenário de altas emissões de gases de efeito estufa, no qual a forçante radiativa é superior à  $8,5 \text{ W m}^{-2}$  em 2100, com aumento da temperatura terrestre oscilando entre  $2,6^\circ\text{C}$  e  $4,8^\circ\text{C}$ .

A Figura 13 apresenta a caracterização dos três cenários em relação à entrada de dados climáticos, de uso e cobertura da terra, de demandas de uso consuntivo, de crescimento demográfico e de evolução de atividades produtivas.

**Figura 13 - Caracterização dos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**



Portanto, o **cenário RCP4.5** e o **cenário RCP8.5** diferem apenas quanto aos dados climáticos (precipitação, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento), sendo os dados projetados para as bacias PCJ referentes às demandas pelo uso da água, ao uso e cobertura da terra, de crescimento demográfico e de evolução de atividades produtivas, iguais.

É importante destacar que o produto SudesteD2-BR do Modelo Regional de Mudanças Climáticas Eta cobre parte do Sudeste do Brasil. Esse produto, com resolução de 5 km, é proveniente do refinamento do Modelo Climático Regional Eta na resolução de 20 km, que por meio da técnica de *downscaling* “modelagem

aninhada ou dinâmica”, foi aninhado ao modelo climático global HADGEM2-ES sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5. A resolução de 5 km é adequada para o estudo de questões relacionadas com o clima em escala local, tais como as alterações climáticas em áreas metropolitanas ou hidrologia de pequenas bacias hidrográficas (Holbig *et al.*, 2018).

Os dados climáticos dos **cenários RCP4.5** e **RCP8.5** advindos do produto SudesteD2-BR do Modelo Climático Regional Eta-HadGEM2-ES foram submetidos à correção de viés pelo método de Escalonamento Linear (Lenderink; Buishand; Van Deursen, 2007), empregando-se a planilha de cálculo desenvolvida por Shrestha (2015). Nesse método um coeficiente de correção é calculado a partir das diferenças entre os valores observados e os estimados pelo modelo climático no período histórico. Esse coeficiente é então utilizado na remoção do viés dos valores estimados pelo modelo climático no período futuro. Cada mês apresentará um coeficiente de correção. A comparação dos dados brutos e com correção de viés pode ser consultada no Apêndice E.

A vazão simulada pelo modelo criado no programa WEAP para o **cenário BAU** foi comparada à vazão observada na estação fluviométrica Artemis (código 62715000 no Portal HIDROWEB). Essa estação está localizada no Rio Piracicaba no município de Piracicaba a uma altitude de 445 m. Situa-se nas coordenadas geográficas: -22,67 latitude Sul; -47,77 longitude Oeste e abrange uma área de drenagem de 10.900 km<sup>2</sup> (ANA, 2023), o que corresponde a aproximadamente 71% da área de drenagem total das bacias PCJ (15.378 km<sup>2</sup>).

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (Nash; Sutcliffe, 1970), a porcentagem de viés (Gupta; Sorooshian; Yapo, 1999) e a razão entre a raiz do Erro Quadrático Médio e o desvio padrão (Moriasi *et al.*, 2007) foram analisados em conjunto para a verificação da performance do modelo criado em simular a vazão, seguindo-se a classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007) (Quadro 7). Essas métricas foram calculadas automaticamente pelo programa WEAP.

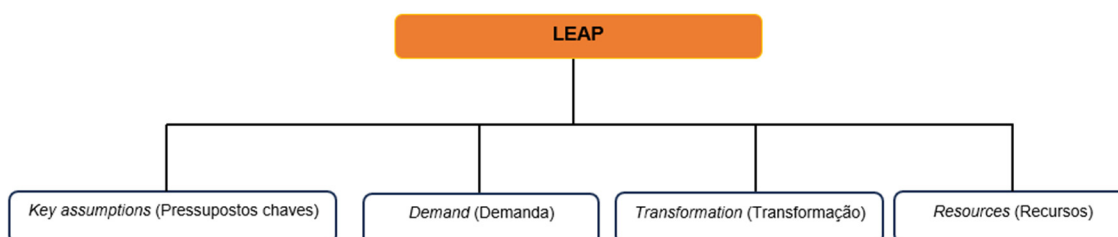
**Quadro 7 - Classificação da performance do modelo hidrológico**

Performance	RSR	NSE	PBIAS (%)
Muito bom	$0,00 < RSR \leq 0,50$	$0,75 < NSE \leq 1,0$	$< \pm 10$
Bom	$0,50 < RSR \leq 0,60$	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfatório	$0,60 < RSR \leq 0,70$	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfatório	$RSR > 0,70$	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$

**Fonte:** Moriasi *et al.* (2007). NSE= coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; RSR = razão entre a raiz do Erro Quadrático Médio e o desvio padrão; PBIAS = porcentagem de viés.

### 3.4 Modelo LEAP

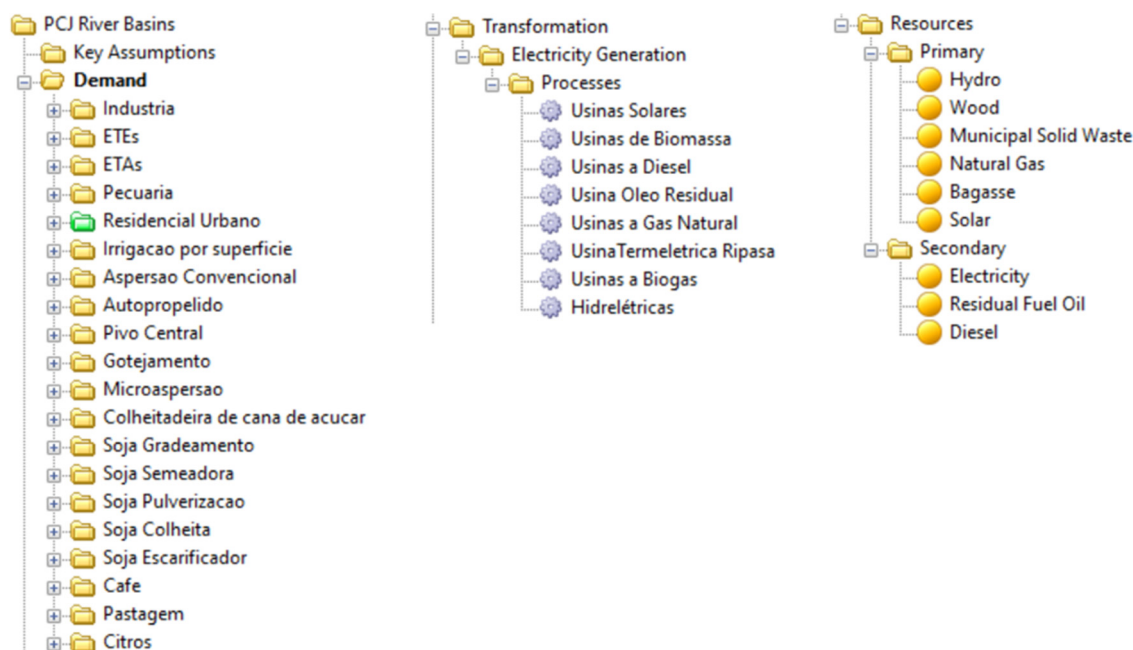
Na elaboração de um modelo no programa LEAP, que é a representação do consumo e suprimento de energia, é necessário a entrada de dados nas categorias demanda (*demand*, em inglês) e transformação (*transformation*, em inglês). Os pressupostos chaves (*key assumptions*, em inglês) são uma categoria na qual pode-se definir variáveis que serão empregadas em cálculos de demanda, nos processos de transformação ou na categoria recursos (*resources*, em inglês). As informações referentes aos recursos empregados nos processos de transformação de energia são geradas automaticamente conforme a definição do tipo de fonte utilizada. A Figura 14 apresenta um fluxograma contendo as categorias presentes no LEAP.

**Figura 14 - Fluxograma representando as categorias presentes no LEAP**

A modelagem da produção e demanda por energia e suas emissões de gases de efeito estufa nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá no programa LEAP foi realizada em escala anual, sendo definido dois cenários: **cenário BAU** com inserção de dados registrados no período de 1995-2019 e **cenário RCP** com inserção de dados previstos, utilizando regressão linear, para o período 2020-2070. O modelo criado no LEAP (Figura 15) apresentou:

- a) 20 demandas pelo uso de energia: 1) Indústria; 2) ETEs (Estações de Tratamento de Esgoto); 3) ETAs (Estações de Tratamento de Água); 4) Pecuária; 5) Residencial Urbano; 6) Irrigação por superfície; 7) Aspersão convencional; 8) Autopropelido; 9) Pivô central; 10) Gotejamento; 11) Microaspersão; 12) Soja gradeamento; 13) Soja semeadora; 14) Soja pulverização; 15) Soja escarificador; 16) Soja colheita; 17) Café; 18) Citros; 19) Pastagem; 20) Colheitadeira de cana-de-açúcar; e
- b) 8 transformações, que representam as usinas de geração de eletricidade existentes dentro da bacia hidrográfica: 1) Hidrelétricas; 2) Usinas Solares; 3) Usinas de Biomassa cuja fonte de combustível é o bagaço de cana-de-açúcar; 4) Usinas à Diesel; 5) Usina a Óleo Residual; 6) Usinas a Gás Natural; 7) Usina Termelétrica Ripasa que opera utilizando lixívia de madeira, cavaco de madeira e gás natural como combustíveis; e 8) Usinas a Biogás.

**Figura 15 - Modelo LEAP desenvolvido para as bacias PCJ**



*Primary*= primários; *Secondary*= secundários; *Hydro*= hídrico; *Wood* = madeira; *Municipal Solid Waste* = resíduos sólidos urbanos; *Natural Gas* = gás natural; *Bagasse* = bagaço de cana-de-açúcar; *Solar* = radiação solar; *Electricity* = energia elétrica; *Residual Fuel Oil* = óleo residual; *Diesel*= diesel.

Por conta da contribuição da emissão de gases de efeito estufa ao aquecimento global, intensificando as mudanças climáticas, no modelo LEAP das bacias PCJ foram adicionadas as emissões de gases de efeito estufa referentes às fontes de energia empregadas nas demandas e nas transformações. Os detalhes

referentes às emissões e as demais características do modelo podem ser consultados no Apêndice B.

O Quadro 8 apresenta as fontes de dados consultadas para a alimentação do cenário BAU.

### Quadro 8 - Fonte de dados consultadas para alimentação do modelo LEAP

(Continua)

Dados	Fonte de dados
Consumo de energia elétrica de máquinas utilizadas na pecuária	DPM, ensiladeira e misturador de ração: Salum (2000) <i>apud</i> Pereira <i>et al.</i> (2002); ordenhadeira e resfriador de leite: Souza <i>et al.</i> (1998) <i>apud</i> Hardoim e Gonçalves (2003)
Consumo de energia para o bombeamento de 1 m <sup>3</sup> a uma altura de recalque de 25 m	Irrigação por superfície, autoprovelido, aspersão convencional e pivô central: Scaloppi (1985) <i>apud</i> Medeiros e Rojas (1997) gotejamento: Marouelli e Silva (2011)
Consumo de energia por hectare irrigado por microaspersão	Vescove e Turco (2010)
Consumo energético na colheita de cana-de-açúcar	Martins <i>et al.</i> (2017)
Consumo energético no cultivo da soja	Tavares (2012)
Consumo energético no cultivo de café	Veiga <i>et al.</i> (2015)
Consumo energético no cultivo de citros	Veiga <i>et al.</i> (2015)
Consumo energético no manejo de pastagens	Figueiredo <i>et al.</i> (2017)
Usinas Produtoras de Energia Elétrica	SIGA-ANEEL (ANEEL, 2023a)
Percentual de uso residencial per capita de energia para: iluminação; conforto térmico; aquecimento da água; lazer; preservação de alimentos; e outros usos.	Abrahão e Souza (2021)
Consumo de energia por classe consumidora	GDE-SIM-SP (São Paulo, 2023)

**Quadro 8 - Fonte de dados consultadas para alimentação do modelo LEAP****(Continuação)**

<b>Dados</b>	<b>Fonte de dados</b>
Consumo para a produção de 1 m <sup>3</sup> de água tratada	SNIS (Brasil, 2023)
Consumo para o tratamento de 1 m <sup>3</sup> de esgoto	SNIS (Brasil, 2023)
Percentual de propriedades agrícolas com acesso à eletricidade e n° de máquinas	LUPA (São Paulo, 1997, 2009, 2019)

DPM=Desintegrador, picador e moedor; GDE-SIM-SP= Grupo de Dados Energéticos da Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo; SIGA-ANEEL= Sistema de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica; SNIS= Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento; e LUPA = Levantamento Censitário das Unidades de Produção Agropecuária do Estado de São Paulo;

**3.5 Modelo de Interação**

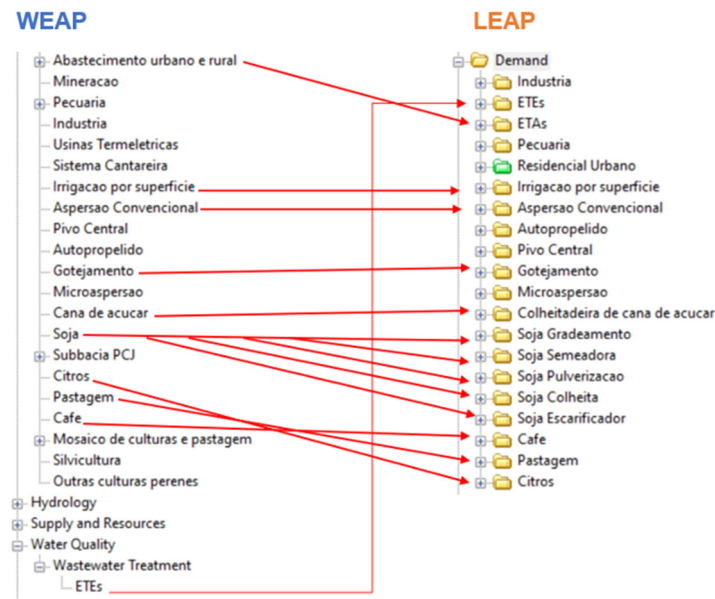
O Modelo de Interação, cujos detalhes constam no Apêndice C e o código no Apêndice D, permite a ligação entre dados do WEAP e do LEAP, possibilitando a troca de informações entre os modelos por meio do WEAP-KIB-LEAP *framework*. As interações estabelecidas foram:

- 1) O volume de água demandado para o abastecimento urbano e rural, em metros cúbicos (m<sup>3</sup>), calculado no WEAP foi o dado de entrada no LEAP referente ao volume de água tratado nas ETAs;
- 2) O volume de esgoto tratado nas ETEs, em m<sup>3</sup>, calculado no WEAP foi o dado de entrada no LEAP referente ao volume de água tratado nas ETEs;
- 3) O volume de água demandado pela irrigação por superfície, em m<sup>3</sup>, calculado no WEAP foi o dado de entrada no LEAP referente ao volume irrigado por irrigação por superfície;
- 4) O volume de água demandado pela irrigação por aspersão convencional, em m<sup>3</sup>, calculado no WEAP foi o dado de entrada no LEAP referente ao volume irrigado por aspersão convencional;
- 5) O volume de água demandado pela irrigação por sistema autopropelido, em m<sup>3</sup>, calculado no WEAP foi o dado de entrada no LEAP referente ao volume irrigado por autopropelido;

- 6) O volume de água demandado pela irrigação por gotejamento, em m<sup>3</sup>, calculado no WEAP foi o dado de entrada no LEAP referente ao volume irrigado por gotejamento;
- 7) A área irrigada por microaspersão, em hectares, presente no WEAP foi o dado de entrada no LEAP referente à área irrigada por microaspersão;
- 8) A produção de cana-de-açúcar, em toneladas, presente no WEAP foi o dado de entrada no LEAP referente à colheita de cana por meio do uso de colheitadeiras;
- 9) A área plantada com soja, em hectares, presente no WEAP foi o dado de entrada no LEAP referente à área com plantio de soja. Neste caso, avaliou-se o consumo de energia (diesel) para o cultivo da soja, considerando-se diferentes técnicas de preparo do solo antecedentes ao plantio, que foram:  
Cultivo mínimo, técnica na qual antes do plantio há uso do escarificador (soja escarificador), seguido pelo uso da semeadora (soja semeadora).  
Plantio direto, técnica na qual antes do plantio há somente uso da semeadora (soja semeadora); e  
Cultivo convencional, técnica na qual antes do plantio há uso de grade (soja gradeamento), seguido pelo uso da semeadora (soja semeadora).  
Além disso, foram verificadas as demandas energéticas durante a prática de pulverização (soja pulverização) e na colheita (soja colheita).
- 10) A área plantada com café, em hectares, presente no WEAP foi o dado de entrada no LEAP referente à área com plantio de café. Neste caso, avaliou-se o consumo de energia (diesel) por maquinários durante o ciclo da cultura.
- 11) A área plantada com citros, em hectares, presente no WEAP foi o dado de entrada no LEAP referente à área com plantio de citros. Neste caso, avaliou-se o consumo de energia (diesel) por maquinários durante o ciclo da cultura.
- 12) A área plantada com pastagem, em hectares, presente no WEAP foi o dado de entrada no LEAP referente à área com cultivo de pastagem. Neste caso, avaliou-se o consumo de energia (diesel) por maquinários durante o manejo da cultura.

Essas interações estão representadas na Figura 16 pelo uso das setas.

**Figura 16 - Interações entre o WEAP e o LEAP**



### 3.6 Verificação do nexu AEA no WEAP e no LEAP separadamente

A modelagem quantitativa do nexu AEA também ocorreu por meio do uso dos programas separadamente. No WEAP, verificou-se o percentual de atendimento do potencial de geração de energia das hidrelétricas: Americana, Jaguari e Salto Grande, o uso de água pela pecuária e por usinas termelétricas. Enquanto, no LEAP, verificou-se a emissão de gases de efeito estufa das usinas de geração de energia elétrica, o uso de energia elétrica por maquinários empregados na criação animal e o uso residencial urbano de energia elétrica para o conforto térmico, aquecimento da água e conservação de alimentos.

### 3.7 Limitações dos Modelos

No modelo WEAP, a principal limitação são os dados climáticos observados, por isso além de dados de estações pluviométricas e climatológicas, também foram empregados dados advindos de observações por satélite adquiridos da Plataforma Nasa Power (*Prediction of Worldwide Energy Resources*) Project (NASA POWER, 2023), cuja validação pode ser verificada no Apêndice F. Os dados observados por

satélite foram comparados com os dados registrados no Posto Meteorológico da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), localizado na latitude: 22° 42' 30" Sul, longitude: 47° 38' 00" Oeste e altitude de 546 metros, na cidade de Piracicaba, estado de São Paulo (LEB; ESALQ; USP, 2023).

Os dados climáticos provenientes do Modelo Climático Regional Eta-HadGEM2-ES na resolução de 5 km, produto SudesteD2-BR, limitam sua aplicação à Região Sudeste do Brasil. Ademais, deve-se considerar as incertezas relacionadas ao processo de *downscaling* que podem amplificar tendências presentes nos modelos climáticos de maior escala (Pielke; Wilby, 2012). Neste sentido, destaca-se que em Brasil (2015), constatou-se que o Modelo Climático Regional Eta na resolução de 20 km aninhado ao modelo climático global HADGEM2-ES apresenta como tendência a redução da precipitação em - 20% para a Região Sudeste e possibilidade de reduções na vazão das bacias hidrográficas.

Além das incertezas relacionadas aos dados de mudança climática, somam-se às incertezas relacionadas à previsão sobre o uso e cobertura da terra, das demandas de uso consuntivo, do crescimento demográfico e da evolução de atividades produtivas nas bacias PCJ, que representam condições socioeconômicas futuras e alterações no sistema natural das bacias.

No modelo LEAP, as incertezas estão relacionadas ao uso de dados estimados de consumo de energia elétrica e combustível por maquinários. A principal limitação é a não representação da sazonalidade da demanda e produção de energia elétrica que são variáveis ao longo do ano, visto que não foi possível obter dados históricos diários ou mensais de produção e consumo advindos das concessionárias atuantes nas bacias PCJ.

No Modelo de Interação, o principal fator limitante é a configuração para que o algoritmo do modelo seja executado sem erros, pois são necessárias instalações de extensões no Vs Code e a instalação das versões corretas dos programas Python, NodeJS e Java. Além disso, deve-se ter atenção à estrutura da escrita do código para que o acoplamento entre os programas WEAP e LEAP ocorra sem erros.

### 3.8 Variabilidade espacial da precipitação e temperatura

A variabilidade espacial da precipitação e temperatura dos dados com correção de viés do Modelo Climático Regional Eta-HadGEM2-ES, resolução de 5 km, foi avaliada por meio da observação de mapas gerados utilizando o método de interpolação Inverso da Distância Ponderada (IDW). Para esse cálculo, o cenário BAU correspondeu ao recorte temporal de 1995 a 2005 devido à extensão da série de dados do modelo Eta. Os cenários RCP4.5 e RCP8.5 continuaram com a mesma extensão temporal (2020-2070).

Para aplicar o IDW, é necessário ter um conjunto de pontos com localização geográfica cujo valor da variável é conhecido. Os valores dos pontos desconhecidos serão estimados por meio do cálculo da média ponderada das amostras vizinhas (pontos com valores conhecidos), sendo o peso definido pelo inverso da distância entre os pontos com valores conhecidos e o ponto cujo valor está sendo estimado (Equação 3) (Farias; Francisco; Senna, 2017). Caso o peso seja igual a 2, os dados serão ponderados inversamente como o quadrado da distância.

$$w(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d(x, x_i)^p} u_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d(x, x_i)^p}} \quad (3)$$

Em que,  $w$  é o valor a ser estimado;  $d$  é a distância;  $x$  é o ponto desconhecido;  $x_i$  é o ponto conhecido;  $u_i$  é o valor do ponto conhecido; e  $p$  é o peso.

O cálculo do IDW para os dados climáticos foi efetuado no programa de geoprocessamento de acesso livre QGIS, aplicando-se o peso 2 na ponderação da média. Foram empregados os dados que corresponderam às localizações das estações pluviométricas do Departamento de Águas e Energia Elétrica do estado de São Paulo (DAEE): D4-035 (latitude: -22,13, longitude: -47,67), D3-054 (latitude: -22,93, longitude: -46,27), D3-036 (latitude: -22,79, longitude: -46,58) e D4-099 (latitude: -22,57, longitude: -47,15).

### 3.9 Índice Padronizado de Precipitação (SPI) como indicador de mudança climática

O Índice Padronizado de Precipitação (SPI) foi selecionado como indicador de mudança climática. O cálculo do SPI para a escala temporal de 12 meses, foi realizado utilizando o programa DIMES (*Drought Index and Monitoring System*) desenvolvido por Blain, Rolim e Brunini (2005) em linguagem *Visual Basic for Applications*, disponível como uma planilha do Microsoft Excel. Apenas para o cálculo desse índice, a série de precipitação mensal foi ampliada para o período de 1980 a 2019, visto que seu ajuste à função de probabilidade Gama depende de uma série histórica de no mínimo 30 anos. Os valores de precipitação foram obtidos de 20 estações pluviométricas operadas pelo DAEE cujas informações estão presentes no Apêndice A. Após o preenchimento de falhas pelo método de regressão linear múltipla, procedeu-se com o cálculo da média.

Dessa forma, o SPI foi calculado com dados históricos observados de precipitação e dados estimados pelo Modelo Climático Regional Eta-HadGEM2-ES, resolução de 5 km, para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

O SPI é amplamente empregado no monitoramento das condições hidrológicas de uma região, e sua escala, desenvolvida por McKee, Doesken e Kleist (1993), permite a categorização da seca em diferentes escalas de severidade (Quadro 9).

**Quadro 9 - Categorias de grau de severidade de secas segundo intervalos do Índice Padronizado de Precipitação (SPI)**

SPI	Categoria de seca
0,00 a - 0,99	Seca leve
-1,00 a - 1,49	Seca moderada
-1,50 a - 1,99	Seca severa
≤ -2,00	Seca extrema

Fonte: McKee, Doesken e Kleist (1993)

De acordo com Svoboda, Hayes e Wood (2012), as escalas temporais do SPI podem representar diferentes impactos gerados durante períodos de condições de

deficiência hídrica (seca) em uma região. O Quadro 10 apresenta a variação desses impactos segundo diferentes escalas temporais.

**Quadro 10 - Escala temporal do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e denominação do tipo de seca conforme os impactos gerados**

Escala de Tempo (meses) do SPI	Denominação da seca	Impactos
1	Meteorológica	Qualidade do ar, saúde humana, estresse agrícola
3	Agrícola	Condições de umidade do solo
6	Agrícola (estações seca/chuvosa)	Condições de umidade do solo em reservas mais profundas
12	Hidrológica	Vazão de rios, nível de corpos de água e reservatórios, condições de aquíferos livres
24	Socioeconômica	Disponibilidade e acessibilidade de produtos e serviços

Fonte: Svoboda, Hayes e Wood (2012)

### 3.10 Índices de Disponibilidade Hídrica

Os índices de disponibilidade hídrica: Índice de Falkenmark (IF) (Falkenmark, 1989) e Índice de Estresse Hídrico (IEH) (Vörösmarty *et al.*, 2005), foram determinados a fim de verificar a disponibilidade hídrica nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP 8.5, para tal foram utilizadas as Equações 4 (para o IF) e 5 (para o IEH).

$$IF = \frac{Q}{P} \quad (4)$$

Em que, *IF* é o Índice de Falkenmark em m<sup>3</sup> per capita<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>; *Q* é a vazão anual calculada pelo modelo criado no WEAP (m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>) ; e *P* é a população anual em número de habitantes.

$$IEH = \frac{\sum Q_b}{Q} \quad (5)$$

Em que, *IEH* é o Índice de Estresse Hídrico (adimensional);  $\sum Q_b$  é o somatório de todas as demandas pelo uso consuntivo da água (abastecimento urbano e rural, indústria, irrigação, pecuária, etc.) em escala anual ( $m^3 \text{ ano}^{-1}$ ); e *Q* é a vazão anual calculada pelo modelo criado no WEAP ( $m^3 \text{ ano}^{-1}$ ).

A classificação do estado da disponibilidade hídrica ocorreu conforme os Quadros 11 e 12 que apresentam respectivamente as classes para o IF e para o IEH.

**Quadro 11 - Classificação do Índice de Falkenmark (IF)**

<b>Categoria</b>	<b>IF</b>
Sem estresse	> 1.700 $m^3$ per capita <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>
Estresse	1.000 a 1.700 $m^3$ per capita <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>
Escassez	500 a 1.000 $m^3$ per capita <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>
Escassez absoluta	< 500 $m^3$ per capita <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>

Fonte: Xu e Wu (2017)

**Quadro 12 - Classificação do Índice de Estresse Hídrico (IEH)**

<b>Categoria</b>	<b>IEH</b>
Baixo	< 0,1
Moderado	0,1 a 0,2
Médio	0,2 a 0,4
Alto	> 0,4

Fonte: Vörösmarty *et al.* (2005)

Ressalta-se que o Índice de Falkenmark leva em consideração a disponibilidade hídrica para a população além das suas necessidades de uso residencial, abrangendo também os recursos hídricos necessários para o atendimento das diversas necessidades humanas (produção de alimentos, vestuário, etc.) (Da Rocha *et al.*, 2013).

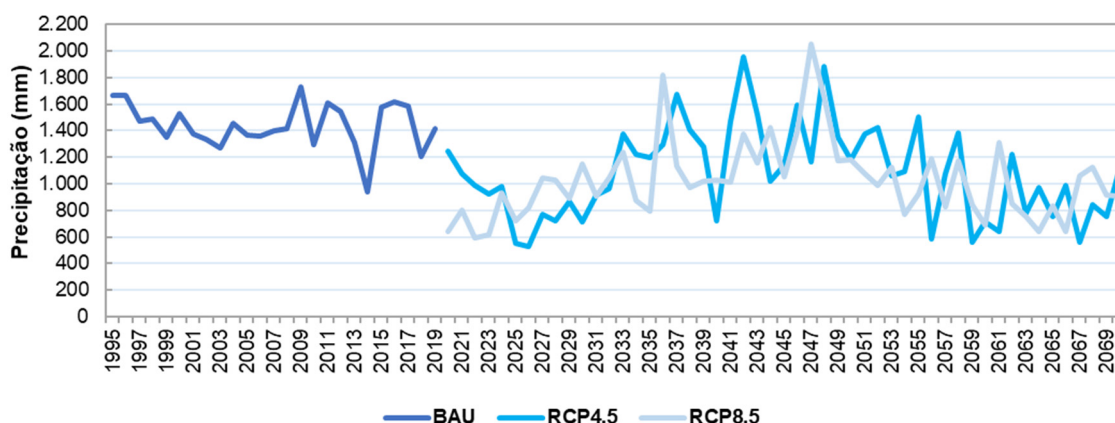
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Alterações climáticas

#### 4.1.1 Precipitação

De acordo com a Agência das Bacias PCJ (2018), a precipitação anual média nas bacias PCJ varia entre 1.195 mm e 1.609 mm, o que pode ser comprovado por meio da observação dos dados de precipitação registrados no cenário BAU presentes na Figura 17. Neste cenário, apenas os anos 2009 e 2014 foram anos atípicos, apresentando, respectivamente, valores muito acima de 1.609 mm e bem abaixo de 1.195 mm. As projeções para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 indicam que esse padrão de precipitação nas bacias PCJ deve sofrer alterações, apresentando valores anuais abaixo de 1.195 mm nos intervalos 2020 a 2030 e 2063 a 2070 e valores acima de 1.609 mm no intervalo de 2036 a 2048.

**Figura 17 - Precipitação anual das bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**



Analisando a precipitação média anual das séries de dados dos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5 (Tabela 1), verifica-se que em relação à média do cenário BAU, a precipitação do cenário RCP4.5 sofrerá uma redução de 24,9%, enquanto no cenário RCP8.5, foi projetada uma redução de 28,9%. No estudo desenvolvido por Brasil (2015) aplicando o Modelo Climático Regional Eta aninhado ao HadGEM2-ES

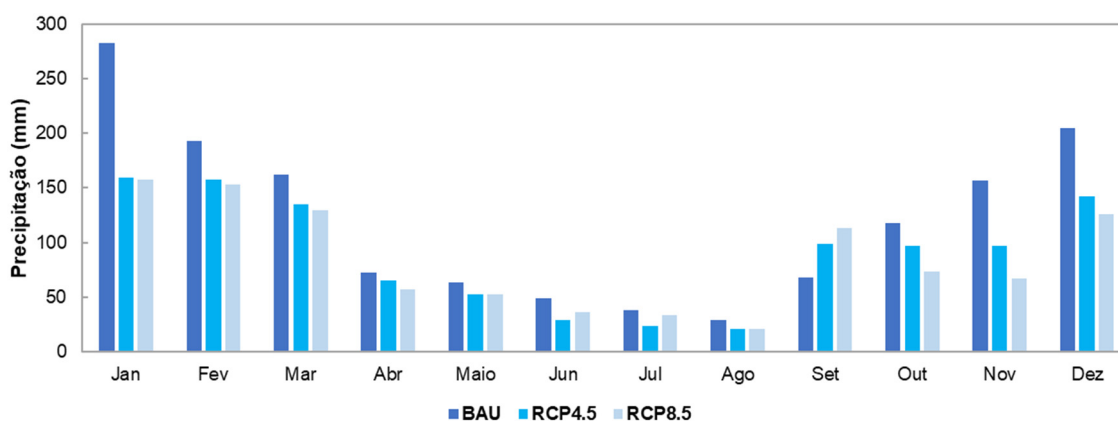
com resolução de 20 km, para a região das bacias PCJ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, foram projetadas diminuições na precipitação média anual da ordem de -15 a -35%. Os valores encontrados no presente estudo concordam com o que foi observado em Brasil (2015).

**Tabela 1 - Variação da precipitação anual média nas bacias PCJ entre os cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**

Cenário	Média (mm)	Redução (mm)	Redução (%)
<b>BAU</b>	1.438,7	-	-
<b>RCP4.5</b>	1.079,9	358,8	24,9
<b>RCP8.5</b>	1.023,5	415,3	28,9

A precipitação, assim como as demais variáveis climáticas, apresenta variação intra-anual. De acordo com Marengo e Alves (2016), a precipitação na Região Sudeste, região de localização das bacias PCJ, apresenta padrão bem definido, com altas precipitações de dezembro a fevereiro (verão) e baixas precipitações de junho a agosto (inverno). Esse padrão intra-anual de precipitação foi verificado nas bacias PCJ em todos os cenários (Figura 18), verificando-se decréscimos na precipitação média mensal nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em todos os meses, exceto para o mês de setembro.

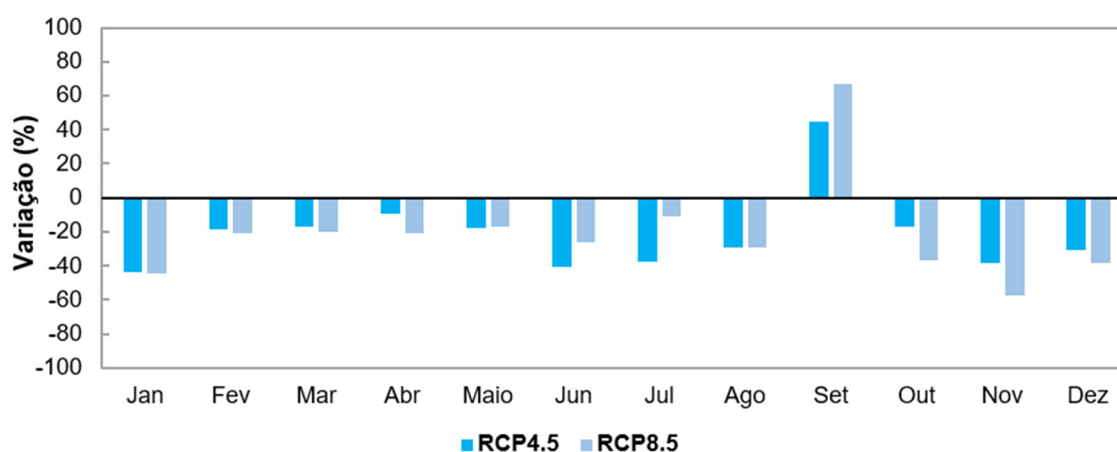
**Figura 18 - Precipitação média mensal das bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**



Higuera-Castro (2022) ao estudar os impactos das mudanças climáticas na bacia hidrográfica do rio Piracicaba, que faz parte das bacias PCJ, aplicando dados advindos do modelo climático global GFDL-ESM4 considerando as forçantes radiativas 4,5 e 8,5 W m<sup>-2</sup>, também verificaram reduções na precipitação mensal, em torno de 17,1 mm mês<sup>-1</sup>. Tendo em vista as médias dos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5, iguais a 119,9; 90,0 e 85,3 mm mês<sup>-1</sup>, respectivamente, a precipitação mensal das bacias PCJ reduziu 29,9 mm mês<sup>-1</sup> no cenário RCP4.5 e 34,6 mm mês<sup>-1</sup> no cenário RCP8.5. Dessa forma, embora indicando um cenário mais pessimista, os resultados do presente estudo concordam com os encontrados por Higuera-Castro (2022).

Em relação à precipitação média de cada mês registrada no cenário BAU, o cenário RCP4.5 apresentou reduções entre -9,3% (mês de abril) e -43,5% (mês de janeiro), enquanto o cenário RCP8.5 apresentou reduções entre -11,2% (mês de julho) e -57,4% (mês de novembro). O mês de setembro é o único que apresentou incrementos, igual a 44,4% no cenário RCP4.5 e 66,5% no cenário RCP8.5 (Figura 19).

**Figura 19 - Variação da precipitação média mensal das bacias PCJ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em relação ao cenário BAU**



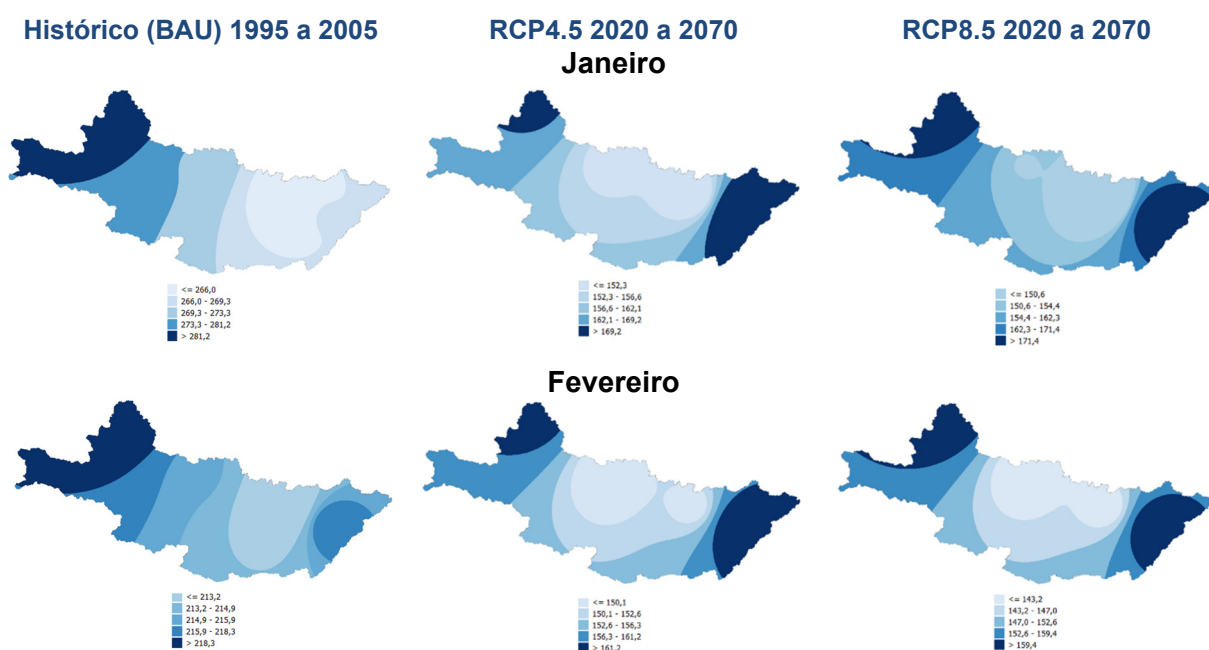
O regime de precipitação das bacias PCJ é influenciado por frentes frias, pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e o Jato de Baixos Níveis (JBN), que é responsável pelo transporte de umidade da Amazônia para a região (Marengo; Alves, 2016). Ademais, os fenômenos El Niño e La Niña interferem na formação da ZCAS, um importante sistema meteorológico causador de chuvas na Região

Sudeste entre o fim da primavera e o verão, favorecendo ou dificultando sua atuação e formação (INMET, 2023).

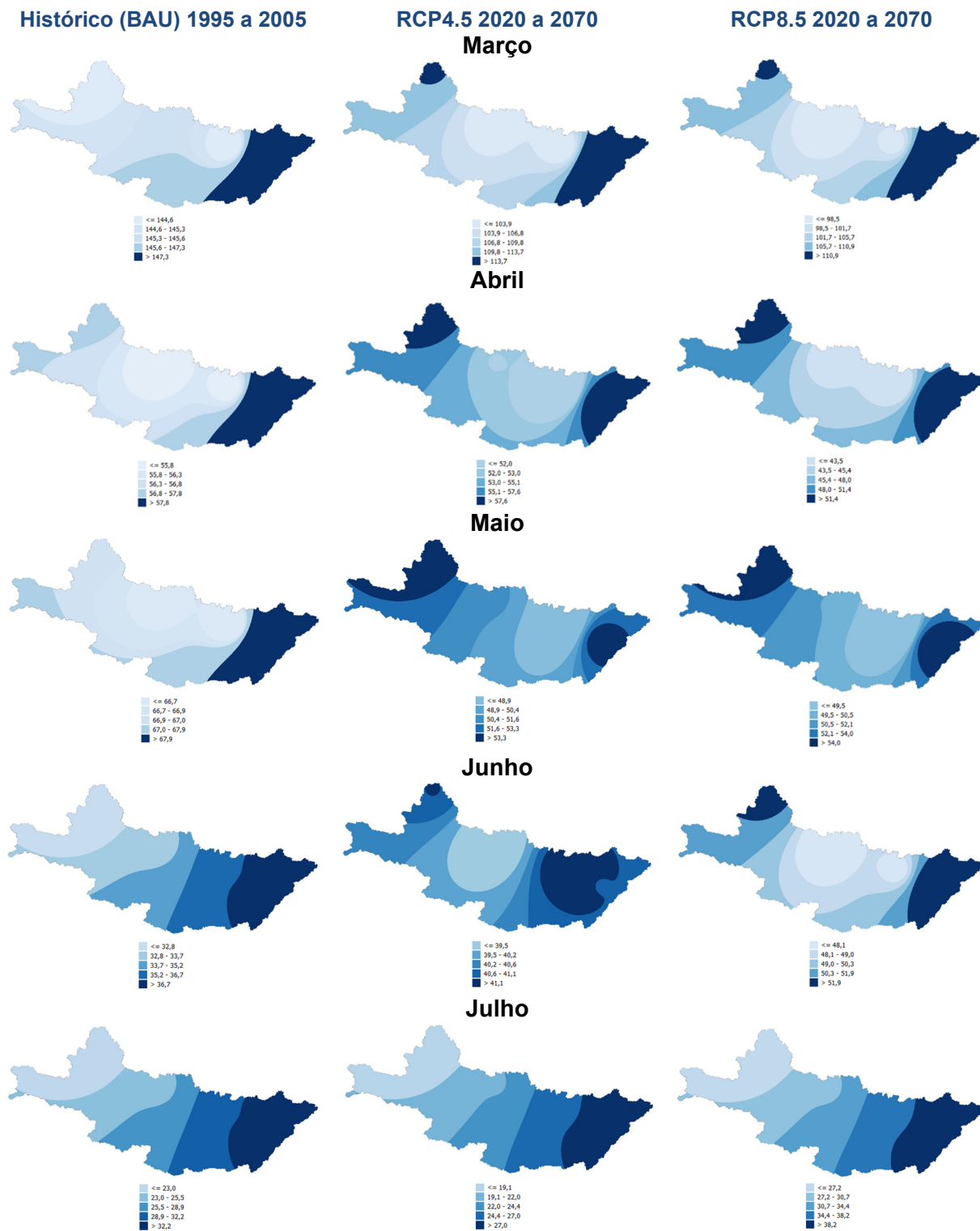
#### 4.1.1.1 Variabilidade espacial da precipitação

A precipitação nas bacias PCJ também apresenta variação espacial perceptível. No período histórico, que cobre parte do horizonte temporal do cenário BAU, nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro, período chuvoso, os maiores valores de precipitação (coloração azul escuro, classe “>”) estão concentrados na parte noroeste e extremo oeste das bacias PCJ, chegando a abranger os municípios: Analândia, Corumbataí, Charqueada, Ipeúna, São Pedro, Santa Maria da Serra e Águas de São Pedro. Essa mesma localização, por sua vez, apresenta os menores valores de precipitação (coloração azul claro, classe “<=”) nos meses de março, junho, julho, agosto, setembro e outubro (Figuras 20, 21 e 22).

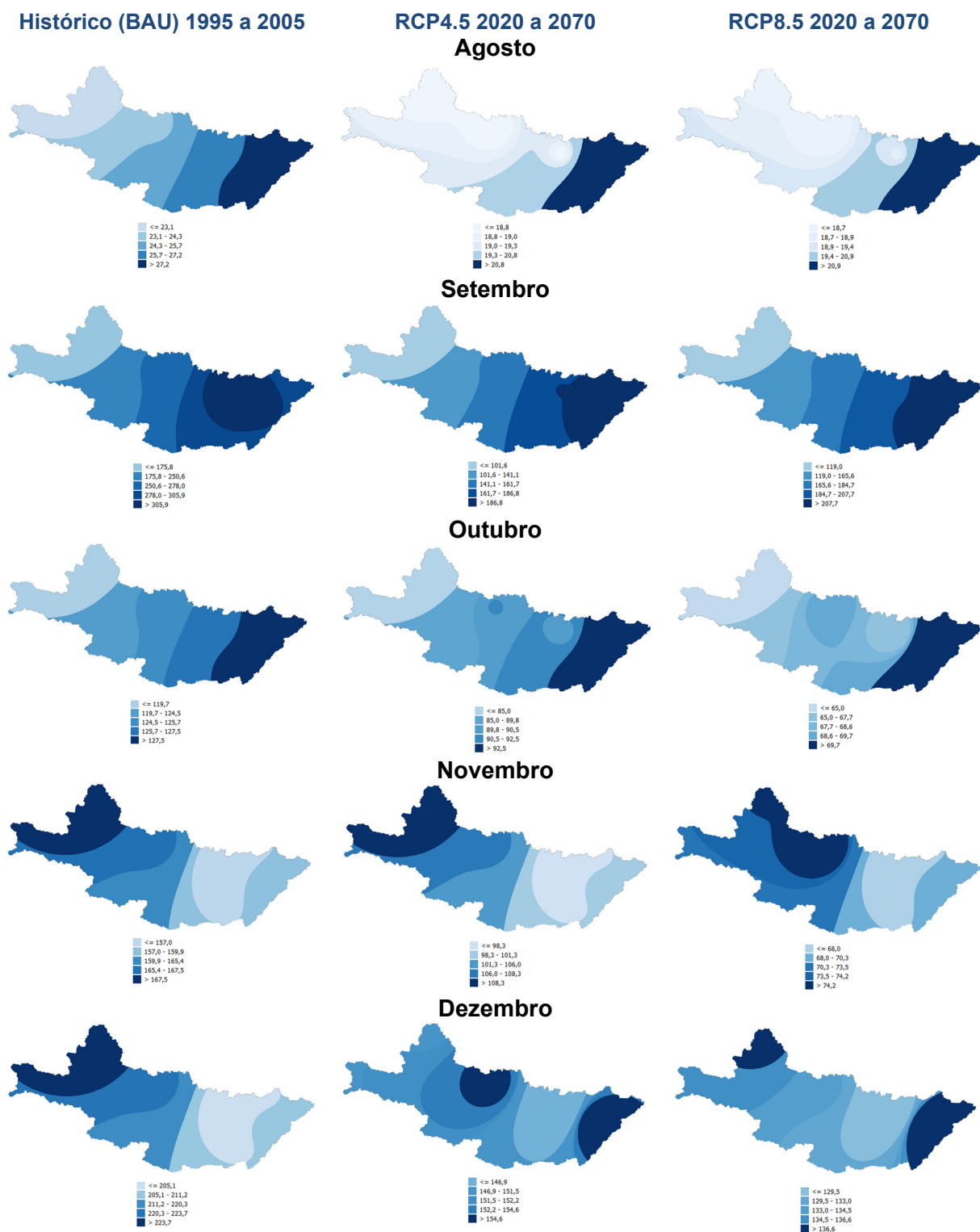
**Figura 20 - Variabilidade espacial da precipitação nas bacias PCJ para os meses de janeiro e fevereiro para os cenários BAU (1995 a 2005), RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070)**



**Figura 21 - Variabilidade espacial da precipitação nas bacias PCJ para os meses: março, abril, maio, junho e julho para os cenários BAU (1995 a 2005), RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070)**



**Figura 22 - Variabilidade espacial da precipitação nas bacias PCJ para os meses: agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro para os cenários BAU (1995 a 2005), RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070)**



Já nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, as maiores precipitações (coloração azul escuro, classe “>”) estiveram concentradas na maior parte do ano (meses de janeiro,

fevereiro, março, abril, junho, julho, agosto, outubro e dezembro), majoritariamente na porção extremo leste das bacias PCJ, chegando a abranger os municípios: Camanducaia, Itapeva, Toledo, Extrema, Joanópolis, Piracaia e Nazaré Paulista. Por outro lado, os menores valores de precipitação (coloração azul claro, classe “<=”) estiveram concentrados na porção centro-leste das bacias PCJ durante os meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio, novembro e dezembro (Figuras 20, 21 e 22).

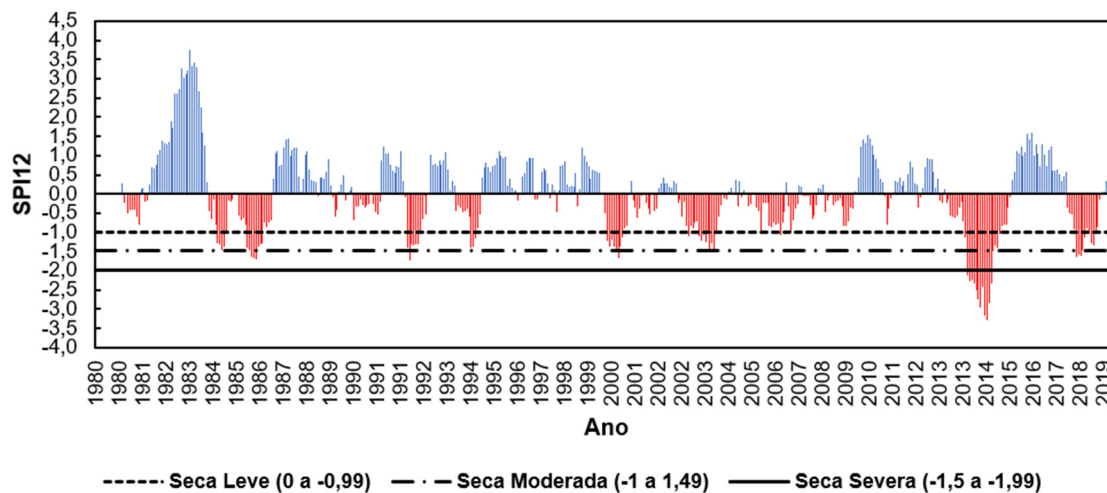
Verifica-se, portanto, que o padrão espacial da precipitação foi variável entre os cenários e ao longo do ano. Essa constatação pode ser útil no processo decisório quanto ao local de instalação de projetos de intervenção como a criação de barragens e reservatórios e a definição de áreas prioritárias para a reservação de água para uso no período seco (baixa precipitação).

#### *4.1.1.2 Índice Padronizado de Precipitação*

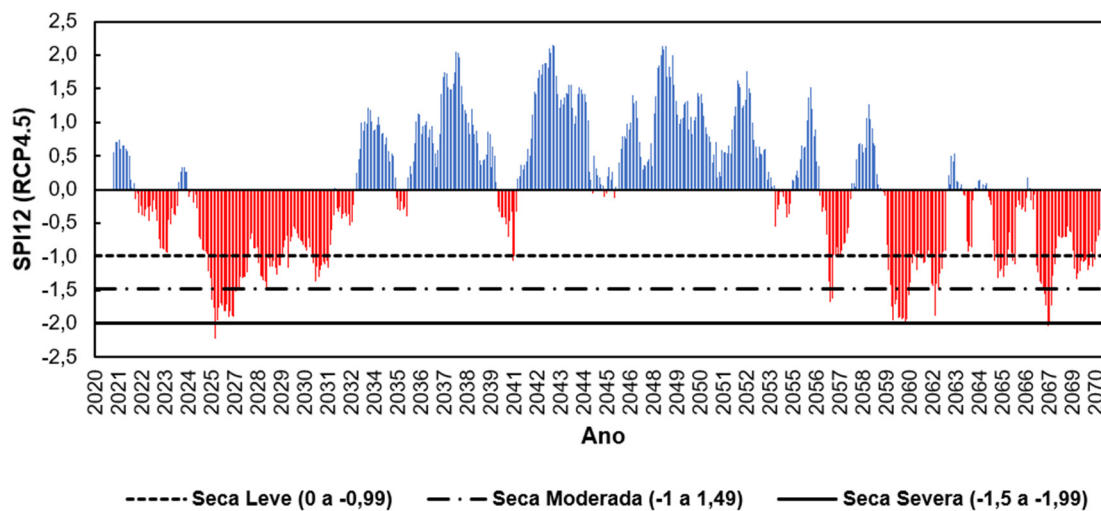
Considerando a bacia hidrográfica como um sistema com entradas e saídas, a precipitação é o principal elemento de entrada, em vista disso, o Índice Padronizado de Precipitação é um bom indicador da magnitude de períodos de deficiência hídrica, uma vez que considera apenas as variações na precipitação.

Na escala de 12 (doze) meses, o SPI representa uma seca hidrológica, indicando impactos no nível de reservatórios e corpos d’água, na recarga de aquíferos livres (rasos) e na vazão de cursos d’água (Svoboda; Hayes; Wood, 2012). Por isso, essa foi a escala escolhida para apresentação do SPI para as bacias PCJ para a série histórica de 40 anos (1980-2019), que cobre o período do cenário BAU (Figura 23), e as séries de previsão de mudanças climáticas (2020-2070) dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 representadas nas Figuras 24 e 25, respectivamente.

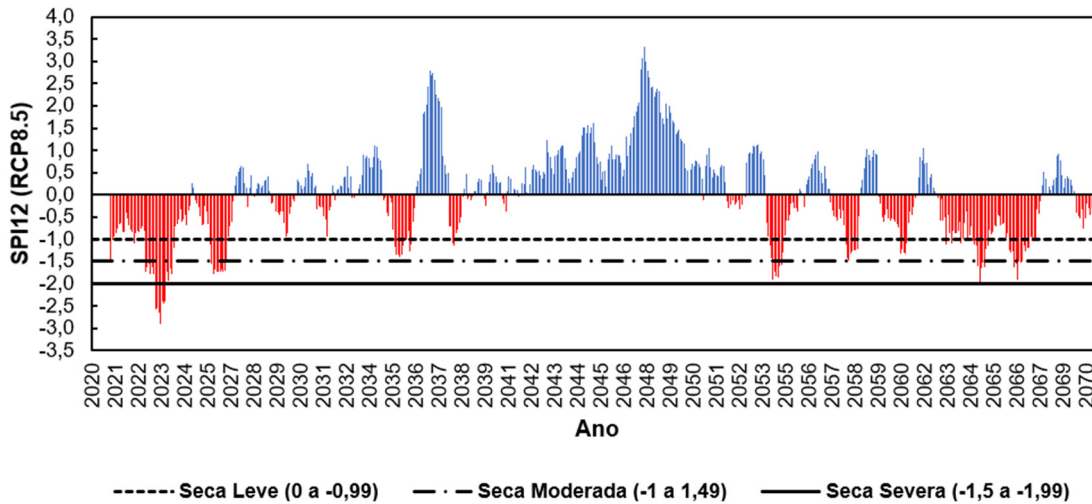
**Figura 23 - Índice Padronizado de Precipitação (SPI) para as bacias PCJ na escala temporal de 12 meses para a série histórica de dados (1980-2019, abrangência cenário BAU: 1995 a 2019)**



**Figura 24 - Índice Padronizado de Precipitação (SPI) para as bacias PCJ na escala temporal de 12 meses para a série prevista (2020-2070) para o cenário RCP4.5**



**Figura 25 - Índice Padronizado de Precipitação (SPI) para as bacias PCJ na escala temporal de 12 meses para a série prevista (2020-2070) para o cenário RCP8.5**



Para a série histórica de dados (Figura 23), nota-se que o SPI foi capaz de indicar, classificando-o como “seca severa”, o período prolongado de estiagem registrado nas bacias PCJ entre os anos 2013 e 2015. Essa seca prolongada impactou o abastecimento hídrico nos municípios localizados na área de drenagem das bacias e o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo, em virtude do trasvase de vazão das bacias PCJ para o Sistema Cantareira, responsável pela captação, tratamento e distribuição de água para essa região.

Marengo e Alves (2016) associaram como causa da seca de 2014, a persistência de uma alta pressão no sudeste da América do Sul, o que gerou um bloqueio atmosférico, impedindo, assim, a entrada de umidade advinda da Amazônia através do JBN, a passagem de frentes frias e a formação da ZCAS na Região Sudeste.

Partindo de análises documentais, Cosso, Amaral e Mariosa (2020) verificaram que a estiagem de 2013-2015 teve grande influência na gestão dos recursos hídricos das bacias PCJ, que foi materializada por meio de investimentos no monitoramento hidrometeorológico e em tecnologias verdes, assim denominadas por representarem investimentos em planos de conservação ambiental e de prevenção à poluição. Os autores também destacaram a adoção de práticas consideradas como além da esfera ambiental, atingindo projetos que se enquadram nas esferas: comportamental, social, educativa e socioeconômica.

Nas séries históricas previstas para o RCP4.5 (Figura 24) e RCP8.5 (Figura 25), verifica-se longos períodos de déficit hídrico (barras vermelhas, SPI negativo), assim como longos períodos de excedente hídrico (barras azuis, SPI positivo), havendo pouca alternância entre eles como observado na série histórica (Figura 23), em que a alternância entre déficit e excedência é maior. Essas constatações estão em consonância com Marengo e Alves (2016), que citam que de acordo com as projeções de mudanças climáticas de modelos globais e regionais para a Região Sudeste do Brasil, são previstos períodos secos intensos e longos, assim como chuvas extremas, aumentando a probabilidade de desastres naturais em áreas vulneráveis.

No RCP4.5, são previstos períodos de seca moderada a severa de 2025 a 2031, 2059 a 2062 e 2065 a 2070 e um período de seca leve entre 2021 e 2023 (Figura 24). Já no RCP8.5, são previstas secas leve a severa nos períodos: 2021-2027, 2034-2036, 2053-2055, 2058-2060, 2063-2067 e 2069-2070. Com a identificação desses futuros períodos de estiagem nas bacias PCJ, faz-se necessária a intensificação das discussões em torno de um plano de enfrentamento de seca, de ações de proteção e conservação ambiental, a ampliação de projetos de educação ambiental, programas de incentivo ao reúso de efluentes tratados e captação de águas pluviais, além de investimentos em obras de infraestrutura hídrica.

Pereira (2022), usando dados do Modelo Climático Regional Eta HadGEM2-ES na resolução de 5 km para o cenário RCP8.5, avaliou projeções de SPI no período de 2025 a 2055 para a bacia hidrográfica do rio Suaçuí Grande, localizada no estado de Minas Gerais, encontrando, assim como observado no presente estudo, períodos de seca recorrentes com picos de intensidade variando de -1 a -2, o que os enquadram como secas moderada a severa. Em virtude dessas constatações, ações de restauração de ecossistemas foram recomendadas como iniciativa de prevenção e mitigação de tais impactos.

#### 4.1.2 Temperatura

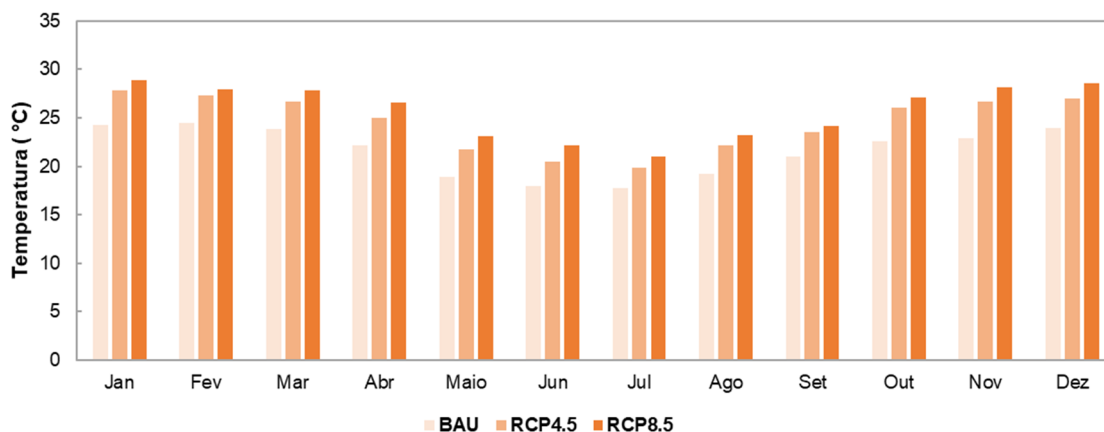
A insegurança hídrica nas bacias PCJ devido ao déficit de precipitação não é o único impacto adverso das mudanças climáticas. O aumento progressivo da

temperatura deve provocar impactos negativos à saúde humana em virtude de eventos de ondas de calor (Luber; Prudent, 2009); aos ecossistemas, em consequência da redução da concentração de oxigênio nos oceanos (Mcgrath, 2019) e ao risco de perda significativa de cobertura florestal na Amazônia (Jones *et al.*, 2009); e à produtividade agrícola, em função de problemas fitopatológicos e valores acima da faixa de temperatura ideal para o desenvolvimento vegetativo (Assunção; Chein, 2016).

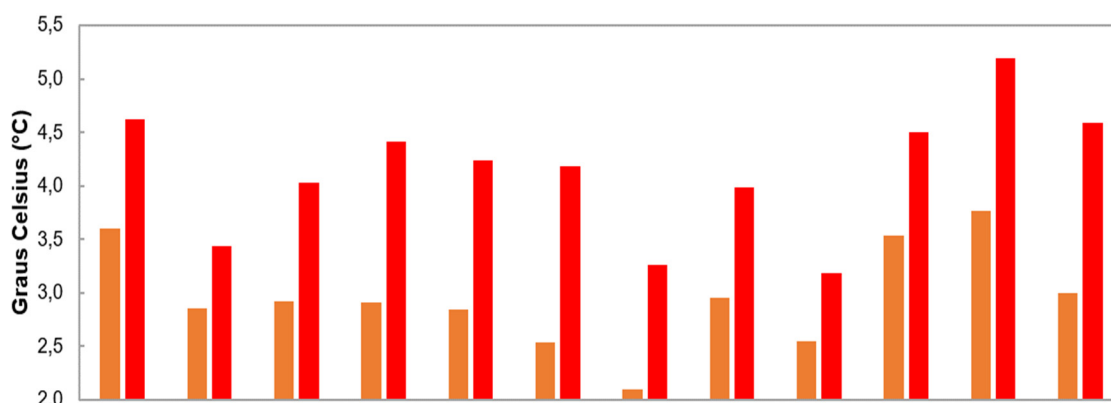
A temperatura afeta os cultivos agrícolas, influenciando a taxa de fotossíntese, a transpiração e respiração de manutenção, o repouso vegetativo, a indução do florescimento, a duração das fases fenológicas, a taxa de germinação, entre outros processos, o que a torna uma das principais variáveis meteorológicas a ser considerada em estudos de zoneamento agroclimático (Sentelhas; Monteiro, 2009).

A Figura 26 apresenta os acréscimos na temperatura média mensal das bacias PCJ, enquanto na Figura 27, é possível observar o valor do incremento, em graus Celsius (°C). De acordo com Agência das Bacias PCJ (2018), as maiores temperaturas nas bacias PCJ são observadas nos meses de outubro a abril e as menores, de maio a setembro. Nota-se esse padrão nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5 (Figura 26), ou seja, mesmo com os incrementos na temperatura, seu padrão de variação intra-anual de máximas e mínimas permanece.

**Figura 26 - Temperatura média mensal nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**



**Figura 27 - Aumento da temperatura média mensal das bacias PCJ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em relação à média mensal do cenário BAU**



Observa-se que no cenário RCP4.5 foi previsto um aumento de 2°C (julho) a 4°C (novembro) ao longo do ano. No cenário RCP8.5 esse aumento será na faixa de 3°C (fevereiro e setembro) a 5°C (novembro, dezembro e janeiro) (Figura 27). Esses resultados concordam com os achados de Higuera-Castro (2022) para a bacia do rio Piracicaba, que verificou aumento na temperatura mensal na faixa de 2,8°C a 5,1°C.

A Tabela 2 apresenta as temperaturas mínima e máxima mensal para os cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5. Verifica-se que no cenário BAU a temperatura mínima mensal foi de 17,8°C, aumentando para 19,9°C e 21,0°C nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente. Já a temperatura máxima passa de 24,4°C no cenário BAU para 27,8°C e 28,9°C nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente. Esse aumento na temperatura beneficiaria o desenvolvimento da cana-de-açúcar que apresenta incremento na taxa de crescimento quando a temperatura ultrapassa 20°C, tendo bom desenvolvimento vegetativo com temperaturas na faixa de 25°C a 33°C (Almeida *et al.*, 2008).

**Tabela 2 - Temperaturas mínima e máxima mensal nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**

	<b>BAU</b>	<b>RCP4.5</b>	<b>RCP8.5</b>
Mínima (°C)	17,8	19,9	21,0
Máxima (°C)	24,4	27,8	28,9

Em contrapartida, considerando o aumento da temperatura média anual nas bacias PCJ, que deve mudar de 21,6°C no cenário BAU, para 24,5°C no cenário

RCP4.5 e para 25,7°C no cenário RCP8.5, o que representa um aumento de 3°C e 4,1°C nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente (Tabela 3), o cultivo de café arábica poderá se tornar inviável, uma vez que temperaturas acima de 23°C são prejudiciais a cultura, cuja temperatura média de aptidão está na faixa de 18°C a 23°C (Mesquita *et al.*, 2016).

**Tabela 3 - Variação da temperatura média anual entre os cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**

Cenário	Temperatura (°C)	Aumento (°C)	Aumento (%)
<b>BAU</b>	21,6	-	-
<b>RCP4.5</b>	24,5	3,0	13,7
<b>RCP8.5</b>	25,7	4,1	19,2

Em termos percentuais, a temperatura média anual nas bacias PCJ deve aumentar 13,7% no cenário RCP4.5 e 19,2% no cenário RCP8.5 em relação ao cenário BAU (Tabela 3). Esse aumento, conforme previamente exposto, pode beneficiar ou prejudicar a produção de certos cultivos nas bacias PCJ.

#### 4.1.2.1 Variabilidade espacial da temperatura

A variabilidade espacial da temperatura mensal nas bacias PCJ para os períodos: histórico, que cobre parte do cenário BAU, e de mudanças climáticas, cenários RCP4.5 e RCP8.5, é apresentada nas Figuras 28, 29 e 30. A análise da distribuição espacial das faixas de variação da temperatura poderá nortear discussões relacionadas ao zoneamento agroclimático de culturas, decisões quanto às melhores soluções para o tratamento de água e esgotos, planos de ações para minimização dos efeitos das ondas de calor e definição de zonas de atenção para avaliação e monitoramento de efeitos aos ecossistemas.

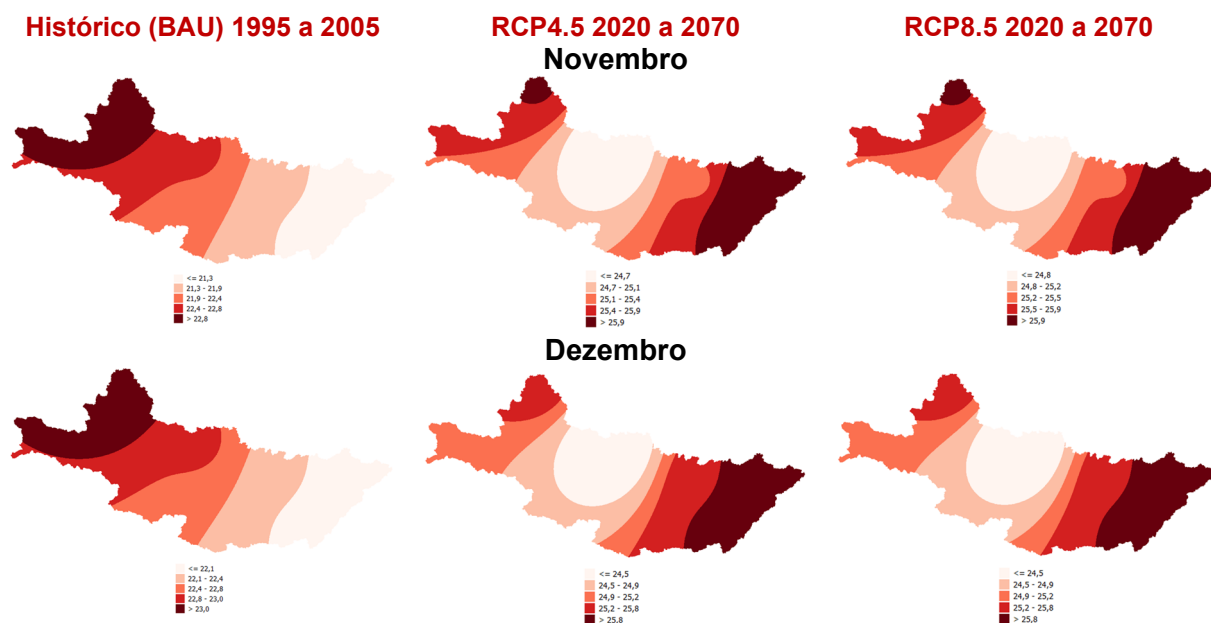
**Figura 28 - Variabilidade espacial da temperatura nas bacias PCJ para os meses de janeiro, fevereiro, março, abril e maio para os cenários BAU (1995 a 2005), RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070)**



**Figura 29 - Variabilidade espacial da temperatura nas bacias PCJ para os meses de junho, julho, agosto, setembro e outubro para os cenários BAU (1995 a 2005), RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070)**



**Figura 30 - Variabilidade espacial da temperatura nas bacias PCJ para os meses de novembro e dezembro para os cenários BAU (1995 a 2005), RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070)**



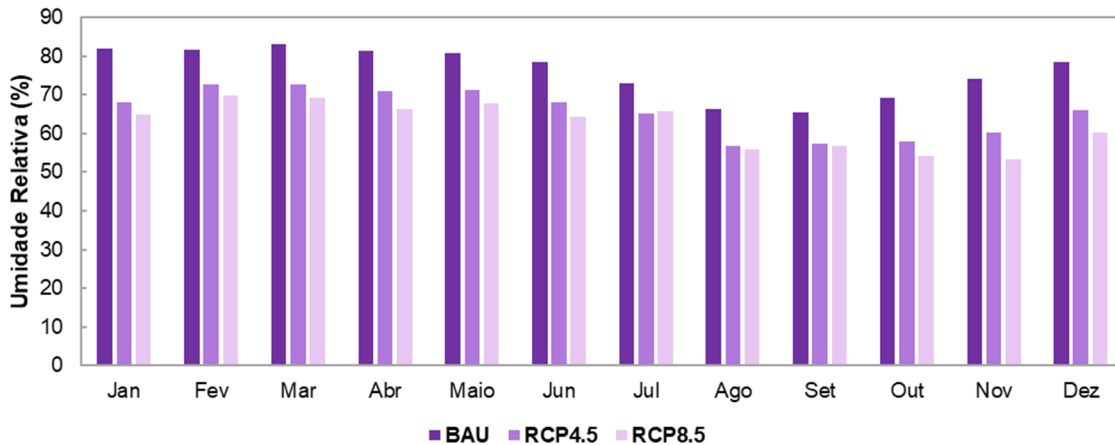
Tal como para a precipitação, a temperatura apresenta faixas de distribuição espacial, sendo essas variáveis apenas entre os períodos histórico (cenário BAU) e de mudanças climáticas (cenários RCP4.5 e RCP8.5), ou seja, as faixas de variabilidade espacial se mantêm constantes ao longo do ano. Observa-se no cenário BAU, maiores valores de temperatura (coloração vermelho escuro, classe “>”) na parte noroeste e extremo oeste das bacias PCJ, enquanto nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, os maiores valores de temperatura ficam predominantemente concentrados na porção leste das bacias PCJ (Figuras 28, 29 e 30).

Contrariamente, a porção leste das bacias PCJ apresenta os menores valores de temperatura (coloração rosa claro, classe “<=”) nas espacializações para o cenário BAU. Enquanto nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, as menores temperaturas ficaram concentradas na região central, chegando a abranger os municípios: Artur Nogueira, Holambra, Limeira, Cosmópolis, Jaguariúna, Paulínia, Nova Odessa, Hortolândia, Sumaré e Monte Mor (Figuras 28, 29 e 30).

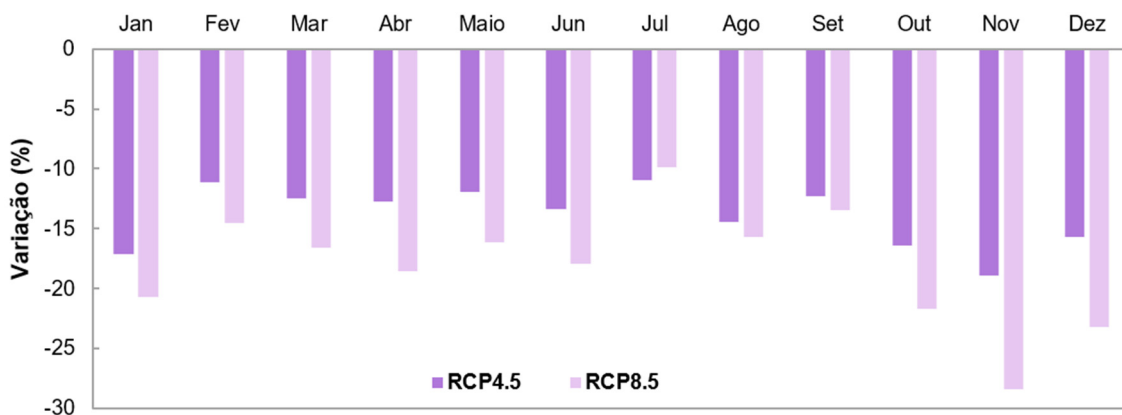
#### 4.1.3 Umidade relativa do ar e velocidade do vento

A intensidade do impacto das mudanças climáticas nas bacias PCJ depende da interação de elementos climáticos. Além de alterações na temperatura, as saídas do Modelo Climático Regional Eta-HadGEM2-ES, resolução de 5 km, para as bacias PCJ, indicam decréscimos na umidade relativa do ar (Figuras 31 e 32) e oscilações, majoritariamente reduções, na velocidade do vento (Figuras 33 e 34). Tais alterações influenciam a evapotranspiração, um componente importante do ciclo hidrológico, essencial para cálculos de balanço hídrico em bacias hidrográficas e para a determinação da demanda hídrica das culturas em áreas irrigadas com vistas ao dimensionamento e manejo adequado dos sistemas de irrigação (Barreto; Wendland; Marcuzzo, 2009; Rossatto *et al.*, 2022).

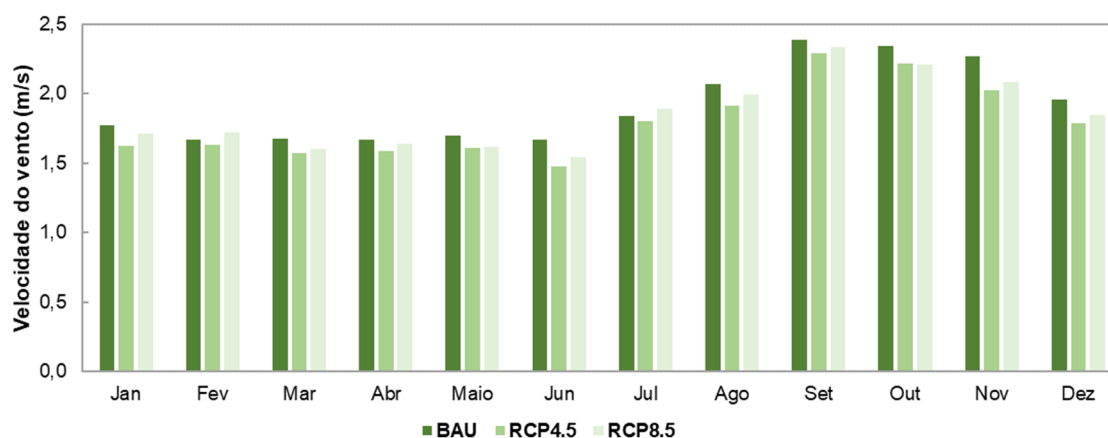
**Figura 31 - Umidade relativa do ar mensal média das bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**



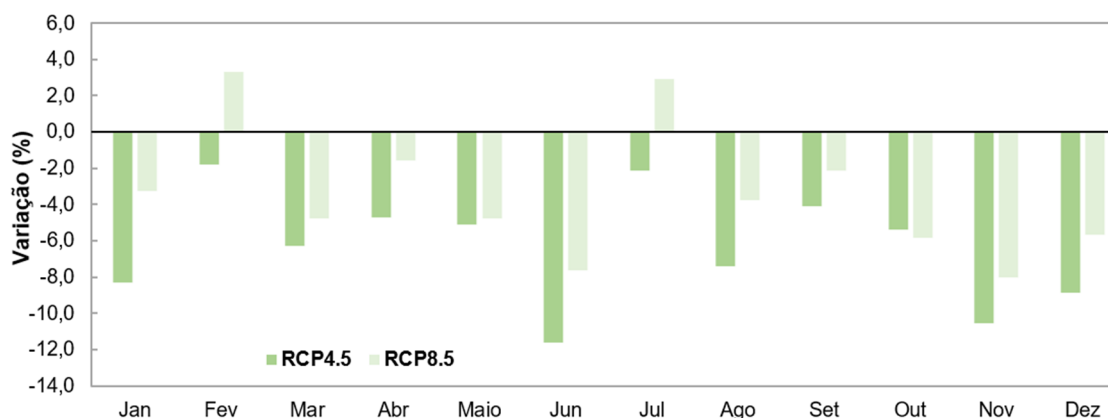
**Figura 32 - Variação da umidade relativa do ar média mensal dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em relação ao cenário BAU**



**Figura 33 - Velocidade do vento média mensal (2 m de altura) nas bacias nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**



**Figura 34 - Variação da velocidade do vento média mensal dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em relação ao cenário BAU**



A umidade relativa do ar média nas bacias PCJ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 foi respectivamente igual a 65,5% e 62,4%, representando, nesta ordem, reduções de 13,9 e 18,1% em relação à média do cenário BAU, igual a 76,1% (Tabela 4). Condições de baixa umidade relativa aliada a altas temperaturas favorecem o desenvolvimento de ácaros fitófagos, os da Família Tetranychidae são importantes para o agronegócio, uma vez que podem causar danos consideráveis a uma ampla gama de culturas, entre elas, a soja, café, feijão, algodão, tomate, pimentão, entre outras (Carvalho; Barcellos; Bubans, 2018).

**Tabela 4 - Variação da umidade relativa do ar média anual entre os cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**

<b>Cenário</b>	<b>Umidade relativa do ar (%)</b>	<b>Diferença</b>	<b>Redução (%)</b>
<b>BAU</b>	76,1	-	-
<b>RCP4.5</b>	65,5	10,6	13,9
<b>RCP8.5</b>	62,4	13,8	18,1

A velocidade do vento média nas bacias PCJ é o parâmetro climático para o qual são previstas as menores reduções em relação ao cenário BAU, sendo prevista uma redução de 6,4% no cenário RCP4.5 e de 3,6% no cenário RCP8.5, passando de 1,92 m/s no cenário BAU, para 1,80 m/s no cenário RCP4.5 e 1,85 m/s no cenário RCP8.5 (Tabela 5).

**Tabela 5 - Variação da velocidade do vento média anual entre os cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**

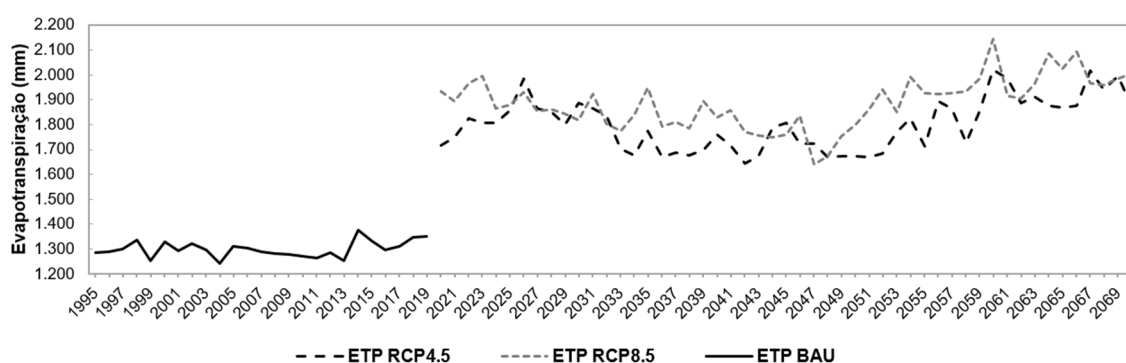
<b>Cenário</b>	<b>Velocidade do vento (m/s)</b>	<b>Redução (m/s)</b>	<b>Redução (%)</b>
<b>BAU</b>	1,92	-	-
<b>RCP4.5</b>	1,80	0,12	6,4
<b>RCP8.5</b>	1,85	0,07	3,6

O vento é importante aos processos agrícolas, pois atua na propagação de sementes, patógenos e grãos de pólen, influencia a distribuição de água nos sistemas de irrigação por aspersão, pode ocasionar danos mecânicos a folhas e ramos, e intensifica a transferência de água para a atmosfera quando quente e seco (Schubert, 2021). Considerando a distribuição da água em sistemas de irrigação por aspersão, ventos menos intensos possibilitam menores perdas de água no momento da aplicação, contribuindo para uma maior eficiência no uso da água na irrigação (Gontijo *et al.*, 2019).

#### 4.1.4 Evapotranspiração potencial

A Figura 35 apresenta a evapotranspiração potencial (ETP) média anual calculada pelo WEAP para as bacias PCJ, considerando todas as sub-bacias inseridas no modelo, nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5. Verifica-se que com o aumento da temperatura e a redução da umidade relativa do ar e da velocidade do vento nos cenários de mudança climática, a ETP anual sofreu incrementos expressivos, passando de valores no intervalo de 1.300 mm a 1.400 mm no cenário BAU, para valores no intervalo de 1.700 mm a 2.100 mm nos cenários RCP4.5 e RCP8.5.

**Figura 35 - Evapotranspiração potencial (ETP) anual das bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**



Avaliando a média para os cenários, constata-se que a ETP anual nas bacias PCJ aumentou 38,5% no cenário RCP4.5 e 45,1% no cenário RCP8.5 em relação ao cenário BAU, passando de 1.300,3 mm nesse cenário para 1.800,5 mm no cenário RCP4.5 e 1.886,7 mm no cenário RCP8.5 (Tabela 6).

**Tabela 6 - Variação da evapotranspiração potencial média anual entre os cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**

Cenário	Evapotranspiração Potencial (mm)	Aumento (mm)	Aumento (%)
BAU	1300,3	-	-
RCP4.5	1800,5	500,2	38,5
RCP8.5	1886,7	586,4	45,1

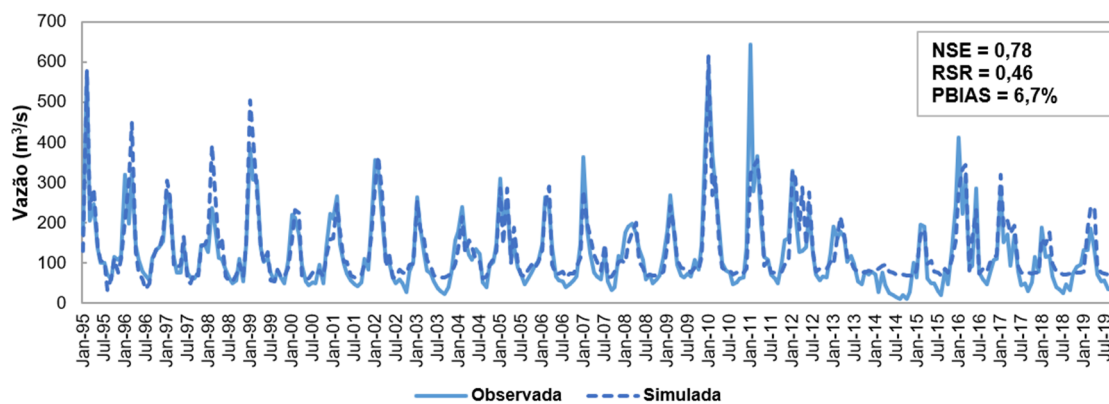
Com os cenários de mudanças climáticas RCP4.5 e RCP8.5 indicando aumento da evapotranspiração (Tabela 6) e decréscimo da precipitação anual (Tabela 1), a disponibilidade hídrica nas bacias PCJ, segundo este prognóstico, será reduzida, dado que numa bacia hidrográfica, desconsiderando-se as demandas de uso consuntivo, a precipitação é a principal entrada de água e a evapotranspiração a principal saída.

## 4.2 Disponibilidade hídrica e alterações na demanda dos recursos hídricos

### 4.2.1 Validação do modelo hidrológico

As métricas de validação do modelo hidrológico desenvolvido para as bacias PCJ no WEAP indicam uma boa performance na simulação da vazão, visto que o modelo apresentou valor de 0,79 para o coeficiente NSE, 0,46 para a RSR e PBIAS igual a 6,7% (Figura 36). Esses resultados, analisados em conjunto, enquadram o modelo criado como “muito bom” segundo a classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007). Destaca-se que o valor positivo da PBIAS indica uma subestimativa da vazão simulada em relação à vazão observada.

**Figura 36 - Validação do modelo hidrológico desenvolvido para as bacias PCJ no WEAP com apresentação de métricas de desempenho**

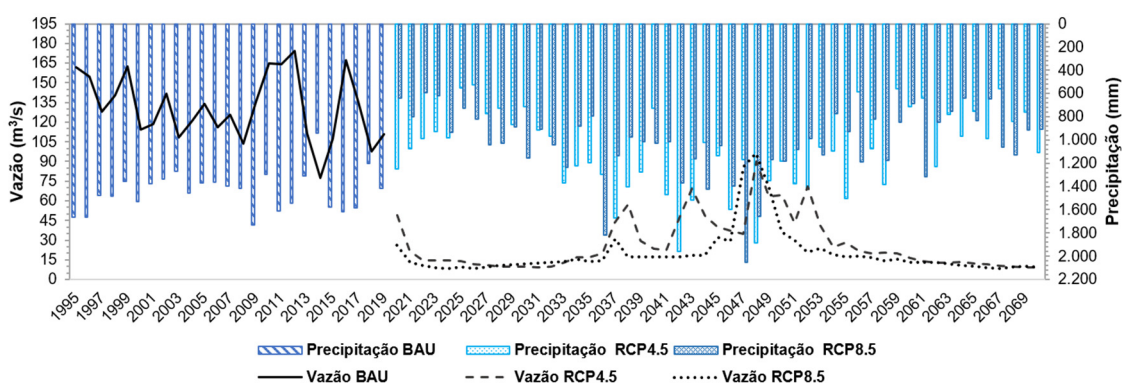


NSE= coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; RSR = razão entre a raiz do Erro Quadrático Médio e o desvio padrão; PBIAS = porcentagem de viés.

#### 4.2.2 Relação entre precipitação e vazão

Apesar da relação entre precipitação e vazão ser complexa e dependente de outros fatores do ciclo hidrológico e da demanda hídrica dos usos consuntivos, na Figura 37 apresenta-se esse relacionamento nas bacias PCJ para os dados do cenário BAU e dos cenários RCP4.5 e RCP8.5, todos em escala anual. Voltando a atenção aos picos de vazão registrados, percebe-se que no cenário BAU, o maior pico de vazão ( $174,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) ocorreu no ano de 2012, sendo registrados altos valores de precipitação em 2011 e no ano de 2012 (entre 1.500 e 1.600 mm). Nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, observa-se que os maiores picos de vazão devem ocorrer em 2048, sendo iguais a  $89,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e  $96,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente. Esses picos foram também precedidos de altas precipitações no período de 2046 a 2048 (entre 1.170 e 2.100 mm).

**Figura 37 - Relação entre precipitação e vazão nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**

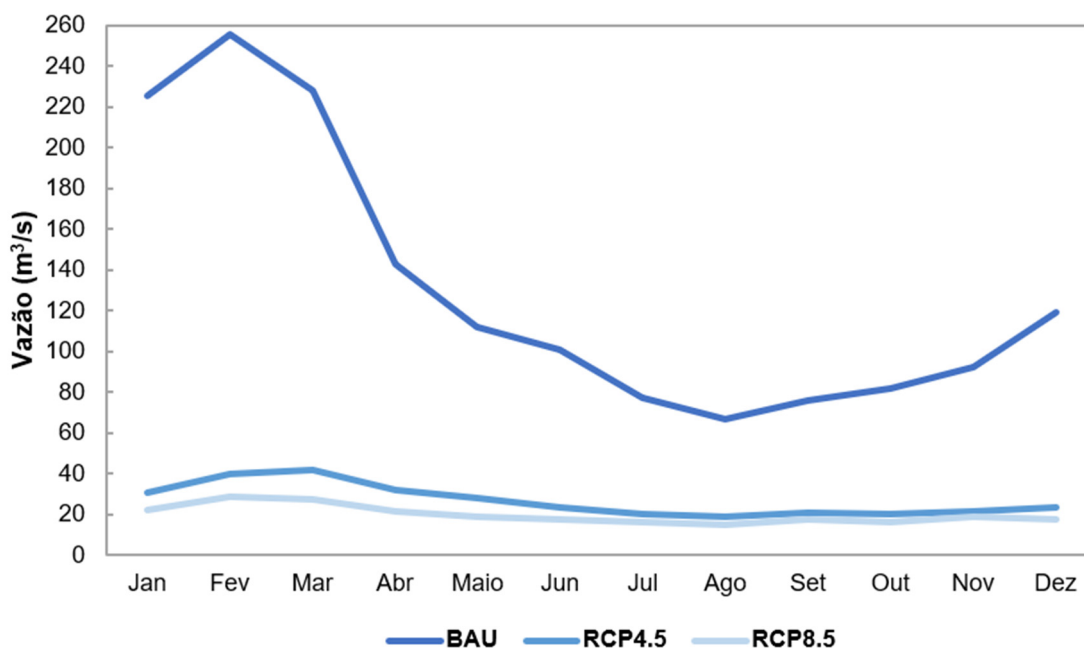


O fato de os maiores picos de vazão ocorrerem após anos de alta pluviosidade se deve ao tempo de retardo existente entre o aumento da vazão em relação à alta incidência de chuvas. Comportamento semelhante também foi observado por Maciel (2017), Henriques (2019) e Eichenberger, Souza e Nascimento (2020) ao estudarem a relação entre vazão e precipitação em bacias hidrográficas.

#### 4.2.3 Vazão média mensal e anual

Verifica-se que o padrão da vazão mensal do cenário BAU, que foi validado com dados observados, se mantém nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, com as maiores vazões ocorrendo entre os meses de janeiro e março e as menores entre agosto e outubro (Figura 38, Tabela 7). Henriques (2019) também observou que nas bacias PCJ as menores vazões ocorrem entre agosto e setembro e as maiores entre janeiro e março. Nota-se que é prevista uma grande redução na vazão das bacias PCJ nos cenários de mudanças climáticas RCP4.5 e RCP8.5, com o cenário climático RCP8.5 apresentando as menores previsões de vazão.

**Figura 38 - Vazão média mensal nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**



**Tabela 7 - Vazão média mensal nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**

(Continua)

	BAU (m³ s <sup>-1</sup> )	RCP4.5 (m³ s <sup>-1</sup> )	RCP8.5 (m³ s <sup>-1</sup> )
Jan.	225,3	30,3	22,3
Fev.	255,7	39,8	28,7
Mar.	228,2	42,0	27,6
Abr.	142,6	32,2	21,6

**Tabela 7 - Vazão média mensal nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5****(Continuação)**

	<b>BAU (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)</b>	<b>RCP4.5 (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)</b>	<b>RCP8.5 (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)</b>
Maio	111,9	28,1	19,1
Jun.	100,6	23,7	17,4
Jul.	77,4	20,2	16,0
Ago.	66,8	19,1	14,9
Set.	76,2	20,7	17,3
Out.	82,0	20,0	16,4
Nov.	92,3	21,4	19,0
Dez.	119,1	23,2	17,4

Comparando a vazão média anual nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5, constata-se uma redução de 79,6% no cenário RCP4.5 e de 84,9% no cenário RCP8.5 em relação ao cenário BAU, com a vazão média anual passando de 131,0 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> no cenário BAU para 26,7 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> no cenário RCP4.5 e 19,8 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> no cenário RCP8.5 (Tabela 8).

**Tabela 8 - Variação da vazão média anual entre os cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**

<b>Cenário</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Redução (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Redução (%)</b>
<b>BAU</b>	131,0	-	-
<b>RCP4.5</b>	26,7	104,3	79,6
<b>RCP8.5</b>	19,8	111,2	84,9

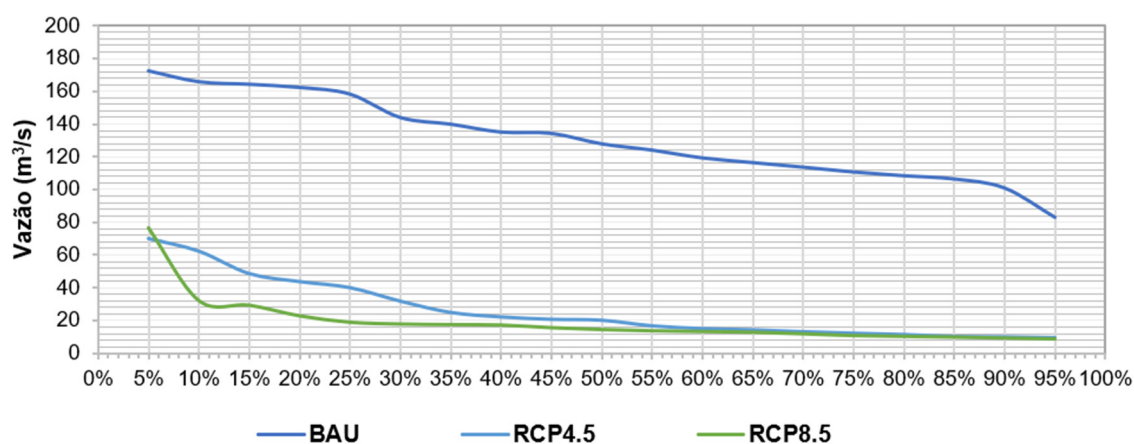
Brasil (2015), avaliando os impactos na vazão em virtude dos cenários climáticos RCP4.5 e RCP8.5 projetado pelo Modelo Climático Regional Eta, resolução de 20 km, aninhado ao modelo climático global HadGEM2-ES, verificou reduções na vazão entre 30% e 50% na região de localização das bacias PCJ. Constata-se um cenário mais pessimista no presente estudo, uma vez que as reduções de vazão previstas por esses cenários são próximas ou superiores a 80%. Neste caso, vale salientar o fato de que no processo de *downscaling*, as tendências do modelo de maior escala podem ser amplificadas (Pielke; Wilby, 2012), o que resultaria no modelo Eta-HadGEM2-ES na resolução de 5 km, amplificar a tendência

de redução da vazão observada no modelo Eta-HadGEM2-ES na resolução de 20 km.

#### 4.2.4 Vazões de referência

Além da observação dos impactos das mudanças climáticas na vazão média das bacias PCJ, é importante verificar as mudanças quanto às vazões de referência normalmente empregadas no processo decisório de concessão de outorgas de direito de uso da água. A curva de permanência é uma das formas de se obter e visualizar as vazões de referência  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ , ela representa a relação entre a vazão e a porcentagem de tempo em que ela é igualada ou superada considerando todo o período da série histórica empregado na sua construção (Cruz; Tucci, 2008). A Figura 39 apresenta as curvas de permanência geradas para os cenários BAU, RCP 4.5 e RCP8.5. As vazões de referência  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  correspondem às porcentagens 90% e 95%, respectivamente.

**Figura 39 - Curva de permanência da vazão simulada no WEAP para os cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**



A vazão  $Q_{90}$  no cenário BAU correspondeu ao valor  $101,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , enquanto para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 foram estimados os valores para a  $Q_{90}$  respectivamente iguais a  $9,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e  $9,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , representando, nessa ordem, 90,4% e 91,0% de redução em relação cenário BAU. Já a vazão  $Q_{95}$  foi igual a  $83,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  no cenário BAU,  $9,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  no cenário RCP4.5 e  $8,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  no cenário

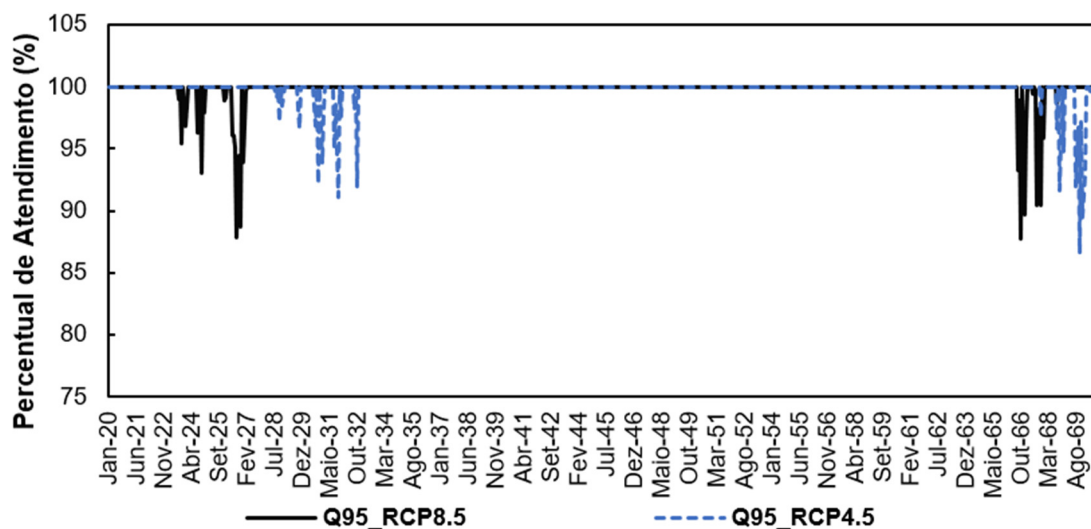
RCP8.5, o que equivale a redução de 88,9% e 89,8%, respectivamente, da  $Q_{90}$  simulada sob condições de mudanças climáticas em relação ao cenário BAU.

No Plano de Recursos Hídricos das bacias PCJ 2020 a 2035 (Consórcio Profill-Rhama, 2020), a vazão  $Q_{95}$  foi considerada como vazão de referência, sendo encontrado o valor de  $63,83 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  considerando-se dados de vazão registrados entre 1940 e 1970. Esse valor é inferior ao resultado encontrado para o cenário BAU, igual a  $83,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . A diferença entre o valor calculado no Plano e o calculado no presente estudo para o cenário BAU pode ser resultante do período considerado no cálculo, visto que esse cenário abrange o horizonte temporal de 1995 a 2019.

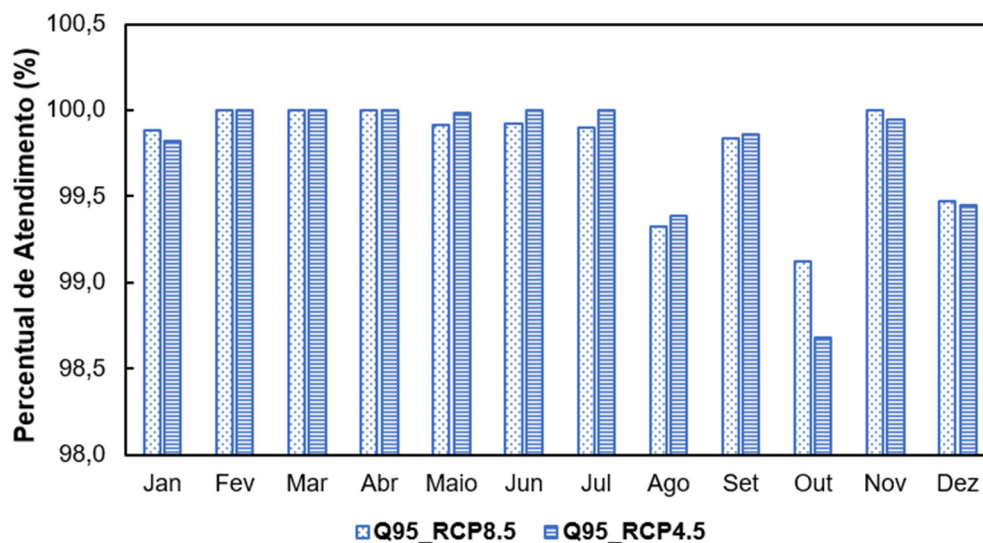
Devido aos cenários RCP4.5 e RCP8.5 indicarem reduções expressivas na vazão de referência  $Q_{95}$  (Figura 39) e sendo ela uma das vazões de referência adotada no Plano de Recursos Hídricos das bacias PCJ, verifica-se a necessidade de adoção de medidas de adaptação a essas reduções de vazão em virtude das mudanças climáticas previstas nesses cenários. Essas medidas de adaptação devem combinar subconjuntos de atividades como otimização de processos tecnológicos, desenvolvimento de infraestruturas, sistema de informação, reforço ou mudanças comportamentais e institucionais, gestão integrada e sustentável dos recursos naturais e serviços financeiros, englobando também a transferência de riscos (Brasil, 2015).

O modelo desenvolvido no WEAP para as bacias PCJ pode permitir a verificação da resposta hidrológica das bacias PCJ frente à adoção de medidas de adaptação às mudanças climáticas nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, pois é possível verificar, entre outros resultados, o percentual de atendimento da vazão de referência  $Q_{95}$ . A Figura 40 apresenta esse percentual de atendimento nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 considerando a  $Q_{95}$  igual a  $9,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  no cenário RCP4.5 e a  $8,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  no cenário RCP8.5. Já na Figura 41 é possível analisar a variação intra-anual desse atendimento, verificando-se que com base nos valores médios, os meses mais suscetíveis a não atender o valor da  $Q_{95}$  são agosto, outubro e dezembro. Destaca-se que nesses meses, o percentual de atendimento da vazão de referência  $Q_{95}$  esteve na faixa de 98,4% a 99,5%, ou seja, é uma variação pequena, mas que indica que nesses meses, ações de mitigação às mudanças climáticas relacionadas ao reforço de mudanças comportamentais e institucionais com vistas ao uso racional da água devem ser intensificadas.

**Figura 40 - Percentual de atendimento da vazão  $Q_{95}$  nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, período de jan. 2020 a dez. 2070**



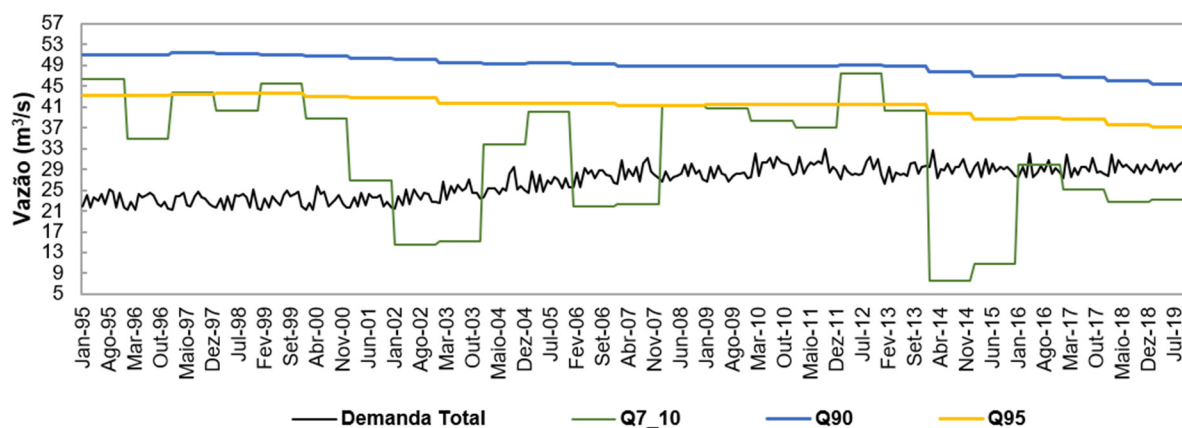
**Figura 41 - Percentual de atendimento da vazão  $Q_{95}$  nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 considerando a média mensal**



A fim de verificar as diferenças entre as vazões de referência  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{7,10}$ , que são usualmente empregadas no processo de outorga de direito de uso da água, na Figura 42 são apresentados os valores calculados no programa SisCAH (Souza *et al.*, 2009) para essas vazões utilizando séries de dados diários observados na estação Artemis (dados registrados no ano de 1944 até o ano de 2019), sendo obtidos valores para o período de 1995 a 2019. Os valores das vazões de referência

$Q_{90}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{7,10}$  foram comparados às variações da demanda total de uso consuntivo de água nas bacias PCJ, cujo cálculo foi realizado no WEAP para o cenário BAU.

**Figura 42 - Variação das vazões de referência  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{7,10}$  em comparação com as variações da demanda total de uso consuntivo da água nas bacias PCJ para o cenário BAU, período de jan. 1995 a dez. 2019**



Por meio da comparação das vazões  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{7,10}$  em relação à demanda nas bacias PCJ, percebe-se que a  $Q_{7,10}$  é a vazão de referência mais restritiva, porém é a única que indica o não atendimento da demanda em períodos de seca como as registradas nas bacias PCJ em 2001-2002, 2006-2007 e 2013-2016 (Figura 42). Por outro lado, a vazão passível de ser outorgada seria menor, o que poderia limitar o desenvolvimento econômico na região das bacias hidrográficas. Em consonância com essa observação está o trabalho desenvolvido por Ribeiro *et al.* (2017), que constataram na bacia do Rio Branco, localizada em Roraima, que a substituição da vazão de referência  $Q_{7,10}$  pela  $Q_{90}$  ou  $Q_{95}$  permitiria um aumento da vazão a ser outorgada da ordem de 122% e 74%, respectivamente.

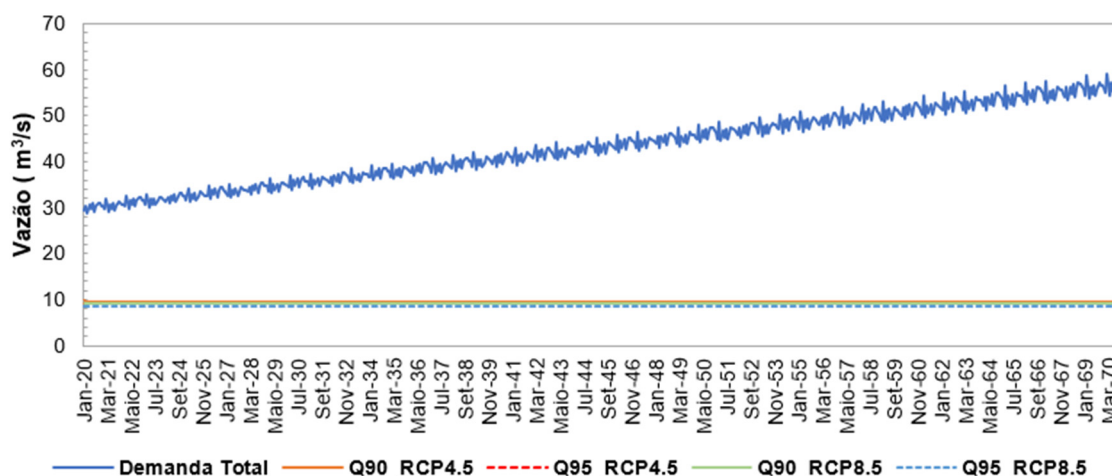
#### 4.2.5 Demanda versus disponibilidade

No Plano de Recursos Hídricos das bacias PCJ 2020 a 2035 além da  $Q_{95}$ , a  $Q_{7,10}$  também foi considerada como vazão de referência, sendo definido o valor de  $40,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  para a  $Q_{7,10}$ . Utilizando o valor da  $Q_{7,10}$  e da  $Q_{95}$  (igual a  $63,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), o saldo do balanço hídrico nas bacias PCJ, ou seja, a disponibilidade menos a

demanda, foi definido em quatro classes: muito alta, alta, média e baixa criticidade. A maior parte das bacias PCJ foi classificada na classe de média criticidade, na qual o saldo do balanço hídrico foi menor ou igual a  $Q_{95}$  e maior que 50% da  $Q_{7,10}$  (Consórcio Profill-Rhama, 2020).

Ao compararmos a projeção da demanda de uso consuntivo para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 com os valores de vazão  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  previstos, verifica-se um panorama futuro preocupante, visto que mesmo adotando as vazões de referência menos restritivas entre as aqui analisadas ( $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ), a demanda projetada não seria atendida (Figura 43), enquadrando o balanço hídrico na classe “muito alta criticidade”, na qual o saldo hídrico nas bacias PCJ é nulo ou negativo conforme a classificação presente no Plano de Recursos Hídricos das bacias PCJ 2020 a 2035 (Consórcio Profill-Rhama, 2020).

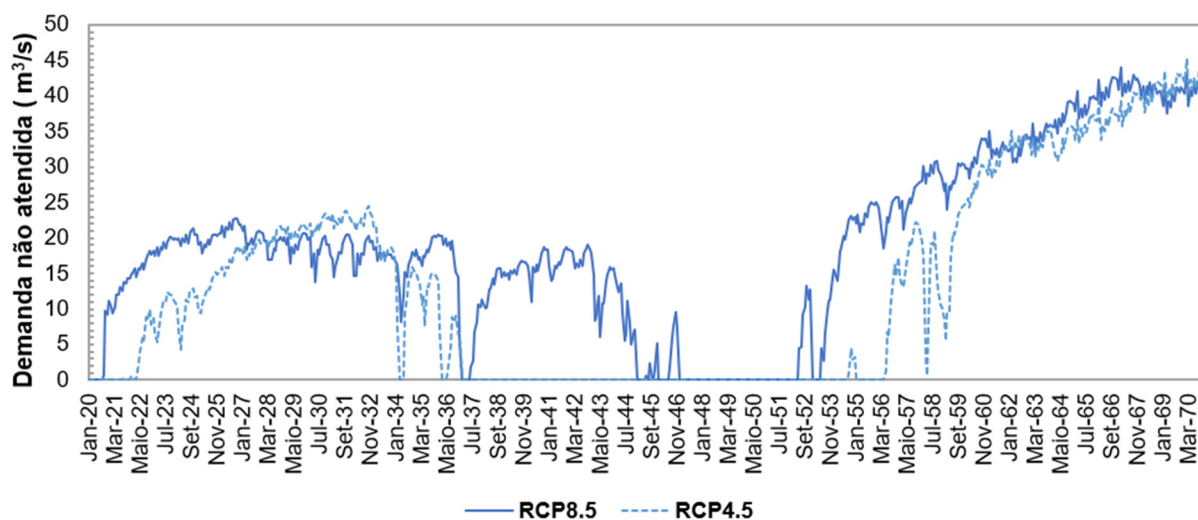
**Figura 43 - Variação das vazões  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em comparação com as variações projetadas para a demanda total de uso consuntivo da água nas bacias PCJ, jan. 2020 a dez. 2070**



A demanda total de uso consuntivo da água projetada para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 também apresenta longos períodos nos quais o balanço hídrico é negativo mesmo quando consideramos a vazão total simulada. Na Figura 44 são apresentados os valores de vazão demandada não atendidos nesses cenários, ou seja, a vazão disponível nas bacias PCJ não foi capaz de satisfazer as necessidades hídricas dos múltiplos usuários. Os valores de demanda não atendida nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 devem chegar a valores próximos de  $45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  entre 2067 e 2070. Essa grande lacuna entre demanda e disponibilidade para os usos

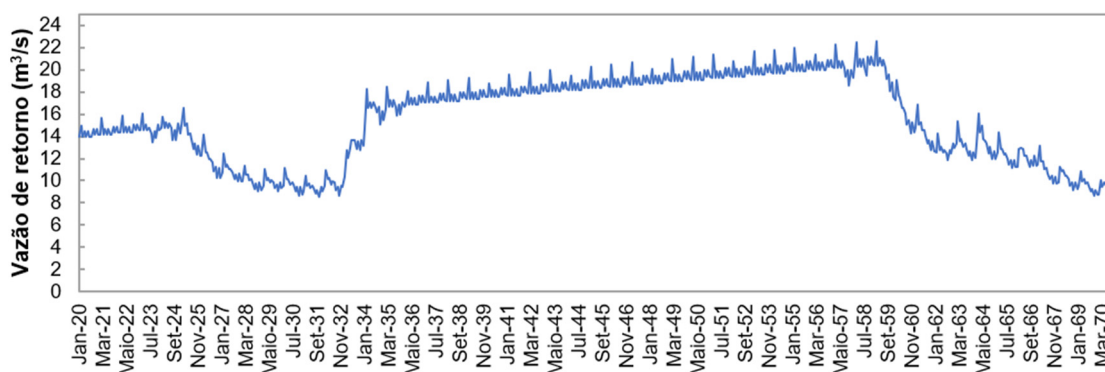
múltiplos dos recursos hídricos das bacias PCJ pode comprometer a sustentabilidade socioeconômica e impactar negativamente os ecossistemas aquáticos.

**Figura 44 - Demanda de uso consuntivo não atendida nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 (jan. 2020 a dez. 2070)**



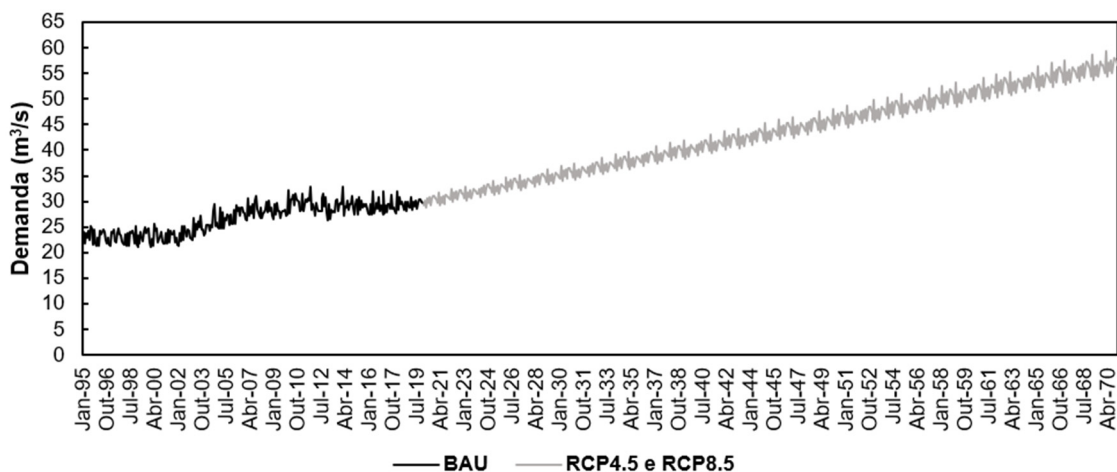
Diante do exposto, uma fonte alternativa de água para as bacias PCJ pode ser a água residuária proveniente do reúso de esgotos domésticos tratados, o que pode garantir incrementos na disponibilidade hídrica da ordem de  $9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  a  $23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Figura 45). Outras fontes alternativas de água que devem ser consideradas a fim de alcançar segurança hídrica às demandas da bacia PCJ, incluem a captação e reúso de águas pluviais, reúso de águas cinzas e o reúso de águas residuárias advindas de efluentes industriais e agroindustriais tratados.

**Figura 45 - Vazão de retorno proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto prevista para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 (jan. 2020 a dez. 2070)**



Avaliando a evolução da demanda de uso consuntivo da água nas bacias PCJ, percebe-se um aumento contínuo nos cenários BAU e RCP4.5 e RCP8.5, passando de valores próximos de  $25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  em 1995 para valores superiores a  $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  em 2070 (Figura 46). Ao compararmos a demanda média do cenário BAU com a demanda média projetada para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, observa-se 62,6% de aumento, com a demanda média passando de  $26,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  no cenário BAU para  $43,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 (Tabela 9).

**Figura 46 - Demanda de uso consuntivo da água nos cenários BAU (jan. 1995 a dez. 1995), RCP4.5 e RCP8.5 (jan. 2020 a dez. 2070)**

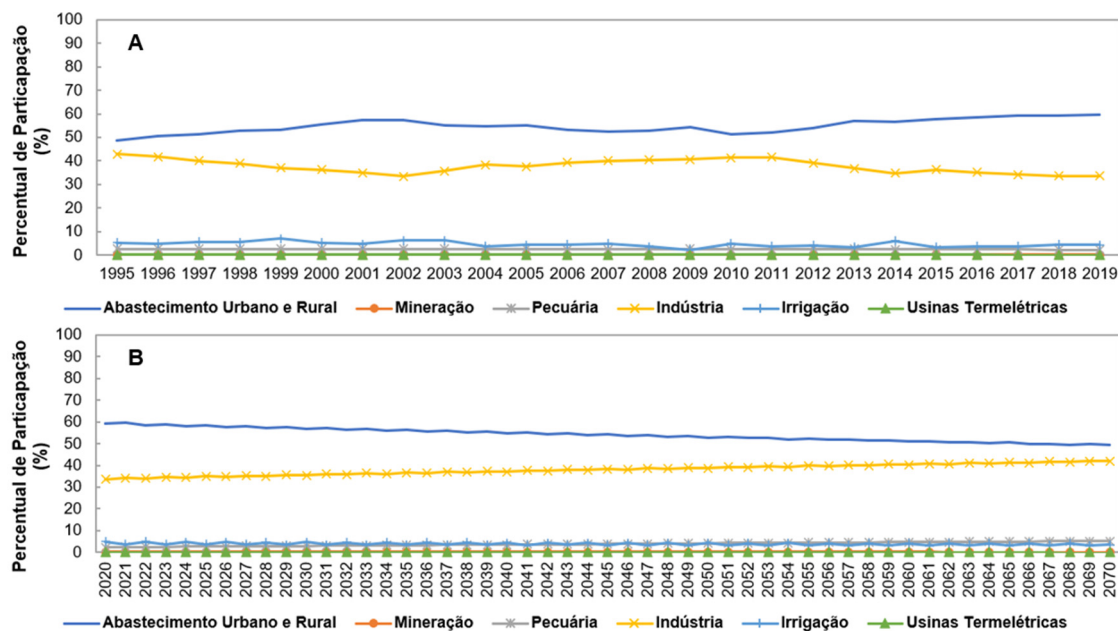


**Tabela 9 - Variação da demanda média de uso consuntivo da água entre os cenários RCP4.5 e RCP8.5 e o cenário BAU**

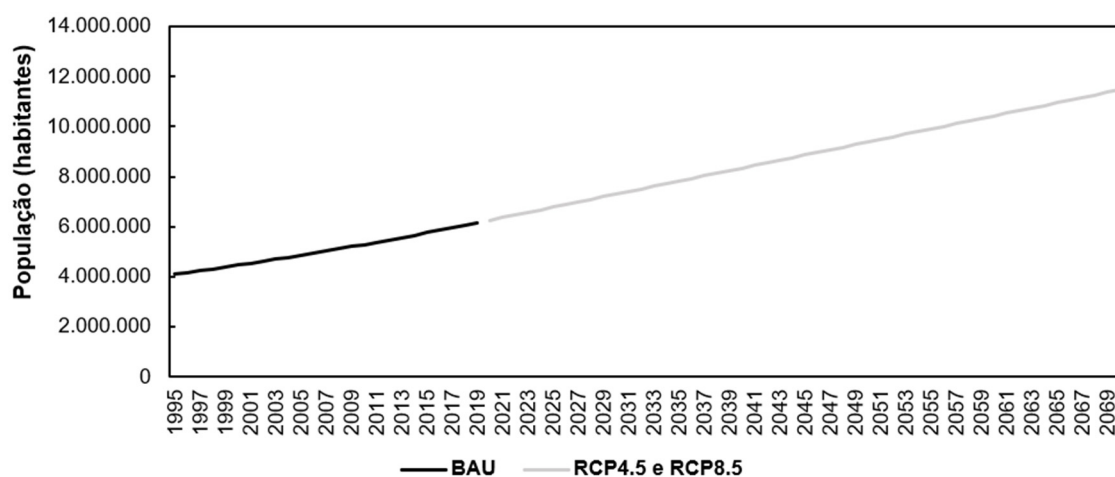
Cenários	Demanda ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )	Aumento ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )	Aumento (%)
BAU	26,7	-	-
RCP4.5 e RCP8.5	43,4	16,7	62,6%

O aumento progressivo da demanda hídrica nas bacias PCJ é impulsionado principalmente pelo crescimento populacional, posto que o abastecimento urbano e rural é a principal demanda hídrica (Figura 47). No cenário BAU, a população nas bacias PCJ passou de aproximadamente 4 milhões de habitantes em 1995 para aproximadamente 6 milhões de habitantes em 2019. No final dos cenários RCP4.5 e RCP8.5, ano de 2070, é previsto que a população nas bacias PCJ atinja o valor de aproximadamente 11 milhões de habitantes (Figura 48).

**Figura 47 - Percentual de participação das demandas de uso consuntivo da água em relação à demanda total nas bacias PCJ para A) cenário BAU (1995-2019) e B) cenários RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070)**



**Figura 48 - Crescimento populacional nas bacias PCJ nos cenários BAU (1995-2019), RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070)**



O desenvolvimento econômico nas bacias PCJ devido à industrialização é outro fator que influencia a disponibilidade hídrica, uma vez que a indústria é a segunda maior usuária dos recursos hídricos (Figura 47).

Por fim, a agricultura irrigada e a pecuária também são atividades que impulsionam a economia nas bacias PCJ, no cenário BAU, a irrigação apresentou 2,3% a 6,9% de percentual de participação, enquanto a pecuária apresentou 2,3% a

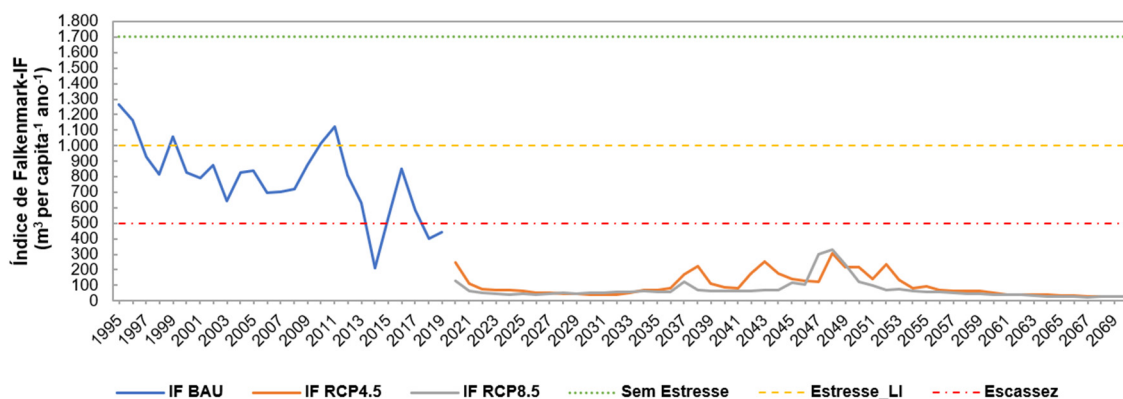
2,7% de percentual de participação (Figura 47A). Considerando as projeções para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, a participação dessas atividades econômicas em relação à demanda total hídrica nas bacias PCJ devem permanecer na faixa de 2,3% a 5,2% de participação (Figura 47B).

#### 4.2.6 Índices de disponibilidade hídrica

##### 4.2.6.1 Índice de Falkenmark

A disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas pode ser caracterizada por meio do uso de índices. O Índice de Falkenmark é amplamente difundido, sendo empregado na verificação da disponibilidade hídrica per capita em países, regiões e bacias hidrográficas. Na Figura 49 apresenta-se o Índice de Falkenmark nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.

**Figura 49 - Índice de Falkenmark para as bacias PCJ nos cenários BAU (1995-2019), RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070)**



Observa-se que as bacias PCJ, segundo o Índice de Falkenmark (Figura 49), em 1995, já estavam classificadas como estresse hídrico (IF na faixa de 1.000 a 1.700 m³ per capita⁻¹ ano⁻¹) permanecendo nessa classificação até 1997, ano no qual se iniciou a classe de escassez (IF na faixa de 500 per capita⁻¹ ano⁻¹ a 1.000 m³ per capita⁻¹ ano⁻¹). A partir desse ano até 2013, as bacias oscilaram entre as classes estresse hídrico e escassez, atingindo em 2014 a classe de escassez absoluta (IF < 500 m³ per capita⁻¹ ano⁻¹), retornando no ano seguinte (2015) à classe

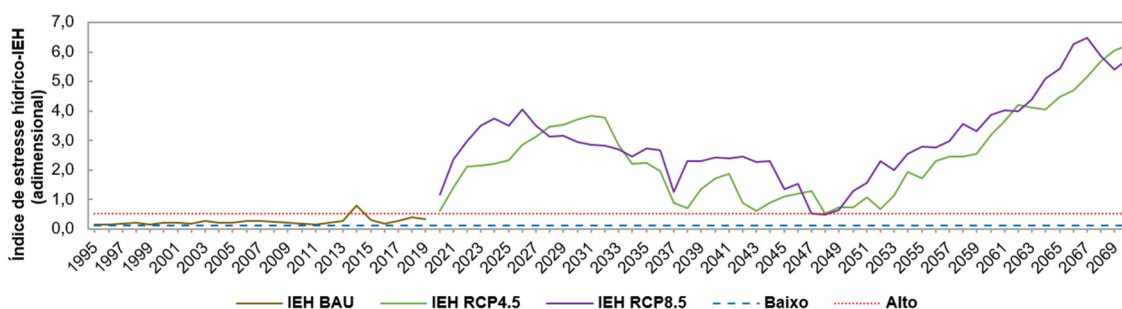
de escassez (IF na faixa de 500 a 1.000 m<sup>3</sup> per capita<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), mantendo-se nela até 2018, ano no qual as bacias se enquadram mais uma vez na classe de escassez absoluta (IF < 500 m<sup>3</sup> per capita<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), que se estende até o final da série do cenário BAU (ano de 2019) e por toda a série dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070) que incluem mudanças climáticas.

Sánchez-Román *et al.* (2012), aplicando Dinâmica de Sistemas, verificaram que no cenário *Business as Usual* criado para as bacias PCJ, o Índice de Falkenmark em 2010, igual a 1.302 m<sup>3</sup> per capita<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, já enquadrava as bacias em situação de estresse hídrico, sendo que para 2050 foi previsto um IF igual a 774 m<sup>3</sup> per capita<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, caracterizando uma situação de escassez. Em comparação com esses achados, no presente estudo, no ano de 2010, as bacias PCJ também se enquadravam em situação de estresse hídrico, apresentando IF igual a 1.014 m<sup>3</sup> per capita<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Em contrapartida, para o ano de 2050 foi previsto no presente trabalho uma situação de escassez absoluta, com IF igual a 214 m<sup>3</sup> per capita<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, sendo esse um prognóstico mais preocupante que a situação de escassez prevista pelos autores. Contudo, na pesquisa aqui apresentada foram considerados cenários de mudanças climáticas, nos quais são previstas reduções na precipitação anual das bacias PCJ, impactando, por consequência sua vazão média anual.

#### 4.2.6.2 Índice de Estresse Hídrico

O segundo indicador avaliado conforme dados dos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5, o Índice de Estresse Hídrico (Figura 50) traduz a magnitude do estresse hídrico considerando a demanda hídrica total de uso consuntivo na bacia e a vazão disponível para atendê-la. Nele, uma situação de baixo estresse hídrico (IEH < 0,1) representa um evento no qual para cada 1 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> de vazão demandada pelas atividades desenvolvidas na bacia hidrográfica, há mais de 10 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> de vazão disponível.

**Figura 50 - Índice de Estresse Hídrico (IEH) para as bacias PCJ nos cenários BAU (1995-2019), RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070)**



Verifica-se no cenário BAU, com exceção do ano 2014, que as bacias PCJ estavam em situação de estresse hídrico moderado ou médio (IEH na faixa 0,1 a 0,4), o que significa que a cada  $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de vazão demandada havia 2,5 a  $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de vazão disponível. Nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, as bacias já iniciam o período de simulação (ano 2020) em condição de alto estresse hídrico (IEH > 0,4), que se traduz na circunstância em que a cada  $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de vazão demandada, havia menos de  $2,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de vazão disponível, chegando à situação extrema em que para cada  $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de vazão demandada pelas atividades desenvolvidas na bacia hidrográfica, havia apenas  $0,161 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de vazão disponível no cenário RCP4.5 (IEH = 6,2; ano 2070, Figura 50), e  $0,153 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de vazão disponível no cenário RCP8.5 (IEH = 6,5; ano 2067, Figura 50).

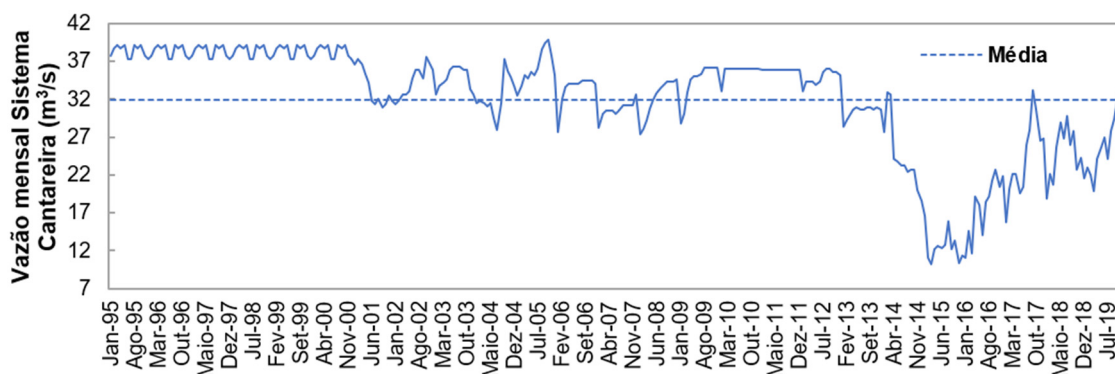
#### 4.2.7 Sistema Cantareira

Os impactos das alterações na vazão disponível nas bacias PCJ ultrapassam os limites da sua área de drenagem em virtude da sua contribuição ao Sistema Cantareira, que abastece a Região Metropolitana de São Paulo, por isso é importante a análise das mudanças previstas frente aos cenários de mudanças climáticas (cenários RCP4.5 e RCP8.5).

No cenário BAU, desconsiderando-se o período 2014-2016 devido à seca prolongada (Ver Figura 23), a vazão mensal transvasada ao Sistema Cantareira esteve majoritariamente concentrada na faixa  $27,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  a  $39,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Figura 51). Vale destacar que no período 2014-2016 encontra-se o menor valor de vazão

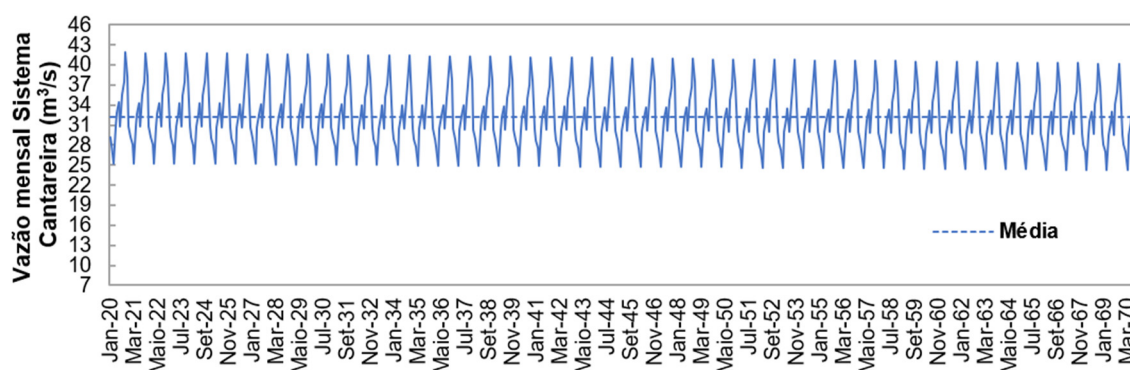
transvasada ao Sistema Cantareira, registrado em março de 2015, sendo esse igual a  $10,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . A média para esse cenário foi de  $31,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

**Figura 51 - Vazão mensal transvasada das bacias PCJ para o Sistema Cantareira no cenário BAU (jan. 1995 a dez. 2019)**



Já a projeção para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, indica que a vazão mensal a ser transvasada ao Sistema Cantareira oscilará entre  $24,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e  $41,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , apresentando média de  $30,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Figura 52). Todavia, é importante salientar que a Resolução Conjunta ANA/DAEE-925, de 29 de maio de 2017 (São Paulo, 2017) estabelece regras quanto à vazão de transferência ao Sistema Cantareira e à vazão a ser retornada às bacias PCJ considerando dois períodos hidrológicos, o período úmido, que se estende de dezembro a maio, e o período seco, que se estende de junho a novembro. Além desses períodos, o volume útil dos reservatórios foi levado em consideração no estabelecimento de faixas, variando de 1 a 5, que estabelecem os limites de vazão a serem transvasadas ( $33,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  a  $15,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ).

**Figura 52 - Vazão mensal transvasada das bacias PCJ para o Sistema Cantareira prevista para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 (jan. 2020 a dez. 2070)**

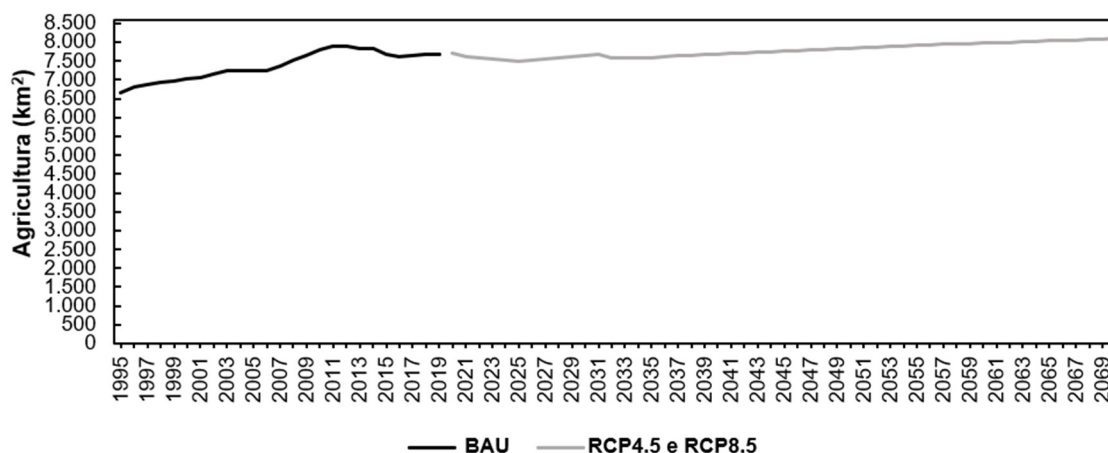


De acordo com a Agência das Bacias PCJ (2023b), em janeiro de 2023 ocorreu o lançamento do Projeto Cantareira PCJ no qual a Sabesp liberará R\$1,75 milhões por ano entre 2023 e 2027 para o financiamento de projetos de proteção de mananciais das bacias PCJ contribuintes do Sistema Cantareira. Inicialmente, haverá investimentos no levantamento de informações da adequação ambiental de propriedades rurais, sendo previstas ações de intervenção. O objetivo principal é a conservação do solo a fim de aumentar a taxa de infiltração da água proveniente da precipitação e evitar processos de erosão e de assoreamento dos corpos d'água.

Percebe-se, portanto, uma preocupação da gestão (Agência das Bacias PCJ) e partes interessadas (Sabesp) das bacias PCJ na melhoria da sua condição ambiental a fim de mitigar impactos relacionados à redução da disponibilidade hídrica.

Em virtude das ações voltadas à adequação ambiental de propriedades rurais previstas no Projeto Cantareira PCJ, na Figura 53 é apresentada a evolução da área destinada à prática da agricultura nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5. Esses valores referem-se ao somatório das áreas das sub-bacias: café, cana-de-açúcar, citros, mosaico de culturas e pastagem, soja e outras culturas perenes, cujos valores individuais podem ser consultados no Apêndice G para o cenário BAU e Apêndice H para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

**Figura 53 - Área destinada à prática da agricultura nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**

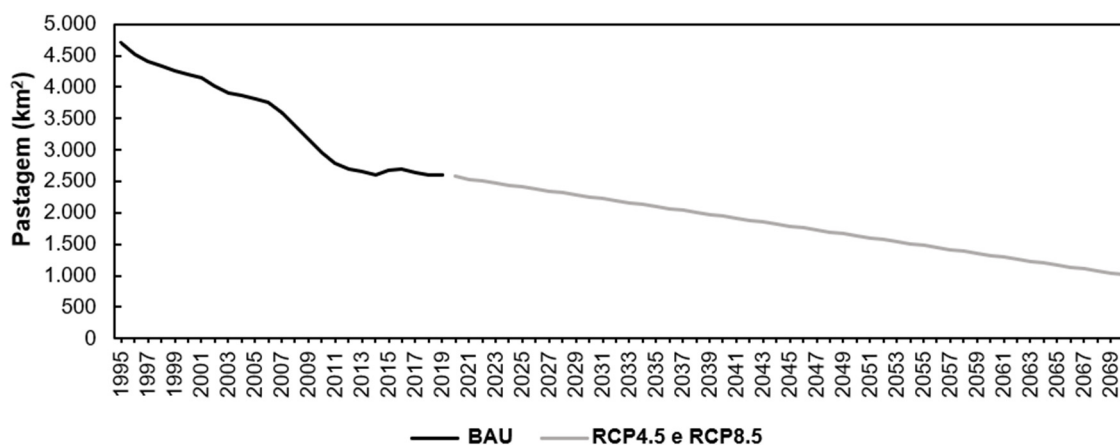


Verifica-se que nas bacias PCJ, a área destinada à agricultura oscilou entre 6.661,0 km<sup>2</sup> e 7.899,2 km<sup>2</sup> no cenário BAU e de 7.492,4 km<sup>2</sup> a 8.103,8 km<sup>2</sup> nos

cenários RCP4.5 e RCP8.5 (Figura 53). A importância da adequação ambiental das propriedades rurais dedicadas à prática da agricultura fica bastante evidente ao analisarmos esses dados, uma vez que elas representaram de 43,3% a 51,4% da área de drenagem das bacias PCJ, igual a 15.378 km<sup>2</sup>, no cenário BAU, e podem representar de 48,7% a 52,7% da área de drenagem das bacias PCJ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5.

O Projeto Cantareira PCJ também deve contemplar a adequação ambiental de propriedades rurais dedicadas à pecuária, que apresentam grandes áreas de pastagem, por esse motivo, na Figura 54 é apresentada a evolução das áreas de pastagem nas bacias PCJ ao longo dos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5. Nota-se um declínio praticamente contínuo ao longo dos cenários. No cenário BAU, a área de pastagem reduziu 44,9%, passando de 4.709,3 km<sup>2</sup> em 1995 para 2.594,5 km<sup>2</sup> em 2019. Como os cenários RCP4.5 e RCP8.5 são baseados no cenário BAU, as áreas de pastagens previstas para esses cenários devem reduzir 60,8%, passando de 2.574,8 km<sup>2</sup> em 2020 para 1.009,4 km<sup>2</sup> em 2070.

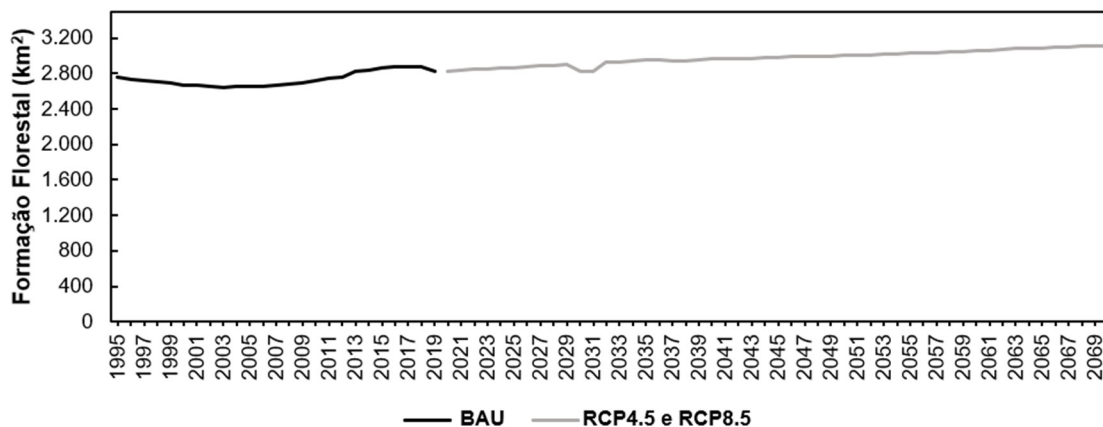
**Figura 54 - Área de pastagens nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**



No Projeto Cantareira PCJ também é previsto investimentos em projetos de proteção de mananciais, que usualmente envolve ações de reflorestamento. Prova disso, é o fato de que entre janeiro e maio de 2023, o “Programa de Proteção aos Mananciais” das bacias PCJ realizou a doação de 15.050 mudas de árvores nativas, o que permitiu o reflorestamento de uma área de 9 (nove) hectares, correspondente a 0,09 km<sup>2</sup> de área reflorestada (Consórcio PCJ, 2023b). Entre 2016 e 2021, esse

programa foi responsável pela doação de 150.839 mudas de árvores nativas, o que contribuiu para o reflorestamento de mais de 260 hectares (2,6 km<sup>2</sup>) (Agência das Bacias PCJ, 2021). Dessa forma, ações de reflorestamento contínuas poderão garantir aumento da formação florestal nas bacias PCJ, que no cenário BAU aumentou 2,5%, passando de 2.753,3 km<sup>2</sup> em 1995 para 2.822,2 km<sup>2</sup> em 2019, influenciando a previsão de aumento de 10,3% nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, com a área passando de 2.826,3 km<sup>2</sup> em 2020 para 3.117,6 km<sup>2</sup> em 2070 (Figura 55).

**Figura 55 - Área com formação florestal nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**



O aumento da formação florestal nas bacias PCJ pode contribuir com a redução do escoamento superficial devido à ampliação da área de infiltração da água das chuvas no solo, o que contribui com a recarga das águas subterrâneas, moderação de eventos de inundação e melhoria da qualidade da água devido ao carreamento de sedimentos (Ellison; Futter; Bishop, 2011).

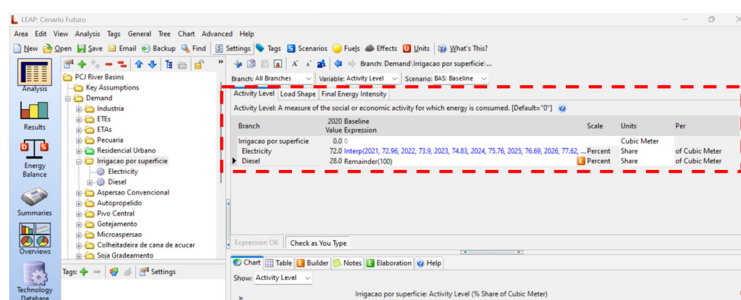
### 4.3 Nexo água-energia-alimento

#### 4.3.1 Acoplagem WEAP-LEAP

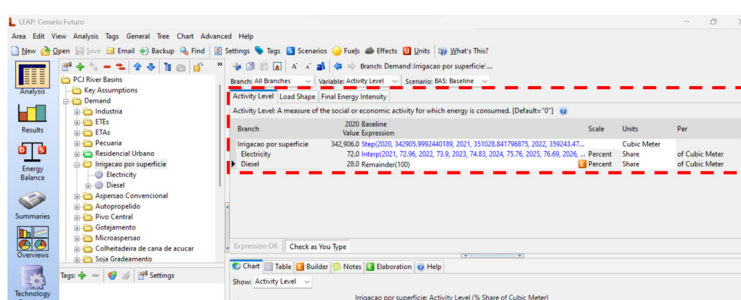
O nexos entre os recursos água, energia e alimento se materializa de várias formas por meio de interações cujos impactos ambientais influenciam o clima ao

mesmo tempo em que todos os recursos são influenciados por mudanças climáticas. O Modelo de Interação desenvolvido para a acoplagem dos programas WEAP e LEAP permite a quantificação dessas interações. As Figuras 56 e 57 apresentam capturas de tela que mostram, respectivamente, o estado do modelo LEAP antes e após a acoplagem via a execução do Modelo de Interação por meio da abordagem WEAP-KIB-LEAP *framework*.

**Figura 56 - Captura de tela do LEAP antes da acoplagem com o WEAP**



**Figura 57 - Captura de tela do LEAP após a acoplagem com o WEAP**



Antes da execução do Modelo de Interação, não havia dados para o nível de atividade (*Activity Level*) da demanda (energia) “Irrigação por superfície” no modelo LEAP (Figura 56). Após a execução do Modelo de Interação, o campo supramencionado foi preenchido com dados provenientes do WEAP, caracterizando a interação WEAP-LEAP (Figura 57). Nesta interação, a demanda “Irrigação por superfície” do modelo LEAP recebeu o volume de água destinado a esse método de irrigação calculado pelo modelo WEAP, caracterizando o nexos água-energia-alimento, posto que teremos resultados quanto ao consumo hídrico e consumo de energia por esse método de irrigação que é empregado na produção de alimentos. A interação com o clima também é quantificada ao analisarmos os resultados do

potencial de aquecimento global resultante da emissão de gases de efeito estufa devido ao consumo de energia por essa atividade.

#### 4.3.2 Produção agrícola

Ao compararmos a produção agrícola média do cenário BAU, que inclui dados observados (Tabela 10), igual a 26.979.498 toneladas (t) ano<sup>-1</sup>, com a média dos cenários RCP4.5 e RCP8.5, que apresenta dados previstos (Tabela 11), igual a 32.720.201 t ano<sup>-1</sup>, nota-se que é projetado aumento de 21,3% na produção agrícola nas bacias PCJ, o que pode garantir segurança alimentar e gerar desenvolvimento socioeconômico.

**Tabela 10 - Produção anual média, em toneladas (t), das principais lavouras cultivadas nas bacias PCJ no cenário BAU**

<b>Cultura</b>	<b>Produção média (t ano<sup>-1</sup>) no período 1995 a 2019*</b>
1° Cana-de-açúcar	23.248.507
2° Citros	3.079.843
3° Milho	202.315
4° Mandioca	123.242
5° Batata	85.090
6° Tomate	74.882
7° Uva	69.215
8° Abacate	28.287
9° Café	23.233
10° Banana	13.402
11° Manga	13.299
12° Soja	9.687
13° Feijão	5.698
14° Arroz	2.798
<b>Total</b>	<b>26.979.498</b>

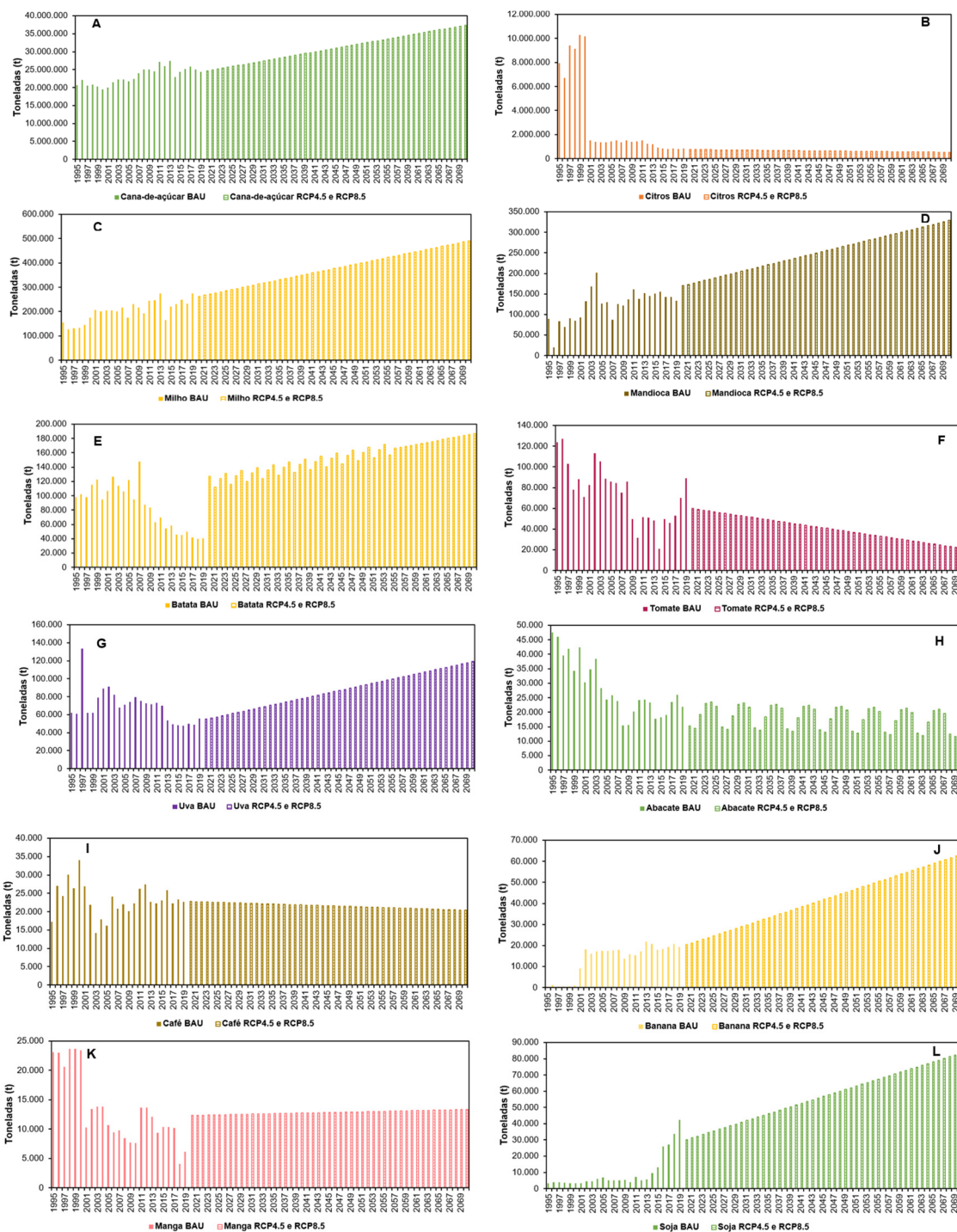
\*Os dados de produção agrícola municipal foram obtidos de SIDRA (2023).

**Tabela 11 - Produção anual média estimada, em toneladas (t), para as principais lavouras cultivadas nas bacias PCJ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5**

<b>Cultura</b>	<b>Produção média (t ano<sup>-1</sup>) no período 2020 a 2070</b>
1° Cana-de-açúcar	31.011.065
2° Citros	648.593
3° Milho	377.023
4° Mandioca	249.426
5° Batata	153.142
6° Uva	86.945
7° Soja	56.809
8° Banana	41.845
9° Tomate	40.660
10° Café	21.596
11° Abacate	18.064
12° Manga	12.838
13° Feijão	2.120
14° Arroz	74
<b>Total</b>	<b>32.720.201</b>

Verifica-se que segundo a classificação realizada no cenário BAU, a principal cultura produzida nas bacias PCJ foi a cana-de-açúcar (Tabela 10), apresentando produção média de aproximadamente 23 milhões t ano<sup>-1</sup>. Esse resultado concorda com Piacente, Silva e Delgado (2016), que informam que os municípios pertencentes às bacias PCJ, com destaque para Piracicaba, constituem uma das principais e mais tradicionais áreas de produção de cana-de-açúcar do país. Em virtude dos incrementos anuais na produção de cana-de-açúcar (Figura 58A), na projeção para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, essa cultura permaneceu como a lavoura mais cultivada nas bacias PCJ (Tabela 11), apresentando produção média estimada em aproximadamente 31 milhões t ano<sup>-1</sup>. Quando consideramos o valor médio da produção agrícola das bacias PCJ no cenário BAU (26.979.498 t ano<sup>-1</sup>) e a média de produção projetada nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 (32.720.201 t ano<sup>-1</sup>), Tabelas 10 e 11, respectivamente, constata-se que a cana-de-açúcar foi responsável por 86,2% do total produzido no cenário BAU e por 94,8% da produção projetada para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

**Figura 58 - Produção anual nas bacias PCJ de A) cana-de-açúcar B) citros C) milho D) mandioca E) batata F) tomate G) uva H) abacate I) café J) banana K) manga e L) soja nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**

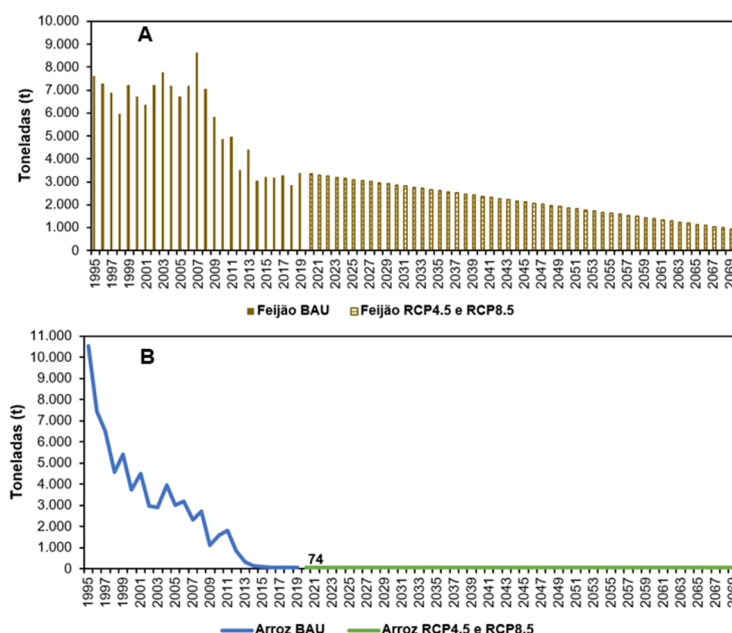


Fonte: Os dados de produção agrícola municipal do cenário BAU foram obtidos de SIDRA (2023).

Segundo os dados reunidos sobre as principais lavouras permanentes e temporárias cultivadas nas bacias PCJ, além da cana-de-açúcar, nas bacias PCJ são produzidos: citros, milho, mandioca, batata, tomate, uva, abacate, café, banana,

manga, soja (Figura 58, gráficos B, C, D, E, F, G, H, I, J, K e L, respectivamente) feijão e arroz (Figura 59, gráficos A e B, respectivamente), produções importantes para a garantia da segurança alimentar da população. Juntas, essas lavouras somaram 3.730.991 t ano<sup>-1</sup> de produtos agrícolas produzidos no cenário BAU, representando 13,8% do valor total (Tabela 10), e 1.709.136 t ano<sup>-1</sup> de produtos agrícolas previstos de serem produzidos nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, que representam 5,2% do valor total projetado (Tabela 11).

**Figura 59 - Produção anual nas bacias PCJ de A) Feijão B) Arroz nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**



**Fonte:** Os dados de produção agrícola municipal do cenário BAU foram obtidos de SIDRA (2023).

Observando a Figura 58, verifica-se que para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, foram previstos incrementos anuais na produção de cana-de-açúcar, milho, mandioca, batata, uva, banana e soja, e reduções na produção de tomate e abacate. Enquanto na produção de café e manga, nota-se pouca variação, com a primeira apresentando valores próximos de 21 mil t ano<sup>-1</sup>, e a segunda, valores em torno de 12 mil t ano<sup>-1</sup>. A previsão para a produção de citros também apresentou pouca variação ao longo dos cenários RCP4.5 e RCP8.5, porém, devido às altas produções no início do cenário BAU, a produção projetada não ficou prontamente visível no gráfico, neste caso, é melhor a análise do valor médio, próximo de 650 mil t ano<sup>-1</sup> (Tabela 11).

É importante destacar que o cultivo de citros no estado de São Paulo tem se mostrado desafiador e essa produção projetada pode não ser concretizada. Entre os fatores desafiantes para a produção de citros no estado, destaca-se o combate ao *greening*, também conhecido por *huanglongbing* (HLB), doença causada por bactérias *Candidatus Liberibacter* spp., transmitida aos pomares pelo psíldeo *Diaphorina citri*, inseto que apresenta bordas escuras e asas transparentes, medindo de 2 a 3 mm de comprimento (Machado, Locali-Fabris, Coletta-Filho, 2010; Miranda, 2019). Essa doença não provoca a morte, porém debilita as plantas dos pomares, podendo torná-las improdutivas com o passar dos anos, o que, após o aparecimento da primeira planta sintomática, pode transformar pomares inteiros economicamente inviáveis entre sete e dez anos caso não sejam adotadas medidas de controle (Belasque Junior *et al.*, 2009).

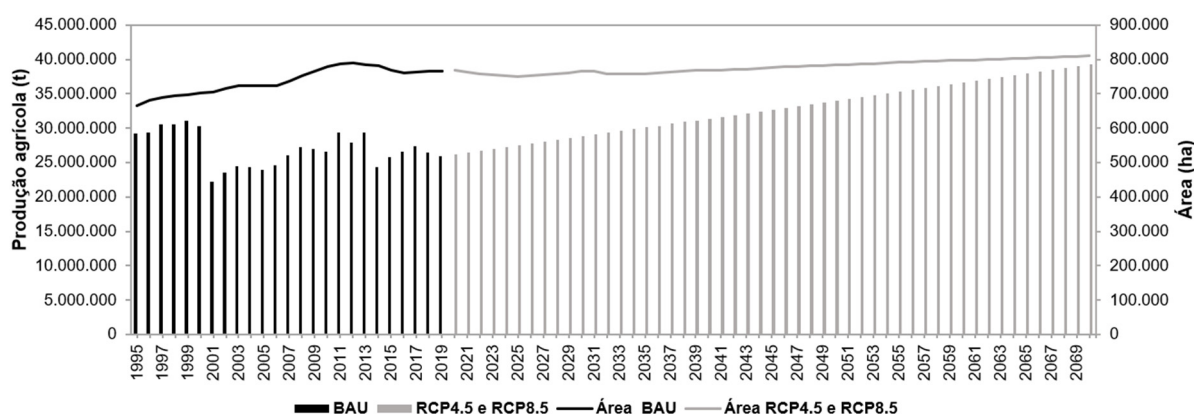
Nota-se também que no cenário BAU (Figura 58 B), a produção de citros sofreu uma queda expressiva em 2001, passando de aproximadamente 10 milhões de toneladas no ano 2000, para aproximadamente 1,5 milhões de toneladas no ano de 2001, representando, assim, uma redução de aproximadamente 85%. Silva (2001) e Boteon e Pagliuca (2010) apontaram como fatores responsáveis pela redução de pomares de citros no estado de São Paulo: a sua substituição por lavouras de cana-de açúcar, o aumento da incidência de doenças e pragas, seca prolongada e baixos preços.

Analisando a Figura 59, observa-se que a produção de feijão nas bacias PCJ foi variável ao longo do cenário BAU, apresentando valores mais uniformes, em torno de 3 mil t ano<sup>-1</sup>, entre 2014 e 2019. Nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, verifica-se uma previsão de redução na produção, com valores passando de aproximadamente 3 mil toneladas em 2020, para valores menores que 1 mil t ano<sup>-1</sup> entre 2068 e 2070 (Figura 59 A). Constata-se também, que nas bacias PCJ, a produção de arroz sofreu quedas ao longo do cenário BAU, chegando a valores abaixo de 1 mil toneladas em 2012. Entre 2014 e 2019, foram registrados valores de produção próximos ou abaixo de 100 t ano<sup>-1</sup>. Por conta disso, para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, o valor previsto, mantido constante, corresponde à média do período 2014-2019, sendo ela igual à 74 t ano<sup>-1</sup> (Figura 59 B). Destaca-se como fatores que podem ter influenciado as reduções na produção de feijão e arroz nas bacias PCJ, a expansão no cultivo de cana-de-açúcar e sua substituição por plantio de soja e milho, uma vez que essas

culturas vêm apresentando maior rentabilidade e menor custo de produção (Oliveira, Turci, Capitani, 2019; Salati; Souza, 2022).

A produção agrícola anual nas bacias PCJ considerando a soma das produções das lavouras permanentes e temporárias, cujos valores individuais podem ser visualizados no Apêndice I, é apresentada na Figura 60, bem como a área destinada à agricultura nas bacias PCJ, que representa a soma das áreas das sub-bacias: café, cana-de-açúcar, citros, mosaico de culturas e pastagem, soja e outras culturas perenes (ver Apêndices G e H).

**Figura 60 - Produção agrícola, em toneladas, nas bacias PCJ e a evolução da área destinada à agricultura, em hectares, nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**



Verifica-se que a produção agrícola nas bacias PCJ no cenário BAU esteve na faixa de 22,2 milhões t ano<sup>-1</sup> a 31,1 milhões t ano<sup>-1</sup>, ocorrendo em áreas destinadas à agricultura nas bacias PCJ que totalizaram de 666,1 mil hectares (ha) a 789,9 mil ha. Nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 é previsto crescimento contínuo da produção agrícola, que deve ocorrer numa área total variando entre 749,2 mil ha e 810,4 mil ha, atingindo o patamar de aproximadamente 39 milhões de toneladas de produtos agrícolas produzidos em 2070, ano final desse cenário (Figura 60).

Ao compararmos os dados do primeiro e último ano do cenário BAU, percebe-se que a área destinada à agricultura nas bacias PCJ apresentou aumento de 15,2%, o representa o acréscimo de 100.985,1 hectares. A mesma comparação com os dados previstos para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, indica um crescimento de 5,3% da área destinada à agricultura nas bacias PCJ, representando um acréscimo de 41.061 hectares (Tabela 12).

**Tabela 12 - Variação da área destinada à agricultura nas bacias PCJ entre o primeiro e último ano dos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**

	<b>Cenário BAU</b>	<b>Aumento</b>	<b>Aumento (%)</b>
	<b>Área (ha)</b>	<b>Área (ha)</b>	
<b>1995</b>	666.098,4	-	-
<b>2019</b>	767.083,5	100.985,1	15,2
	<b>Cenários RCP4.5 e RCP8.5</b>	<b>Aumento</b>	<b>Aumento (%)</b>
	<b>Área (ha)</b>	<b>Área (ha)</b>	
<b>2020</b>	769.316,4	-	
<b>2070</b>	810.377,7	41.061,3	5,3

Com a previsão de pouca expansão da área destinada à agricultura nas bacias PCJ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, o aumento da produção agrícola, projetado em 21,3%, será dependente de incrementos de rendimento, que representa a produção agrícola por área cultivada. Ganhos de rendimento, por sua vez, são dependentes da adoção de inovações tecnológicas e das condições climáticas. Destaca-se que a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) em conjunto com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) projetam que a produção agrícola global crescerá 1,4% ao ano no período de 2021 a 2030, impulsionada principalmente por aumentos de rendimento em vez de expansão das áreas produtivas (OCDE; FAO, 2021).

A produção agrícola se dá por meio da agricultura de sequeiro, na qual a demanda hídrica das plantas é suprida exclusivamente pela precipitação, e por meio agricultura irrigada, na qual a técnica de irrigação é empregada no suprimento da demanda hídrica das plantas de forma total ou suplementar à precipitação. Nas duas formas de agricultura, são empregados maquinários que demandam energia. Dessa maneira, na produção agrícola tem-se a dependência dos recursos água e energia, representando onexo água-energia-alimento.

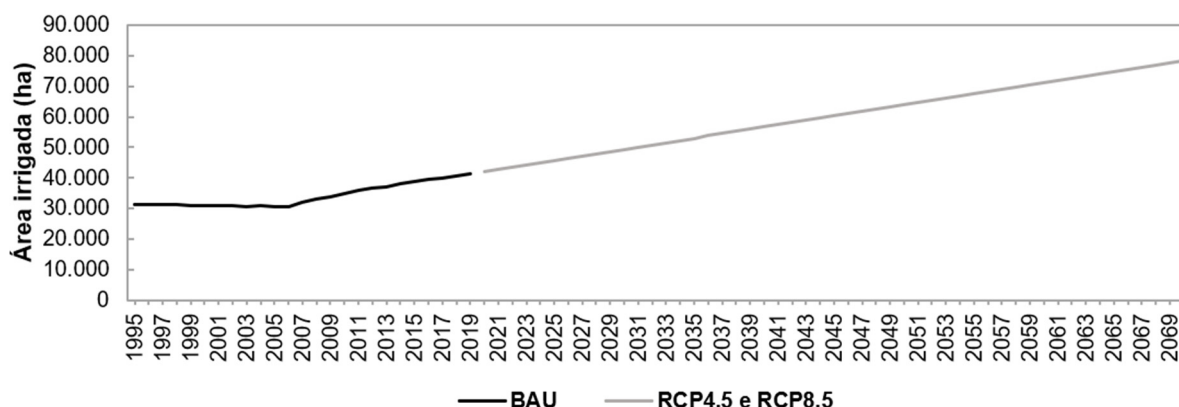
Frente à incerteza do suprimento hídrico das lavouras permanentes e temporárias nas bacias PCJ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 pela precipitação, visto que foram previstas reduções de 24,9% e 28,9%, respectivamente, em relação à precipitação média anual do cenário BAU (Tabela 1), a agricultura de sequeiro deve ser substituída pela agricultura irrigada.

### 4.3.3 Agricultura irrigada

#### 4.3.3.1 Área irrigada

A prática da agricultura irrigada nas bacias PCJ no cenário BAU apresentou aumento contínuo no período de 2006 a 2019. Por conta deste crescimento, a previsão para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 segue a tendência de incrementos contínuos de área irrigada nas bacias PCJ, chegando ao patamar de aproximadamente 78 mil hectares irrigados em 2070 (Figura 61). Destaca-se que os períodos de déficit de precipitação ocorridos no período de 2006 a 2019 (Figura 23) podem ter contribuído para a adoção da prática da agricultura irrigada nas bacias PCJ.

**Figura 61 - Área irrigada das bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**



Analisando a variação da área irrigada nas bacias PCJ considerando a média dos cenários BAU e RCP4.5 e RCP8.5, nota-se que foi previsto um aumento de 76,6% nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em relação ao cenário BAU, o que equivale ao incremento de aproximadamente 26 mil hectares de áreas com a prática da agricultura irrigada (Tabela 13).

**Tabela 13 - Variação da área irrigada média entre os cenários RCP4.5 e RCP8.5 e o cenário BAU**

<b>Cenários</b>	<b>Área irrigada média (ha)</b>	<b>Aumento (ha)</b>	<b>Aumento (%)</b>
<b>BAU</b>	34.111,3	-	-
<b>RCP4.5 e RCP8.5</b>	60.231,8	26.120,5	76,6%

Em relação à média da área total destinada à prática da agricultura nas bacias PCJ, igual a 738.031,1 hectares, que conforme mencionado anteriormente, representa a soma das áreas das sub-bacias: café, cana-de-açúcar, citros, mosaico de culturas e pastagem, soja e outras culturas perenes, a média da área irrigada no cenário BAU representou 4,6% desse valor, sendo equivalente a aproximadamente 34 mil hectares. Já nos cenários RCP4.5 e 8.5, a agricultura irrigada deve representar 7,7% da área total média destinada à agricultura nas bacias PCJ, igual a 778.483,4 hectares, o que equivale a aproximadamente 60 mil hectares irrigados (Tabela 14).

**Tabela 14 – Porcentagem de área irrigada em relação à área total média destinada à agricultura nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**

	<b>Cenário BAU</b>	<b>Cenários RCP4.5 e RCP8.5</b>
<b>Área irrigada média (ha)</b>	34.111,3	60.231,8
<b>Área agricultura média (ha)</b>	738.031,1	778.483,4
	4,6%	7,7%

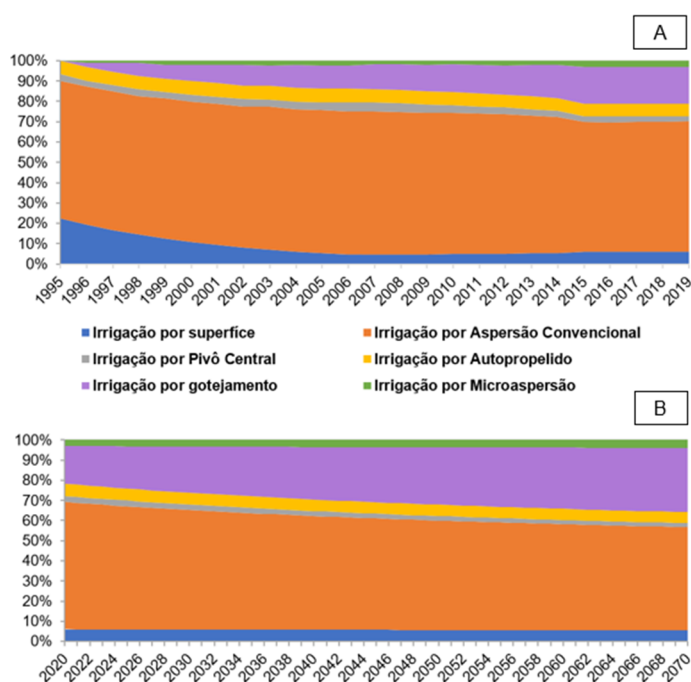
Braga e Calgaro (2010) destacam que os diversos sistemas de irrigação disponíveis para a escolha do produtor que opta por praticar a agricultura irrigada representam uma moderna tecnologia de produção que em conjunto com tratamentos culturais adequados e boa adubação podem elevar significativamente o rendimento da lavoura mesmo em períodos de déficit de precipitação. Neste contexto, o crescimento da prática de agricultura irrigada nas bacias PCJ (Tabelas 13 e 14) pode contribuir com o aumento de 21,3% da produção agrícola prevista nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 apesar do panorama de reduções na precipitação previsto nos cenários de mudança climática (ver Tabela 1). Dessa forma, a irrigação pode ser

uma medida de mitigação/adaptação dos potenciais impactos das mudanças climáticas.

#### 4.3.3.2 Sistemas de irrigação

Considerando os métodos/sistemas de irrigação avaliados, o sistema de irrigação mais utilizado nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP4.5 e RCP8.5 foi aspersão convencional, seguido pelo sistema de irrigação por gotejamento (Figura 62). Guirao e Teixeira Filho (2010) ao analisarem dados do Levantamento Censitário das Unidades de Produção Agropecuária do Estado de São Paulo (LUPA) para o período de julho de 2007 a setembro de 2008, também verificaram que a aspersão convencional e o gotejamento foram, respectivamente, o primeiro e segundo sistema de irrigação mais utilizados nas bacias PCJ.

**Figura 62 - A) Contribuição percentual (%) dos tipos de métodos/sistemas de irrigação empregados em áreas irrigadas das bacias PCJ em relação ao todo nos cenários A) BAU (1995-2019) e B) RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070)**



A escolha do sistema de irrigação é orientada pelo tipo de cultura, características topográficas, tipo de solo, fonte hídrica disponível e custos de

implantação. O manejo adequado envolve a observação de variáveis climáticas e de níveis de umidade do solo, além da manutenção preventiva dos equipamentos empregados. Cada sistema apresenta uma faixa de eficiência de aplicação devido a perdas de água por evaporação, percolação profunda ou arrastamento pelo vento. Dessa forma, sistemas mais eficientes resultam em tomadas menores de água para a irrigação.

Segundo Mantovani, Bernardo e Palaretti (2007), a aspersão convencional e o gotejamento, que são os sistemas de irrigação mais utilizados nas bacias PCJ, apresentam eficiência de aplicação média na faixa de 80% a 90% e 90% a 95%, respectivamente. Na aspersão convencional são comuns perdas de água por arrastamento pelo vento e por evaporação, enquanto no gotejamento podem ocorrer perdas por percolação profunda, especialmente quando há alta frequência de irrigação (Marouelli *et al.*, 2011). Considerando o valor mínimo da faixa de eficiência de aplicação média de cada sistema, em uma situação na qual a cultura necessite de 10 mm de lâmina de irrigação para seu suprimento hídrico pleno, a lâmina de irrigação a ser aplicada seria de 12,5 mm para um sistema por aspersão convencional e de 11,1 mm para um sistema por gotejamento. Com o uso do gotejamento, haveria uma economia de 1,4 litros de água, posto que, nesse contexto, o milímetro (mm) corresponde à aplicação de 1 litro de água em uma área de 1 metro quadrado.

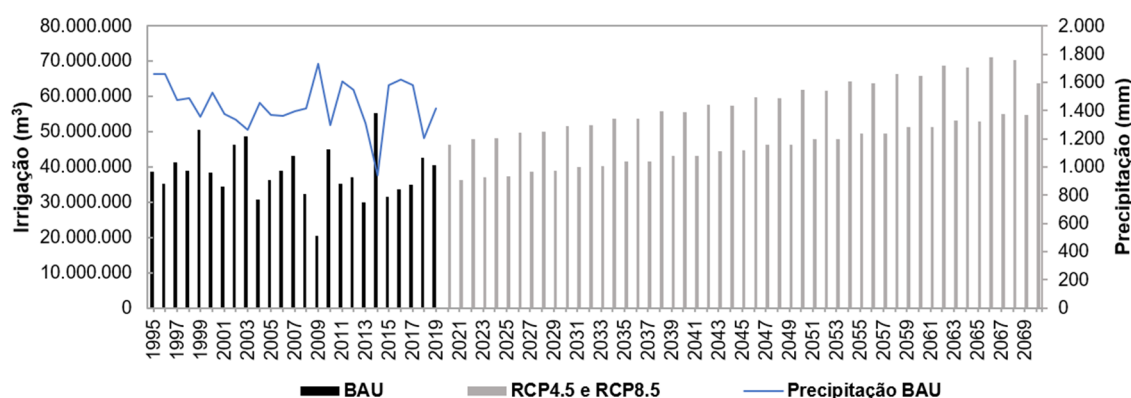
Verifica-se; portanto, que nas bacias PCJ, os sistemas de irrigação mais utilizados, sendo eles, aspersão convencional e gotejamento (Figura 62), apresentam alta eficiência de aplicação, o que pode contribuir com menores retiradas de água pela agricultura irrigada. No entanto, a eficiência de aplicação é variável conforme as condições de operação, condições climáticas e a manutenção do sistema de irrigação (Mantovani, Bernardo e Palaretti, 2007). Condições climáticas e de operação inadequadas e baixa manutenção do sistema de irrigação podem resultar em eficiências de aplicação abaixo da faixa prevista para o sistema.

#### 4.3.3.3 Demanda hídrica para irrigação

A Figura 63 apresenta o volume anual, em metros cúbicos, de água demandado pela atividade de irrigação nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP4.5

e RCP8.5 considerando a demanda advinda de todos os métodos/sistemas de irrigação presentes nas bacias PCJ (Figura 62) e a precipitação anual no cenário BAU. Observa-se que o volume destinado à irrigação foi bastante variável entre os anos, apresentando aumentos e declínios. Os dados projetados para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 apesar de apresentar incrementos ao longo dos anos, imita as oscilações dos dados do cenário BAU.

**Figura 63 – Demanda hídrica da atividade de irrigação nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5 e a precipitação anual do cenário BAU**



Nota-se que no cenário BAU, a demanda hídrica da irrigação oscilou entre 20,5 milhões  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  e 55,4 milhões  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$ , apresentando o valor mínimo em 2009 e o máximo em 2014, sendo que esses anos apresentaram a maior e menor precipitação, respectivamente (Figura 63). Portanto, é possível verificar a relação causal existente entre o déficit ou excesso de precipitação com o uso da água nas bacias PCJ para a prática da agricultura irrigada, indicando como as mudanças climáticas devem influenciar essa demanda hídrica.

Nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, a demanda prevista de uso da água para irrigação esteve na faixa de 36,2 milhões  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  a 71,0 milhões  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  (Figura 63). Em comparação com a média do cenário BAU, foi projetado incremento de 35,6% na demanda hídrica para irrigação nas bacias PCJ, que deve passar de 38,4 milhões  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  no cenário BAU para 52,1 milhões de  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 (Tabela 15).

**Tabela 15 - Variação da demanda hídrica para irrigação nas bacias PCJ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em relação ao cenário BAU**

<b>Cenários</b>	<b>Demanda hídrica média (m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>)</b>	<b>Aumento (m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>)</b>	<b>Aumento (%)</b>
<b>BAU</b>	38.424.990,4	-	-
<b>RCP4.5 e RCP8.5</b>	52.099.968,5	13.674.978,1	35,6%

Frente às condições climáticas projetadas pelo Modelo Climático Regional Eta- HadGEM2-ES, resolução de 5 km, para as bacias PCJ, especialmente os períodos de seca (ver Figuras 24 e 25), a garantia de altas produtividades agrícolas nas bacias PCJ só será possível por meio do suprimento hídrico via irrigação. Todavia, em períodos de seca prolongada, pode haver conflitos pelo uso da água, visto que há um desequilíbrio maior entre oferta e demanda. Nessas situações, o abastecimento humano e a dessedentação animal são os usos prioritários, ao mesmo tempo, os demais setores econômicos disputam para o atendimento das suas necessidades a fim de diminuir suas perdas. Dessa forma, apesar da irrigação ser vital para a produção de alimentos nas bacias PCJ, considerando as mudanças climáticas previstas, o volume por ela demandando pode não ser suprido em épocas de estiagem prolongada. Logo, investimentos em projetos de captação, distribuição e uso de fontes alternativas de água como a água residuária proveniente de estações de tratamento de esgoto, de processos de fabricação de alimentos e bebidas e do processo industrial de transformação da cana-de-açúcar são medidas viáveis de adaptação.

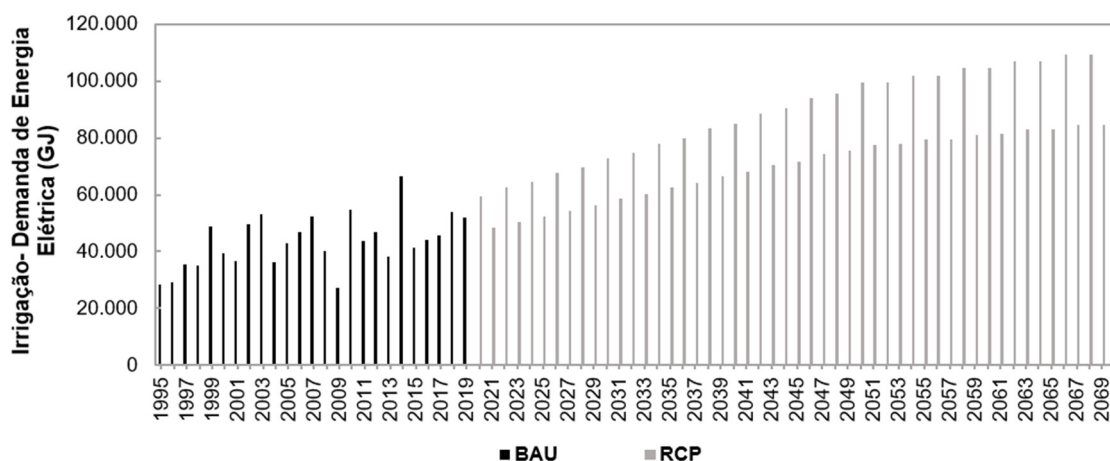
#### *4.3.3.4 Demanda energética para irrigação*

A irrigação é uma atividade que também depende da disponibilidade de energia, posto que a captação e distribuição de água em áreas irrigadas se dá pelo uso de motobombas movidas usualmente à energia elétrica ou diesel.

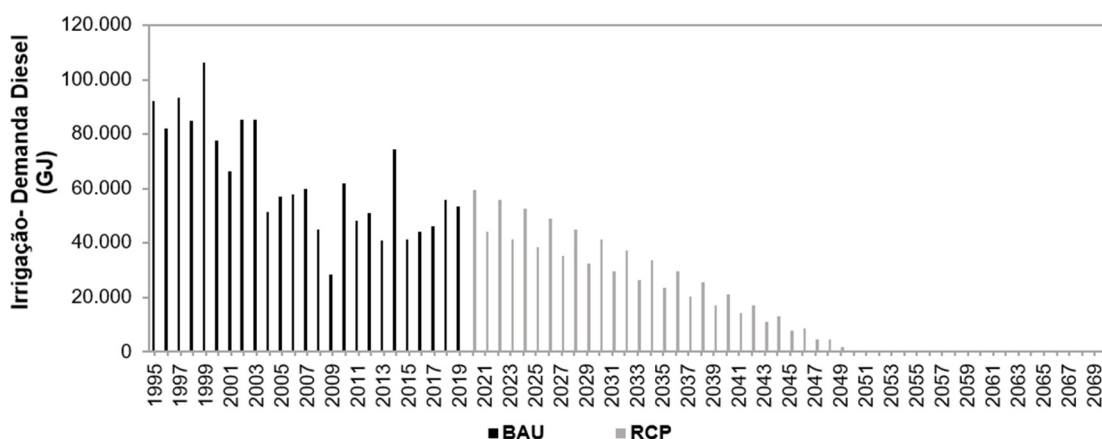
Nas bacias PCJ, no cenário BAU (1995-2019) e no cenário RCP (2020-2070) do modelo LEAP, a demanda de energia elétrica apresentou oscilações, variando entre 27,2 mil GJ ano<sup>-1</sup> e 66,3 mil GJ ano<sup>-1</sup> no cenário BAU e entre 48,3 mil GJ ano<sup>-1</sup>

e 109,4 mil GJ ano<sup>-1</sup> no cenário RCP (Figura 64). Ao passo que, a demanda por diesel, que também apresenta oscilações em ambos os cenários, variou entre 28,3 mil GJ ano<sup>-1</sup> e 106,5 mil GJ ano<sup>-1</sup> no cenário BAU e entre 0,0 GJ ano<sup>-1</sup> e 59,4 mil GJ ano<sup>-1</sup> no cenário RCP (Figura 65). Em comparação com a média do cenário BAU, no cenário RCP, a demanda média de energia elétrica para irrigação nas bacias PCJ deve aumentar em 82,7%, passando de aproximadamente 43,5 mil GJ ano<sup>-1</sup> no cenário BAU para aproximadamente 79,5 mil GJ ano<sup>-1</sup> no cenário RCP. Já a demanda média por diesel deve diminuir 74,1%, passando de aproximadamente 63,5 mil GJ ano<sup>-1</sup> no cenário BAU para aproximadamente 16,4 mil GJ ano<sup>-1</sup> no cenário RCP (Tabela 16).

**Figura 64 - Demanda de energia elétrica, em gigajoules (GJ), da atividade de irrigação nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP**



**Figura 65 - Demanda energética, em gigajoules (GJ), referente ao uso de diesel na atividade de irrigação nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP**

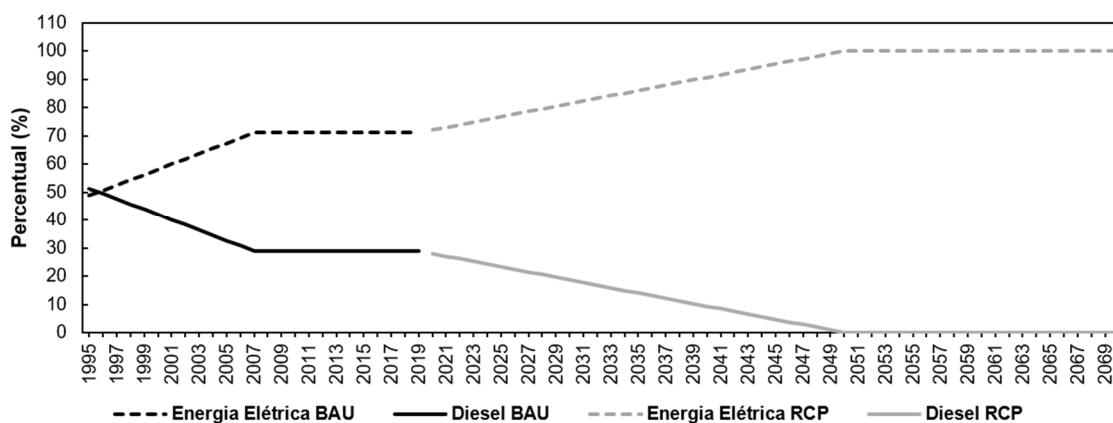


**Tabela 16 – Variação da demanda energética média por energia elétrica e diesel, em gigajoules, da atividade de irrigação nas bacias PCJ entre os cenários BAU e RCP**

Cenários	Média (GJ ano <sup>-1</sup> )	Diferença (GJ ano <sup>-1</sup> )	Variação (%)
<b>Energia Elétrica</b>			
<b>BAU</b>	43.511,2	-	-
<b>RCP</b>	79.475,7	↑35.964,6	↑82,7
<b>Diesel</b>			
<b>BAU</b>	63.509,8	-	-
<b>RCP</b>	16.446,0	↓47.063,8	↓74,1

A substituição do diesel pela energia elétrica como fonte de energia para a irrigação ao longo dos cenários BAU e RCP fica mais evidente por meio da observação da Figura 66 que apresenta a porcentagem referente ao uso dessas duas fontes de energia ao longo do tempo.

**Figura 66 - Porcentagem do uso de energia elétrica e diesel na agricultura irrigada nos cenários BAU e RCP**



O aumento do uso de energia elétrica na agricultura irrigada nas bacias PCJ está relacionado à criação de políticas públicas voltadas à energização rural. Destaca-se aqui, a implementação dos programas “Luz no Campo”, instituído em 1999 pelo presidente Fernando Henrique Cardoso, e “Luz para todos”, lançado em 2003 pelo presidente Luiz Inácio Lula da Silva (Braga, 1999; MME, 2021). A criação e implementação desses programas, garantiram, no cenário BAU, aumentos

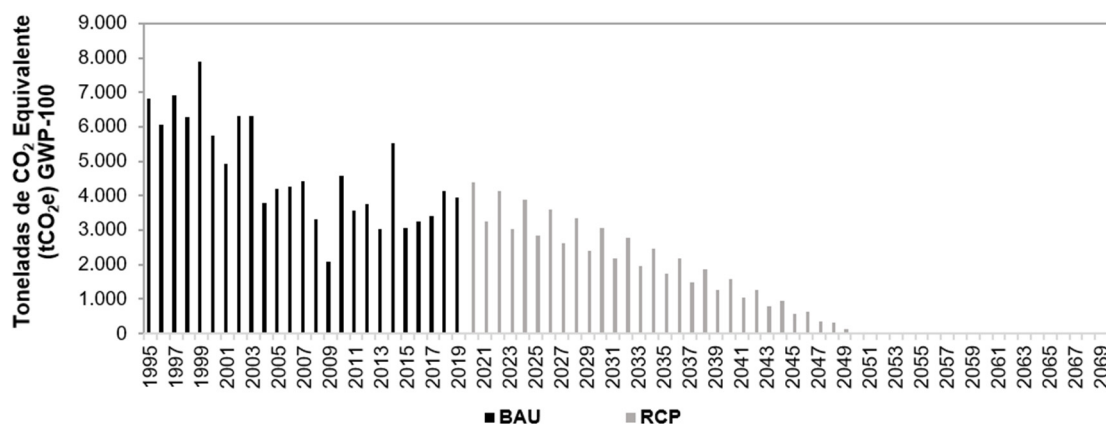
contínuos no uso de energia elétrica na irrigação até o ano de 2007. De 2007 a 2019, verifica-se estabilização, com a eletricidade sendo responsável pelo suprimento de energia a 70% das motobombas empregadas na prática da irrigação (Figura 66).

No cenário RCP foram previstos incrementos contínuos no uso de energia elétrica nas bacias PCJ pela agricultura irrigada, atingindo o percentual de 100% de uso no ano de 2050 (Figura 66). A completa substituição do diesel pela energia elétrica como fonte de energia na atividade de irrigação pode contribuir com a redução da emissão de gases de efeito estufa, podendo amenizar, conseqüentemente, o impacto das mudanças climáticas, visto que o diesel é uma fonte de energia não renovável que gera lançamentos substanciais de CO<sub>2</sub> equivalente na atmosfera, enquanto, as emissões de CO<sub>2</sub> equivalente devido ao uso de energia elétrica pela atividade de irrigação será variável conforme a matriz energética local, podendo ser zero caso apenas fontes de energia renováveis como a energia solar sejam adotadas.

#### *4.3.3.5 Emissões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente devido ao uso de energia na irrigação*

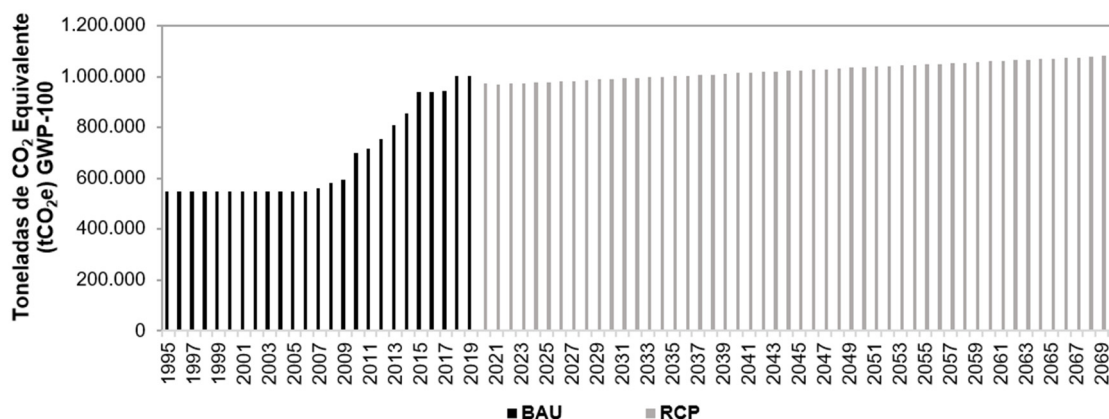
O uso de diesel como fonte de energia para irrigação nas bacias PCJ apresentou potencial de aquecimento global no horizonte de 100 anos (GWP-100), expresso em toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) equivalente (tCO<sub>2</sub>e), oscilando entre 2,1 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> e 7,9 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> no cenário BAU e entre 0,0 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> e 4,4 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> no cenário RCP. A redução observada no cenário RCP, que chega a zero emissões de tCO<sub>2</sub>e em 2050, mantendo-se nesse valor até o ano final do cenário, ano de 2070, se deve à substituição do diesel pela eletricidade como fonte de energia no funcionamento motobombas na irrigação (Figura 67). É importante destacar que CO<sub>2</sub> equivalente é o produto da multiplicação do potencial de aquecimento global de gases de efeito estufa pelas toneladas emitidas.

**Figura 67 - Toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (GWP-100) resultante do uso de diesel em motobombas destinadas à irrigação nos cenários BAU e RCP**



A Figura 68 apresenta as emissões de CO<sub>2</sub> equivalente devido à geração de energia elétrica nas bacias PCJ. Constata-se que no cenário BAU as emissões oscilaram entre 549,7 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> e aproximadamente 1,0 milhão tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>. Já no cenário RCP, as emissões estiveram na faixa de 968,8 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a aproximadamente 1,1 milhão tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>. Como essas emissões são referentes à geração de energia elétrica a fim de atender outras demandas além do uso de energia elétrica pela irrigação, a verificação quanto ao benefício da substituição do diesel pela energia elétrica como fonte de energia pode ocorrer por meio da análise do fator de emissão médio de ambas as fontes de energia. Esse fator representa a quantidade de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente emitida por unidade de energia gerada.

**Figura 68 - Toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (GWP-100) devido à geração de energia elétrica nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP**



Verificou-se o fator de emissão médio de 0,2669 tCO<sub>2</sub>e por megawatt-hora (MWh) de energia consumida devido ao uso de diesel na prática da irrigação nas

bacias PCJ nos cenários BAU e RCP (ver Apêndice J), enquanto a geração de energia elétrica nas bacias PCJ apresentou fator de emissão médio igual a 0,2587 tCO<sub>2</sub>e/MWh no cenário BAU e 0,1454 tCO<sub>2</sub>e/MWh no cenário RCP (Ver Apêndice L). O fator de emissão médio é invariável para o uso de diesel em virtude de a fonte de energia ser a mesma ao longo dos cenários, em contrapartida, a matriz energética das bacias PCJ varia entre os cenários, o que gerou variações no fator de emissão médio.

Constata-se, por conseguinte, que a substituição do diesel pela energia elétrica como fonte de energia para a irrigação garantiu, no cenário BAU, a redução de 0,0082 tCO<sub>2</sub>e/MWh (-3,1%) e pode garantir a redução de 0,1215 tCO<sub>2</sub>e/MWh (-45,5%) no cenário RCP.

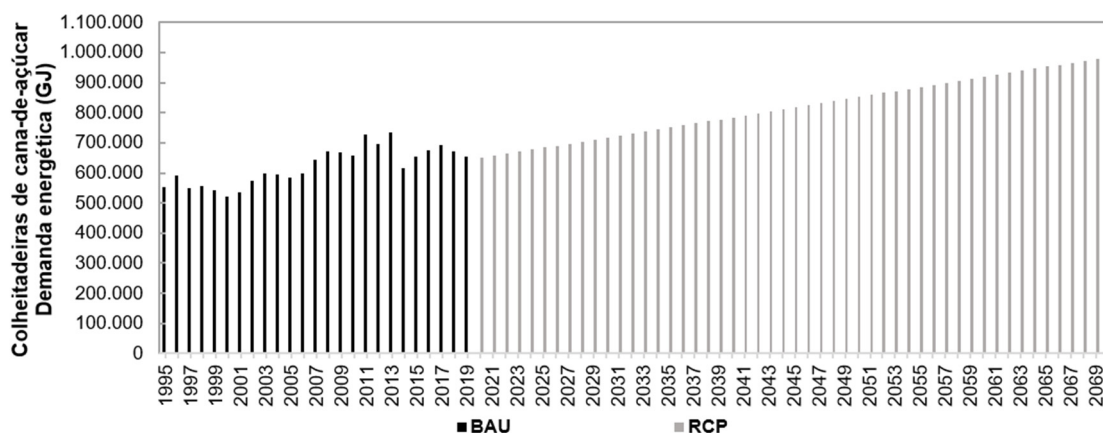
#### 4.3.4 Mecanização agrícola

Na agricultura irrigada e de sequeiro, o diesel também é utilizado na operação de máquinas agrícolas, representando onexo energia-alimento, visto que há uma demanda energética associada à operação de tais máquinas. A quantificação desse nexo pode ser realizada considerando apenas o uso de uma máquina agrícola, empregada em uma fase específica do ciclo da cultura ou o conjunto de máquinas agrícolas empregadas no decorrer do ciclo da cultura. O uso de diesel acarretará emissões de gases de efeito estufa que contribuirão com o potencial de aquecimento global, favorecendo a intensificação das mudanças climáticas.

##### *4.3.4.1 Colheitadeiras de cana-de-açúcar: demanda energética e emissões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente*

Com o propósito de apresentar a demanda energética devido ao uso de diesel em uma máquina agrícola empregada em uma fase específica da cultura, na Figura 69 é apresentada a demanda energética referente ao uso de diesel em colheitadeiras de cana-de-açúcar, que é uma máquina empregada na colheita, ou seja, no fim do ciclo da cultura.

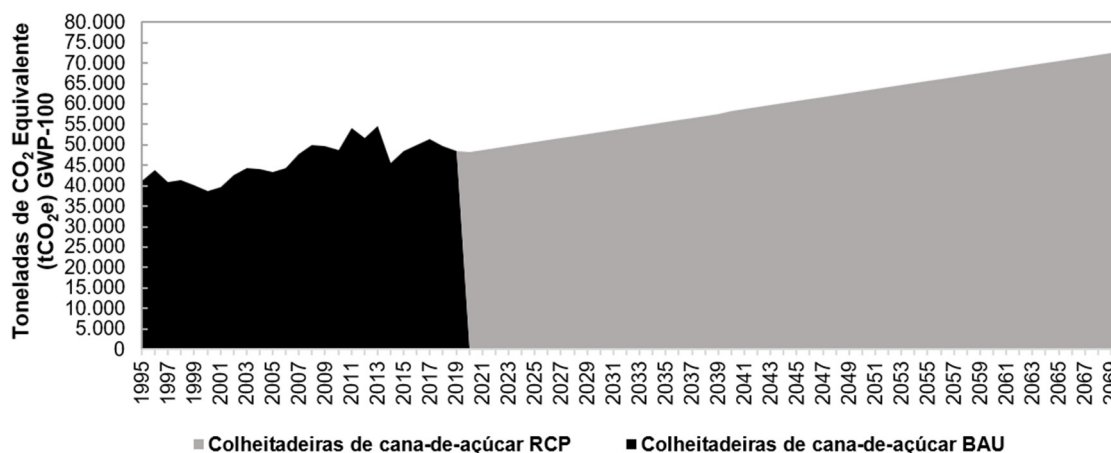
**Figura 69 - Demanda energética, em gigajoules (GJ), referente ao uso de diesel em colheitadeiras de cana-de-açúcar nos cenários BAU e RCP**



Nota-se que a demanda energética oscilou entre 523,2 mil GJ ano<sup>-1</sup> e 736,2 mil GJ ano<sup>-1</sup> no cenário BAU, com pequenas variações entre os anos, ao passo que no cenário RCP, verifica-se incrementos contínuos ao longo dos anos, com valores na faixa de 650,4 mil GJ ano<sup>-1</sup> a 986,2 mil GJ ano<sup>-1</sup> (Figura 69). A tendência de aumento no cenário RCP está relacionada à projeção de incrementos na produção de cana-de-açúcar, enquanto as variações no cenário BAU referem-se às oscilações ocorridas na produção (Figura 58 A), já que no cálculo dessa demanda energética, considerou-se o consumo de diesel por tonelada de cana-de-açúcar colhida.

As emissões de gases de efeito estufa, expressas em toneladas de dióxido de carbono equivalente, resultantes do uso de diesel em colheitadeiras empregadas na colheita de cana-de-açúcar nas bacias PCJ são apresentadas na Figura 70. No cenário BAU, as emissões estiveram na faixa de 38,8 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 54,6 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>, enquanto para o cenário RCP, foram previstas emissões variando entre 48,2 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> e 73,1 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>. Lyra *et al.* (2020) relatam que a produtividade da lavoura, a rotação do motor e a velocidade de operação são fatores que influenciam o consumo de combustível nessa atividade. Portanto, essas são as variáveis passíveis de modificação a fim de reduzir o consumo de combustível, diminuindo, por consequência, o potencial de aquecimento global devido às emissões de gases de efeito estufa.

**Figura 70 - Toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (GWP-100) resultante do uso de diesel em colheitadeiras de cana-de-açúcar nos cenários BAU e RCP**



Outra forma de reduzir as emissões de gases de efeito estufa por colheitadeiras de cana-de-açúcar, é o uso do biodiesel, que pode ser utilizado em conjunto com o diesel ou substituí-lo completamente. Quando o biodiesel é consumido puro, recebe a denominação B100, quando é misturado ao diesel na proporção de 20%, recebe a denominação B20, e quando é adicionado ao diesel em proporções de 1% a 5%, recebe as denominações B1 a B5 conforme a proporção empregada (Barros; Jardine, 2021).

No Brasil, a mistura de biodiesel ao diesel comercializado passou a ser obrigatória após a promulgação da Lei N° 11.097 de 13 de janeiro de 2005, que estabeleceu o percentual mínimo de 2% (B2) de adição do biodiesel ao óleo diesel com prazo de aplicação de 3 (três) anos após a sua publicação, ou seja, em janeiro de 2008, a adição desse percentual passou a ser legalmente obrigatória. Esse percentual foi ampliado ao longo dos anos e em março de 2023, por meio da Resolução do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) n°3/2023, o percentual mínimo obrigatório de adição de biodiesel ao diesel foi estabelecido em 12% a partir de 1° de abril de 2023, com previsões de aumentos progressivos anuais, iguais a: 13% a partir de 1° de abril de 2024, 14% a partir de 1° de abril de 2025 e 15% a partir de 1° de abril de 2026 (Brasil, 2005; CNPE, 2023).

O biodiesel pode ser resultante da transesterificação, ou seja, a reação de gordura vegetal ou animal com um álcool, resultando em ésteres, podendo ser produzido a partir de matérias primas diversas como: dendê, mamona, canola, girassol, soja, milho, amendoim, entre outras, ou a partir do reuso de óleos vegetais

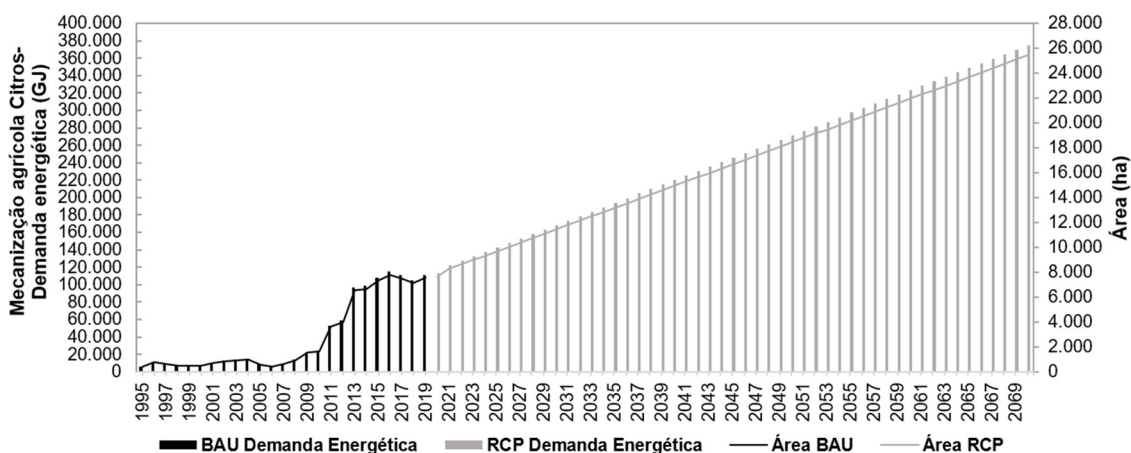
residuais como o óleo proveniente da fritura de alimentos (Soranso *et al.*, 2008; Barros; Jardine, 2021).

Cunha *et al.* (2015) verificaram que em virtude do uso de biodiesel proveniente da soja de forma pura, ou seja, B100, em um conjunto trator/grade, as emissões de CO<sub>2</sub> diminuíram 14,5% em comparação com a utilização unicamente do diesel como fonte de energia. Os resultados encontrados pelos autores exemplificam como a substituição do diesel pelo biodiesel na operação de máquinas agrícolas nas bacias PCJ pode contribuir com a redução de gases de efeito estufa na prática da agricultura. Adicionalmente, verifica-se como as políticas públicas brasileiras voltadas à mistura de biodiesel ao diesel comercializado nacionalmente, também contribuem com a redução de gases de efeito estufa pelo setor agrícola, além de favorecer o desenvolvimento da indústria nacional de pesquisa e equipamentos, a criação de empregos no meio rural e a redução da importação de diesel (Barros; Ramos, 2022).

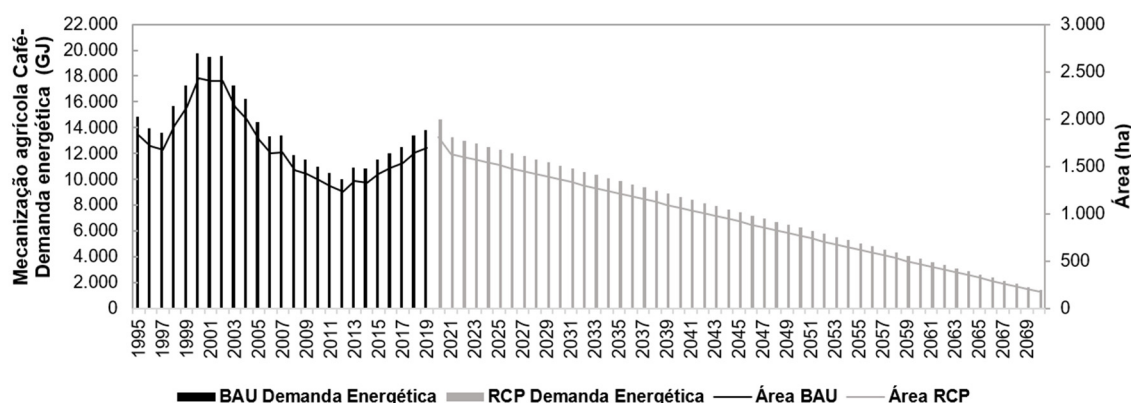
#### *4.3.4.2 Conjunto de máquinas empregadas no manejo de citros, café e pastagem: demanda energética e emissões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente*

A demanda energética referente ao conjunto de máquinas agrícolas empregadas no decorrer do ciclo das culturas citros, café e pastagem, são apresentadas nas Figuras 71, 72 e 73, respectivamente. As oscilações nas demandas energéticas dos maquinários empregados no cultivo dessas culturas são resultantes das alterações na sua área plantada, uma vez que nessa avaliação levou-se em consideração o consumo de diesel por hectare de área cultivada.

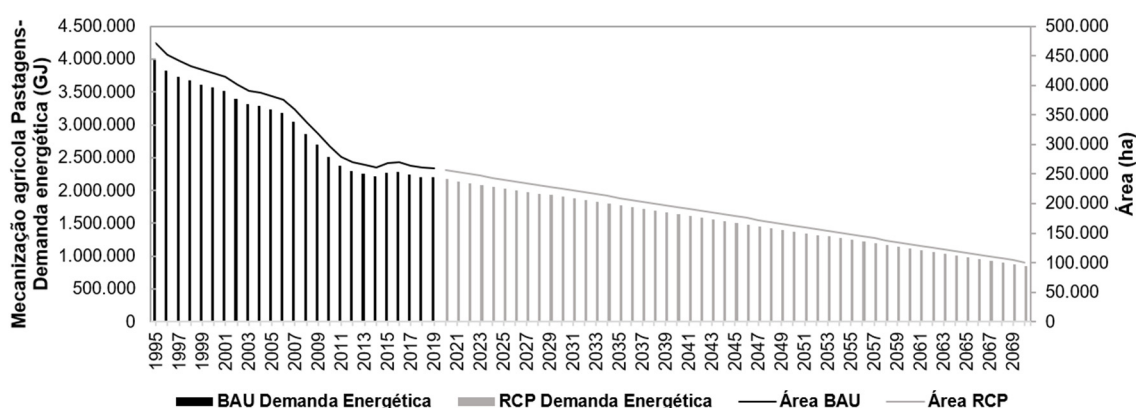
**Figura 71 – Área plantada e demanda energética referente ao uso de diesel no cultivo de citros nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP**



**Figura 72 - Área plantada e demanda energética relacionada ao uso de diesel no cultivo de café nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP**



**Figura 73 - Área plantada e demanda energética referente ao uso de diesel no manejo de pastagens nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP**



No cenário BAU, observa-se que a demanda energética no cultivo de citros apresentou tendência de crescimento a partir de 2009, partindo de uma demanda energética de aproximadamente 22,5 mil GJ no ano em questão para aproximadamente 111,5 mil GJ em 2019. Essa tendência de crescimento tem relação com o aumento da área cultivada com citros nas bacias PCJ, que passou de aproximadamente 1,5 mil ha em 2009 para aproximadamente 7,6 mil ha em 2019 (Figura 71). O aumento da área cultivada com citros nas bacias PCJ de 2009 a 2019 difere das constatações de Erpen *et al.* (2018), que ao analisarem a evolução da área destinada ao cultivo de laranja no estado de São Paulo, verificaram uma tendência de redução de cerca de 29% ao compararam a área cultivada no ano de 2001 com a do ano de 2015.

No cenário RCP, a demanda energética no cultivo de citros apresentou incrementos contínuos passando de aproximadamente 112,7 mil GJ no ano de 2020 para aproximadamente 375,0 mil GJ no ano de 2070. Tal aumento está relacionado à previsão da expansão da área destinada ao cultivo de citros que deve passar de aproximadamente 7,6 mil ha em 2020 para aproximadamente 25,4 mil ha em 2070 (Figura 71). Contudo, essa expansão talvez não venha a se concretizar em virtude dos desafios enfrentados no manejo desse cultivo, especialmente, o combate ao *greening*.

A demanda energética no cultivo de café nas bacias PCJ apresentou mais períodos de declínios do que ascensão no cenário BAU, apresentando valores na faixa de 10,0 mil GJ ano<sup>-1</sup> a 19,8 mil GJ ano<sup>-1</sup>. Essas oscilações têm como causa as variações na área destinada ao cultivo de café nas bacias PCJ que oscilou entre 1,2 mil ha e 2,4 mil ha. Verifica-se uma tendência de redução da demanda energética no cultivo de café nas bacias PCJ no cenário RCP, passando de aproximadamente 14,7 mil GJ em 2020 para aproximadamente 1,4 mil GJ em 2070. Esse decréscimo tem relação com a projeção de diminuição da área cultivada com café nas bacias PCJ que deve passar de 1.806,7 ha em 2020 para apenas 174,8 ha em 2070 (Figura 72).

A demanda energética relacionada ao uso de diesel no manejo de pastagens nas bacias PCJ diminuiu ao longo do cenário BAU, em 1995, a demanda esteve em torno de 4,0 milhões GJ, já em 2019, chegou ao valor de 2,2 milhões GJ. Por conta disso, no cenário RCP, a demanda apresenta tendência de redução, variando de

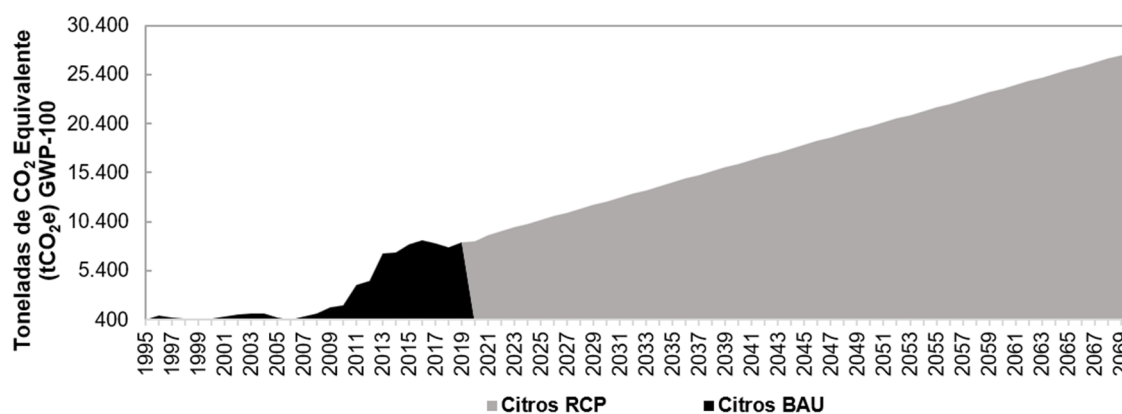
aproximadamente 2,2 milhões GJ em 2020 para valores abaixo de 1 milhão GJ ano<sup>-1</sup> entre 2065 e 2070 (Figura 73).

As reduções na demanda energética no manejo de pastagens nas bacias PCJ são resultantes do decréscimo na área destinada às pastagens, que vem perdendo espaço, possivelmente, para o cultivo de cana-de-açúcar, pois de acordo com Francisco *et al.* (2009), no estado de São Paulo, a cana-de-açúcar ganhou espaço, expandindo-se principalmente em solos manejados sob pastagens. No cenário BAU, a área cultivada com pastagem nas bacias PCJ reduziu de 470,9 mil ha para 259,4 mil ha, ao passo que, para o cenário RCP, foi projetado decréscimo de 60,8%, com a previsão de que área destinada à pastagem deve passar de 257,5 mil ha em 2020 para 100,9 mil ha em 2070 (Figura 73).

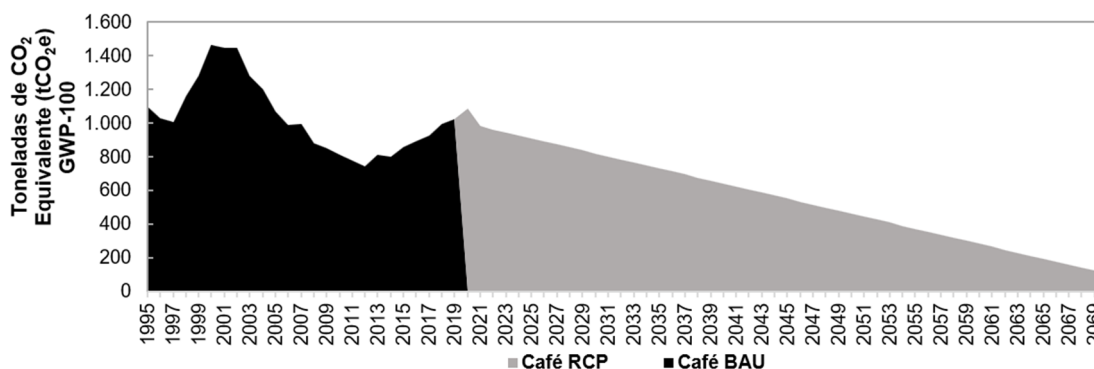
De acordo com Cherubin (2021), a conversão de uma área de pastagem para uma área cultivada com cana-de-açúcar permite um incremento no sequestro anual de carbono da ordem de uma a duas toneladas. Nesse contexto, a substituição de áreas de pastagens por cana-de-açúcar tem como ponto positivo uma maior captura de carbono, reduzindo assim sua contribuição no aumento do aquecimento global.

A quantidade de CO<sub>2</sub> equivalente (GWP-100) resultante das emissões de gases de efeito estufa em decorrência do uso de diesel em máquinas agrícolas empregadas durante o cultivo de citros, café e pastagem são apresentadas nas Figuras 74, 75 e 76, respectivamente. O padrão de emissão nos cenários BAU e RCP acompanha o mesmo padrão da demanda energética, que, por sua vez, está relacionada às mudanças na área destinada aos cultivos avaliados.

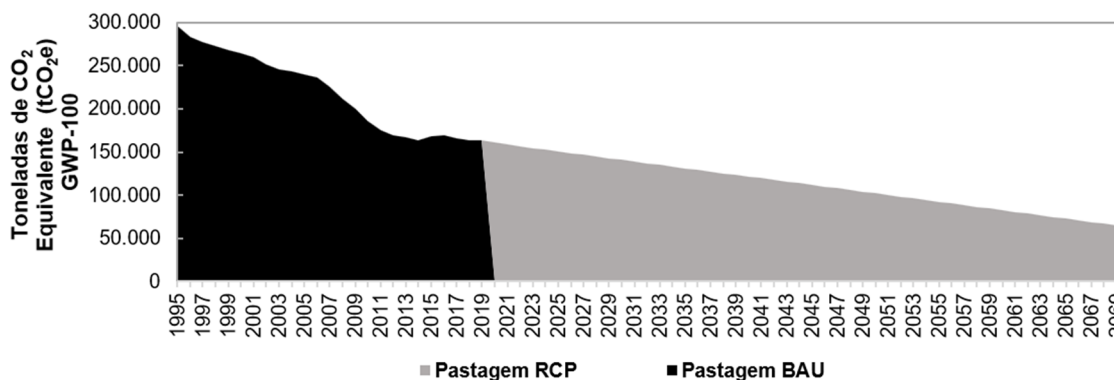
**Figura 74 - Toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (GWP-100) resultante do uso de diesel no cultivo de citros nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP**



**Figura 75 - Toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (GWP-100) resultante do uso de diesel no cultivo de café nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP**



**Figura 76 - Toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (GWP-100) resultante do uso de diesel no manejo de pastagens nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP**

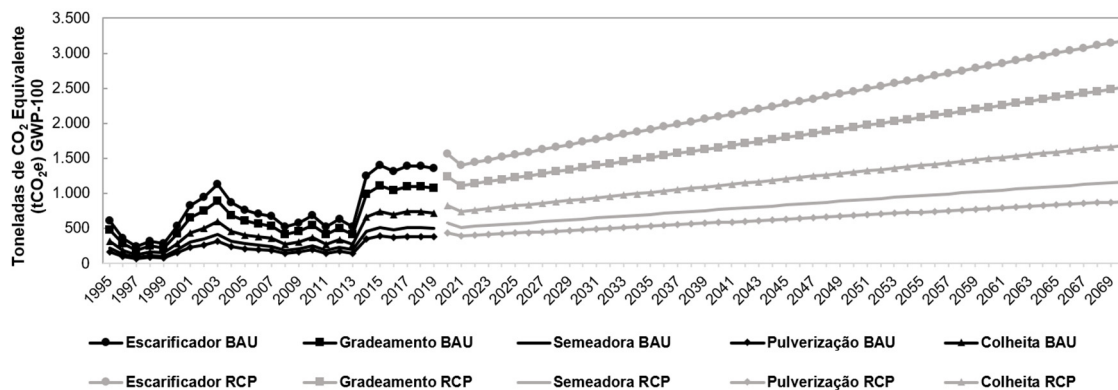


No cenário BAU, o uso de diesel em máquinas agrícolas empregadas no cultivo de citros resultou na emissão de 443,2 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 8.505,5 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> (Figura 74), ao passo que, no cultivo de café, as emissões estiveram na faixa de 742,8 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 1.465,8 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> (Figura 75). Já no cultivo de pastagens, as emissões oscilaram entre 163,1 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> e 296,1 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> (Figura 76).

No cenário RCP, foram previstas emissões na faixa de 8,4 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 27,8 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> referentes ao uso de diesel em maquinários agrícolas utilizados no cultivo de citros (Figura 74), enquanto para o cultivo de café, foram previstos valores no intervalo de 105,2 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 1.087,6 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> (Figura 75). Já no cultivo de pastagens, foram previstas emissões na faixa de 63,2 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 161,2 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> (Figura 76). Destaca-se que nas previsões para o cultivo de café e pastagens, verificou-se tendência de redução, enquanto para o cultivo de citros observou-se tendência de crescimento.



**Figura 78 - Toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (GWP-100) resultante do uso de diesel em máquinas e equipamentos empregados no cultivo da soja nos cenários BAU e RCP**



Verifica-se que o escarificador é a máquina agrícola que apresentou a maior demanda energética no cultivo da soja nas bacias PCJ (Figura 77), resultando, conseqüentemente, em maiores emissões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (Figura 78). No cenário BAU, sua demanda energética oscilou entre 3,2 mil GJ ano<sup>-1</sup> e 18,9 mil GJ ano<sup>-1</sup>, que geraram emissões na faixa de 238,6 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 1.399,7 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>. Já no cenário RCP, as demandas energéticas previstas oscilaram entre 19,0 mil GJ ano<sup>-1</sup> e 42,9 mil GJ ano<sup>-1</sup>, que resultaram emissões na faixa de 1,4 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 3,2 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>.

No cenário BAU, as demandas energéticas do escarificador e suas emissões de CO<sub>2</sub> equivalente apresentaram oscilações, enquanto no cenário RCP, verificou-se tendência de crescimento. Esses resultados foram influenciados pelas mudanças da área destinada ao cultivo de soja, uma vez que no cálculo da demanda energética foi considerado o consumo de diesel por hectare de área cultivada. No cenário BAU, a área cultivada com soja nas bacias PCJ oscilou entre 5,5 mil ha e 32,1 mil ha. Já no cenário RCP, foi previsto aumento de 103,8% na área cultivada com soja, que deve passar de aproximadamente 35,8 mil ha em 2020 para aproximadamente 72,9 mil ha em 2070 (Figura 77).

O gradeamento, a colheita, a semeadora e a pulverização ocuparam, respectivamente, a segunda, terceira, quarta e quinta posição em relação à demanda energética (Figura 77) e emissões de CO<sub>2</sub> equivalente (Figura 78).

No cenário BAU, o gradeamento correspondeu à demanda energética na faixa de 2,5 mil GJ ano<sup>-1</sup> a 14,9 mil GJ ano<sup>-1</sup>, a colheita esteve no intervalo de

1,7 mil GJ ano<sup>-1</sup> a 10,0 mil GJ ano<sup>-1</sup>, a semeadora apresentou valores variando de 1,2 mil GJ ano<sup>-1</sup> a 6,9 mil GJ ano<sup>-1</sup> e a pulverização esteve na faixa de 894,3 GJ ano<sup>-1</sup> a 5.245,8 mil GJ ano<sup>-1</sup> (Figura 77). As emissões ficaram na faixa de 188,5 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 1.105,8 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> no gradeamento, no intervalo de 126,3 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 741,1 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> na colheita, entre 87,4 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> e 512,6 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> para a semeadora, e na faixa de 66,3 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 388,9 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> na pulverização (Figura 78).

No cenário RCP, as projeções indicam demandas energéticas na faixa de 15,0 mil GJ ano<sup>-1</sup> a 33,9 mil GJ ano<sup>-1</sup> para o gradeamento, de 10,0 mil GJ ano<sup>-1</sup> a 22,7 mil GJ ano<sup>-1</sup> para a colheita, de 6,9 mil GJ ano<sup>-1</sup> a 15,7 mil GJ ano<sup>-1</sup> para a semeadora e de 5,3 mil GJ ano<sup>-1</sup> a 11,9 mil GJ ano<sup>-1</sup> para a pulverização (Figura 77). Ao passo que as emissões de CO<sub>2</sub> equivalente ficaram no intervalo de 1,1 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 2,5 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> para o gradeamento, de 744,4 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 1.685,6 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> para a colheita, de 514,9 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 1.165,9 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> para a semeadora e de 390,7 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 884,6 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> para a pulverização (Figura 78). Estratégias para a redução de emissões de CO<sub>2</sub> equivalente incluem o uso de biodiesel e ajustes no maquinário com a finalidade de diminuir o consumo de combustível.

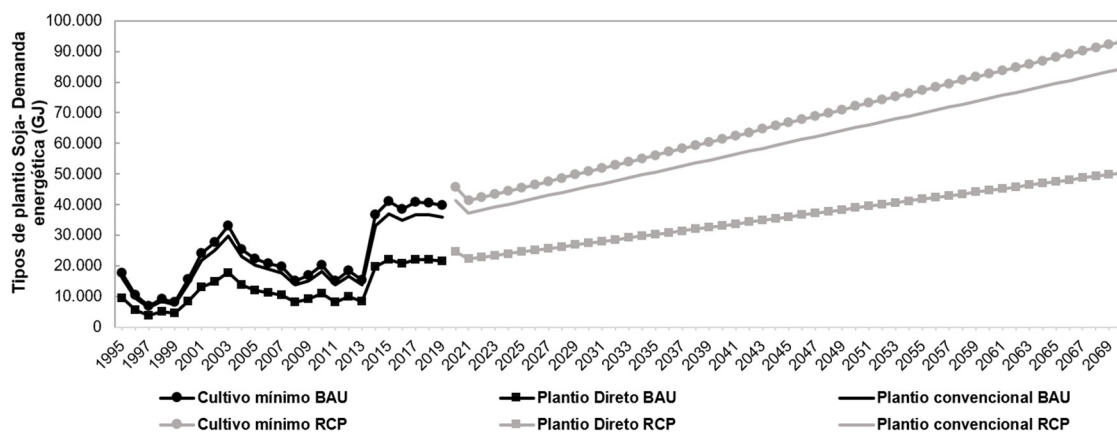
#### 4.3.5 Formas de plantio da soja: demanda energética e emissões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente

A inclusão ou exclusão do escarificador ou da grade (gradeamento) no momento do plantio da soja caracteriza uma técnica agrônômica diferente. No cultivo mínimo é empregado o escarificador, no plantio convencional utiliza-se o gradeamento e no plantio direto, não há uso de escarificador ou grade, o plantio inicia com o uso da semeadora.

Com a finalidade de verificar como a forma de plantio da soja influencia na demanda energética considerando todo o seu ciclo, na Figura 79 são apresentadas as demandas energéticas relacionadas ao uso de diesel no cultivo mínimo, plantio convencional e plantio direto. O cultivo mínimo correspondeu ao somatório das demandas energéticas do escarificador, semeadora, pulverização e colheita. O plantio convencional correspondeu ao somatório das demandas energéticas do

gradeamento, semeadora, pulverização e colheita. Já o plantio direto correspondeu ao somatório das demandas energéticas da semeadora, pulverização e colheita.

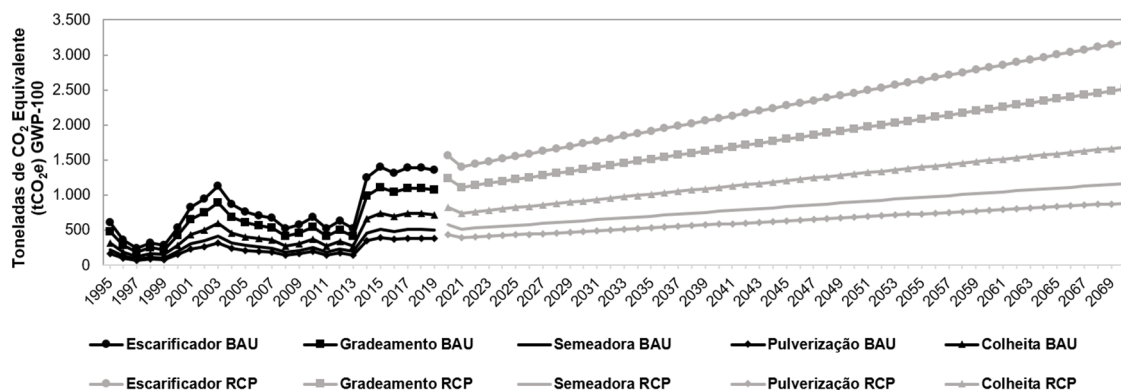
**Figura 79 - Demanda energética, em gigajoules (GJ), relacionada ao uso de diesel por tipo de preparo do solo no cultivo da soja nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP**



Percebe-se que o cultivo mínimo resultou em uma maior demanda energética, que oscilou de 7,0 mil GJ ano<sup>-1</sup> a 41,0 mil GJ ano<sup>-1</sup> no cenário BAU e entre 41,2 mil GJ ano<sup>-1</sup> e 93,3 mil GJ ano<sup>-1</sup> no cenário RCP. O plantio convencional apresentou a segunda maior demanda energética, com valores variando entre 6,3 mil GJ ano<sup>-1</sup> e 37,1 mil GJ ano<sup>-1</sup> no cenário BAU e de 37,2 mil GJ ano<sup>-1</sup> a 84,3 mil GJ ano<sup>-1</sup> no cenário RCP. Já o plantio direto apresentou a menor demanda energética, com valores variando de 3,8 mil GJ ano<sup>-1</sup> a 22,2 mil GJ ano<sup>-1</sup> no cenário BAU e entre 22,3 mil e 50,4 mil GJ ano<sup>-1</sup> no cenário RCP (Figura 79).

As emissões de CO<sub>2</sub> equivalente seguem o mesmo padrão da demanda energética, com o cultivo mínimo apresentando os maiores valores e o plantio direto os menores valores. No cenário BAU, o cultivo mínimo apresentou emissões na faixa de 518,6 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 3.042,2 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>, o plantio convencional apresentou emissões no intervalo de 468,5 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 2.748,3 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>, e o plantio direto apresentou emissões que variaram entre 280,0 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> e 1.642,5 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>. No cenário RCP, as emissões estiveram na faixa de 3,1 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 6,9 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> no cultivo mínimo, de 2,8 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 6,3 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> no plantio convencional, e de 1,6 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 3,7 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> no plantio direto (Figura 80).

**Figura 80 - Toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (GWP-100) resultante do tipo de preparo do solo empregado no cultivo da soja nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP**



Comparando os valores médios, verifica-se que tanto no cenário BAU como no cenário RCP, o plantio direto resulta em emissões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente 40,2% inferiores às emissões do plantio convencional e 46,0% inferiores às emissões do cultivo mínimo. Já o plantio convencional apresenta emissões 9,7% inferiores ao cultivo mínimo (Tabela 17).

**Tabela 17 - Variação da emissão de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente entre as formas de plantio da soja nos cenários BAU e RCP**

	Média		Redução em relação ao		Redução em relação ao	
	(tCO <sub>2</sub> e ano <sup>-1</sup> )		cultivo mínimo (%)		plantio convencional (%)	
	Cenário BAU	Cenário RCP	Cenário BAU	Cenário RCP	Cenário BAU	Cenário RCP
<b>Cultivo mínimo</b>	1.722,0	4.956,6	-	-	-	-
<b>Plantio convencional</b>	1.555,6	4.477,7	9,7	9,7	-	-
<b>Plantio Direto</b>	929,7	2.676,1	46,0	46,0	40,2	40,2

É necessário apontar que o cultivo mínimo e o plantio convencional alteram as estruturas do solo visando a sua descompactação, enquanto o mesmo não ocorre no plantio direto, no qual a cobertura ou restos culturais que estiverem no solo é mantida. Ademais, Tavares, Benez e Silva (2012) ao compararem os sistemas de plantio direto, plantio convencional e cultivo mínimo, encontraram maior produtividade para o sistema de plantio direto. Portanto, ao optar pela técnica de

plantio direto, os produtores de soja das bacias PCJ contribuem com a conservação do solo e podem garantir aumento de produtividade ao mesmo tempo em que contribuem com a redução de emissões de CO<sub>2</sub> equivalente da ordem de 46,0% em comparação ao cultivo mínimo e de 40,2% em comparação ao plantio convencional. Nesse contexto, o estímulo ao plantio direto de soja nas bacias PCJ pode ser uma medida em prol da mitigação do impacto das mudanças climáticas.

Salienta-se também que a prática de plantio direto é uma das ações estimuladas pelos Planos ABC (2010-2020) e ABC+ (2020-2030), os quais representam políticas públicas brasileiras voltadas à agricultura de baixa emissão de carbono por meio da adoção de tecnologias agropecuárias sustentáveis. Outras iniciativas dos Planos ABC e ABC+ incluem: Sistemas Agroflorestais (SAF), Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), Sistemas Irrigados (SI), Florestas Plantadas (FP), bioinsumos (BI), denominada como Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) no Plano ABC, Terminação Intensiva (TI) de bovinos, práticas para recuperação de pastagens degradadas (PRPD) e manejo de resíduos da produção animal (MRPA), denominado como tratamento de dejetos animais (TDA) no Plano ABC (MAPA, 2023; Embrapa, 2024). Diante do exposto, verifica-se que a adoção do sistema de plantio direto em outras lavouras nas bacias PCJ deve ser estimulada, assim como as demais iniciativas presentes nos Planos ABC e ABC+.

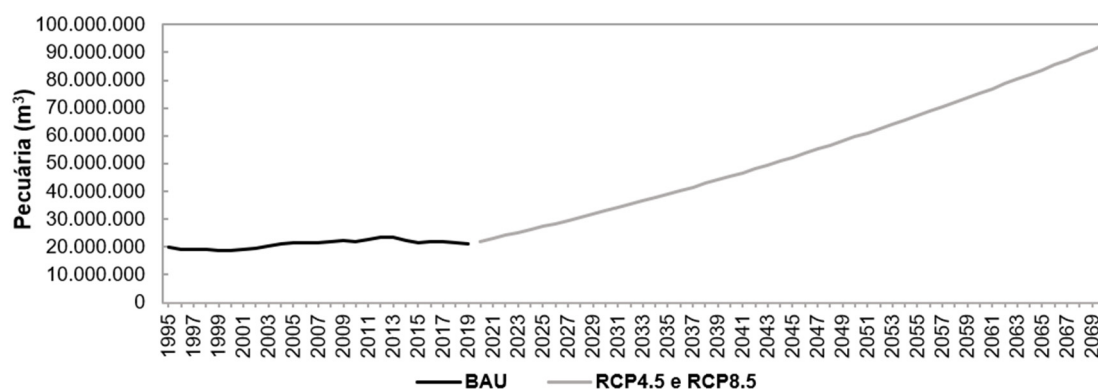
#### 4.3.6 Pecuária

A produção de alimentos de origem animal se dá durante sua criação e/ou após seu abate por meio do processamento e beneficiamento de produtos gerados a partir deles. A pecuária é, portanto, uma importante fonte de alimentos. Durante essa prática, os recursos, água e energia, são essenciais. A água é empregada na dessedentação dos rebanhos, ao passo que a energia é usada tanto no provimento do conforto térmico animal como no processamento da sua alimentação. Ambos os recursos também são utilizados no beneficiamento e processamento dos produtos resultantes no decorrer da sua criação e/ou após seu abate.

#### 4.3.6.1 Demanda hídrica para dessedentação animal

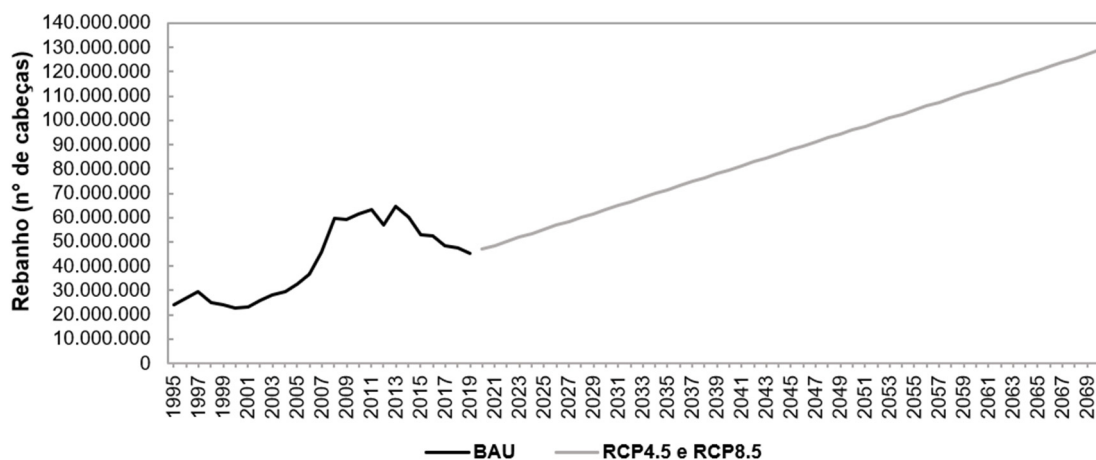
A Figura 81 apresenta a demanda hídrica da pecuária nas bacias PCJ. Verifica-se no cenário BAU, que a quantidade de água utilizada na dessedentação animal oscilou entre 18,6 milhões  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  e 23,4 milhões  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$ , apresentando crescimento de 1999 a 2005 e acréscimos e decréscimos no período de 2006 a 2019. Nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, foram previstos acréscimos contínuos, partindo de 22,1 milhões  $\text{m}^3$  em 2020, alcançando o valor de 92,7 milhões  $\text{m}^3$  em 2070. Em todos os cenários, a demanda hídrica é influenciada tanto pelo tamanho do rebanho como pela sua composição.

**Figura 81 - Demanda hídrica, em metros cúbicos ( $\text{m}^3$ ), da pecuária nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**



O rebanho total das bacias PCJ, considerando a soma dos rebanhos: bubalino, caprino, bovino, equinos, ovinos e suínos, e o número de codornas, galinhas, galos, frangos e frangas, esteve na faixa de 22,9 milhões a 64,8 milhões de cabeças no cenário BAU, e na faixa de 46,9 milhões a 128,8 milhões de cabeças nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 (Figura 82).

**Figura 82 - Rebanho, em número de cabeças, das bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**



Comparando a média dos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5, verifica-se que nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 foi previsto incremento de 109,7% no rebanho das bacias PCJ, resultando em aproximadamente 45,9 milhões de cabeças a mais (Tabela 18), o que pode contribuir com o desenvolvimento socioeconômico e garantia da segurança alimentar.

**Tabela 18 - Variação do tamanho do rebanho e sua demanda hídrica nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em relação ao cenário BAU**

Cenário	Média (Nº de cabeças)	Aumento (Nº de cabeças)	Aumento (%)
*BAU	41.898.914,7	-	-
RCP4.5 e RCP8.5	87.861.446,1	45.962.531,4	109,7%
	Média (m <sup>3</sup> ano <sup>-1</sup> )	Aumento (m <sup>3</sup> ano <sup>-1</sup> )	Aumento (%)
BAU	21.036.191,9	-	-
RCP4.5 e RCP8.5	54.070.963,9	33.034.772,1	157%

\*O tamanho dos rebanhos foi obtido de SIDRA (2023).

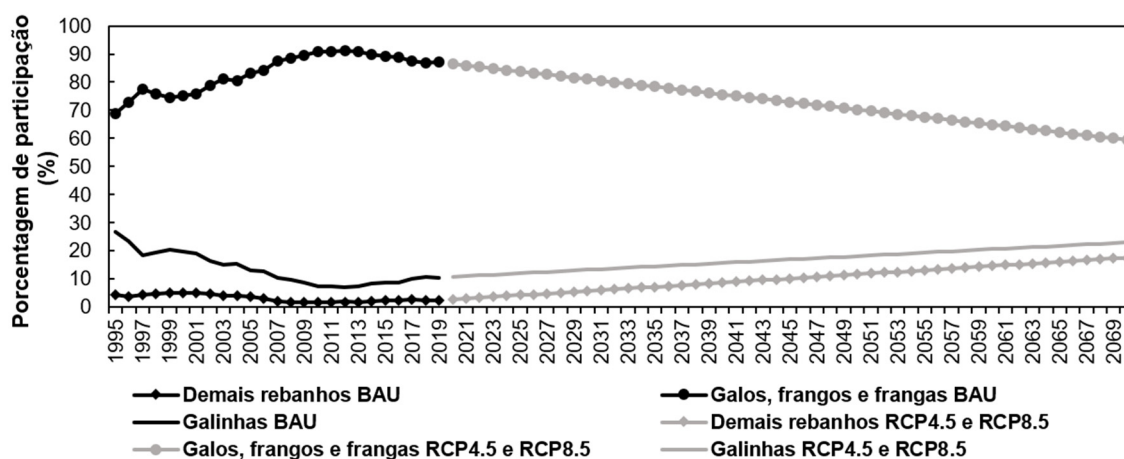
A demanda hídrica média para a prática da pecuária nas bacias PCJ deve aumentar 157% nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em relação à média do cenário BAU, passando de aproximadamente 21,0 milhões m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> no cenário BAU para

aproximadamente 54,0 milhões  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 (Tabela 18).

Cabe ressaltar que no Brasil, a pecuária e a agricultura, cujas movimentações financeiras correspondem ao setor econômico denominado agronegócio, são essenciais ao desenvolvimento socioeconômico do país. O Centro de Estudos em Economia Aplicada em colaboração com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil estimam que, em 2023, o PIB do agronegócio brasileiro poderá chegar a R\$ 2,63 trilhões, e esse valor corresponderá a 24,4% do PIB nacional (CEPEA; CNA, 2023). Dessa forma, a garantia hídrica para a dessedentação do rebanho previsto (Figura 82) e para produção agrícola prevista (Figura 60) para as bacias PCJ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, pode impulsionar não só a economia local como a economia nacional.

A composição do rebanho das bacias PCJ é apresentada na Figura 83. Observa-se que nos cenários avaliados, galos, frangos e frangas apresentaram a maior participação, correspondendo por 69% a 91% do rebanho total das bacias PCJ no cenário BAU, e por 59% a 87% nos cenários RCP4.5 e RCP8.5. O rebanho de galinhas aparece como o segundo maior rebanho das bacias PCJ, apresentando percentual de participação na faixa de 7% a 27% no cenário BAU, e de 11% a 23% nos cenários RCP4.5 e RCP8.5. Os demais rebanhos, que correspondem à soma dos rebanhos bubalino, caprino, bovino, equinos, ovinos, suínos e codornas, mesmo agrupados, corresponderam a apenas 2% a 5% do rebanho total das bacias PCJ no cenário BAU, e por 3% a 18% nos cenários RCP4.5 e RCP8.5.

**Figura 83 - Composição do rebanho das bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**



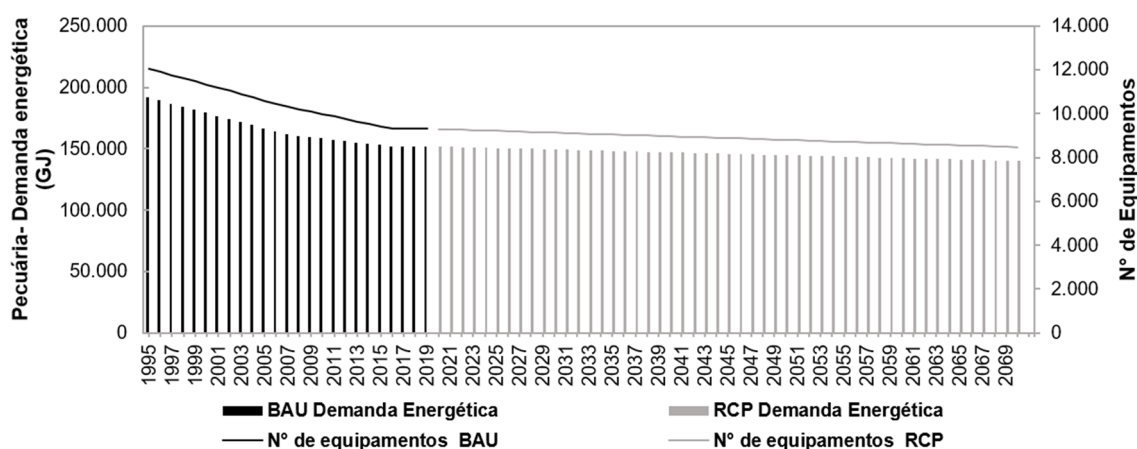
Verifica-se que o percentual de participação do rebanho galos, frangos e frangas foi variável no cenário BAU e apresentou tendência de redução nos cenários RCP4.5 e RCP8.5. Por outro lado, o percentual de participação dos demais rebanhos (bubalino, caprino, bovino, equinos, ovinos, suínos e codornas) também oscilou no cenário BAU, porém, apresentou tendência de crescimento no cenário RCP4.5 e RCP8.5. Já o rebanho galinhas apresentou tendência de redução no cenário BAU, e tendência de crescimento nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 (Figura 83).

A análise da composição do rebanho das bacias PCJ é importante, pois cada rebanho apresenta demanda hídrica diária específica, influenciando no volume total destinado à dessedentação animal na prática da pecuária. Bovinos e bubalinos apresentam demanda hídrica média de 50 litros por cabeça dia ( $L\ cabeça^{-1}\ dia^{-1}$ ), equinos demandam em média 40  $L\ cabeça^{-1}\ dia^{-1}$ , suínos demandam em média 12,5  $L\ cabeça^{-1}\ dia^{-1}$ , ovinos e caprinos demandam em média 10  $L\ cabeça^{-1}\ dia^{-1}$  e codornas, galinhas, galos, frangos e frangas demandam em média 0,18  $L\ cabeça^{-1}\ dia^{-1}$  (ANA, 2019b).

#### *4.3.6.2 Demanda energética e emissões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente de maquinários empregados na pecuária*

Conforme mencionado anteriormente, na criação e/ou abate de animais e durante o beneficiamento e processamento dos produtos provenientes da prática da pecuária, é necessário o uso de energia. O número de equipamentos comumente utilizados na prática da pecuária nas bacias PCJ e sua demanda energética referente ao consumo de energia elétrica são apresentados na Figura 84. Os equipamentos considerados foram: DPM (desintegrador-picador-misturador), ensiladeira, misturador de ração, ordenhadeira e resfriador de leite. O DPM, a ensiladeira e o misturador de ração são empregados na criação animal, especificamente, no processamento da sua alimentação, ao passo que, a ordenhadeira e o resfriador de leite são empregados no beneficiamento de produtos de origem animal.

**Figura 84 – Número de equipamentos empregados na prática da pecuária nas bacias PCJ e sua demanda energética nos cenários BAU e RCP**



A demanda energética, considerando a soma dos equipamentos avaliados, apresentou, no cenário BAU, decréscimos contínuos de 1995 a 2016 e valores constantes de 2016 a 2019, variando entre 152,0 mil GJ ano<sup>-1</sup> e 191,8 mil GJ ano<sup>-1</sup>. No cenário RCP, observa-se pouca variação, com os valores previstos estando na faixa de 140,1 mil GJ ano<sup>-1</sup> a 151,8 mil GJ ano<sup>-1</sup>, porém, verifica-se uma tendência de redução ao longo da série (Figura 84).

Ao comparar a média dos cenários, verifica-se que no cenário RCP foi projetada uma redução de 12,3% na demanda energética de energia elétrica em relação ao cenário BAU, que deve passar de aproximadamente 166,4 mil GJ ano<sup>-1</sup> para aproximadamente 145,9 mil GJ ano<sup>-1</sup> (Tabela 19). Essa redução tem relação com a quantidade de equipamentos, a qual apresentou decréscimos ao longo do cenário BAU, passando de 12,0 mil unidades em 1995 para 9,3 mil unidades em 2019 (Figura 84).

**Tabela 19 - Variação da demanda energética de maquinários empregados na prática da pecuária nas bacias PCJ no cenário RCP em relação ao cenário BAU**

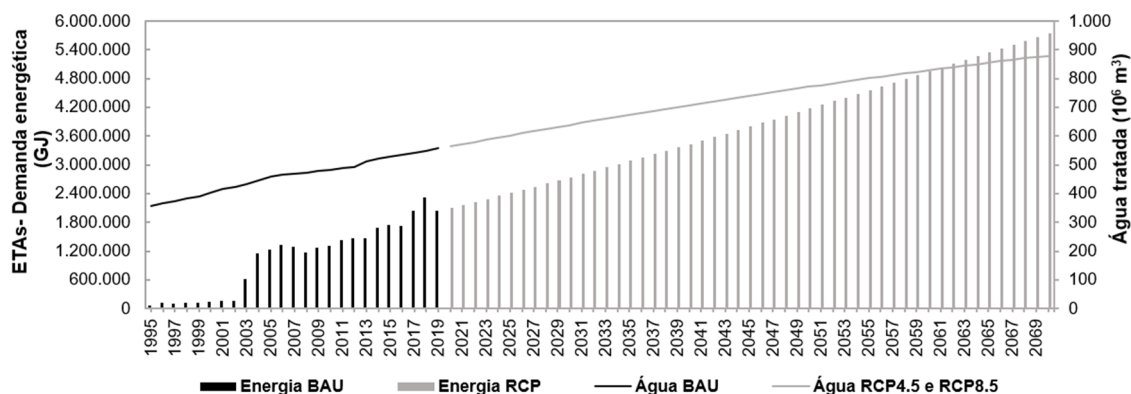
Cenário	Demanda média (GJ ano <sup>-1</sup> )	Redução (GJ ano <sup>-1</sup> )	Redução (%)
<b>BAU</b>	166.434,3	-	-
<b>RCP</b>	145.919,4	20.514,9	12,3%

As emissões CO<sub>2</sub> equivalente são variáveis conforme a matriz elétrica das bacias PCJ. Considerando os fatores de emissão médios dos cenários BAU e RCP, respectivamente iguais a 0,2587 tCO<sub>2</sub>e/MWh e 0,1454 tCO<sub>2</sub>e/MWh, e transformando MWh para GJ por meio da divisão desses valores por 3,6. Verifica-se os seguintes fatores de emissão médios: 0,0719 tCO<sub>2</sub>e/GJ no cenário BAU e 0,0404 tCO<sub>2</sub>e/GJ no cenário RCP. Dessa maneira, a emissão de CO<sub>2</sub> equivalente em virtude do consumo de energia elétrica pelos maquinários avaliados, considerando a demanda energética média de 166.434,3 GJ ano<sup>-1</sup> no cenário BAU e 145.919,4 GJ ano<sup>-1</sup> no cenário RCP (Tabela 19), equivaleu a 11.960,7 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> no cenário BAU e 5.891,8 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> no cenário RCP.

#### 4.3.7 Tratamento de água e esgoto

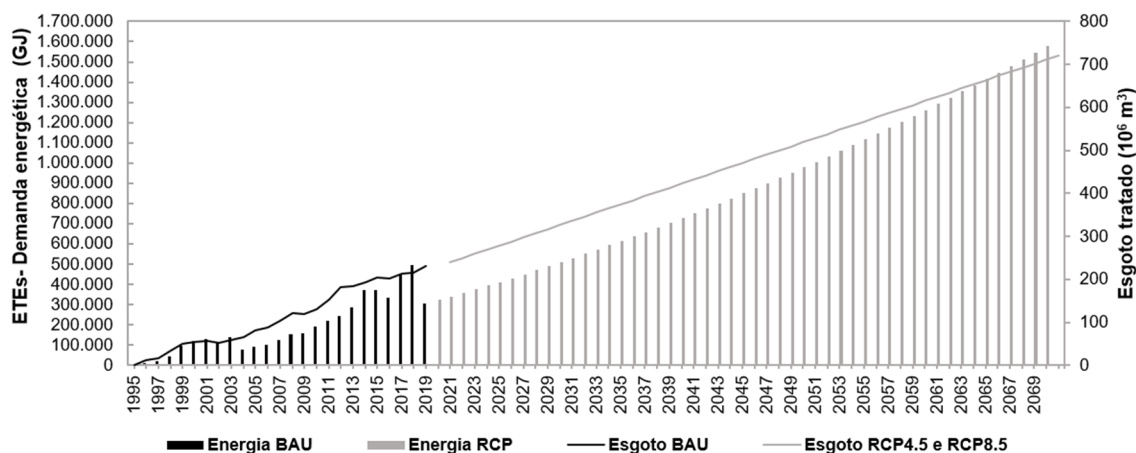
O nexos água-energia-alimento pode ser visualizado prontamente ao analisarmos a quantidade de energia elétrica demandada no tratamento de água para abastecimento público e no tratamento de esgoto doméstico, já que tanto a água tratada pelas ETAs como a água residuária das ETEs podem ser fonte hídrica para a irrigação. A Figura 85 apresenta a demanda energética das ETAs localizadas nas bacias PCJ e o volume de água tratada, já a Figura 86 apresenta a demanda das ETEs e o volume de esgoto tratado nos cenários avaliados.

**Figura 85 – Volume de água tratada e demanda energética (energia elétrica) das ETAs localizadas nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP (modelo LEAP) e BAU, RCP4.5 e RCP8.5 (modelo WEAP)**



ETAs= Estações de Tratamento de Água; GJ= gigajoules.

**Figura 86 – Volume de esgoto tratado e demanda energética (energia elétrica) ETEs localizadas nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP (modelo LEAP) e BAU, RCP4.5 e RCP8.5 (modelo WEAP)**



ETEs= Estações de Tratamento de Esgoto; GJ= gigajoules.

A demanda energética das ETAs e ETEs são influenciadas pelo crescimento populacional, pela cobertura de atendimento e pela configuração do sistema de tratamento adotado (Jordão, 2015; Molinos-Senante; Sala-Garrido, 2018).

No cenário BAU, a demanda energética referente ao consumo de energia elétrica por ETAs nas bacias PCJ esteve na faixa de 64,3 mil GJ ano<sup>-1</sup> a 2,3 milhões GJ ano<sup>-1</sup>, apresentando variações. Ao passo que no cenário RCP, foram previstos valores de demanda no intervalo de 2,1 milhões GJ ano<sup>-1</sup> a 5,8 milhões GJ ano<sup>-1</sup>, observando-se tendência de crescimento, com sucessivos incrementos (Figura 85).

Destaca-se que o volume de água tratado apresentou crescimento contínuo por praticamente toda a série dos cenários estudados, oscilando entre 357,3 milhões m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> e 556,7 milhões m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> no cenário BAU, e entre 564,0 milhões m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> e 879,4 milhões m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> nos cenários RCP4.5 e RCP8.5. Todavia, os índices de consumo de energia elétrica por metro cúbico de água tratada foram variáveis, principalmente ao longo do cenário BAU, por isso, verifica-se oscilações na demanda energética das ETAs das bacias PCJ nesse cenário (Figura 85).

A demanda energética referente ao consumo de energia elétrica por ETEs das bacias PCJ, no cenário BAU, correspondeu a valores na faixa de 505,4 GJ ano<sup>-1</sup> a 495.020,4 GJ ano<sup>-1</sup>, e no cenário RCP, a valores variando de 323,6 mil GJ ano<sup>-1</sup> a

1,6 milhões GJ ano<sup>-1</sup>. Assim como para as ETAs, a série do cenário BAU apresentou oscilações, enquanto a série do cenário RCP apresentou incrementos contínuos. As razões para as oscilações observadas no cenário BAU, são as variações do índice de consumo de energia elétrica por metro cúbico de esgoto tratado, visto que o volume de esgoto tratado nas bacias PCJ apresentou tendência de crescimento em ambos os cenários, oscilando entre 1,1 milhões m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> e 230,3 milhões m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> no cenário BAU, e entre 239,9 milhões m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> e 720,6 milhões m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 (Figura 86).

Em termos percentuais, o volume de água tratada nas ETAs deve aumentar 58,9% nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em relação à média do cenário BAU, enquanto para o volume de esgoto tratado foi projetado aumento de 325,3% (Tabela 20). Essa diferença pode ser resultante da projeção de aumento da taxa de cobertura de tratamento de esgoto nas bacias PCJ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, pois no cenário BAU ela foi inferior à taxa de cobertura de tratamento da água. Segundo a Agência das Bacias PCJ (2020), em 2019, as bacias PCJ apresentavam as seguintes taxas de cobertura: 90% de atendimento quanto ao fornecimento de água tratada à população nos municípios a ela pertencentes e 77% da população residente era atendida com o tratamento de esgoto.

**Tabela 20 – Variação do volume tratado nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) e Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) das bacias PCJ entre os cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5**

Cenários	Volume médio (m <sup>3</sup> ano <sup>-1</sup> )	Aumento (m <sup>3</sup> ano <sup>-1</sup> )	Variação (%)
<b>ETAs</b>			
<b>BAU</b>	461,9 x 10 <sup>6</sup>	-	-
<b>RCP4.5 e RCP8.5</b>	734,1 x 10 <sup>6</sup>	272,2 x 10 <sup>6</sup>	↑58,9
<b>ETEs</b>			
<b>BAU</b>	112,9 x 10 <sup>6</sup>	-	-
<b>RCP4.5 e RCP8.5</b>	480,3 x 10 <sup>6</sup>	367,4 x 10 <sup>6</sup>	↑325,3

As ETAs apresentaram, nos dois cenários, demanda de energia elétrica superior às ETEs (Tabela 21) e entre as causas para essa disparidade, pode-se citar, diferentes índices de consumo de energia elétrica por metro cúbico de

água/efluente tratado e a taxa de cobertura, posto que ambas as demandas sofrem interferência do aumento populacional.

**Tabela 21 – Variação da demanda energética (energia elétrica) das Estações de Tratamento de Água (ETAs) e Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) das bacias PCJ entre os cenários BAU e RCP**

<b>Cenário</b>	<b>Demanda energética média (GJ ano<sup>-1</sup>)</b>	<b>Diferença (GJ ano<sup>-1</sup>)</b>	<b>Variação (%)</b>
<b>ETAs</b>			
<b>BAU</b>	1,1 x 10 <sup>6</sup>	-	-
<b>RCP</b>	3,8 x 10 <sup>6</sup>	2,7 x 10 <sup>6</sup>	↑266,7
<b>ETEs</b>			
<b>BAU</b>	186.813,5	-	-
<b>RCP</b>	884.622,7	697.809,2	↑373,5

Em termos percentuais, a demanda energética das ETAs das bacias PCJ deve aumentar 266,7% no cenário RCP em relação à média do cenário BAU, passando de 1,1 milhões GJ ano<sup>-1</sup> (cenário BAU) para 3,8 milhões GJ ano<sup>-1</sup> (cenário RCP). Já para as ETEs foi projetado aumento de 373,5%, com a projeção de que a demanda energética deve passar de 186,8 mil GJ ano<sup>-1</sup> no cenário BAU para 884,6 mil GJ ano<sup>-1</sup> no cenário RCP (Tabela 21). Com tais projeções, verifica-se a importância do investimento em sistemas de tratamento que apresentem menor consumo energético e em iniciativas que visem o reaproveitamento do biogás gerado pelas ETEs e do lodo gerado nas ETAs e ETEs para geração de energia elétrica.

Jordão (2008) destaca que a energia para aeração de sistemas de tratamento de esgoto é variável, com processos de lodo ativado convencional apresentando demanda média variando entre 10 e 15 kWh por habitante ano<sup>-1</sup> para lodo com idade inferior a 3 dias e entre 18 e 22 kWh por habitante ano<sup>-1</sup> para lodo com idade entre 4 e 7 dias. Já lagoas aeradas de mistura completa apresentam demanda média na faixa de 20 a 24 kWh por habitante ano<sup>-1</sup>, enquanto sistemas compostos pela combinação reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) + lodo ativado convencional apresentam demanda média de aproximadamente 15 kWh. Dessa

maneira, percebe-se como a configuração do sistema de tratamento pode influenciar na demanda energética da estação.

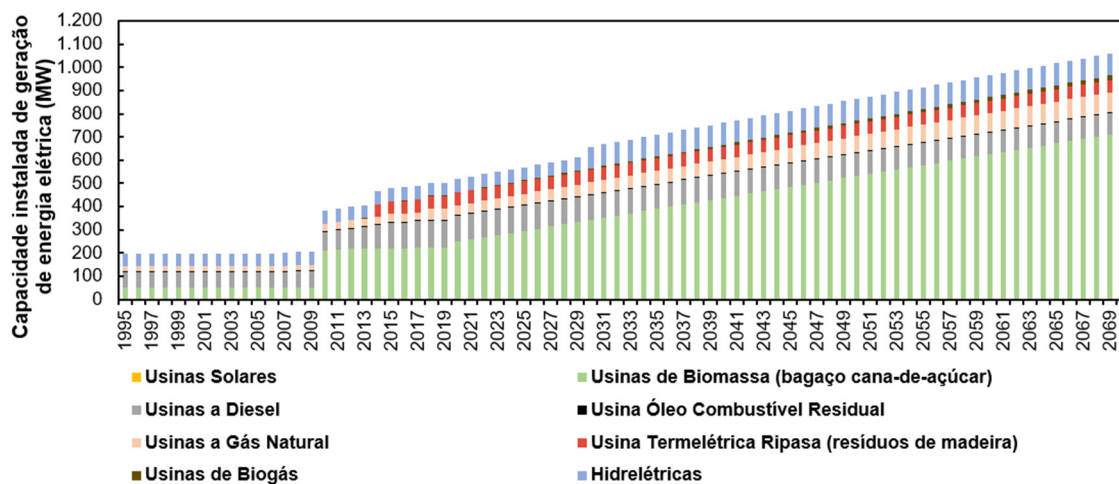
Ao avaliar o potencial de produção de biogás por um reator anaeróbio de leito fluidizado em uma estação de tratamento de esgoto localizada em Cascavel, estado do Paraná, Zilotti (2012) constatou que a produção diária de 624 m<sup>3</sup> de biogás apresentou potencial de geração de energia elétrica mensal igual a 35.459 kWh. Portanto, é perceptível como o biogás gerado por ETEs das bacias PCJ pode se tornar uma fonte viável de energia elétrica para atendimento da demanda energética das ETEs ou ETAs.

Borges, Sellin e Medeiros (2008) analisaram o uso de lodo sanitário proveniente do Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto de São Bento do Sul, estado de Santa Catarina, como fonte de biomassa para geração de energia, verificando poder calorífico médio de 19 MJ/kg, sendo essa capacidade para liberação de energia similar à de outras biomassas empregadas na geração de energia termelétrica como o bagaço de cana-de-açúcar em briquete e madeiras de descarte. Dessa forma, nota-se que o lodo proveniente de ETEs e ETAs das bacias PCJ também pode ser uma fonte viável de geração de energia elétrica.

#### 4.3.8 Matriz elétrica

As demandas por energia elétrica nas bacias PCJ são atendidas por meio da geração de energia elétrica dentro dos limites das bacias e pela importação de energia elétrica produzida fora da sua área de drenagem. A Figura 87 apresenta a capacidade instalada de geração de energia elétrica dentro dos limites das bacias PCJ ao longo dos cenários BAU e RCP. Identifica-se o uso de fontes de energia renováveis e não renováveis. As fontes de energia renováveis utilizadas são: bagaço de cana-de-açúcar, resíduos de madeira, biogás, radiação solar e água, enquanto as fontes de energia não renováveis utilizadas são: óleo combustível residual, diesel e gás natural.

**Figura 87 - Capacidade instalada, em megawatts (MW), de geração de energia elétrica nas bacias PCJ ao longo do cenário BAU (1995-2019) e cenário RCP (2020-2070)**



Ao longo do cenário BAU (1995-2019), a capacidade instalada de geração de energia elétrica nas bacias PCJ passou de 198,5 MW, em 1995, para 503,3 MW em 2019, representando aumento de 153,7%. Observa-se também um salto de crescimento entre 2009 e 2010, impulsionado pelo uso de usinas de biomassa cuja fonte de energia é o bagaço de cana-de-açúcar. Já para o cenário RCP (2020 a 2070), verifica-se a previsão de que a capacidade instalada de geração de energia elétrica nas bacias PCJ deve passar de 519,5 MW em 2020 para 1.067,9 MW em 2070, representando aumento de 105,6%. Constata-se que as usinas de biomassa de bagaço de cana-de-açúcar também foram as responsáveis pelos incrementos contínuos da capacidade instalada de geração de energia elétrica nesse cenário (Figura 87).

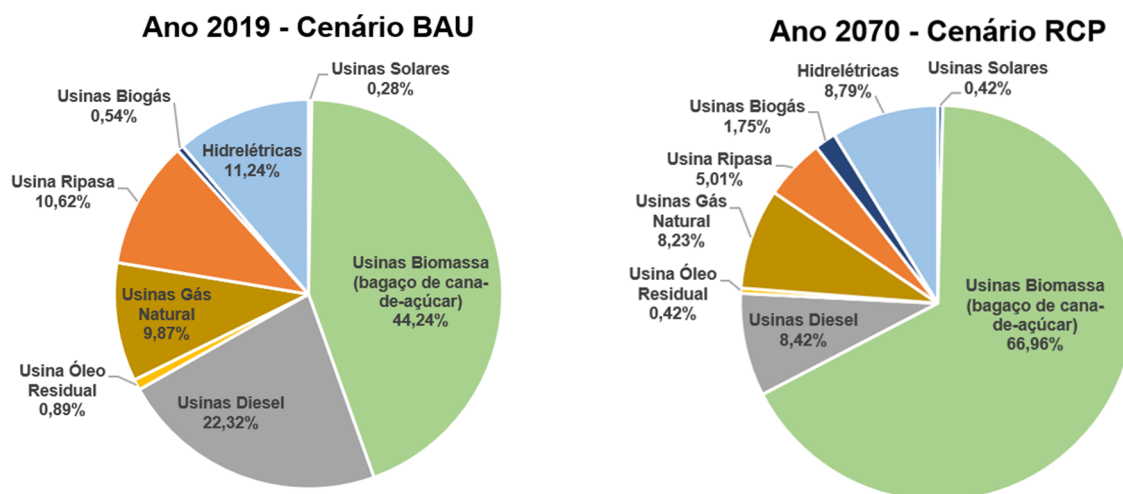
A Tabela 22 apresenta a comparação da capacidade instalada de geração de energia elétrica nas bacias PCJ por tipo de fonte de energia entre os anos 2019 e 2070, que são os últimos anos dos cenários BAU e RCP, respectivamente. Verifica-se que são previstos aumentos na geração de energia elétrica por meio do uso das fontes renováveis: radiação solar, biogás, água e biomassa, visto que, ao comparar o valor previsto para o ano 2070, ao observado em 2019, nota-se que as usinas solares, de biogás, hidrelétricas e de biomassa de bagaço de cana-de-açúcar serão responsáveis pelo incremento de 3,1 MW, 16,0 MW, 37,3 MW e 492,2 MW, respectivamente, na matriz elétrica das bacias PCJ.

**Tabela 22 - Comparação da capacidade instalada de geração de energia elétrica nas bacias PCJ entre os anos 2019 e 2070 por tipo de fonte de energia**

	Ano 2019 Cenário BAU	Ano 2070 Cenário RCP	Aumento ou redução (MW)
Usinas solares	1,4	4,5	3,1
Usinas de biomassa (bagaço de cana-de-açúcar)	222,8	715,0	492,2
Usinas a diesel	112,4	89,9	-22,5
Usina óleo combustível residual	4,5	4,5	0,0
Usinas a gás natural	49,7	87,9	38,2
Usina termelétrica Ripasa	53,5	53,5	0,0
Usinas de biogás	2,7	18,7	16,0
Hidrelétricas	56,6	93,9	37,3
<b>Total</b>	<b>503,57</b>	<b>1.067,87</b>	<b>564,3</b>

Já para as fontes não renováveis, observa-se previsões diferentes. Comparando a previsão para o ano de 2070 com o valor observado no ano 2019, constata-se que a geração de energia elétrica por meio do uso do diesel deve reduzir, diminuindo 22,5 MW em relação ao valor de 2019, enquanto, a geração de energia elétrica utilizando gás natural deve aumentar, incrementando 38,2 MW à matriz elétrica das bacias PCJ (Tabela 22).

A expressiva participação da biomassa bagaço de cana-de-açúcar na geração de energia elétrica nas bacias PCJ fica ainda mais evidente ao observarmos o gráfico da Figura 88, o qual compara a porcentagem de participação de cada fonte de energia empregada na geração de energia elétrica nos anos 2019 (último ano do cenário BAU) e 2070 (último ano do cenário RCP). A biomassa bagaço de cana-de-açúcar, em 2019, foi responsável por 44,2% da matriz elétrica das bacias PCJ, sendo prevista uma participação de 66,9% para o ano de 2070. Por ser dependente de um produto agrícola (cana-de-açúcar), essa fonte de energia representa o nexo água-energia-alimento. É importante destacar que a cana-de-açúcar é a principal cultura produzida nas bacias PCJ, o que pode ter contribuído para a expansão do uso do seu bagaço como fonte de energia para geração de eletricidade.

**Figura 88 - Matriz elétrica das bacias PCJ nos anos 2019 e 2070**

A terceira maior participação na matriz elétrica das bacias PCJ, em ambos os anos, é das hidrelétricas, cuja fonte de energia é a água. Os recursos hídricos das bacias PCJ foram responsáveis pela geração de 11,2% da energia elétrica produzida em 2019, sendo prevista uma participação de 8,8% na geração de energia elétrica no ano 2070 (Figura 88). As hidrelétricas, por dependem de disponibilidade hídrica para a geração de energia elétrica, e por influenciarem os preços de produtos agrícolas irrigados, também representam o nexo água-energia-alimento.

Ao compararmos a participação das fontes de energia renováveis e não renováveis na matriz elétrica das bacias nos anos 2019 e 2070, percebe-se que, em 2019, as fontes de energia renováveis foram responsáveis por 66,9% da energia elétrica produzida, esse valor refere-se à soma dos percentuais das usinas: solares, hidrelétricas, biogás, biomassa e Ripasa, ao passo que as fontes de energias não renováveis foram responsáveis por 33,1% da energia elétrica produzida, esse valor refere-se à soma dos percentuais das usinas: diesel, gás natural e óleo residual. Em 2070, as fontes de energia renováveis deverão ser responsáveis por 82,9% da energia elétrica produzida nas bacias PCJ, representando um aumento de 24%, já as fontes de energia não renováveis deverão ser responsáveis por 17,1% da energia elétrica produzida nas bacias PCJ, representando uma redução de 48% em relação ao ano de 2019 (Figura 88).

A água é empregada na cadeia produtiva das fontes de energia renováveis e não renováveis utilizadas na geração de eletricidade e sua quantificação representa

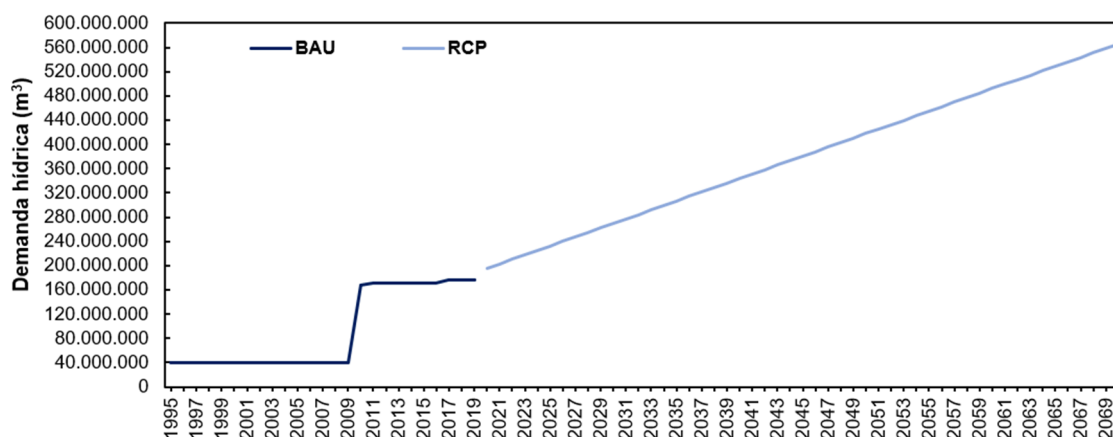
o nexo água-energia. Já a eletricidade é empregada na produção de alimentos, o que caracteriza o nexo água-energia-alimento.

#### 4.3.8.1 Demanda hídrica considerando a pegada hídrica

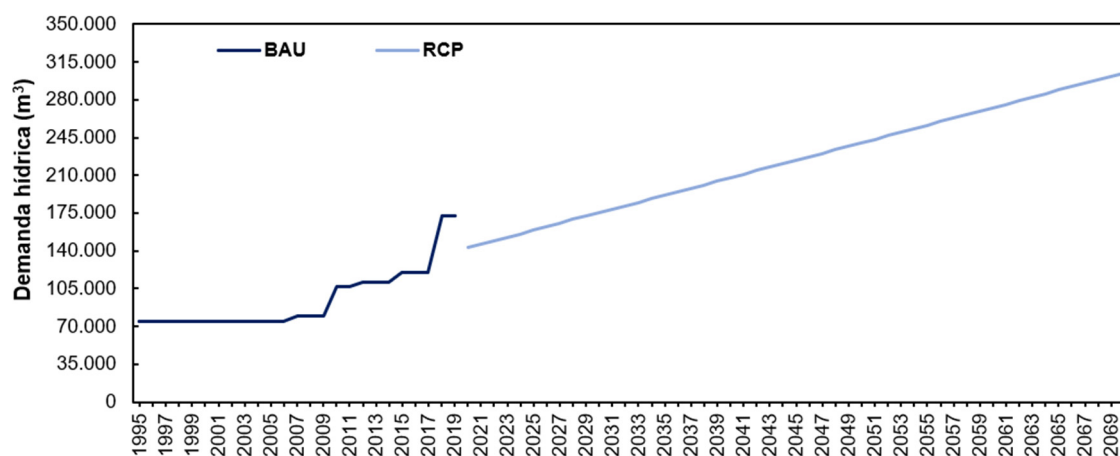
Uma forma de quantificação da demanda hídrica das fontes de energia empregadas na geração de energia elétrica é a consideração da sua pegada hídrica, que representa a quantidade de água consumida no decorrer da sua cadeia de produção. Gerbens-Leenes, Hoekstra e Van Der Meer (2008) definiram a pegada hídrica das fontes de energia: gás natural, hídrica, bagaço de cana-de-açúcar e óleo cru, esse último é utilizado na geração de diesel. Para a geração de energia por hidrelétricas, a pegada hídrica foi estimada em 22,3 m<sup>3</sup>/GJ e esse valor refere-se à evaporação nos reservatórios das usinas. A pegada hídrica do gás natural e do óleo cru foi estimada em 0,11 m<sup>3</sup>/GJ e 1,06 m<sup>3</sup>/GJ, respectivamente. Já a pegada hídrica da geração de energia por meio do bagaço da cana-de-açúcar produzida no Brasil foi estimada em 22,3 m<sup>3</sup>/GJ, sendo considerado o consumo de 127,9 m<sup>3</sup> de água por tonelada produzida.

Baseado nos valores de pegada hídrica estimados por Gerbens-Leenes, Hoekstra e Van Der Meer (2008), as demandas hídricas das usinas de biomassa, gás natural, diesel e hidrelétricas foram calculadas e são apresentadas nas Figuras 89, 90, 91 e 92, respectivamente.

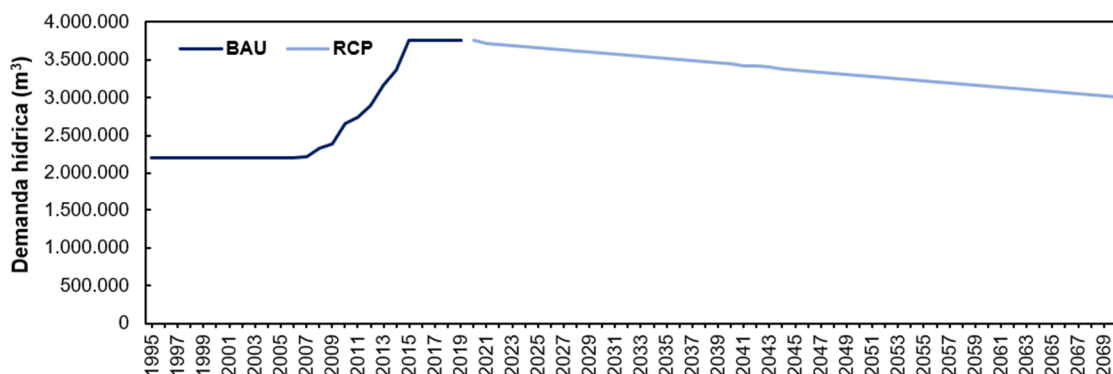
**Figura 89 - Demanda hídrica considerando a pegada hídrica das usinas de biomassa das bacias PCJ nos cenários BAU e RCP**



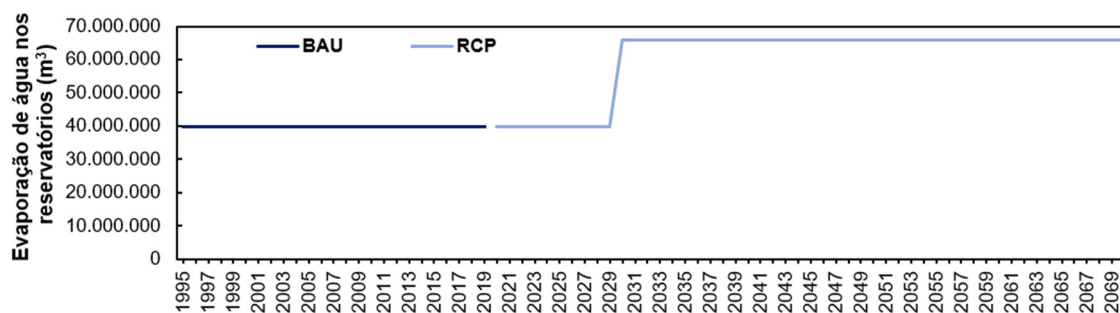
**Figura 90 - Demanda hídrica considerando a pegada hídrica das usinas de gás natural das bacias PCJ nos cenários BAU e RCP**



**Figura 91 - Demanda hídrica das usinas a diesel das bacias PCJ nos cenários BAU e RCP considerando a pegada hídrica do óleo cru**



**Figura 92 - Demanda hídrica considerando a pegada hídrica (evaporação) das usinas hidrelétricas das bacias PCJ nos cenários BAU e RCP**



A demanda hídrica anual considerando a pegada hídrica das usinas de biomassa de bagaço de cana-de-açúcar das bacias PCJ oscilou entre

39,5 milhões  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  e 176,4 milhões  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  no cenário BAU, apresentando valor constante de 1995 a 2009, aumento significativo de 2009 a 2010, pequeno incremento entre 2010 e 2011 e 2016 e 2017 e estabilização de 2011 a 2016 e 2017 a 2019. Já no cenário RCP, foram previstas demandas hídricas na faixa de 195,3 milhões  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  a 566 milhões  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$ , verificando-se tendência de crescimento (Figura 89).

A demanda hídrica anual considerando a pegada hídrica das usinas de gás natural esteve na faixa de 74,9 mil  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  a 172,4 mil  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  no cenário BAU, apresentando tendência de crescimento de 2009 até 2018. No cenário RCP, foram previstas demandas entre 142,9 mil  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  e 304,9 mil  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$ , verificando-se tendência de crescimento desde o início até o final da série histórica (Figura 90).

Em contrapartida, a demanda hídrica anual das usinas a diesel, considerando a pegada hídrica do óleo cru, apresentou tendência de redução no cenário RCP, sendo previstos valores na faixa de 3,0 milhões  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  a 3,8 milhões  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$ . Já no cenário BAU, a demanda hídrica anual oscilou entre 2,2 milhões  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  e 3,8 milhões  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$ , apresentando crescimento de 2008 a 2015 e valores constantes de 1995 a 2006 e de 2015 a 2019 (Figura 91).

Nas hidrelétricas, a demanda hídrica proveniente da evaporação de água dos reservatórios foi constante no cenário BAU, sendo igual a 39,8 milhões  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$ , enquanto no cenário RCP, verifica-se continuidade do valor 39,8 milhões  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  de 2020 a 2029. Para 2030, foi previsto aumento para 66,0 milhões de metros cúbicos, valor que permanece inalterado até 2070 (Figura 92). Esse aumento do volume evaporado a partir de 2030, se deve a previsão da inserção, em 2030, de 13 aproveitamentos hidrelétricos que atualmente encontram-se na fase de projeto ou estudo segundo o Plano de Recursos Hídricos das bacias PCJ 2020 a 2035 (Consórcio Profill-Rhama, 2020), juntas, as treze hidrelétricas resultam em uma potência adicional de 37,3 MW.

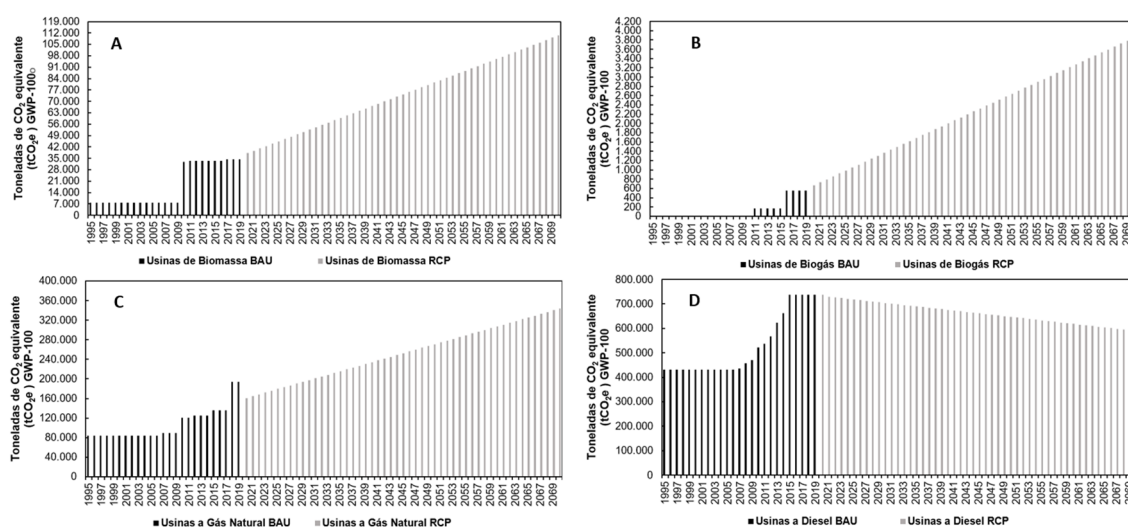
Observando o volume hídrico demandado por cada fonte de energia (Figuras 89, 90 e 91) e a previsão de redução da disponibilidade hídrica (vazão) nas bacias PCJ (Tabela 8), o aumento da participação das usinas de biomassa (Figura 88) poderia parecer inviável. No entanto, essa demanda pode ser suprida pelo reúso de vinhaça, uma água residuária resultante da atividade sucroalcooleira, reduzindo ou eliminando o uso dos recursos hídricos das bacias PCJ para essa finalidade. A aplicação da vinhaça no solo agrícola do estado de São Paulo é regulamentada pela

Norma Técnica da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo N° P 4.231/2015, que apresenta os procedimentos a serem adotados a fim de minimizar impactos ambientais negativos advindos dessa prática (CETESB, 2015).

#### 4.3.8.2 Geração de energia elétrica: emissões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente

A Figura 93 apresenta as emissões anuais de CO<sub>2</sub> equivalente (GWP-100) das fontes de energia: biomassa de bagaço de cana-de-açúcar, biogás, gás natural e diesel, empregadas na geração de energia elétrica nas bacias PCJ.

**Figura 93 - Toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (GWP-100) emitidas devido ao uso das fontes de energia: A) biomassa bagaço de cana-de-açúcar, B) biogás, C) gás natural e D) diesel na geração de energia elétrica nas bacias PCJ nos cenários BAU e RCP**



Nota-se que no cenário BAU, as emissões anuais de CO<sub>2</sub> equivalente de todas as fontes de energia avaliadas apresentaram crescimento ao longo dos anos, oscilando de 7,7 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 34,4 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> para as usinas de biomassa de bagaço de cana-de-açúcar, de 173,1 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 556,6 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> para as usinas de biogás, de 84,5 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 194,5 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> para as usinas a gás natural e de 431,6 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 737,3 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> para as usinas a diesel (Figura 93).

No cenário RCP, constata-se tendência de crescimento nas emissões provenientes das usinas de biomassa de bagaço de cana-de-açúcar, de biogás e gás natural e tendência de redução para as usinas a diesel. Esse comportamento reflete as previsões de geração de energia elétrica projetadas para as usinas nesse cenário (Tabela 22), o que leva ao aumento ou redução nas emissões anuais de CO<sub>2</sub> equivalente. Verifica-se que foram previstas emissões na faixa de 38,1 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 110,5 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> para as usinas de biomassa de bagaço de cana-de-açúcar, de 669,6 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 3,8 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> para as usinas de biogás, de 84,5 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 343,8 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> para as usinas a gás natural, e de 431,6 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 589,9 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> para as usinas a diesel (Figura 93).

Constata-se que mesmo com uma menor participação das usinas a diesel e gás natural na geração de energia elétrica nas bacias PCJ (Figura 88), a quantidade de CO<sub>2</sub> equivalente emitida por elas foi superior às emissões das usinas de biomassa de bagaço de cana-de-açúcar (Figura 93), as quais apresentam maior participação na matriz elétrica das bacias PCJ (Figura 88). Dessa maneira, observa-se como o uso de fontes de energia renováveis na geração de eletricidade pode contribuir com a redução da emissão de gases de efeito estufa, atenuando o potencial de aquecimento global, e, por conseguinte, o impacto das mudanças climáticas.

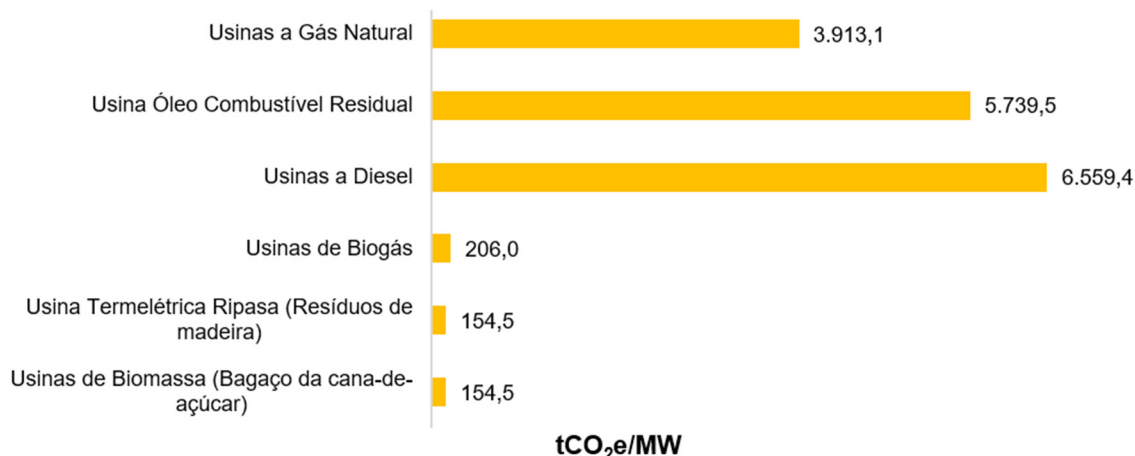
A visualização de como o investimento no uso de fontes de energia renováveis na geração de eletricidade nas bacias PCJ pode ser uma medida de mitigação dos impactos das mudanças climáticas fica mais evidente ao observamos a Tabela 23, que apresenta a comparação entre os anos 2019, último ano do cenário BAU, e 2070, último ano do cenário RCP, em relação à geração de energia elétrica, emissão de CO<sub>2</sub> equivalente, e emissões específicas de CO<sub>2</sub> equivalente, que representam as emissões por unidade de energia gerada.

**Tabela 23 - Emissão de CO<sub>2</sub> equivalente (GWP-100) pelo setor de energia elétrica, geração de energia elétrica e emissões específicas de CO<sub>2</sub> equivalente nas bacias PCJ nos anos 2019 (cenário BAU) e 2070 (cenário RCP)**

	<b>Ano 2019 cenário BAU</b>	<b>Ano 2070 cenário RCP</b>	<b>Aumento ou redução</b>	<b>Variação (%)</b>
Toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente (tCO <sub>2</sub> e)	1.000.833,6	1.083.522,6	82.689,0	8,3%
Geração de energia elétrica (MW)	503,6	1.067,9	564,3	112,1%
Emissões específicas de toneladas CO <sub>2</sub> equivalente (tCO <sub>2</sub> e/MW)	1.987,5	1.014,7	-972,8	-49%

Verifica-se que mesmo com a adição de 564,3 MW na capacidade de geração de energia elétrica nas bacias PCJ no cenário RCP, as emissões específicas de CO<sub>2</sub> equivalente foram 49% menores que no cenário BAU, passando de 1.987,5 tCO<sub>2</sub>e/MW no último ano do cenário BAU (ano 2019) para 1.014,7 tCO<sub>2</sub>e/MW no último ano do cenário RCP (ano 2070) (Tabela 23). Lembrando que em 2070, 82,9% da energia elétrica das bacias PCJ deverá ser gerada mediante o uso de fontes de energia renováveis (Figura 88).

Outra forma de avaliar as diferenças de emissão de CO<sub>2</sub> equivalente por fontes de energia renováveis e não renováveis usadas na geração de energia elétrica nas bacias PCJ, é a observação da emissão específica de cada fonte. Comparando-as, verifica-se que as fontes de energia termelétrica não renováveis, diesel, óleo combustível residual e gás natural apresentaram os maiores valores, iguais a 6.559,4 tCO<sub>2</sub>e/MW, 5.739,5 tCO<sub>2</sub>e/MW e 3.913,1 tCO<sub>2</sub>e/MW, respectivamente. Enquanto, as fontes de energia termelétrica renováveis biogás, biomassa de bagaço de cana-de-açúcar e resíduos de madeira, apresentam os menores valores, iguais a 206,0 tCO<sub>2</sub>e/MW, 154,5 tCO<sub>2</sub>e/MW e 154,5 tCO<sub>2</sub>e/MW, respectivamente (Figura 94).

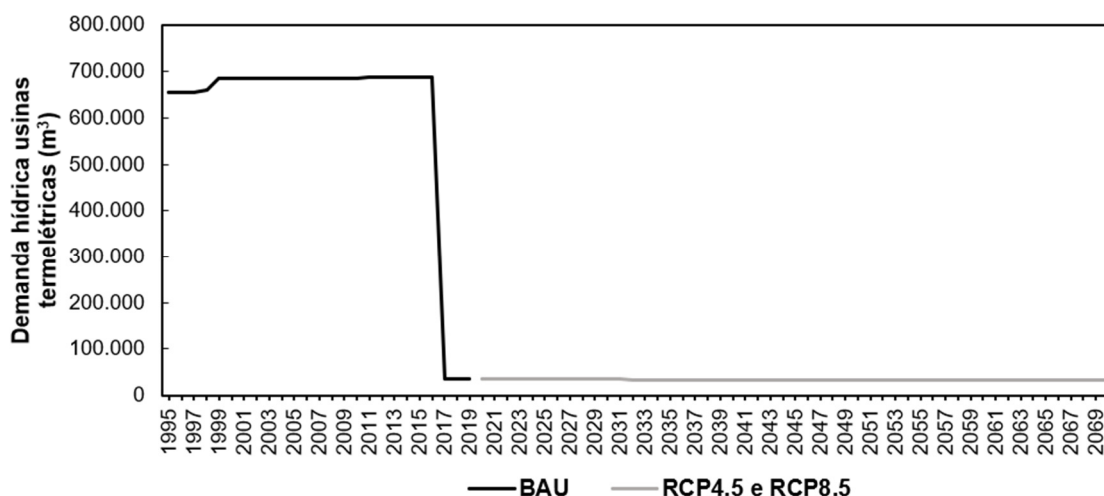
**Figura 94 - Emissão específica de CO<sub>2</sub> equivalente por fonte de energia**

Diante do exposto, a ampliação da matriz elétrica das bacias PCJ baseada no uso das fontes de energia renováveis para geração de energia termelétrica: biogás, biomassa de bagaço de cana-de-açúcar e resíduos de madeira caracteriza-se como uma medida de mitigação dos impactos das mudanças climáticas, visto que há menor emissão de gases de efeito estufa que levam ao potencial aquecimento global, ao passo que há garantia da segurança energética.

#### 4.3.9 Demanda pelo uso da água das termelétricas

A demanda pelo uso da água das termelétricas presentes nas bacias PCJ é apresentada na Figura 95, representando a quantificação do nexo água-energia-alimento. Os valores apresentados foram retirados do produto “Usos Consuntivos da Água no Brasil (1931-2040)” disponibilizado pela ANA por meio do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH, 2022a).

**Figura 95 - Demanda pelo uso da água das termelétricas presentes nas bacias PCJ nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5 (modelo WEAP)**



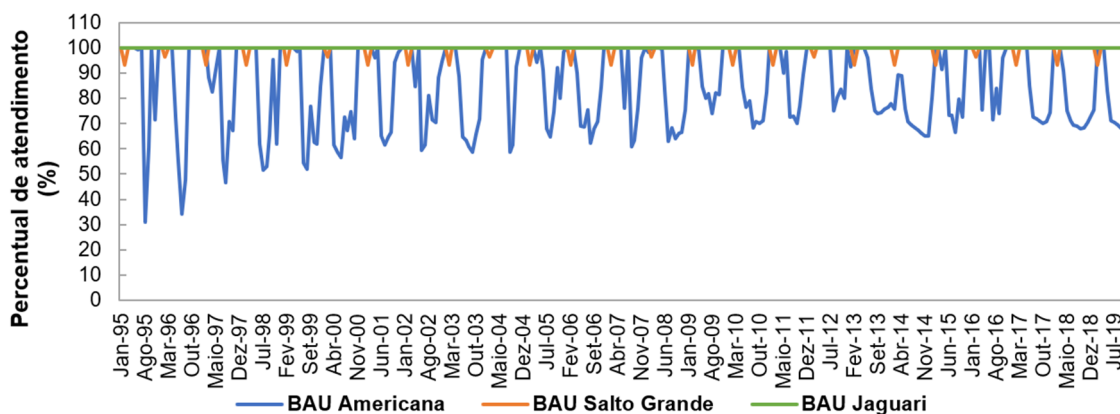
No cenário BAU, a demanda pelo uso da água por termelétricas localizadas nas bacias PCJ apresentou valores constantes nos períodos: 1995 a 1997, 1999 a 2010, 2012 a 2016, e 2018 a 2019, sendo eles iguais a 654,3 mil m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>, 685,8 mil m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>, 688,8 mil m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> e 34,5 mil m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente. Nota-se também uma redução abrupta na demanda entre os anos 2016 e 2017, que passou de 688,8 mil m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> para 34,5 mil m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> (Figura 95), mesmo sem ter sido observado queda na geração desse tipo de energia nas bacias PCJ (Figura 88). Neste caso, a diminuição da demanda pode estar associada ao uso de sistemas de resfriamento que apresentam maior eficiência de uso da água como o sistema de resfriamento por torres úmidas que capta menores quantidades de água. Segundo o Instituto de Energia e Meio Ambiente, a captação de água para esse tipo de sistema é em torno de 0,9 m<sup>3</sup>/MWh (IEMA, 2016).

Nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, a demanda hídrica apresentou valores praticamente constantes em virtude de a projeção ter sido realizada baseada nos últimos três anos do cenário BAU, verificando-se valores variando entre 34,4 mil m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> e 34,5 mil m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> (Figura 95).

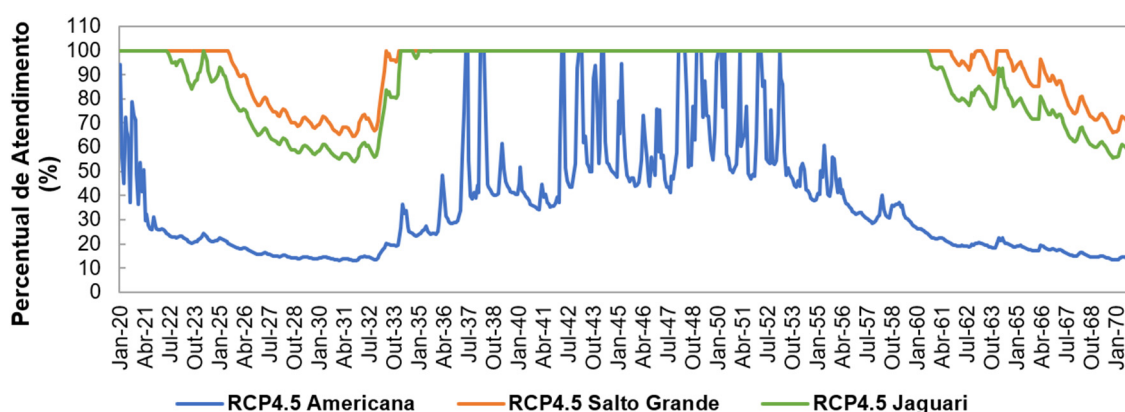
## 4.3.10 Hidroeletricidade

O nexu água-energia-alimento em virtude da geração de hidroeletricidade nas bacias PCJ é apresentado nas Figuras 96, 97 e 98, nas quais pode-se analisar o percentual de atendimento do potencial de geração de energia das hidrelétricas Americana, Jaguari e Salto Grande ao longo dos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente. Esse percentual refere-se à verificação se a disponibilidade hídrica (vazão) permite o atendimento ou não do potencial de geração de energia considerando a vazão turbinada de cada hidrelétrica.

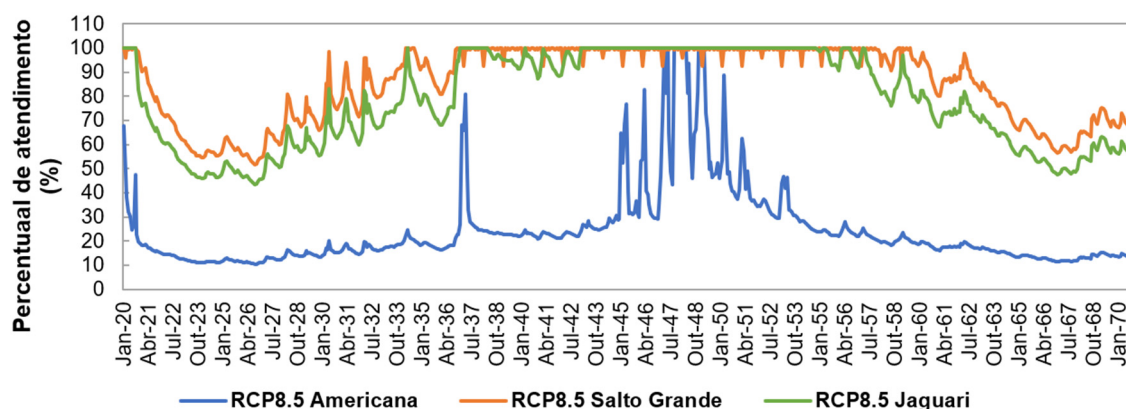
**Figura 96 - Percentual de atendimento do potencial de geração de energia pelas hidrelétricas Americana, Jaguari e Salto Grande no cenário BAU**



**Figura 97 - Percentual de atendimento do potencial de geração de energia pelas hidrelétricas Americana, Jaguari e Salto Grande no cenário RCP4.5**



**Figura 98 - Percentual de atendimento do potencial de geração de energia pelas hidrelétricas Americana, Jaguari e Salto Grande no cenário RCP8.5**



A hidrelétrica Americana tem o potencial de geração de 30,0 MW de energia elétrica, utilizando uma vazão turbinada de  $117,00 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; a hidrelétrica Salto Grande apresenta potencial de geração igual a 4,55 MW, utilizando uma vazão turbinada de  $21,45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; e a hidrelétrica Jaguari possui potencial de geração de energia igual a 11,8 MW, utilizando uma vazão turbinada de  $34,90 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Constatam-se períodos de não atendimento do potencial de geração de energia dessas hidrelétricas em todos os cenários analisados (Figuras 96, 97 e 98).

Destaca-se que as hidrelétricas Americana, Jaguari e Salto Grande foram selecionadas devido à disponibilidade de dados para alimentação do modelo WEAP, e que juntas, elas somam uma potência instalada de 46,4 MW, representando 82,0% da potência verificada no cenário BAU (56,6 MW) para as hidrelétricas das bacias PCJ, e 49,4% da potência projetada para o cenário RCP (93,9 MW) (Tabela 22).

No cenário BAU, a hidrelétrica Jaguari apresentou 100% de atendimento do seu potencial de geração de energia, enquanto as hidrelétricas Salto Grande e Americana apresentaram valores na faixa de 93,2% a 100% e 30,9% a 100%, respectivamente (Figura 96). Nota-se que entre as hidrelétricas estudadas, a hidrelétrica Americana apresentou maior comprometimento na geração de energia. Essa diferença reflete a influência da vazão turbinada na geração de hidroeletricidade, a qual é maior para a hidrelétrica Americana, igual a  $117,00 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , com a hidrelétricas Jaguari e Salto Grande requerendo  $34,90 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e  $21,45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente.

Nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, que apresentam mudanças climáticas, verifica-se que a geração de hidroeletricidade nas bacias PCJ estará comprometida.

A menor geração de energia elétrica no cenário RCP4.5 deve ocorrer em outubro de 2031, com as hidrelétricas Americana, Salto Grande e Jaguari apresentando percentuais de atendimento iguais a 13,0%, 64,4% e 54,1%, respectivamente, o que equivale à geração de 3,9 MW, 2,9 MW e 6,4 MW de energia, respectivamente (Figura 97). Já no cenário RCP8.5, a menor geração de energia elétrica deve ocorrer em agosto de 2026, com um percentual de atendimento de 10,4% para hidrelétrica Americana, equivalente à geração de 3,1 MW, 51,6% para a hidrelétrica Salto Grande, equivalente à geração 2,3 MW, e 43,4% para a hidrelétrica Jaguari, equivalente à geração de 5,1 MW (Figura 98).

A Tabela 24 apresenta a variação do percentual de atendimento do potencial de geração de energia pelas hidrelétricas avaliadas entre os cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5.

**Tabela 24 – Variação do percentual de atendimento do potencial de geração de energia pelas hidrelétricas Americana, Jaguari e Salto Grande nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em relação ao cenário BAU**

Cenário	Média do Percentual de Atendimento (%)	Energia Gerada (MW)	Varição (%)
<b>Americana</b>			
<b>BAU</b>	84,4	25,3	-
<b>RCP4.5</b>	36,0	10,8	↓57,3
<b>RCP8.5</b>	24,6	7,4	↓70,8
<b>Jaguari</b>			
<b>BAU</b>	100,0	11,8	-
<b>RCP4.5</b>	88,2	10,4	↓11,8
<b>RCP8.5</b>	78,7	9,3	↓21,3
<b>Salto Grande</b>			
<b>BAU</b>	99,2	4,5	-
<b>RCP4.5</b>	93,4	4,3	↓5,8
<b>RCP8.5</b>	85,8	3,9	↓13,5

A hidrelétrica Americana apresentou maior sensibilidade às alterações hídricas. No cenário BAU, ela apresentou média igual a 84,4% para potencial de atendimento de geração de energia, enquanto as hidrelétricas Jaguari e Salto

Grande apresentaram médias iguais a 100% e 99,2%. Em relação a esse cenário, no cenário RCP4.5, o percentual de atendimento de geração de energia reduziu 57,3% para a hidrelétrica Americana, 11,8% para a hidrelétrica Jaguari e 5,8% para a hidrelétrica Salto Grande. No cenário RCP8.5 as reduções foram maiores, iguais a 70,8%, 21,3% e 13,5% para as hidrelétricas Americana, Jaguari e Salto Grande, respectivamente (Tabela 24).

A hidrelétrica Americana, que apresenta potencial de geração de 30,0 MW de energia elétrica, gerou em média 25,3 MW no cenário BAU, sendo prevista a geração média de 10,8 MW no cenário RCP4.5 e de 7,4 MW no cenário RCP8.5. Ao passo que a hidrelétrica Jaguari, que apresenta potencial de geração de 11,8 MW de energia elétrica, gerou em média 11,8 MW no cenário BAU, sendo prevista a geração média de 10,4 MW no cenário RCP4.5 e de 9,3 MW no cenário RCP8.5. Já a hidrelétrica Salto Grande, que apresenta potencial de geração de 4,55 MW de energia elétrica, gerou em média 4,5 MW no cenário BAU, sendo prevista a geração média de 4,3 MW no cenário RCP4.5 e de 3,9 MW no cenário RCP8.5 (Tabela 24).

Em situações em que a disponibilidade hídrica para geração de energia hidrelétrica é baixa, ou seja, a geração de energia está abaixo do potencial da usina hidrelétrica (Figuras 96, 97 e 98, Tabela 24), há a necessidade de ativação de usinas termelétricas, cujo custo de operação é superior ao das usinas hidrelétricas. Por conta disso, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu desde 2015 o Sistema de Bandeiras Tarifárias a fim de informar ao consumidor o aumento na tarifa praticada (ANEEL, 2023b).

Esse sistema define que em condições favoráveis de geração de energia hidrelétrica, a tarifa normal deve ser praticada, sendo essa a Bandeira Verde. A Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), que é uma das principais provedoras de energia elétrica nas bacias PCJ, apresenta os valores das Bandeiras Tarifárias usualmente praticados por ela, os quais são: Bandeira Amarela, acréscimo de 0,0187 reais (R\$) por kWh consumido, representa condições menos favoráveis, em que as usinas termelétricas são acionadas a um custo de operação no intervalo de R\$ 211,28 a R\$ 422,56 por MWh; Bandeira Vermelha-Patamar 1, acréscimo de R\$ 0,0416 por kWh consumido em situações em que as termelétricas precisam ser acionadas a um custo acima de R\$ 422,56 MWh<sup>-1</sup> chegando até R\$ 610,0 MWh<sup>-1</sup>; e Bandeira Vermelha-Patamar 2, acréscimo de R\$ 0,0949 por kWh consumido

quando o custo de acionamento das usinas termelétricas é maior ou igual a R\$ 610,0 MWh<sup>-1</sup> (CPFL, 2023).

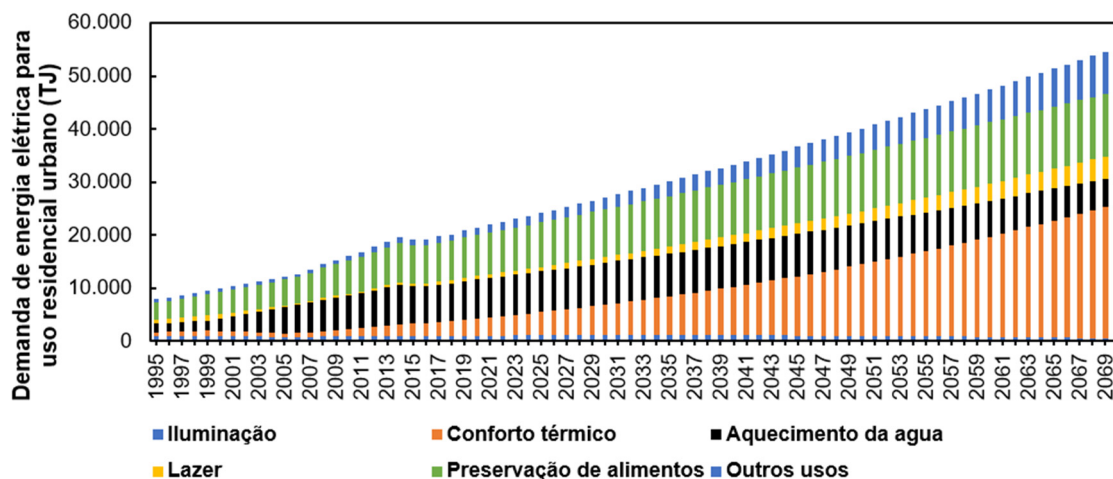
Percebe-se, então, a influência das alterações na disponibilidade hídrica das bacias PCJ na geração de hidroeletricidade e no valor pago pelo uso de energia elétrica, o que, conseqüentemente, pode acarretar aumento dos custos da produção agrícola advinda da agricultura irrigada. Diante desse panorama, nota-se que as bacias PCJ precisam continuar a dar preferência ao uso de fontes de energia renováveis não dependentes da disponibilidade hídrica na região, como o investimento em energia solar e eólica e o uso de biogás. A bioenergia obtida do bagaço da cana-de-açúcar continua sendo uma boa escolha, já que, apesar da grande demanda de água proveniente do plantio e processamento da cana-de-açúcar, é possível suprir essa demanda por meio da aplicação de vinhaça no solo, que é regulamentada por uma norma estadual para esse fim.

Outrossim, os reservatórios das usinas hidrelétricas das bacias PCJ podem ser utilizados para a geração de energia solar mediante a instalação de um sistema flutuante fotovoltaico, o que além de gerar energia, também contribui com a redução da pegada hídrica das hidrelétricas em virtude da redução da evaporação da água (Silva *et al.*, 2022). Ademais, a usina solar ocupando a mesma área da usina hidrelétrica permite que ambas sejam despachadas da mesma subestação, sendo que a área que seria ocupada para instalação dos painéis solares, pode receber outros usos (Silvério, 2018). Outra vantagem, é a não emissão de gases de efeito estufa devido ao acionamento de usinas termelétricas em períodos de escassez hídrica (Velloso, 2017). No entanto, ainda são incertos os efeitos dessa produção híbrida de energia (hidrosolar) sobre a fauna fluvial (Cruz, 2019).

#### 4.3.11 Uso residencial de energia elétrica

A demanda de energia elétrica para uso residencial urbano por finalidade de uso nas bacias PCJ é apresentada na Figura 99. Constata-se que essa demanda oscilou entre 7,9 mil terajoules (TJ) ano<sup>-1</sup> e 20,9 mil TJ ano<sup>-1</sup> ao longo do cenário BAU (1995 a 2019), e entre 21,4 mil TJ ano<sup>-1</sup> e 55,4 mil TJ ano<sup>-1</sup> ao longo do cenário RCP (2020 a 2070), apresentando tendência de crescimento em ambos os cenários.

**Figura 99 - Demanda anual de energia elétrica, em terajoules (TJ), para uso residencial urbano nas bacias PCJ por finalidade de uso ao longo do cenário BAU (1995-2019) e cenário RCP (2020-2070)**



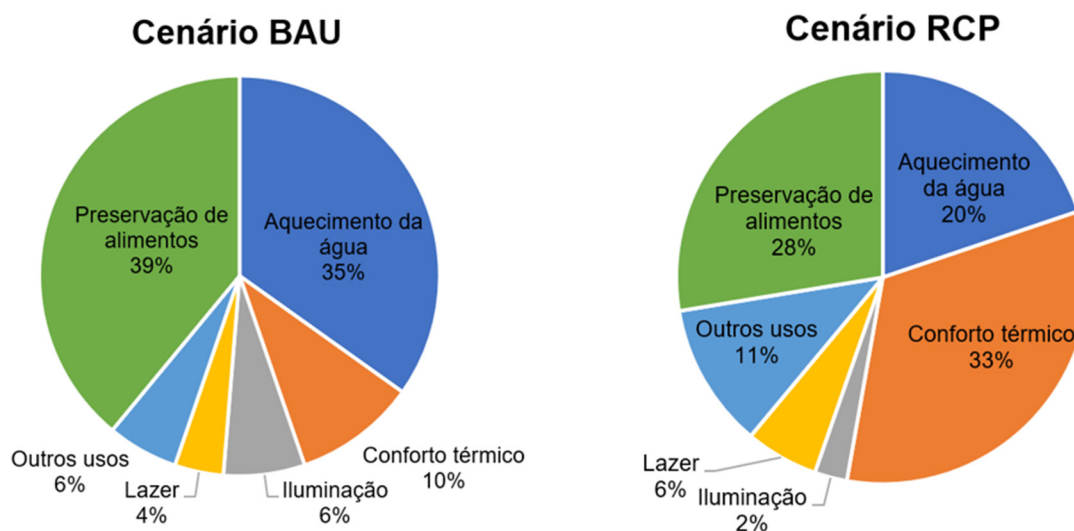
A análise da demanda de energia elétrica para uso residencial urbano é importante no estudo do nexos água-energia-alimento, pois um alto consumo por esse setor pode ocasionar problemas de oferta, levando ao aumento dos custos de energia na agricultura irrigada, bem como, a problemas no fornecimento de energia elétrica, gerando interrupções. Essa demanda também é impactada pelas mudanças climáticas, uma vez que o clima influencia o padrão de consumo.

Observando a Figura 99, verifica-se que foi previsto aumento considerável do uso residencial urbano de energia elétrica nas bacias PCJ para a finalidade de conforto térmico ao longo do cenário RCP (2020-2070), enquanto o uso para aquecimento da água tende a diminuir. É altamente provável que esse padrão venha a se concretizar, pois o aumento da temperatura nas bacias PCJ, previsto em 3,0°C no cenário de mudança climática RCP4.5 e em 4,1°C no cenário de mudança climática RCP8.5 (Tabela 3), influenciará o uso de equipamentos voltados a promoção de conforto térmico (Ex.: ventilador, ar-condicionado, humidificadores de ar), ao passo que, o uso de energia para o aquecimento da água, principalmente para o banho (chuveiro elétrico), deve sofrer redução.

Tal constatação fica ainda mais evidente ao analisarmos a porcentagem de participação das finalidades de uso em relação à demanda de energia elétrica média anual residencial urbana nos cenários BAU e RCP (Figura 100). Nota-se que baseado nos valores médios de cada cenário, o percentual de participação da

finalidade conforto térmico aumenta de 10% no cenário BAU para 33% no cenário RCP, já o uso para aquecimento da água diminui de 35% de participação no cenário BAU para 20% de participação no cenário RCP.

**Figura 100 - Porcentagem de participação das finalidades de uso em relação à demanda de energia elétrica média anual residencial urbana nos cenários BAU e RCP**



É importante salientar que todas as finalidades de uso residencial urbano de energia elétrica das bacias PCJ, principalmente, as finalidades: lazer, iluminação, preservação de alimentos e outros podem ser influenciadas por políticas públicas e iniciativas que incentivam o uso de lâmpadas, equipamentos e eletroeletrônicos mais eficientes, como é o caso do Selo Procel de Economia de Energia, que identifica os eletrodomésticos e equipamentos mais eficientes (Eletrobras, 2023), e a Lei N°10.925 de 17 de outubro de 2001, que estabeleceu a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, indicando a criação de programas de metas progressivas visando a implantação de níveis mínimos e máximos de eficiência energética de aparelhos e máquinas comercializados ou fabricados no Brasil (Brasil, 2001).

A Tabela 25 apresenta a comparação das médias da demanda de energia elétrica das finalidades de uso residencial urbano das bacias PCJ e a demanda total média dos cenários BAU e RCP. Verifica-se previsão de aumento no cenário RCP em relação ao cenário BAU, sendo ele igual a 49,9% para aquecimento da água,

781% para conforto térmico, 2,2% para iluminação, 282,6% para lazer, 421% para outros usos e 86,5% para preservação de alimentos.

**Tabela 25 - Demanda de energia elétrica média, em terajoules (TJ), das finalidades de uso residencial urbano nos cenários BAU e RCP**

	<b>Cenário BAU Média (TJ ano<sup>-1</sup>)</b>	<b>Cenário RCP Média (TJ ano<sup>-1</sup>)</b>	<b>Aumento (%)</b>
Aquecimento da água	4.926,8	7.384,7	49,9
Conforto térmico	1.394,5	12.286,1	781
Iluminação	928,6	949,2	2,2
Lazer	556,7	2.130,3	282,6
*Outros usos	810,5	4.222,9	421
Preservação de alimentos	5.515,3	10.283,9	86,5
<b>Total</b>	<b>14.132,5</b>	<b>37.257,1</b>	<b>163,6</b>

\*nesta finalidade estão incluídos equipamentos empregados na execução de serviços gerais, como aspirador de pó, máquina de lavar, liquidificador, entre outros.

Observa-se também, que considerando a média dos cenários BAU e RCP, a demanda de energia elétrica para uso residencial urbano nas bacias PCJ deve aumentar 163,6%, passando de 14.132,5 TJ ano<sup>-1</sup> no cenário BAU para 37.257,1 TJ ano<sup>-1</sup> no cenário RCP (Tabela 25).

## 5 CONCLUSÕES

O Modelo Climático Regional Eta-HadGEM2-ES na resolução de 5 km projeta decréscimos de precipitação, umidade relativa do ar e velocidade do vento, e aumento da temperatura e evapotranspiração das bacias PCJ nos cenários de mudança climática RCP4.5 e RCP8.5. Em relação à média anual do cenário BAU, a precipitação reduz 24,9% no cenário RCP4.5 e 28,9% no cenário RCP8.5, a umidade relativa reduz 13,9% no cenário RCP4.5 e 18,1% no cenário RCP8.5, a velocidade do vento reduz 6,4% no cenário RCP4.5 e 3,6% no cenário RCP8.5, a temperatura aumenta 3°C no cenário RCP4.5 e 4,1°C no cenário RCP8.5 e a evapotranspiração aumenta 38,5% no cenário RCP4.5 e 45,1% no cenário RCP8.5. Tais alterações climáticas alteram o regime hidrológico das bacias PCJ.

A vazão média anual das bacias PCJ reduz 79,6% no cenário RCP4.5 e 84,9% no cenário RCP8.5 em comparação ao cenário BAU, passando de 131,0 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> no cenário BAU, para 26,7 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> no cenário RCP4.5 e 19,8 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> no cenário RCP8.5. Para as vazões de referência Q<sub>90</sub> e Q<sub>95</sub> são previstas reduções de 90,4% e 88,9%, respectivamente, no cenário RCP4.5, e de 91,0% e 89,8%, respectivamente, no cenário RCP8.5. A Q<sub>90</sub> muda de 101,2 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> no cenário BAU para 9,7 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> no cenário RCP4.5 e 9,1 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> no cenário RCP8.5. Já a Q<sub>95</sub> passa de 83,4 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> no cenário BAU para 9,2 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> no cenário RCP4.5 e 8,5 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> no cenário RCP8.5.

Essas modificações previstas na vazão, que também é influenciada pela previsão de aumento de 62,6% na demanda de uso consuntivo da água nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em relação à demanda média do cenário BAU, enquadram as bacias PCJ na condição de alto estresse hídrico pelo Índice de Estresse Hídrico, com o índice chegando aos valores máximos de 6,2 no cenário RCP4.5 e 6,5 no cenário RCP8.5, os quais representam situações em que para cada 1 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> de vazão demandada para uso consuntivo, há apenas 0,161 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> e 0,153 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, respectivamente, de vazão disponível. Essa lacuna entre demanda e disponibilidade para os usos múltiplos dos recursos hídricos das bacias PCJ prejudica o desenvolvimento socioeconômico e compromete a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos.

O Índice de Falkenmark aponta que nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, as bacias PCJ encontram-se em escassez absoluta, apresentando valores menores

que 500 m<sup>3</sup> per capita<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Portanto, recomenda-se ações de proteção e conservação ambiental, investimentos em obras de infraestrutura hídrica, programas de incentivo ao reúso de efluentes tratados e captação de águas pluviais, implementação de políticas de redução da demanda e ampliação de projetos de educação ambiental a fim de garantir segurança hídrica aos múltiplos usuários e a proteção dos ecossistemas aquáticos.

O Índice Padronizado de Precipitação indica, no cenário RCP4.5, seca leve no período 2021-2023 e seca moderada a severa nos períodos 2025-2031, 2059-2062 e 2065-2070. No cenário RCP8.5, há previsão de secas leve a severa nos períodos: 2021-2027, 2034-2036, 2053-2055, 2058-2060, 2063-2067 e 2069-2070. Com a identificação desses futuros períodos de estiagem, recomenda-se a elaboração de planos de enfrentamento aos efeitos da seca e protocolos para mediação de conflitos pelo uso da água.

Como os cenários RCP4.5 e RCP8.5 apontam déficit de precipitação para as bacias PCJ, o aumento da produção agrícola, projetado em 21,3%, poderá ser alcançado por meio do uso da irrigação, para a qual é previsto aumento de 35,6% na demanda hídrica média em relação ao cenário BAU. Dessa forma, a demanda hídrica para irrigação deve passar de 38,5 milhões m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> (cenário BAU) para 52,1 milhões m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> (cenários RCP4.5 e RCP8.5). Neste contexto, a demanda média de energia elétrica para irrigação deve aumentar 82,7% no cenário RCP em relação ao cenário BAU, passando de 43,5 mil GJ ano<sup>-1</sup> para 79,5 mil GJ ano<sup>-1</sup>.

A expansão de áreas irrigadas nas bacias PCJ é, portanto, uma medida de mitigação/adaptação aos potenciais impactos das mudanças climáticas.

A redução da vazão projetada nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 também deve comprometer a dessedentação do rebanho das bacias PCJ, composto principalmente por galos, frangos e frangas e galinhas. A previsão indica que o rebanho total das bacias PCJ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 deve ser 109,7% superior à média do cenário BAU, representando o incremento de 45,9 milhões de cabeças. O aumento projetado representará uma demanda hídrica para dessedentação animal 157% superior à média do cenário BAU, que deve passar de 21,0 milhões m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup> para 54,0 milhões m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>.

Destarte, a garantia do suprimento hídrico do rebanho e para a produção agrícola das bacias PCJ contribuirá com seu desenvolvimento socioeconômico e garantia da segurança alimentar, sendo esses benefícios refletidos além dos seus

limites geográficos devido à comercialização e exportação de produtos agropecuários.

A demanda energética das ETAs das bacias PCJ deve aumentar 266,7% no cenário RCP em relação à média do cenário BAU, enquanto para as ETEs foi projetado aumento de 373,5%. Com tais projeções, verifica-se a importância do investimento em sistemas de tratamento que apresentem menor consumo energético e em iniciativas que visem o reaproveitamento do biogás gerado pelas ETEs e do lodo gerado nas ETAs e ETEs para geração de energia elétrica.

A demanda de energia elétrica para uso residencial urbano nas bacias PCJ deve aumentar 163,6% no cenário RCP, passando do consumo médio de 14.132,5 TJ ano<sup>-1</sup> no cenário BAU para 37.257,1 TJ ano<sup>-1</sup> no cenário RCP. Diante do exposto, o uso de lâmpadas, equipamentos e eletroeletrônicos que apresentam maior eficiência energética deve ser estimulado.

O atendimento das demandas por energia elétrica nas bacias PCJ por meio da geração de energia elétrica dentro dos limites das bacias, ocorre mediante o uso de fontes de energia renováveis e não renováveis. As fontes de energia renováveis utilizadas são: bagaço de cana-de-açúcar, resíduos de madeira, biogás, radiação solar e água, enquanto as fontes de energia não renováveis utilizadas são: óleo combustível residual, diesel e gás natural.

Em 2019, último ano do cenário BAU, as fontes de energia renováveis foram responsáveis por 66,9% da energia elétrica produzida nas bacias PCJ, enquanto para 2070, último ano do cenário RCP, foi prevista a participação de 82,9% das fontes de energia renováveis na matriz energética das bacias PCJ. Nesse panorama, as emissões específicas de CO<sub>2</sub> equivalente serão 49% menores, passando de 1.987,5 tCO<sub>2</sub>e/MW em 2019 para 1.014,7 tCO<sub>2</sub>e/MW em ano 2070. É importante destacar que a biomassa bagaço de cana-de-açúcar foi a principal fonte de energia renovável em ambos os cenários. Em 2019, ela foi responsável por 44,2% da matriz elétrica das bacias PCJ, sendo prevista uma participação de 66,9% para o ano de 2070. A expansão do uso do bagaço de cana-de-açúcar como fonte de energia para geração de eletricidade tem relação direta com a produção de cana-de-açúcar que é o principal produto agrícola das bacias PCJ.

Diante da previsão de redução da disponibilidade hídrica (vazão) nas bacias PCJ, o aumento da participação das usinas de biomassa de bagaço de cana-de-açúcar poderia parecer inviável. No entanto, essa demanda pode ser suprida pelo

reúso de vinhaça, um efluente resultante da atividade sucroalcooleira, reduzindo ou eliminando o uso dos recursos hídricos das bacias PCJ para essa finalidade.

A geração de hidroeletricidade pelas hidrelétricas Americana, Salto Grande e Jaguari será comprometida devido aos impactos na disponibilidade hídrica das bacias PCJ previstos nos cenários RCP4.5 e RCP8.5. A menor previsão de atendimento do potencial de geração de energia elétrica no cenário RCP4.5 ocorreu em outubro de 2031, para a qual foi previsto o percentual de atendimento de apenas 13,0% da capacidade de geração de 30,0 MW pela hidrelétrica Americana, o que equivale à geração de apenas 3,9 MW, 64,4% da capacidade de geração de 4,55 MW pela hidrelétrica Salto Grande, o que equivalente à geração 2,9 MW, e 54,1% da capacidade de geração de 11,8 MW pela hidrelétrica Jaguari, equivalente à geração de 6,4 MW. Já no cenário RCP8.5, a menor previsão foi projetada para agosto de 2026, com um percentual de atendimento de apenas 10,4% para hidrelétrica Americana, equivalente à geração de 3,1 MW, 51,6% para a hidrelétrica Salto Grande, equivalente à geração 2,3 MW, e 43,4% para a hidrelétrica Jaguari, equivalente à geração de 5,1 MW.

Em situações de baixa disponibilidade hídrica para geração de energia hidrelétrica, o que resulta na geração de energia abaixo do potencial da usina hidrelétrica, há o aumento da tarifa paga pelo uso de energia elétrica. Logo, o comprometimento da geração de energia pelas hidrelétricas Americana, Salto Grande e Jaguari deve influenciar o valor pago pelo uso de energia elétrica, o que, conseqüentemente, pode acarretar aumento dos custos da produção agrícola advinda da agricultura irrigada. Diante desse panorama, nota-se que as bacias PCJ precisam dar preferência ao uso de fontes de energia renováveis não dependentes da disponibilidade hídrica na região como o biogás, ampliar a geração de bioenergia por meio da biomassa do bagaço de cana-de-açúcar, visto que há o uso de uma fonte alternativa de água (vinhaça) para irrigação da cana-de-açúcar, ou investir em sistemas de produção híbrido hidrosolar, no qual a geração de energia solar ocorre mediante a instalação de um sistema flutuante fotovoltaico nos reservatórios das usinas hidrelétricas.

A ampliação da matriz elétrica das bacias PCJ baseada no uso das fontes de energia renováveis não dependentes da vazão para geração de energia elétrica também é uma medida de mitigação dos impactos das mudanças climáticas, uma

vez há menor emissão de gases de efeito estufa que levam ao potencial aquecimento global, ao passo que há garantia da segurança energética.

O consumo de diesel por colheitadeiras de cana-de-açúcar e por maquinários empregados no cultivo de citros, pastagens e café nas bacias PCJ e suas respectivas emissões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente mostram a importância do aumento do uso de biodiesel como estratégia de mitigação de tais emissões, bem como é essencial seguir medidas de ajustes na operação das máquinas agrícolas em prol da redução do consumo de combustível. Caso o consumo de diesel seja mantido, as projeções para o cenário RCP indicam que as colheitadeiras de cana-de-açúcar devem lançar de 48,2 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> e 73,1 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> na atmosfera, enquanto maquinários agrícolas utilizados no manejo de citros, pastagens e café devem gerar emissões na faixa de 8,4 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 27,8 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>, 63,2 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 161,2 mil tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> e 105,2 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup> a 1.087,6 tCO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>, respectivamente.

A decisão quanto a forma de plantio das culturas agrícolas também influencia na emissão de gases de efeito estufa. No cultivo da soja nas bacias PCJ, a adoção do sistema de plantio direto pode resultar em emissões de toneladas CO<sub>2</sub> equivalente 40,2% inferiores às emissões do plantio convencional e 46,0% inferiores às emissões do cultivo mínimo. Assim, o estímulo ao plantio direto de soja nas bacias PCJ pode ser uma medida em prol da mitigação do impacto das mudanças climáticas.

A adoção do sistema de plantio direto em outras lavouras nas bacias PCJ também deve ser estimulada, assim como outras tecnologias agropecuárias sustentáveis como sistemas agroflorestais, sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, florestas plantadas, bioinsumos, terminação intensiva de bovinos, práticas para recuperação de pastagens degradadas e manejo de resíduos da produção animal.

O WEAP-KIB-LEAP *framework* permite o acoplamento dos programas WEAP e LEAP, possibilitando a troca de dados entre eles, sendo uma opção para a modelagem do nexos AEA em escala de bacia hidrográfica, permitindo a verificação de como os sistemas água, energia e alimentos coevoluem juntos e são afetados e capazes de afetar as mudanças climáticas.

A metodologia desenvolvida possibilita a visualização e análise de dados quantitativos do nexos existente entre poluição atmosférica, alterações no clima,

disponibilidade hídrica, geração e uso de energia e produção de alimentos, podendo esses dados complementarem as informações presentes no Plano de Recursos Hídricos das bacias PCJ.

Os modelos criados para as bacias PCJ podem guiar o desenvolvimento da modelagem do nexos AEA sob o contexto de mudanças climáticas em outras bacias hidrográficas.

A avaliação e compreensão do nexos AEA pode contribuir com o desenvolvimento de políticas públicas, principalmente, aquelas voltadas à mitigação dos impactos das mudanças climáticas e em prol da garantia da segurança hídrica, alimentar e energética. Pode-se simular os efeitos de diferentes políticas públicas no nexos AEA, verificando assim, qual delas pode apresentar uma melhor via de desenvolvimento sustentável.

Para estudos futuros recomenda-se a ampliação das variáveis passíveis de quantificar o nexos entre os recursos água, energia e alimentos, como o potencial de economia de nutrientes em virtude do reúso de efluentes, a contabilização das contribuições da adubação nas entradas de energia nas bacias hidrográficas e a produção de bioetanol ou qualquer outro biocombustível gerado nos municípios pertencentes à bacia em estudo.



## REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, K. C. de F. J.; SOUZA, R. G. V. de. Estimativa da evolução do uso final de energia elétrica no setor residencial do Brasil por região geográfica. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 383-408, abr./jun. 2021. DOI 10.1590/s1678-86212021000200532. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000200532>. Acesso em: 1 set. 2022.

AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. **Primeira revisão do Plano das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá 2010 a 2020**. Piracicaba: Agência das Bacias PCJ, 2018. Execução Técnica: Profill engenharia e ambiente e RHAMA consultoria pesquisa e treinamento. Disponível em: <https://plano.agencia.baciaspcj.org.br/documentos/etapa-1- plano-vigente>. Acesso em: 01 jan. 2020.

AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. **Ações de meio ambiente para combater a estiagem**: ações são realizadas desde 2016 nas Bacias PCJ por meio da Política de Mananciais PCJ. Piracicaba: Agência das Bacias PCJ, 2021. Disponível em: <https://agencia.baciaspcj.org.br/2021/06/04/acoes-de-meio-ambiente-para-combater-a-estiagem/>. Acesso em: 18 ago. 2023.

AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. **Água, efluentes e resíduos**: acesso à água e saneamento como prioridades. Piracicaba: Agência das Bacias PCJ, 2020. Disponível em: <https://agencia.baciaspcj.org.br/institucional2020/agua-efluentes-e-residuos/>. Acesso em: 18 ago. 2023.

AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. **Localização**. Piracicaba: Agência das Bacias PCJ, 2023a. Disponível em: <https://agencia.baciaspcj.org.br/2023/01/27/projeto-cantareira-pcj-tera-r875-milhoes-de-investimentos-nos-proximos-cinco-anos/>. Acesso em: 01 jul. 2023.

AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. **Projeto Cantareira PCJ terá R\$8,75 milhões de investimentos nos próximos cinco anos**. Piracicaba: Agência das Bacias PCJ, 2023b. Disponível em: <https://agencia.baciaspcj.org.br/2023/01/27/projeto-cantareira-pcj-tera-r875-milhoes-de-investimentos-nos-proximos-cinco-anos/>. Acesso em: 01 jul. 2023.

ALBRECHT, T. R.; CROOTOF, A.; SCOTT, C. A. The Water-Energy-Food Nexus: A systematic review of methods for nexus assessment. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 13, n. 4, p. 1-26, 1 abr. 2018. IOP Publishing. DOI 10.1088/1748-9326/aaa9c6. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c6>. Acesso em: 18 ago. 2021.

ALMEIDA, A. C. dos S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R. A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1441-1448, out. 2008. FapUNIFESP (SciELO). DOI 10.1590/s1413-70542008000500013 Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-70542008000500013>. Acesso em: 1 ago. 2022.

ALVARENGA, L. A.; MELLO, C. R. de; COLOMBO, A.; CUARTAS, L. A.; CHOU, S. C. Hydrological responses to climate changes in a headwater watershed. Hydrological responses to climate changes in a headwater watershed. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 6, p.647-657, dez. 2016. DOI 10.1590/1413-70542016406027716. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1413-70542016406027716>. Acesso em: 1 dez. 2020.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

AMAZON. **O que é uma API?**. São Paulo: Amazon Web Services, 2023. Disponível em: <https://aws.amazon.com/pt/what-is/api/#:~:text=API%20significa%20Application%20Programming%20Interface,de%20servi%C3%A7o%20entre%20duas%20aplica%C3%A7%C3%B5es>. Acesso em: 03 jul. 2023.

ANA. **Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos: avaliações e diretrizes para adaptação**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2016. 93 p. Gerência Geral de Estratégia (GGES).

ANA. **Relatório da ANA apresenta situação das águas do Brasil no contexto de crise hídrica**. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2017. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/noticias/relatorio-da-ana-apresenta-situacao-das-aguas-do-brasil-no-contexto-de-crise-hidrica>. Acesso em: 01 jan. 2020.

ANA. **Programa Produtor de água**, 2018. Brasília: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/3835762b-365f-4ac5-80fa-f5583ea914ac>. Acesso em: 01 jul. 2023.

ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: Informe Anual**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2019a. Disponível em: <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/bitstreams/eaf02e53-a58a-440d-a635-a8b1772bd94b/download>. Acesso em: 1 jan. 2021.

ANA. **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2019b. Disponível em: [https://biblioteca.ana.gov.br/asp/download.asp?codigo=134951&tipo\\_midia=2&iIndexSrv=1&iUsuario=0&obra=78093&tipo=1&iBanner=0&idioma=0](https://biblioteca.ana.gov.br/asp/download.asp?codigo=134951&tipo_midia=2&iIndexSrv=1&iUsuario=0&obra=78093&tipo=1&iBanner=0&idioma=0). Acesso em: 1 jan. 2021.

ANA. **HIDROWEB v3.2.7**. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2023. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 01 jan. 2023.

ANALYTICS, C. **Web of science**. 2023.

ANDREWS, T.; FORSTER, P. M.; BOUCHER, O.; BELLOUIN, N.; JONES, A.

Precipitation, radiative forcing and global temperature change. **Geophysical Research Letters**, Hoboken, v. 37, n. 14, p. 1-6, jul. 2010. American Geophysical Union (AGU). DOI 10.1029/2010gl043991. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/2010gl043991>. Acesso em: 1 dez. 2020.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 1.000**, de 07 de dezembro de 2021. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica; revoga as Resoluções Normativas ANEEL nº 414, de 9 de setembro de 2010; nº 470, de 13 de dezembro de 2011; nº 901, de 8 de dezembro de 2020 e dá outras providências. Brasília, DF: Diretoria Geral da ANEEL, 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2023.

ANEEL. **SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2023a. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>. Acesso em: 18 ago. 2023.

ANEEL. **Bandeiras Tarifárias**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2023b. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/bandeiras-tarifarias>. Acesso em: 28. ago. 2023.

ANJOS, M. M. dos. **O papel das energias renováveis no processo de transição energética do estado de minas gerais**: modelagem de sistemas energéticos para o horizonte 2030-2050. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

ARROYO, E. M. V. **Proposta metodológica para avaliação da vulnerabilidade da geração termelétrica a carvão mineral no Brasil às mudanças climáticas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

ASSUNÇÃO, J.; CHEIN, F. Climate change and agricultural productivity in Brazil: future perspectives. **Environment And Development Economics**, Cambridge, v. 21, n. 5, p. 581-602, 11 abr. 2016. Cambridge University Press (CUP). DOI 10.1017/s1355770x1600005x. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1017/s1355770x1600005x>. Acesso em: 1 set. 2021.

BARRETO, C. E. A. G.; WENDLAND, E.; MARCUZZO, F. F. N. Estimativa da evapotranspiração a partir de variação de nível estático de aquífero. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 52-61, mar. 2009.

BARROS, M. A. L.; RAMOS, G. A. **Políticas e legislação**. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/mamona/pre-producao/socioeconomia/politicas-e-legislacao>. Acesso em: 03 fev. 2023.

BARROS, T. D.; JARDINE, J. G. **Agroenergia**: Biodiesel. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2021. Elaborado para Agência Embrapa de

Informação Tecnológica. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/biodiesel>. Acesso em: 1 dez. 2023.

BELASQUE JUNIOR, J.; BERGAMIN FILHO, A.; BASSANEZI, R. B.; BARBOSA, J. C.; FERNANDES, N. G.; YAMAMOTO, P. T.; LOPES, S. A.; MACHADO, M. A.; LEITE JUNIOR, R. P.; AYRES, A. J.; MASSARI, C. A. Base científica para a erradicação de plantas sintomáticas e assintomáticas de Huanglongbing (HLB, Greening) visando o controle efetivo da doença. **Tropical Plant Pathology**, Brasília, v. 34, n. 3, p. 137-145, 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-56762009000300001>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/tpp/a/m7J3CV7LrZns4MdwgmJsP4J/>. Acesso em: 1 dez. 2023.

BLAIN, G. C.; ROLIM, G. de S.; BRUNINI, O. DIMES- Software para cálculo e interpretação do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) em Visual Basic for Application em ambiente MS-Excel. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, 5, 2005, Londrina. **Anais [...]**. Londrina: Sbi-Agro, 2005. p. 1-8.

BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S. H. W. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia. **Ciência & Engenharia**, Uberlândia, v. 17, n. 1/2, p. 27-32, 2008. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/cieng/article/view/730>. Acesso em: 1 dez. 2023.

BOTEON, M.; PAGLIUCA, L. G. Análise da sustentabilidade econômica da citricultura paulista. **Citrus Research & Technology**, Cordeirópolis, v. 31, n. 2, p. 101-106, 2010. Disponível em: <https://citrusrt.ccsm.br/article/596f398a0e8825e14b51e79d/pdf/citrusrt-31-2-101.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2023.

BRAGA, I. **Governo lança programa "Luz no Campo"**. Londrina: Folha de Londrina, 1999. Disponível em: <https://www.folhadelondrina.com.br/geral/governo-lanca-programa-luz-no-campo-230762.html?d=1>. Acesso em: 18 ago. 2023.

BRAGA, M. B.; CALGARO, M. **Sistema de Produção de Melancia: irrigação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. 20 p.

BRAJTERMAN, O. **Introdução de veículos elétricos e impactos sobre o setor energético brasileiro**. 2016. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, DF: Presidência da República, 1997. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9433.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm). Acesso em: 03 fev. 2020.

BRASIL. **Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001**. Dispõe sobre a Política Nacional

de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2001. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/leis\\_2001/l10295.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10295.htm). Acesso em: 7 dez. 2023.

BRASIL. **Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005**. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira; altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2005. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2005/lei/l11097.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/l11097.htm). Acesso em: 03 fev. 2020.

BRASIL. Secretaria de Assuntos Estratégicos. **Brasil 2040**: resumo executivo. Brasília, DF: Governo Federal, 2015. 62 p. Disponível em: [https://www.agroicone.com.br/\\$res/arquivos/pdf/160727143013\\_BRASIL-2040-Resumo-Executivo.pdf](https://www.agroicone.com.br/$res/arquivos/pdf/160727143013_BRASIL-2040-Resumo-Executivo.pdf). Acesso em: 10 dez. 2023.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Série Histórica**: água e esgotos. Brasília, DF: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 2023. Disponível em: <http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/>. Acesso em: 28. ago. 2023.

CARVALHO, N. L. de; BARCELLOS, A. L. de; BUBANS, V. E. Ácaros Fitófagos em plantas cultivadas e os fatores que interferem em sua dinâmica populacional. **Revista Técnico-Científica do IFSC**, Florianópolis, v. 7, n. 2, p. 4-17, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ifsc.edu.br/index.php/rtc/article/view/1783>. Acesso em: 1 dez. 2023.

CASTRO, C. M. de S. N. **Emprego de indicadores e índices de sustentabilidade na avaliação de medidas emergenciais de gestão da água: caso da bacia do Rio Descoberto, DF**. 2019. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

CBH-PCJ; CBH-PJ1. **Comitês PCJ realizam Simpósio para debater a gestão dos recursos hídricos**. Piracicaba: Comitês das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá e Comitê da Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba e Jaguari, 2020. Disponível em: [http://www.comitespcj.org.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2:comites-pcj-realizam-simposio-para-debater-a-gestao-dos-recursos-hidricos&catid=122:eventos&Itemid=345](http://www.comitespcj.org.br/index.php?option=com_content&view=article&id=2:comites-pcj-realizam-simposio-para-debater-a-gestao-dos-recursos-hidricos&catid=122:eventos&Itemid=345). Acesso em: 03 fev. 2020.

CEPEA; CNA. **PIB do Agronegócio Brasileiro**. Piracicaba: Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada; Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em: 18 set. 2023.

CETESB. **NORMA TÉCNICA P4.231**: Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2015. Disponível em: [https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2013/11/P4.231\\_Vinhaca\\_-Critérios-e-procedimentos-para-](https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2013/11/P4.231_Vinhaca_-Critérios-e-procedimentos-para-)

aplicacao-no-solo-agricola-3a-Ed-2a-VERSAO.pdf. Acesso em: 9 jan. 2023.

CHERUBIN, M. R. As estratégias para descarbonizar a produção de cana e torná-la mais competitiva. **Diálogos da Transição**, online, 2021. Entrevista concedida a Nayara Machado e Gabriel Chiappini. Disponível em: <https://epbr.com.br/as-estrategias-para-descarbonizar-a-producao-de-cana-e-torna-la-mais-competitiva/>. Acesso em: 1 dez. 2023.

CIAGRO. **CIAGRO ONLINE: Resenha Agrometeorológica**. Campinas: Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas e Instituto Agrônomo de Campinas, 2023. Disponível em: <http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/>. Acesso em: 03 fev. 2023.

CNPE. **Resolução Nº 3, de 20 de março de 2023**. Altera a Resolução CNPE nº 16, de 29 de outubro de 2018, que dispõe sobre a evolução da adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel vendido ao consumidor final, em qualquer parte do território nacional, e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2023. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-473383252>. Acesso em: 03 dez. 2023.

COLLAÇO, F. M. de A. **Sinergias entre o planejamento energético e o planejamento urbano**: estudo de caso do sistema de energia urbano da megacidade de São Paulo. 2019. Tese (Doutorado em Energia) - Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

CONSÓRCIO PCJ. **Nossa Área de Atuação**: as Bacias PCJ. Americana: Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, 2023a. Disponível em: <https://agua.org.br/nossa-area-de-atuacao/>. Acesso em: 18 jun. 2023.

CONSÓRCIO PCJ. **Ações do Programa de Proteção aos Mananciais do Consórcio PCJ tem potencial para ampliar a infiltração de água no solo em até 8,12 mil m<sup>3</sup>/ano com doação de mudas para reflorestamento**. Americana: Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, 2023b. Disponível em: <https://agua.org.br/noticias/acoes-do-programa-de-protacao-aos-mananciais-do-consorcio-pcj-tem-potencial-para-ampliar-a-infiltracao-de-agua-no-solo-em-ate-812-mil-m%C2%B3-ano-com-doacao-de-mudas-para-reflorestamento/>. Acesso em: 18 nov. 2023.

CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA. **Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, 2020 a 2035**: Relatório final. Piracicaba: Comitês PCJ/Agência das Bacias PCJ, 2020. 757 p. ISBN: 978-65-88688-01-4. Disponível em: [https://www.comitespcj.org.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=957:pb-pcj-2020-2035&catid=148:plano-das-bacias&Itemid=332](https://www.comitespcj.org.br/index.php?option=com_content&view=article&id=957:pb-pcj-2020-2035&catid=148:plano-das-bacias&Itemid=332). Acesso em: 1 dez. 2023.

COSSO, S. P. de A.; AMARAL, P. S. do; MARIOSIA, D. F. As mudanças do clima e os desafios da gestão dos recursos hídricos nas Bacias do PCJ. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, Tupã, v.16, n. 5, p. 19-34, 2020. Disponível em: [https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum\\_ambiental/article/](https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/)

download/2644/2426. Acesso em: 1 ago. 2022.

CPFL. **Bandeiras Tarifárias**. Campinas: Companhia Paulista de Força e Luz, 2023. Disponível em: <https://www.cpfl.com.br/bandeiras-tarifarias>. Acesso em: 28. ago. 2023.

CREMADES, R.; MITTER, H.; TUDOSE, N. C.; SANCHEZ-PLAZA, A.; GRAVES, A.; BROEKMAN, A.; BENDER, S.; GIUPPONI, C.; KOUNDOURI, P.; BAHRI, M.; CHEVAL, S.; CORTEKAR, J.; MORENO, Y.; MELO, O; KARNER, K.; UNGUREAN, C.; DAVIDESCU, S. O.; KROPF, B.; BROUWER, F.; MARIN, M. Ten principles to integrate the water-energy-land nexus with climate services for co-producing local and regional integrated assessments. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 693, p. 1-9, nov. 2019. Elsevier BV. DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.133662. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133662>. Acesso em: 1 dez. 2020.

CRUZ, J.; TUCCI, C. Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 111-124, 2008. DOI 10.21168/rbrh.v13n1.p111-124. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v13n1.p111-124>. Acesso em: 1 fev. 2023.

CRUZ, S. Milhares de painéis solares na represa de Sobradinho. **Revista Pesquisa Fapesp**, São Paulo, v. 275, n. 1, p. 3, jan. 2019. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/milhares-de-paineis-solares-na-represa-de-sobradinho/>. Acesso em: 1 dez. 2023.

CUNHA, J. P. B.; REIS, E. F.; COUTO, R. F.; HOLTZ, V.; MACHADO, T. A.; LEONÍDIO, D. M. Efeito de diferentes concentrações de biodiesel nas emissões gasosas de um trator agrícola em operação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal Of Agricultural Sciences**, Recife, v. 10, n. 4, p. 564-569, 30 dez. 2015. Revista Brasileira de Ciências Agrárias. DOI 10.5039/agraria.v10i4a5245. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/1190/119043229013.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2023.

DA ROCHA, G. C.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; FOLEGATTI, M. V.; LINO, J. S. Aspectos físicos e sociais da geografia da disponibilidade hídrica municipal no Brasil. **IRRIGA**, Botucatu, v. 18, n. 3, p. 402–414, 2013. DOI 10.15809/irriga.2013v18n3p402. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/1039>. Acesso em: 18 dez. 2023.

DAEE. **Hidrologia**: banco de dados hidrológicos. São Paulo: Departamento de Águas e Energia Elétrica, 2023. Disponível em: <http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/> Acesso em: 18 jun. 2023.

DAVIES, E. G. R.; SIMONOVIC, S. P. ANEMI: a new model for integrated assessment of global change. **Interdisciplinary Environmental Review**, Geneva, v. 11, n. 2/3, p. 127-161, 2010. DOI 10.1504/ier.2010.037903. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1504/ier.2010.037903>. Acesso em: 1 set. 2021.

DOURADO, G. **Cordel do Aquecimento Global**. Disponível em: <http://www.gustavodourado.com.br/cordel/Cordel%20do%20Aquecimento%20Global.htm>. Acesso em: 1 dez. 2023.

EASTERBROOK, S. M.; JOHNS, T. C. Engineering the Software for Understanding Climate Change. **Computing in Science & Engineering**, Piscataway, v. 11, n. 6, p. 65-74, nov. 2009. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI 10.1109/mcse.2009.193. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/mcse.2009.193>. Acesso em: 1 dez. 2022.

EICHENBERGER, A. M. R.; SOUZA, T. S. de; NASCIMENTO, P. dos S. Tendência e correlação da vazão e da precipitação pluviométrica no município de Valença – BA. **Geofronter**, Campo Grande, v. 6, n. 1, p. 1-20, 2020. Disponível em: <https://periodicosonline.uems.br/index.php/GEOF/article/view/5449>. Acesso em: 1 dez. 2023.

ELETOBRAS. **Procel**. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas Brasileiras S.A, 2023. Disponível em: <https://q.eletobras.com/pt/Paginas/Procel.aspx>. Acesso em: 7 dez. 2023.

ELLISON, D.; FUTTER, M. N.; BISHOP, K. On the forest cover–water yield debate: from demand- to supply-side thinking. **Global Change Biology**, West Sussex, v. 18, n. 3, p. 806-820, 6 dez. 2011. DOI 10.1111/j.1365-2486.2011.02589.x. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-2486.2011.02589.x>. Acesso em: 1 dez. 2023.

EMBRAPA. **Agricultura de baixa emissão de carbono**. Brasília, DF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-agricultura-de-baixo-carbono/sobre-o-tema>. Acesso em: 1 jan. 2024.

ERPEN, L.; MUNIZ, F. R.; MORAES, T. de S.; TAVANO, E. C. da R. Análise do cultivo da laranja no Estado de São Paulo de 2001 a 2015. **Revista Ipecege**, Piracicaba, v. 4, n. 1, p. 33-43, 1 mar. 2018. I-PECEGE. DOI 10.22167/r.ipecege.2018.1.33. Disponível em: <https://revista.ipecege.com/Revista/article/view/221/122>. Acesso em: 1 dez. 2023.

FALKENMARK, M. The Massive Water Scarcity now threatening Africa-Why isn't it being addressed? **Ambio: A Journal of the Human Environment**, Cham, v. 18, p.112-118, 1989.

FARD, M. D.; SARJOUGHIAN, H. S. Coupling WEAP and LEAP models using interaction modeling. *In*: SPRING SIMULATION MULTICONFERENCE, 1., 2020, Fairfax. **Anais [...]**. [S. l.]: Society for Modeling and Simulation International (SCS), 2020. p. 94-105. Disponível em: <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10231712>. Acesso em: 18 jun. 2023.

FARD, M. D.; SARJOUGHIAN, H. S.; MAHMOOD, I.; MOUNIR, A.; GUAN, X.; MASCARO, G. Modeling the Water-Energy Nexus for the Phoenix Active Management Area. *In*: WINTER SIMULATION CONFERENCE (WSC), 1, 2020,

Orlando. **Anais** [...]. [S. l.]: IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Xplore, 2020, p. 2317-2328. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9384054>. Acesso em: 1 dez. 2021.

FARIAS, O. G.; FRANCISCO, C. N.; SENNA, M. C. A. Avaliação de métodos de interpolação espacial aplicados à pluviosidade em Região Montanhosa No Litoral Sul do Estado Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 21, n. 13, p. 172-185, 21 set. 2017. DOI: 10.5380/abclima.v21i0.52065. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v21i0.52065>. Acesso em: 1 ago. 2021.

FIGUEIREDO, E. B. de; JAYASUNDARA, S.; BORDONAL, R. de O.; BERCHIELLI, T. T.; REIS, R. A.; WAGNER-RIDDLE, C.; LASCALA JUNIOR, N. Greenhouse gas balance and carbon footprint of beef cattle in three contrasting pasture-management systems in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 142, p. 420-431, jan. 2017. Elsevier BV. DOI 10.1016/j.jclepro.2016.03.132. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.132>. Acesso em: 1 set. 2021.

FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D. W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D. C.; MYHRE, G. NGANGA, J., PRINN, R., RAGA, G., SCHULZ, M, VAN DORLAND, R. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR M.; MILLER, H.L. (ed.). **Climate Change 2007: The physical science basis**. contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, United Kingdom And New York: Cambridge University Press, 2007. chap. 2, p. 130-234.

FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL (WORLD ECONOMIC FORUM). **The Global Competitiveness Report 2016–2017**. Geneva: World Economic Forum, 2016. 400 p.

FRANCISCO, V. L. F. dos S.; VEGRO, C. L. R.; ÂNGELO, J. A.; GHOBRI, C. N. Estrutura Produtiva da Cafeicultura Paulista. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 39, n. 8, p. 42-48, 2009. Disponível em: [https://www.cati.sp.gov.br/projetolupa/estudos\\_lupa/EstruturaProdutivaCafeicultura.pdf](https://www.cati.sp.gov.br/projetolupa/estudos_lupa/EstruturaProdutivaCafeicultura.pdf). Acesso em: 1 dez. 2023.

GERBENS-LEENES, P.W.; HOEKSTRA, A. Y.; VAN DER MEER, Th. H. **Water footprint of bio-energy and other primary energy carriers**. Delft: Unesco-IHE Institute for Water Education, 2008. 44 p. (The Value of Water Research Report Series N. ° 29). Disponível em: <https://www.waterfootprint.org/resources/Report29-WaterFootprintBioenergy.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2023.

GETIRANA, A.; LIBONATI, R.; CATALDI, M. Brazil is in water crisis: it needs a drought plan. **Nature**, Londres, v. 600, n. 7888, p. 218-220, 9 dez. 2021. DOI 10.1038/d41586-021-03625-w. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/d41586-021-03625-w>. Acesso em: 26 ago. 2023.

GONÇALVES, P. B. C. **Avaliação de medidas de gerenciamento da demanda no sistema hídrico do Descoberto e interligações com sistema Santa Maria/Torto**. 2018. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) -

Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

GONTIJO, G. M.; VALADÃO, L. T.; CARDOSO, F. C. de P.; MEDEIROS, R. L. de. **Uso conservativo da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília, DF: Emater-DF, 2019. 49 p. Disponível em: <https://emater.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/06/uso-conservativo-da-agua.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2023.

GOOSSE, H. **Climate System Dynamics and Modelling**. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.

GUIRAO, Â. C.; TEIXEIRA FILHO, J. Perspectiva do risco de impacto nos recursos hídricos das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá, em função do uso de sistemas de irrigação. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 28, n. 1, p. 127-143, 24 set. 2010. Universidade Estadual de Maringá. DOI 10.4025/bolgeogr.v28i1.8536. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/BolGeogr/article/view/8536/6104>. Acesso em: 1 dez. 2023.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: comparison with multilevel expert calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 4, n. 2, p. 135-143, abr. 1999. American Society of Civil Engineers (ASCE). DOI 10.1061/(asce)1084-0699(1999)4:2(135). Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(1999)4:2(135)). Acesso em: 1 set. 2020.

HARDOIM, P. C.; GONCALVES, A. D. M. A. Avaliação do potencial do emprego do biogás nos equipamentos utilizados em sistemas de produção de leite. *In*: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2003, Campinas. **Proceedings**. Online. Disponível em: [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022000000100053&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000100053&lng=en&nrm=abn). Acesso em: 18 jun. 2023.

HEAPS, C.G. LEAP: **The Low Emissions Analysis Platform (LEAP)**. [Software version: 2020.1.102] Somerville, MA, USA: Stockholm Environment Institute, 2022. Disponível em: <https://leap.sei.org>. Acesso em: 26 ago. 2023.

HENRIQUES, E. F. **Padrões Hidroclimatológicos em bacias de mesoescala de São Paulo**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências/Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

HERRERA, D. J. M. **Integração de modelos de quantidade e qualidade da água para avaliação de cargas contaminantes em afluentes de mananciais de abastecimento**. 2013. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Faculdade de Tecnologia-Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

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. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

HOFF, H. **Understanding the Nexus.** Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011. Background Paper for the Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. Disponível em: <https://www.sei.org/publications/understanding-the-nexus/>. Acesso em: 18 jun. 2021.

HOLBIG, C. A.; MAZZONETTO, A.; BORELLA, F.; PAVAN, W.; FERNANDES, J. M. C.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; CHOU, S. C. PROJETA platform: accessing high resolution climate change projections over Central and South America using the Eta model. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 26, n. 1, p. 71-81, 21 dez. 2018. DOI 10.31062/agrom.v26i1.26366. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v26i1.26366>. Acesso em: 2 ago. 2020.

IEMA. **Uso de água e emissões atmosféricas em Usinas Termoeletricas (UTES).** São Paulo: Instituto De Energia e Meio Ambiente, 2016. Série Termoeletricidade em Foco. Disponível em: [https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2016/01/FS-agua-emissoes\\_1.pdf](https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2016/01/FS-agua-emissoes_1.pdf). Acesso em: 26 ago. 2023.

INMET. **O que é Zona de Convergência do Atlântico Sul?: entenda agora!** Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, Ministério da Agricultura e Pecuária, 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/zona-de-convergencia-do-atlantico-sul-ZCAS>. Acesso em: 18 ago. 2023.

IPCC. **Climate change 2007: Synthesis Report.** Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genebra: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.

IPCC. **Climate Change 2013: Fifth Assessment Report.** Genebra: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.

IPCC. **Scenario Process for AR5: Representative Concentration Pathways (RCPs).** Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019. Disponível em: [https://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/ar5\\_scenario\\_process/RCPs.html](https://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html). Acesso em: 02 nov. 2023.

JONES, C.; LOWE, J.; LIDDICOAT, S.; BETTS, R. Committed terrestrial ecosystem changes due to climate change. **Nature Geoscience**, Londres, v. 2, n. 7, p. 484-487, 28 jun. 2009.

JORDÃO, E. P. Eficiência energética em tratamento de esgotos. **Revista DAE**, São Paulo, v. 56, n. 177, p. 15-19, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.014>. Acesso em: 1 dez. 2023.

JORDÃO, E. P. É possível economizar energia nas estações de tratamento de esgoto? **Revista DAE**, v. 63, n. 200, p. 6-12, 2015. DOI 10.4322/dae.2015.001. Disponível em: <https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/dae.2015.001>. Acesso em: 4 dez. 2024.

KAFRUNI, S. **Alerta hídrico: demanda mundial por água deve crescer 40% até 2030**. Brasília: Correio Braziliense, 2019. Disponível em: [https://www.correio braziliense.com.br/app/noticia/economia/2019/03/04/internas\\_economia,740975/alerta-hidrico-demanda-mundial-por-agua-deve-crescer-40-ate-2030.shtml](https://www.correio braziliense.com.br/app/noticia/economia/2019/03/04/internas_economia,740975/alerta-hidrico-demanda-mundial-por-agua-deve-crescer-40-ate-2030.shtml). Acesso em: 01 jan. 2020.

KNUTTI, R.; SEDLÁČEK, J. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. **Nature Climate Change**, Londres, v. 3, n. 4, p. 369-373, 28 out. 2012. Springer Science and Business Media LLC. DOI 10.1038/nclimate1716. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1716>. Acesso em: 1 ago. 2022.

KOUNDOURI, P.; PAPADAKI, L. Integrating Water-Food-Energy Nexus with Climate Services: Modelling and Assessment for a Case Study in Africa. *In*: KULSHRESHTHA, S. N. (ed.). **Sustainability Concept in Developing Countries**. London, UK: Intechopen, 2020. cap. 3, p. 96-116.

LEAP. **LEAP Help**: a short history of LEAP. Estocolmo: Stockholm Environment Institute, 2023a. Disponível em: [https://leap.sei.org/help/leap.htm#t=Concepts%2FHistory\\_of\\_LEAP.htm](https://leap.sei.org/help/leap.htm#t=Concepts%2FHistory_of_LEAP.htm). Acesso em: 26 ago. 2023.

LEAP. **LEAP Help**: introduction. Estocolmo: Stockholm Environment Institute, 2023b. Disponível em: <https://leap.sei.org/help/leap.htm#t=Concepts%2FIntroduction.htm>. Acesso em: 26 ago. 2023.

LEAP. **LEAP Help**: effects. Estocolmo: Stockholm Environment Institute, 2023c. Disponível em: [https://leap.sei.org/help/Supporting\\_Screens/Effects\\_Screen.htm](https://leap.sei.org/help/Supporting_Screens/Effects_Screen.htm). Acesso em: 26 ago. 2023.

LEB; ESALQ; USP. **Série de Dados Climatológicos do Campus Luiz de Queiroz de Piracicaba, SP**. Piracicaba: Departamento de Engenharia de Biosistemas, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2023. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/posto/> Acesso em: 18 jun. 2023.

LENDERINK, G.; BUIHAND, A.; VAN DEURSEN, W.: Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. **Hydrology and Earth System Science**, Goettingen, v. 11, n. 3, p. 1145-1159, 3 maio 2007. Copernicus GmbH. DOI 10.5194/hess-11-1145-2007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5194/hess-11-1145-2007>. Acesso em: 1 dez. 2020.

LUBER, G., PRUDENT, N. Climate change and human health. **Transactions of the American Clinical Climatological Association**, San Antonio, v. 1, n.120, p. 113-117, 2009.

LYRA, G.; MASIERO, F. C.; LANÇAS, K. P.; RAMOS, C. R. G.; GIACHINI, C. Consumo de colhedoras de cana. **Revista Cultivar Máquinas**, Pelotas, n.164, p.1-10, 2020. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/artigos/consumo-de-colhedoras-de-cana>. Acesso em: 20 nov. 2023.

MACHADO, M. A.; LOCALI-FABRIS, E. C.; COLETTA-FILHO, H. D. Candidatus

Liberibacter spp., agentes do huanglongbing dos citros. **Citrus Research & Technology**, Cordeirópolis, v. 31, n. 1, p. 25-35, 2010. Disponível em: <https://citrusrt.ccsm.br/article/10.5935/2236-3122.20100003/pdf/citrusrt-31-1-25.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2023.

MACIEL, S. A. **Análise da relação chuva-vazão na bacia hidrográfica do Rio Paranaíba, Brasil**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geografia/Geografia e Gestão de Território) - Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2007. 358 p.

MAPA. **Tecnologias do ABC+ (SPSabc)**. Brasília: Ministério da Agricultura e Pecuária, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/abc/tecnologias-do-abc-spsabc>. Acesso em: 1 dez. 2023.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. **Geosp – Espaço e Tempo** (Online), v. 19, n. 3, p. 485-494, 2016. DOI 10.11606/issn.2179-0892.geosp.2015.100879. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/100879>. Acesso em: 18 jun. 2023.

MARIANI, L.; GUARENGHI, M. M.; MITO, J. Y. L.; CAVALIERO, C. K. N.; GALVÃO, R. R. A. Análise de oportunidades e desafios para o Nexso Água- Energia. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 37, p.9-30, 17 maio 2016. Universidade Federal do Paraná. DOI 10.5380/dma.v37i0.45046. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v37i0.45046>. Acesso em: 18 jun. 2020.

MARQUELLI, W. A.; OLIVEIRA, A. S. de; COELHO, E. F.; NOGUEIRA, L. C.; SOUSA, V. F. de. Manejo da água de irrigação. In: SOUSA, V. F. de; MARQUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. (ed.). **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. Cap. 5. p. 157-232. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/55931/1/IRRIGACAO-e-FERTIRRIGACAO-cap5.pdf>. Acesso em: 1 jan. 2023.

MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. **Seleção de sistemas de irrigação para hortaliças**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2011. 24 p. (Circular Técnica 98). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/75698/1/ct-98.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2023.

MARTINS, M. B.; LANÇAS, K. P.; SARTORI, M. M. P.; TESTA, J. V. P. Consumo de combustível da colheita mecanizada de cana-de-açúcar em diferentes velocidades de deslocamento e rotações do extrator primário. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 32, n. 2, p. 115-119, 27 nov. 2017. EIA Energy in Agriculture. DOI 10.17224/energagric.2017v32n2p115-119. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17224/energagric.2017v32n2p115-119>. Acesso em: 1 fev. 2022.

MCGRATH, M. **Aumento das temperaturas tem acelerado redução do oxigênio nos oceanos, alertam cientistas**. São Paulo: BBC News Brasil, 2019. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-50700094>. Acesso em: 18 ago. 2023.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. In: 8TH CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8, 1993, Anaheim, **Proceedings** [...]. [S. l.], 1993. p. 179-184. Disponível em: [https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS\\_Relationship\\_Drought\\_Frequency\\_Duration\\_Time\\_Scales\\_1993.pdf](https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf). Acesso em: 1 set. 2020.

MEDEIROS, R. D. de; ROJAS, R. N. Z. **Informações básicas para elaboração de projeto de irrigação**. Boa Vista: Embrapa/CPAF-Roraima, 1997. 27 p. ISSN: 0101-9805. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/195443/1/doc00196.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2023.

MELO, L. B. **Análise integrada do nexos água-energia-emissões e mitigação das externalidades para o estado de Minas Gerais**. 2020. Tese (Doutorado em Ciências e Técnicas Nucleares) - Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

MESQUITA, C. M. de; MELO, E. M. de; REZENDE, J. E. de; CARVALHO, J. S.; FABRI JÚNIOR, M. A.; MORAES, N. C.; DIAS, P. T.; CARVALHO, R. M. de; ARAÚJO, W. G. de. **Manual do café: implantação de cafezais Coffea arábica L.** Belo Horizonte: Emater-Mg, 2016. Disponível em: [http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/publicacoes/livro\\_implantacao\\_cafezais.pdf](http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/publicacoes/livro_implantacao_cafezais.pdf). Acesso em: 1 dez. 2023.

MME. **Programa Luz para Todos**: sobre o Programa. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/destaques/Programa%20Luz%20para%20Todos/sobre-o-programa>. Acesso em: 18 ago. 2023.

MIRANDA, M. P. de. **Manual de Psilídeo Diaphorina citri**: medidas essenciais de controle. Araraquara: Fundecitrus, 2019. Disponível em: [https://www.fundecitrus.com.br/index.php/comunicacao/download\\_manual/62](https://www.fundecitrus.com.br/index.php/comunicacao/download_manual/62). Acesso em: 1 dez. 2023.

MOLINOS-SENANTE, M.; SALA-GARRIDO, R. Evaluation of energy performance of drinking water treatment plants: Use of energy intensity and energy efficiency metrics. **Applied Energy**, v. 229, p. 1095-1102, nov. 2018. DOI 10.1016/j.apenergy.2018.08.102. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918312728>. Acesso em: 4 dez. 2024.

MORAES, N. V. **Custo da escassez para a indústria em diferentes cenários de decisões do uso da água**. 2018. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas e Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

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. **Transactions of The Asabe**, St. Joseph, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). DOI 10.13031/2013.23153. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.23153>. Acesso em: 1 set. 2020.

NASA POWER PROJECT. **The POWER Project**: data access viewer. Hampton: NASA Langley Research Center, 2023. Disponível em: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. Acesso em: 18 jun. 2023.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models' part I — A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 10, n. 3, p. 282-290, abr. 1970. Elsevier BV. DOI 10.1016/0022-1694(70)90255-6. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6). Acesso em: 1 set. 2020.

NÓBREGA, M. T.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; PAZ, A. R. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, Goettingen, v. 15, n. 2, p. 585-595, 17 fev. 2011. DOI 10.5194/hess-15-585-2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-15-585-2011>. Acesso em: 18 jun. 2023.

OECD; FAO. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030**. Paris: OECD Publishing, 2021.

OLIVEIRA, L. C. de; TURCI, A. A. da S.; CAPITANI, D. H. D. Expansão da cana-de-açúcar e os impactos sobre culturas agroalimentares no estado de São Paulo. **Nucleus**, Ituverava, v. 16, n. 1, p. 259-275, 30 abr. 2019. Fundação Educational de Ituverava. DOI 10.3738/1982.2278.3527. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/287179982.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2023.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Base científica das mudanças climáticas**. Rio de Janeiro: COPPE Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014. 464 p. (Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas).

PEREIRA, G. S. **Aplicação do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e de Vazão (SSI) para Análise de Eventos de Seca na Bacia do Rio Suaçuí Grande/MG**. 2022. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) - Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Itabira, 2022. Disponível em: [https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/3444/1/00\\_DISSERTA%20%87%20%83O\\_Gabriela%20Pereira\\_V.corrigidaFINAL%2028.07.22%20-%20Gabriela%20Soares.pdf](https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/3444/1/00_DISSERTA%20%87%20%83O_Gabriela%20Pereira_V.corrigidaFINAL%2028.07.22%20-%20Gabriela%20Soares.pdf). Acesso em: 1 dez. 2023.

PEREIRA, S.; CAMACHO, J. R.; DIAS, G. P.; OLIVEIRA FILHO, D. Eficiência energética de equipamentos eletrorurais. *In*: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Proceedings** [...]. [S. l.]: Scielo Proceedings, 2002. p. 1-6. Disponível em:

[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100055&script=sci\\_arttext](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100055&script=sci_arttext). Acesso em: 18 jun. 2023.

PIACENTE, F.J.; SILVA, V. de C.; DELGADO, M. F. As bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá: a agroindústria canavieira local e a situação ambiental (2000-2005). *In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO AMBIENTAL E MEIO AMBIENTE-ENGEMA*, 1, 2016, São Paulo. **Anais [...]**. ENGEMA, 2016, p.1-16.

PIELKE, R. A.; WILBY, R. L. Regional climate downscaling: what's the point? **Eos, Transactions American Geophysical Union**, Washington, v. 93, n. 5, p. 52-53, 31 jan. 2012. American Geophysical Union (AGU). DOI 10.1029/2012eo050008. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2012EO050008>. Acesso em: 1 dez. 2023.

PROJETO MAPBIOMAS. **Coleções MAPBIOMAS**: Coleção [7.1] da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. São Paulo: Mapbiomas Brasil, 2023. Disponível em: <https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1>. Acesso em: 18 jun. 2023.

REZENDE, B. N. **Aplicação do modelo WEAP em cenários de alocação de água na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Baixo Pardo/Grande**. 2021. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2021.

RIBEIRO, T. B; ALBUQUERQUE, C. C.; LISBOA, L.; BATISTA, I. H.; ULIANA, E. M. Estimativa das vazões mínimas de referência ( $Q_{7,10}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{90}$ ) anuais e semestrais para a bacia do Rio Branco. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 22, 2017, Florianópolis. **Anais [...]**. [S. l.]: ABRHidro - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017. p. 1-8.

ROSSATTO, A. A. P.; KIRCHNER, J. H.; MARTINS, J. D.; SANDER, L. S.; AMARAL, W. N. B. do; PETRY, M. T. Partição da evapotranspiração da cultura da soja em diferentes cultivares em cada estágio fenológico. **Irriga**, Botucatu, v. 27, n. 3, p. 477-492, 30 set. 2022. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA. DOI 10.15809/irriga.2022v27n3p477-492. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2022v27n3p477-492>. Acesso em: 1 nov. 2023.

SALATI, P.; SOUZA, V. **Área de plantio de arroz e feijão encolheu mais de 30% em 16 anos, com o avanço da soja e do milho**. Rio de Janeiro: G1 Economia Globo Comunicação e Participações S. A, 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2022/11/15/area-de-plantio-de-arroz-e-feijao-encolheu-mais-de-30percent-em-16-anos-com-o-avanco-da-soja-e-do-milho.ghtml>. Acesso em: 1 dez. 2023.

SALUM, L. J. B. Alternativa energéticas para enfrentar a crise. *In: SEMINÁRIO DE ENERGIA NA AGRICULTURA*, 2, 2001, Uberaba. **Anais [...]**. Uberaba: Fazenda Energética da Cemig, 2001, p. 1.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; ZOLIN, C. A.; GONZÁLEZ, A. M. G. O.; FOLEGATTI, M. V. Simulação da Oferta e Demanda de Recursos Hídricos nas Bacias dos Rios Piracicaba, Capivarí e Jundiá: uma análise em dinâmica de sistemas. **IRRIGA**, Botucatu, v. 17, n. 3, p.284-298, 27 set. 2012. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA. DOI 10.15809/irriga.2012v17n3p284. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2012v17n3p284>. Acesso em: 1 ago. 2021.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo. Instituto de Economia Agrícola. Coordenadoria de Desenvolvimento Rural Sustentável. **Projeto LUPA 1995/96: Censo Agropecuário do Estado de São Paulo**. São Paulo: SAA: IEA: CDRS, 1997. Disponível em: <https://www.cati.sp.gov.br/projetolupa/index.php>. Acesso em: 28. ago. 2023.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo. Instituto de Economia Agrícola. Coordenadoria de Desenvolvimento Rural Sustentável. **Projeto LUPA 2007/08: Censo Agropecuário do Estado de São Paulo**. São Paulo: SAA: IEA: CDRS, 2009. Disponível em: <https://www.cati.sp.gov.br/projetolupa/index.php>. Acesso em: 28. ago. 2023.

SÃO PAULO (Estado). **Resolução Conjunta ANA/DAEE nº 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. São Paulo, SP: Diário Oficial Poder Executivo, 31 maio 2017. p. 42-43. Disponível em: <https://comitespcj.org.br/images/Download/Res-Conj-ANA-%20DAEE-925-2017.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2023.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo. Instituto de Economia Agrícola. Coordenadoria de Desenvolvimento Rural Sustentável. **Projeto LUPA 2016/2017: Censo Agropecuário do Estado de São Paulo**. São Paulo: SAA: IEA: CDRS, 2019. Disponível em: <https://www.cati.sp.gov.br/projetolupa/index.php>. Acesso em: 28. ago. 2023.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. **Infraestrutura e Meio Ambiente Cidadão SP**. São Paulo: Grupo de Dados Energéticos da Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do estado de São Paulo, 2023. Disponível em: <https://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portaicev2/intranet/Renovaveis/index.html>. Acesso em: 28. ago. 2023.

SCALOPPI, I. J. Exigências de energia para irrigação. **Irrigação e Tecnologia moderna**, Brasília, v. 21, n. 1, p. 13-17, 1985.

SCARI, M. E. **Cenários de consumo de energia elétrica para o setor residencial de Belo Horizonte**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

SCHUBERT, A. N. **Modelagem e caracterização da velocidade dos ventos no município de Botucatu-SP**. 2021. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na

Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2021.

SEADE. **SEADE Repositório**: população urbana e rural. São Paulo: FUNDAÇÃO Sistema Estadual de Análise de Dados, 2021. Disponível em: <https://repositorio.seade.gov.br/dataset/populacao-urbana-e-rural>. Acesso em: 18 jun. 2023.

SENTELHAS, P. C.; MONTEIRO, J. E. B. de A. Parte I – Introdução. *In*: MONTEIRO, J. E. B. A. (org.). **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET, 2009. cap. 1. p. 3-12. Disponível em: [https://www.embrapa.br/documents/1355291/37056285/Bases+climatol%C3%B3gicas\\_G.R.CUNHA\\_Livro\\_Agrometeorologia+dos+cultivos.pdf/13d616f5-cbd1-7261-b157-351eaa31188d?version=1.0](https://www.embrapa.br/documents/1355291/37056285/Bases+climatol%C3%B3gicas_G.R.CUNHA_Livro_Agrometeorologia+dos+cultivos.pdf/13d616f5-cbd1-7261-b157-351eaa31188d?version=1.0). Acesso em: 1 dez. 2023.

SHRESTHA, M. **Data analysis relied on Linear Scaling bias correction (V.1.0) Microsoft Excel file**. Berlim: ResearchGate, 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/289290337\\_Linear\\_Scaling\\_bias\\_correction\\_V10\\_Microsoft\\_Excel\\_file](https://www.researchgate.net/publication/289290337_Linear_Scaling_bias_correction_V10_Microsoft_Excel_file). Acesso em: 1 set. 2020.

SIDRA. **Acervo**. Rio de Janeiro: Sistema Ibge de Recuperação Automática, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/acervo#/S/Q>. Acesso em: 28. ago. 2023.

SIEBER, J. **Water Evaluation and Planning (WEAP) System** [Software version: 2023.0], Somerville, MA, USA: Stockholm Environment Institute, 2023. Disponível em: <https://www.weap21.org>. Acesso em: 26 ago. 2023.

SILVA, A. da; LIMA, M. F. de; COELHO, F. P.; SANTOS, A. J. dos. Energia solar fotovoltaica: estudo da diversificação da matriz energética brasileira com a inserção de usinas fotovoltaicas na superfície das represas das hidrelétricas. **Forscience**, Formiga, v. 10, n. 1, p.e00764, 4 jul. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.29069/forscience.2022v10n1.e764>. Acesso em: 1 dez. 2023.

SILVA, D. D. da; D'ANGIOLELLA, G. L. B.; FREITAS, M. de; LANA, A. M. Q.; GOMES, M. P.; RUBERT, O. A. V.; TEIXEIRA, A. de F.; PIOTTO, Z. C.; LISBOA, L.; SILVA, B. M. B. da; OLIVEIRA, I. de C. **Desenvolvimento de matriz de coeficientes técnicos para recursos hídricos no Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2011. 265 p. Relatório Final dos Coeficientes Técnicos de Recursos Hídricos das Atividades Industrial e Agricultura Irrigada. Relatório Técnico 6, apoio Fundação Banco do Brasil participação da Fundação de Apoio à Universidade de Viçosa. Disponível em: <https://www.terrabrasil.org.br/ecotecadigital/pdf/desenvolvimento-de-matriz-de-coeficientes-tecnicos-para-recursos-hidricos-no-brasil.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2023.

SILVA, E. **Cana rouba espaço da laranja**: área de citros em São Paulo diminuiu 21% nos últimos dez anos, enquanto os canaviais cresceram 33,6%. São Paulo: Folha de São Paulo, 2001. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/agrofolh/fa1906200102.htm>. Acesso em: 18 ago. 2023.

SILVA, F. B. **Modelagem hidrológica da bacia do rio Paracatu: avaliação do modelo WEAP como ferramenta de planejamento e gestão de recursos hídricos**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

SILVA, T. D. da. **Integração dos modelos QUAL2K e WEAP para modelagem da qualidade da água em corpos de água receptores de efluentes de ETEs em áreas de adensamento urbano no Distrito Federal**. 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Faculdade de Tecnologia- Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; COSTA, A. A.; CABRAL, S. L. Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre a Região Nordeste do Brasil, Amazônia e Bacia do Prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 28, n. 3, p. 317-330, set. 2013. DOI 10.1590/s0102-77862013000300008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-77862013000300008>. Acesso em: 1 dez. 2020.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; MARTINS, E. S. P. R.; OLIVEIRA, J. L.; COSTA, A. C.; NOBREGA, M. T.; SOUZA, S. A.; SILVA, R. F. V. Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 416-428, 1 abr. 2016. DOI 10.21168/rbrh.v21n2.p416-428. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n2.p416-428>. Acesso em: 1 dez. 2020.

SILVÉRIO, N. M. **Utilização de usinas solares flutuantes para operação coordenada com centrais hidrelétricas: estudo de caso das hidrelétricas da bacia do rio São Francisco**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Energia) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

SNIRH. **Portal de Metadados: Usos Consuntivos da Água no Brasil (1931-2040)**. Brasília: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, 2022a. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/5146c9ec-5589-4af1-bd64-d34848f484fd>. Acesso em: 28. ago. 2023.

SNIRH. **Portal de Metadados: Aproveitamentos hidrelétricos: usos consuntivos a montante**. Brasília: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, 2022b. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/c239a66f-6b41-4b7e-9790-86dbf817cd41>. Acesso em: 28. ago. 2023.

SORANSO, A. M.; GABRIEL FILHO, A.; LOPES, A.; SOUZA, E. G. de; DABDOUB, M. J.; FURLANI, C. E. A.; CAMARA, F. T. da. Desempenho dinâmico de um trator agrícola utilizando biodiesel destilado de óleo residual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 5, p. 553-559, out. 2008. FapUNIFESP (SciELO). DOI 10.1590/s1415-43662008000500018. Disponível

em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/QpStgYx8pDc7kFhhsybJk9r/?lang=pt#>. Acesso em: 1 dez. 2023.

SOUZA, A. *et al.* **Análise das instalações elétricas em uma empresa rural (produção de leite "B")**. Trabalho da disciplina Eletrificação Rural. Departamento de Engenharia da UFLA. Lavras: UFLA. 10p, 1998.

SOUZA, L. M. M. de. **Modelagem da disponibilidade hídrica em refinarias de petróleo brasileiras: o caso da REPLAN**. 2018. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SOUZA, H. T. de; PRUSKI, F. F.; BOF, L. H. N.; CECOM, P. R.; SOUZA, J. R. C. **SisCAH 1.0: sistema computacional para análises hidrológicas**. 1. ed. Brasília, DF: ANA- Agência Nacional de Águas; Viçosa, MG: UFV-Universidade Federal de Viçosa, 2009.

SVOBODA, M.; HAYES, M.; WOOD, D. **Standardized Precipitation Index User Guide**. Geneva: World Meteorological Organization, 2012. WMO-No. 1090.

TAVARES, L. A. F. **Avaliação da produtividade e demanda energética de duas cultivares de soja transgênica e uma não transgênica sob efeito dos preparos de solo**. 2012. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

TAVARES, L. A. F.; BENEZ, S. H.; SILVA, P. R. A. Características agronômicas e demanda energética de cultivares de soja sob efeito dos sistemas de preparo do solo. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 27, n. 4, p. 92-108, 2012.

TAVARES, M. S. de A.; CORRÊA, M. B. de R.; COSTA, R. de C.; LUCIANO, B. A. Eficiência Energética na Indústria do Petróleo, Gás e Biocombustíveis. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS, 6., 2011, Florianópolis, **Anais [...]**. Florianópolis: Associação Brasileira de Petróleo e Gás, 2011, p. 1-6. Disponível em: <http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/7/publicacoes/repositorio/trabalhos/10391020052011785.pdf>. Acesso em: 26 Ago. 2023.

TOMAZELA, J. M. **Pesquisa e tecnologia fazem o País bater recorde na exportação agrícola**. Itararé: Estadão conteúdo, 2019. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/estadao-conteudo/2019/12/08/pesquisa-e-tecnologia-fazem-o-pais-bater-recorde-na-exportacao-agricola.htm>. Acesso em: 01 jan. 2019.

TRIGUEIRO, H. O. **Estimativa da disponibilidade hídrica para usos múltiplos em reservatórios sob periódicas crises hídricas: estudo de caso**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

UDAETA, M. E. M.; INO, W. T.; GRIMONI, J. A. B.; GALVÃO, L. C.R. Proposição para o interior Paulista do Planejamento Integrado de Recursos. *In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL*, 5., 2004, Campinas. **Proceedings online** [...]. Campinas: Scielo, 2004. p. 1-10. Disponível em: [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022004000200040&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000200040&lng=en&nrm=abn). Acesso em: 26 Ago. 2023.

USGS. **Comparisons among 4 IPCC scenarios of Greenhouse Gas emissions**. Reston, VA: United States Geological Survey, 2014. Elaborada por Alaska Science Center. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/images/comparisons-among-4-ipcc-scenarios-greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 2 nov. 2023.

VEIGA, J. P. S.; ROMANELLI, T. L.; GIMENEZ, L. M.; BUSATO, P.; MILAN, M. Energy embodiment in Brazilian agriculture: an overview of 23 crops. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 72, n. 6, p. 471-477, dez. 2015. DOI 10.1590/0103-9016-2015-0188. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0188>. Acesso em: 1 set. 2021.

VELLOSO, M. F. A. **Possibilidade de geração híbrida hidro-solar na bacia do São Francisco**. 2017. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

VESCOVE, H. V.; TURCO, J. E. P. Consumo e custo de energia elétrica na cultura de citros irrigado por gotejamento e microaspersão, com três lâminas de água. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 1, p. 75–89, 2010. DOI 10.15809/irriga.2010v15n1p75. Disponível em: <https://doi.org/10.15809/irriga.2010v15n1p75>. Acesso em: 1 set. 2020.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R. de; CHOU, S. C.; YANAGI, S. N.; GOMES, J. L. Assessing climate change impacts on Upper Grande River Basin hydrology, Southeast Brazil. **International Journal of Climatology**, Oxford, v. 35, n. 6, p. 1054-1068, 12 maio 2014. Wiley. DOI 10.1002/joc.4038. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.4038>. Acesso em: 4 set. 2021.

VÖRÖSMARTY, C. J.; DOUGLAS, E. M.; GREEN, P. A.; REVENGA, C. Geospatial Indicators of Emerging Water Stress: an application to Africa. **Ambio: A Journal of the Human Environment**, Cham, v. 34, n. 3, p. 230-236, May 2005. DOI 10.1579/0044-7447-34.3.230. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1579/0044-7447-34.3.230>. Acesso em: 1 set. 2020.

WEAP. **History and Credits**: history. Estocolmo: Stockholm Environment Institute, 2023a. Disponível em: <https://www.weap21.org/index.asp?action=219#:~:text=The%20development%20and%20distribution%20of,under%20his%20supervision%20until%202001>. Acesso em: 26 ago. 2023.

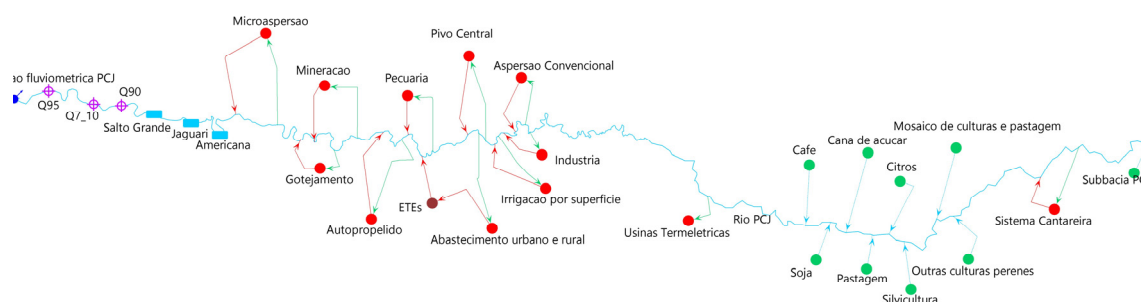
WEAP. **Soil Moisture Method**. Estocolmo: Stockholm Environment Institute, 2023b. Disponível em: [https://www.weap21.org/WebHelp/Two-bucket\\_Method.htm](https://www.weap21.org/WebHelp/Two-bucket_Method.htm). Acesso em: 26 ago. 2023.

WICAKSONO, A.; KANG, D. Nationwide simulation of water, energy, and food nexus: case study in South Korea and Indonesia. **Journal of Hydro-Environment Research**, Amsterdam, v. 22, n. 1, p. 70-87, jan. 2019. DOI: 10.1016/j.jher.2018.10.003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jher.2018.10.003>. Acesso em: 1 set. 2020.

XU, H.; WU, M.; **Water Availability Indices: a literature review**. Lemont: Argonne National Laboratory, Energy Systems Division, 2017. 33 p. Disponível em: [https://water.es.anl.gov/documents/Technical%20Report\\_%20Literature%20Review%20of%20Water%20Availability%20Indices\\_030317.ems\\_vs.pdf](https://water.es.anl.gov/documents/Technical%20Report_%20Literature%20Review%20of%20Water%20Availability%20Indices_030317.ems_vs.pdf). Acesso em: 1 set. 2023.

ZILOTTI, H. A. R. **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica**. 2012. (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

## APÊNDICE A – Modelo WEAP



O modelo WEAP desenvolvido para as bacias PCJ apresenta:

- a) 1 “Rio” denominado como Rio PCJ;
- b) 12 “demandas” denominadas como: 1) abastecimento urbano e rural; 2) mineração; 3) pecuária; 4) indústria; 5) irrigação por superfície; 6) aspersão convencional; 7) pivô central; 8) autopropelido; 9) gotejamento; 10) microaspersão; 11) Usinas Termelétricas; 12) Sistema Cantareira;
- c) 9 “sub-bacias hidrográficas” denominadas como: 1) pastagem; 2) café; 3) cana-de-açúcar; 4) soja; 5) citros; 6) silvicultura; 7) outras culturas perenes; 8) mosaico de culturas e pastagem e 9) sub-bacia PCJ;
- d) 1 “Estação de Tratamento de Esgoto”, denominada como ETEs;
- e) 9 “escoamento/infiltração” referentes às nove sub-bacias hidrográficas criadas, todos eles direcionados ao Rio PCJ;
- f) 12 “links de transmissão” referentes às retiradas para atender às doze demandas;
- g) 12 “vazões de retorno”, 11 (onze) delas referentes às demandas: abastecimento urbano e rural; mineração; pecuária; indústria; irrigação por superfície; aspersão convencional; pivô central; autopropelido; gotejamento; microaspersão e Sistema Cantareira; e 1 (uma) referente às Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). Com exceção da demanda abastecimento urbano e rural, todas as vazões de retorno foram direcionadas ao Rio PCJ. A vazão de retorno para essa demanda foi direcionada às ETEs, visto que nas bacias PCJ quase 100% do esgoto é coletado mesmo que ele não passe por tratamento adequado.
- h) 3 “hidrelétricas” denominadas: Americana, Jaguari e Salto Grande, que são hidrelétricas que operam nas bacias PCJ;

- i) 3 “vazões requeridas” denominadas:  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{7\_10}$  para o **cenário BAU** e 2 (duas) “vazões requeridas” denominadas  $Q_{90}$ , e  $Q_{95}$  para os **cenários RCP4.5** e **RCP8.5**. Essas vazões são usualmente adotadas como valor limite no processo decisório de emissão de outorgas de direito de uso da água.
- j) 1 “estação fluviométrica” denominada Estação fluviométrica PCJ.

Para cada elemento adicionado, exceto o elemento Rio PCJ, foram inseridos dados tabulados em planilhas eletrônicas salvas no formato CSV (Valores Separados por Vírgula) no programa Microsoft Excel. No caso do elemento Rio PCJ, não foi necessária a inserção de dados, visto que o modelo foi criado para simular a vazão desse elemento. Os dados anuais foram tabulados em duas colunas, a primeira apresentando os anos do horizonte temporal do modelo e a segunda apresentando o valor da variável.

Ano	Valor
1995	
1996	
...	...

Já os dados mensais foram tabulados em três colunas conforme o exemplo a seguir. A primeira coluna apresenta os anos do horizonte temporal do modelo que se repete conforme os 12 meses do ano, a segunda apresenta o mês de registro do dado e a terceira refere-se ao valor da variável.

Ano	Mes	Valor
1995	1	
1995	2	
1995	3	
1995	4	
1995	5	
1995	6	
1995	7	
1995	8	
1995	9	
1995	10	
1995	11	
1995	12	
...	...	...

Para cada elemento demanda adicionado, foram inseridos dados referentes à atividade anual, taxa anual de uso da água, variação mensal e consumo anual.

Os dados de demanda do **cenário BAU** foram provenientes das seguintes fontes:

a) **Abastecimento Urbano e Rural- Atividade anual**: População (Estimativas da população por município realizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE) e percentual da população urbana e rural dos municípios, advindo do Sistema Estadual de Análise de Dados (SEADE);

Taxa anual de uso da água: o valor per capita foi obtido por meio da divisão do uso consuntivo anual para o abastecimento urbano e abastecimento rural divulgado pela ANA no SNIRH, produto “Usos Consuntivos da Água no Brasil (1931-2040)”<sup>2</sup> pela população urbana e rural, respectivamente (m<sup>3</sup>/per capita);

Varição mensal: obtida por meio do produto “Aproveitamentos hidrelétricos: usos consuntivos a montante”<sup>3</sup> disponibilizado pela ANA no SNIRH. Esse produto apresenta dados mensais de vazão por demanda de uso consuntivo da água. O valor em percentual da variação mensal foi calculado por meio da divisão do valor registrado no mês para o uso consuntivo pelo valor anual (soma de todos os meses), multiplicando-se o resultado por 100, ou seja:

$$\text{Variação mensal (\%)} = \frac{\text{Valor mensal}}{\text{Valor anual}} \times 100;$$

Consumo anual: o percentual anual foi calculado utilizando os dados do produto “Usos Consuntivos da Água no Brasil (1931-2040)” divulgado pela ANA no SNIRH. Esse produto apresenta as vazões de retirada, consumo e retorno de cada uso consuntivo. Portanto, obtém-se o percentual de consumo ao dividir a vazão consumida pela vazão de retirada, multiplicando o resultado por 100.

b) **Mineração- Atividade anual**: A área (em km<sup>2</sup>) ocupada pela atividade de mineração foi obtida da Plataforma Mapbiomas<sup>4</sup>, coleção 7.1 de mapas de cobertura e uso da terra para o Brasil.

<sup>2</sup> Produto Demanda Hídrica por Município - 1931 a 2030 (anual) - Tabela

<sup>3</sup> Séries históricas de usos consuntivos a montante de aproveitamentos hidrelétricos - Resolução ANA nº 92/2021 (planilha)

<sup>4</sup> [https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama\\_set\\_language=pt-BR](https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR)

Taxa anual de uso da água: calculada por meio da divisão da vazão anual destinada à mineração obtida do produto “Usos Consuntivos da Água no Brasil (1931-2040)” pela área ocupada pela mineração ( $\text{m}^3/\text{km}^2$ );

Variação mensal: obtida do produto “Aproveitamentos hidrelétricos: usos consuntivos a montante” ao selecionar os dados para uso pela mineração. O valor em percentual da variação mensal foi calculado por meio da divisão do valor registrado no mês para o uso consuntivo pelo valor anual, multiplicando-se o resultado por 100;

Consumo anual: o percentual anual foi calculado utilizando os dados do produto “Usos Consuntivos da Água no Brasil (1931-2040)” ao dividir a vazão consumida pela vazão de retirada, multiplicando o resultado por 100.

- c) **Pecuária- Atividade anual**: O valor total foi obtido do Sistema IBGE de Recuperação Automática- SIDRA, “Tabela 3939 Efetivo dos rebanhos, por tipo de rebanho”<sup>5</sup>, selecionando-se a unidade territorial “Municípios” e na guia à esquerda “Início/Município” foi selecionada a caixa “desmarcar todos os elementos listados”, em seguida, no campo de busca, iniciou-se a busca por cada município inserido na área de drenagem das bacias PCJ, seguindo-se com marcação da sua respectiva caixa de seleção. Esse procedimento permite que a planilha de dados gerados contenha apenas os dados para a bacia hidrográfica em estudo, diminuindo o tamanho do arquivo e o tempo de processamento desse dado. Com o valor total “Efetivo dos rebanhos (cabeças)”, e o valor por “Tipo de rebanho” para as categorias: bovino, bubalino, equino, suíno total, caprino, ovino, galináceos-total (que incluem galos, frangas, frangos e pintos), galináceos- galinhas (que inclui apenas galinhas e codornas), procedeu-se com o cálculo do percentual de cada categoria referente ao valor total efetivo dos rebanhos. Dessa forma, a demanda pecuária foi dividida em subcategorias, inserindo-se cada tipo de rebanho como uma categoria;

---

<sup>5</sup> <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/3939>

Taxa anual de uso da água: calculada por meio da divisão da vazão anual destinada à pecuária (dessedentação animal) obtida do produto “Usos Consuntivos da Água no Brasil (1931-2040)” pelo valor total “Efetivo dos rebanhos (cabeças)” ( $m^3/cabeça$ );

Variação mensal: obtida do produto “Aproveitamentos hidrelétricos: usos consuntivos a montante” ao selecionar os dados de uso para dessedentação animal. O valor em percentual da variação mensal foi calculado por meio da divisão do valor registrado no mês para o uso consuntivo pelo valor anual, multiplicando-se o resultado por 100;

Consumo anual: o percentual anual foi calculado utilizando os dados do produto “Usos Consuntivos da Água no Brasil (1931-2040)” ao dividir a vazão consumida pela vazão de retirada, multiplicando o resultado por 100.

- d) **Indústria- Atividade anual**: Havia dados sobre o número de indústrias por município apenas para o período 2006-2019, obtidos do site do Grupo de Dados Energéticos da Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do estado de São Paulo <sup>6</sup> ao analisar o número de consumidores de energia elétrica da classe de consumo “Industrial”. Para os anos 1995 e 1996, o valor foi calculado utilizando dados obtidos do SIDRA para o número de indústria de transformação do estado de São Paulo <sup>7</sup> multiplicado pelo percentual localizado na região de Campinas (14,8%) extraído do documento “Fórum São Paulo Século 21: diagnósticos Setoriais – Indústria”. Os dados para o período 1997 a 2005 foram preenchidos por interpolação;

Taxa anual de uso da água: obtida por meio da divisão da vazão anual para uso industrial disponível em “Usos Consuntivos da Água no Brasil (1931-2040)” pelo número de indústrias ( $m^3/unidade\ industrial$ );

Variação mensal: obtida do produto “Aproveitamentos hidrelétricos: usos consuntivos a montante” ao selecionar os dados referentes ao uso industrial. O valor em percentual da variação mensal foi calculado

---

<sup>6</sup> <https://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalecv2/intranet/Renovaveis/index.html>

<sup>7</sup> <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pia-empresa/tabelas>

por meio da divisão do valor registrado no mês para o uso consuntivo pelo valor anual, multiplicando-se o resultado por 100;

Consumo anual: o percentual anual foi calculado utilizando os dados do produto “Usos Consuntivos da Água no Brasil (1931-2040)” ao dividir a vazão consumida pela vazão de retirada, multiplicando o resultado por 100.

- e) **Usinas Termelétricas - Atividade anual**: Não houve entrada de dados. Há a opção de selecionar “*No data entered at this level*”, que significa “sem entrada de dados neste nível”;

Taxa anual de uso da água: corresponde à vazão anual utilizada por termelétricas localizadas nos municípios pertencentes às bacias PCJ, valor retirado do produto “Usos Consuntivos da Água no Brasil (1931-2040)” disponibilizado pela ANA;

Variação mensal: não foi calculada, esse campo foi preenchido com o valor zero;

Consumo anual: considerado como 100% para toda a série histórica.

- f) **Sistema Cantareira- Atividade anual**: Não houve entrada de dados. Há a opção de selecionar “*No data entered at this level*”, que significa “sem entrada de dados neste nível”;

Taxa anual de uso da água: corresponde a soma da vazão anual trasvasada para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) somada à vazão defluente para as bacias PCJ. Para o período de 2000 a 2011, as informações quanto a vazão de trasvase para a RMSP e a defluente para as bacias PCJ foram retiradas do site Portal dos Mananciais<sup>8</sup> mantido pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp). Para o período anterior, de 1995 a 1999, foi repetido os valores obtidos para o ano 2000 (primeiro ano com dados). Enquanto para o espaço temporal 2011 a 2017, as informações foram retiradas dos boletins presentes no site Sala de Situação PCJ<sup>9</sup>. Para os anos 2018 e 2019, as informações foram retiradas de boletins mensais

---

<sup>8</sup> <https://mananciais.sabesp.com.br/HistoricoSistemas?Sistemald=0>

<sup>9</sup> <http://www2.ana.gov.br/Paginas/boletinsmonitoramentoanteriores.aspx>

divulgados na página da ANA<sup>10</sup>, local no qual consta os boletins para os anos mais recentes. Os dados disponíveis estavam na escala temporal diária ou mensal e foram transformados para a escala anual;

Variação Mensal: o valor em percentual da variação mensal foi calculado por meio da divisão do valor registrado no mês pelo valor anual, multiplicando-se o resultado por 100;

Consumo anual: calculado em percentual, consistiu na divisão do valor registrado no mês para a vazão trasvasada para a RMSP pela soma dessa vazão a vazão defluente para as bacias PCJ, multiplicando-se o resultado por 100.

- g) **Irrigação por superfície, aspersão convencional, pivô central, sistema autopropelido, gotejamento e microaspersão- Atividade anual**: Cada método/sistema de irrigação apresenta um percentual de uso em relação ao todo. Esse percentual foi utilizado para calcular a área irrigada por método/sistema de irrigação.

Para o ano 1995, a área irrigada e os métodos/sistemas de irrigação aplicados não constam no SIDRA. A obtenção desses dados é possível por meio do acesso à página do IBGE<sup>11</sup>. Após acessar a página, deve-se selecionar a pasta referente ao estado no qual se encontra a bacia hidrográfica. Feito isso, deve-se selecionar o arquivo “Tab\_18.zip”, pois é na planilha eletrônica presente neste arquivo compactado que se encontram as informações referentes à área irrigada por município e os métodos/sistemas de irrigação utilizados. É importante ressaltar que para o ano de 1995 não há dados para os sistemas de irrigação: gotejamento e microaspersão; portanto, deve-se digitar o valor zero para esse ano. Para as bacias PCJ, foram selecionadas as pastas “São Paulo” e “Minas Gerais”, e, posteriormente, foram selecionados os dados para os municípios inseridos na área de drenagem da bacia.

---

<sup>10</sup> <https://www.gov.br/ana/pt-br/sala-de-situacao/sistema-cantareira/colecao-para-boletim-mensal-do-sistema-cantareira>

<sup>11</sup> [https://ftp.ibge.gov.br/Censo\\_Agropecuario/Censo\\_Agropecuario\\_1995\\_96/](https://ftp.ibge.gov.br/Censo_Agropecuario/Censo_Agropecuario_1995_96/)

No SIDRA, é possível obter esses dados (área irrigada e métodos de irrigação empregados) para os anos 2006 e 2017, anos nos quais foram realizados o Censo Agropecuário, que é a principal fonte de dados brasileira sobre a agricultura e a pecuária. Dessa forma, é necessário o preenchimento de dados para os demais anos da série. Para esse fim, a interpolação foi o método utilizado, empregando-se o programa Microsoft Excel. O preenchimento de dados para os anos: 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004 e 2005 ocorreu por meio da interpolação de dados dos anos 1995 (inicial) e 2006 (final), enquanto para os anos 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 e 2016, a interpolação foi realizada entre os dados dos anos 2006 (inicial) e 2017 (final). Já os anos 2018 e 2019 foram preenchidos com dados obtidos por meio de previsão (projeção futura), baseada na série de dados 1995-2017, utilizando o Microsoft Excel, função Planilha de Previsão, na qual um valor futuro é estimado com base nos valores observados usando a regressão linear.

Taxa anual de uso da água: obtida por meio da divisão da vazão anual para uso na irrigação disponível em “Usos Consuntivos da Água no Brasil (1931-2040)” pela área irrigada ( $m^3$ /hectares) total da bacia (100%). Em seguida, multiplicou-se esse valor pelo percentual correspondente ao método/sistema de irrigação obtido no item anterior. Dessa forma, obteve-se o resultado individual de cada método/sistema de irrigação;

Varição mensal: obtida do produto “Aproveitamentos hidrelétricos: usos consuntivos a montante” ao selecionar os dados referentes ao uso na irrigação, o valor em percentual da variação mensal foi calculado por meio da divisão do valor registrado no mês pelo valor anual, multiplicando-se o resultado por 100;

Consumo anual: o percentual anual foi calculado utilizando os dados do produto “Usos Consuntivos da Água no Brasil (1931-2040)” ao dividir a vazão consumida pela vazão de retirada, multiplicando o resultado por 100.

Os dados de demanda dos **cenários RCP4.5 e RCP8.5** cuja escala temporal é 2020-2070, foram projetados baseados nos dados registrados no **cenário BAU** (1995-2019), utilizando o Microsoft Excel, função Planilha de Previsão.

Para cada elemento sub-bacia hidrográfica adicionado, houve a inserção de dados climáticos, dados de uso e cobertura da terra, valores de coeficiente de cultivo, valores de latitude e valores para os parâmetros relacionados à infiltração e ao escoamento superficial e subsuperficial da água precipitada.

Os dados climáticos, em escala mensal, inseridos no modelo criado para as bacias PCJ foram: precipitação, temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, fração de cobertura de nuvens e albedo.

Os dados mensais de precipitação (mm) das bacias PCJ referentes ao **cenário BAU** foram obtidos do site do DAEE. Foram adquiridos dados de 20 estações pluviométricas cujas informações estão presentes no Quadro apresentado a seguir. A média entre as 20 estações foi calculada após o preenchimento de dados faltantes (falhas).

<b>Estação</b>	<b>Município</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Altitude</b>
D3-027	Monte Alegre do Sul	-22,69	-46,67	750 m
D3-023	Amparo	-22,72	-46,84	660 m
D3-036	Pinhalzinho	-22,79	-46,58	880 m
D3-042	Jaguariúna	-22,70	-46,98	570 m
D3-046	Morungaba	-22,87	-46,79	750 m
D3-054	Joanópolis	-22,93	-46,27	920 m
D4-012	Rio Claro	-22,41	-47,56	615 m
D4-035	Analândia	-22,13	-47,67	643 m
D4-036	Itirapina	-22,30	-47,74	610 m
D4-043	Corumbataí	-22,22	-47,62	592 m
D4-044	Campinas	-22,87	-47,08	710 m
D4-046	Campinas	-22,78	-47,04	600 m
D4-068	Rio das Pedras	-22,87	-47,61	698 m
D4-069	Capivari	-23,00	-47,51	508 m
D4-099	Artur Nogueira	-22,57	-47,15	667 m
D4-104	Piracicaba	-22,72	-47,65	491 m
E3-015	Itatiba	-22,98	-46,83	740 m
E3-099	Nazaré Paulista	-23,18	-46,40	810 m
E4-015	Indaiatuba	-23,08	-47,22	630 m
E4-124	Indaiatuba	-23,17	-47,13	700 m

As falhas presentes na série histórica mensal de precipitação foram preenchidas por meio do método de Regressão Linear Múltipla (RLM), considerando as seguintes premissas: o coeficiente de correlação linear ( $r$ ) entre os dados das estações pluviométricas deve ser superior ou igual à 0,6; na estimativa, deve-se utilizar dados de no mínimo três estações vizinhas, não podendo a distância entre elas ser superior à 100 km. Os cálculos de RLM foram realizados no programa Minitab®.

Os dados mensais de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) para as bacias PCJ referentes ao **cenário BAU** foram obtidos do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO) por meio do portal CIIAGRO ONLINE<sup>12</sup> ao acessar à Resenha Agrometeorológica para a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRH) Piracicaba, Capivari e Jundiaí. Nele, a temperatura média é apresentada por município e ao selecionar a UGRH, aparecerão somente os dados dos municípios pertencentes à bacia hidrográfica em questão. Por conta disso, procedeu-se com o cálculo da média entre os valores registrados para os municípios pertencentes às bacias PCJ.

Os dados mensais de umidade relativa (%), velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ), fração de cobertura de nuvens (%) e albedo (adimensional) para as bacias PCJ referentes ao **cenário BAU** foram obtidos da Plataforma NASA *Project*<sup>13</sup> comunidade de dados *Agroclimatology* (Agroclimatologia) em formato CSV. Foram adquiridos dados de 20 pontos, cujas coordenadas geográficas foram as mesmas das estações pluviométricas do DAEE. Após a obtenção dos dados para os 20 pontos, procedeu-se com o cálculo da média.

Os dados de precipitação, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento para **os cenários RCP4.5 e RCP8.5**, que correspondem aos cenários de mudança climática, foram primeiro obtidos em escala temporal diária na Plataforma Web Projeta<sup>14</sup> -“*Projeções de Mudança do Clima para a América do Sul Regionalizadas pelo Modelo Eta*”, produto SudesteD2-BR, HADGEM2-ES, resolução de 5 km, requisitando-se os dados por Interface de Programação de Aplicação (API), que gera um link que pode ser aberto no Excel conforme sequência de passos apresentados a seguir.

---

<sup>12</sup> <http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/>

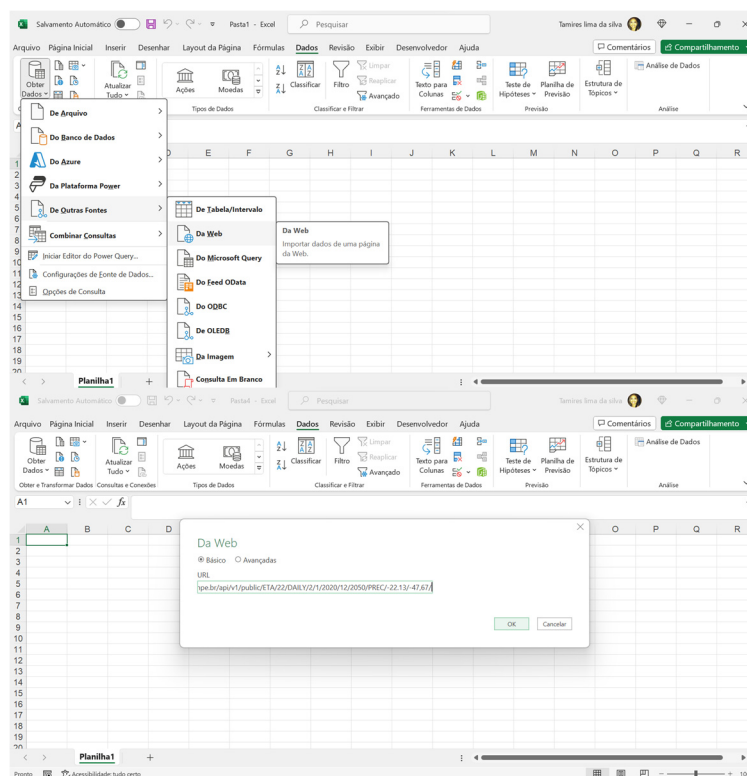
<sup>13</sup> <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

<sup>14</sup> <https://projeta.cptec.inpe.br/#/api>

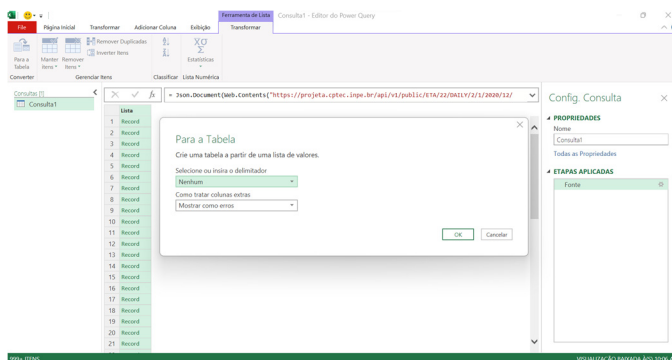
1) Na Plataforma Web Projeta, selecionou-se o cenário climático, a frequência (diária), o mês e ano inicial (janeiro de 2020) e final (dezembro de 2020) e a variável, em seguida, foram inseridas as coordenadas da localização para o qual se desejava obter o dado e por fim, clicou-se em “Gerar URL”.



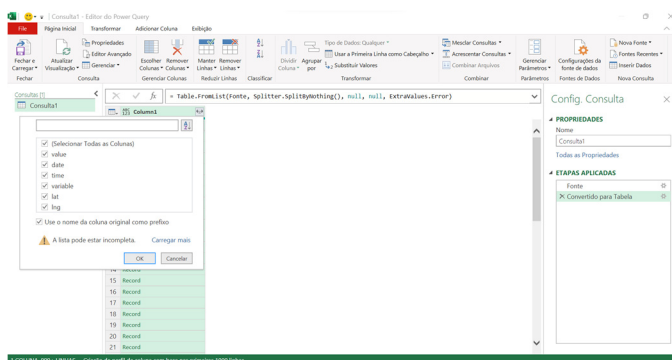
2) No Excel, selecionou-se “Dados”, “Obter Dados Externos”, “De Outras Fontes” e “Da Web”. Em seguida, a URL gerada na requisição junto à Na Plataforma Web Projeta foi inserida, clicando-se em OK para que ela foi carregada.



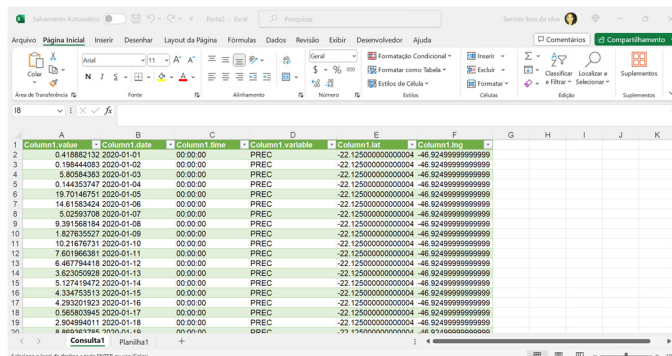
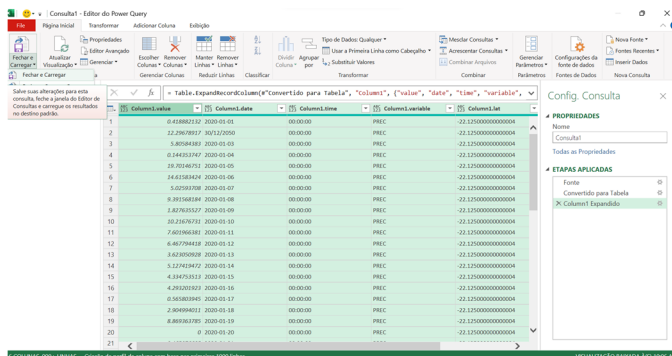
3) Com a URL carregada no Editor do Power Query, movimentou-se o mouse até o menu superior, clicando em “Para a Tabela”, em seguida, em OK, sem modificar as opções que apareceram.



4) Selecionou-se “Selecionar todas as colunas” e “Use o nome da coluna original como prefixo” ao clicar no ícone que indica expansão (duas setas opostas) da célula “Column 1”.



5) Posteriormente, selecionou-se a opção “Fechar e Carregar”. Dessa forma, os dados foram carregados.



Para as bacias PCJ, da Plataforma Web Projeta, foram adquiridos dados para quatro pontos de localização geográfica, cuja localização correspondeu a das estações pluviométricas do DAEE: D4-035, D3-054, D3-036 e D4-099. Essas quatro estações foram selecionadas a fim de cobrir toda a área da bacia hidrográfica que se estende dos paralelos 22° e 23,5° S e meridianos 46° e 49° O. Esses dados após passarem por correção de viés, foram agrupados em escala mensal, que é a escala temporal adotada no modelo PCJ. Na correção de viés pelo método de Escalonamento Linear dos dados do Modelo Climático Regional Eta-HadGEM2-ES, foram utilizados dados diários observados obtidos da Plataforma NASA *Power Project*. Os detalhes desse procedimento encontram-se no Apêndice E.

Destaca-se que para os **cenários RCP4.5 e RCP8.5** não foram obtidos dados de fração de cobertura de nuvens (%) e albedo, visto que eles não estão disponíveis na Plataforma NASA *Power Project* em escala diária, o que inviabilizaria o procedimento de correção de viés. Dessa maneira, o valor de albedo foi considerado 0 e o valor da fração de cobertura de nuvens, foi considerado 1, que representa uma situação de céu claro (sem nuvens), uma vez que esse é o valor pré-determinado pelo WEAP caso não haja inserção de dados.

Os valores de área, que representam os usos e cobertura da terra, das nove sub-bacias inseridas no modelo criado para as bacias PCJ para o **cenário BAU** foram retirados da Plataforma Mapbiomas, coleção 7.1 de mapas de cobertura e uso da terra para o Brasil, sendo obtidos por meio de um recorte espacial utilizando um *shapefile* das bacias PCJ e a Plataforma *Google Earth Engine*. Destaca-se que ao solicitar dados junto à Plataforma Mapbiomas utilizando o *Google Earth Engine*, um arquivo CSV contendo a série histórica dos dados de cobertura e uso da terra é obtido, sendo ele dividido em classes. Essas classes foram mantidas com a nomenclatura original ou agrupadas recebendo uma nova denominação conforme consta na descrição a seguir de cada sub-bacia hidrográfica.

As áreas do **cenário BAU** das sub-bacias cana-de-açúcar, café, soja, citros, pastagem, silvicultura e outras culturas perenes corresponderam às áreas das classes de mesmo nome geradas pela Plataforma Mapbiomas.

Para a área da sub-bacia mosaico de culturas e pastagem no **cenário BAU** foi realizada a soma das classes definidas pelo Mapbiomas como “mosaico de culturas” e “mosaico de agricultura e pastagem”. Essa área foi então dividida em 11 subguias equivalentes em partes (percentuais), que corresponderam às dez maiores

culturas cultivadas nas bacias PCJ, que são: abacate, arroz, banana, batata, feijão, mandioca, manga, milho, tomate e uva, e uma parte que corresponde a outras culturas (percentual remanescente).

Para chegar ao valor em percentual da participação de cada cultura, utilizou-se a área plantada presente no produto disponibilizado pelo IBGE no SIDRA: “Produção Agrícola Municipal”, subproduto “Lavouras temporárias e permanentes<sup>15</sup>”. Foram considerados os dados (1995-2019) para os municípios inseridos na área de drenagem das bacias PCJ. As áreas plantadas com lavouras temporárias e permanentes, que é apresentada por cultura, foram ranqueadas da maior para menor excluindo-se àquelas já consideradas como sub-bacias (cana-de-açúcar, café, soja e citros (laranja, limão e tangerina)), procedimento repetido por ano. Em seguida, somou-se as áreas, valor correspondente ao valor total. Posteriormente, as áreas plantadas que ocupavam da 1ª à 10ª posição foram divididas pelo valor total e o resultado multiplicado por 100 a fim de obter-se o valor em percentual de cada cultura. As áreas a partir da 11ª colocação até a última posição foram somadas, e esse valor correspondeu à parte denominada como outras.

A área da sub-bacia PCJ foi considerada como sem dados. Procedeu-se então com a sua divisão em 8 (oito) subguias que corresponderam às áreas individuais (valor em km<sup>2</sup>) das classes de uso e cobertura da terra: formação florestal; formação campestre; formação savânica; campo alagado e área pantanosa; outras áreas não vegetadas; rio, lago e oceano; afloramento rochoso; e infraestrutura urbana. Aplica-se esse procedimento quando há disponibilidade de dados exatos quanto a área de cada classe de cobertura e uso da terra e deseja-se agrupar as classes como uma única sub-bacia.

Para os **cenários RCP4.5** e **RCP8.5** as áreas das nove sub-bacias hidrográficas foram projetadas utilizando o Microsoft Excel (função Planilha de Previsão) levando-se em consideração sua área total de 15.378 km<sup>2</sup>.

Para o modelo criado para as bacias PCJ, para todos os cenários, foram empregados os valores de coeficiente de cultivo (Kc) apresentados no Quadro a seguir.

---

<sup>15</sup> <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/5457>

Sub-bacia	Kc inicial	Kc médio	Kc final
1) Mosaico de culturas e pastagem			
Abacate (sem cobertura de chão)	0,60	0,85	0,75
Arroz	1,05	1,20	0,90-0,60
Banana (1° ano)	0,50	1,10	1,00
Batata	-	1,15	0,75
Feijão (verde)	0,50	1,05	0,90
Mandioca (ano 2)	0,30	1,10	0,50
Manga	-	-	0,90
Milho (grão)	-	1,20	0,60-0,35
Tomate	-	1,15	0,70-0,90
Uva (mesa ou passas)	0,30	0,85	0,45
Outras culturas	-	-	1,00
2) Sub-bacia PCJ			
Formação Florestal	1	1	1
Formação Savânica	1	1	1
Formação Campestre	1	1	1
Campo Alagado e Área Pantanosa	1	1	1
Outras Áreas não Vegetadas	1	1	1
Rio, Lago e Oceano	1	1	1
Afloramento Rochoso	1	1	1
Infraestrutura Urbana	1	1	1
3) Café (com pouca cobertura de chão)			
3) Café (com pouca cobertura de chão)	0,90	0,95	0,95
4) Citros (sem cobertura de chão, 70% de dossel)	0,70	0,65	0,70
5) Cana-de-açúcar	0,40	1,25	0,75
6) Pastagem (pasto rotativo)	0,40	0,85-1,05	0,85
7) Soja	-	1,15	0,50
8) Silvicultura	1	1	1
9) Outras Culturas Perenes	1	1	1

Como as bacias PCJ estão localizadas entre as latitudes -22,00 e -23,50. Esse intervalo foi levando em consideração na definição dos valores de latitude para cada sub-bacia hidrográfica criada. Eles são apresentados no Quadro abaixo.

<b>Sub-bacia</b>	<b>Latitude</b>
Citros	-23,08
Café	-22,50
Mosaico de Culturas e Pastagem	-22,00
Silvicultura	-22,50
Outras Culturas Perenes	-22,30
Pastagem	-22,12
Soja	-22,70
Cana-de-açúcar	-22,30
Bacias PCJ	-22,00

Por fim, os valores para os parâmetros relacionados à infiltração e ao escoamento superficial e subsuperficial da água das chuvas nas sub-bacias hidrográficas inseridos em todos os cenários foram:

- a) **Capacidade de água disponível (mm ano<sup>-1</sup>)** (*Soil Water Capacity* no WEAP)- Considerado 2.000 mm para as sub-bacias hidrográficas: citros, café, cana-de-açúcar, soja, mosaico de culturas e pastagem, silvicultura e outras culturas perenes. Considerado 3.000 mm para a sub-bacia hidrográfica pastagem. Para a sub-bacia PCJ, foi considerado 3.000 mm para as subguias: formação florestal, campo alagado e área pantanosa, formação campestre e formação savânica; e 2.000 mm para as subguias: outras áreas não vegetadas, rio, lago e oceano, afloramento rochoso e infraestrutura urbana. Esses valores dizem respeito à profundidade do solo.
- b) **Capacidade de retenção de água na camada mais profunda do solo (mm ano<sup>-1</sup>)** (*Deep Water Capacity* no WEAP)- Considerado 1.000 mm para todas as sub-bacias hidrográficas.
- c) **Fator de resistência ao escoamento (1 a 1.000)** (*Runoff Resistance Factor* no WEAP)- Considerado de 2 a 900 para todas as sub-bacias hidrográficas.. Um valor alto irá resultar em um menor escoamento superficial e vice-versa.

- d) **Direção preferencial do fluxo (0 a 1)** (*Preferred Flow Direction* no WEAP)- Considerado como 0,15 para todas as sub-bacias hidrográficas. Esse é um valor predefinido pelo programa WEAP e indica que o fluxo se movimenta nas direções horizontal e vertical, posto que, o valor 1 indica uma movimentação de fluxo completamente horizontal, enquanto o valor 0 indica uma movimentação de fluxo completamente vertical.
- e) **Condutividade hidráulica saturada na camada mais profunda do solo (mm mês<sup>-1</sup>)** (*Deep Conductivity* no WEAP)- Considerado como 20 mm mês<sup>-1</sup> para todas as sub-bacias hidrográficas. Esse é um valor predefinido pelo programa WEAP.
- f) **Condutividade hidráulica saturada na zona radicular (mm mês<sup>-1</sup>)** (*Root Zone Conductivity* no WEAP)- Considerado como 20 mm mês<sup>-1</sup> para todas as sub-bacias hidrográficas. Esse é um valor predefinido pelo programa WEAP.
- g) **Valor inicial Z<sub>1</sub> (0 a 100%)** (*Initial Z1* no WEAP)- Considerado como 20% para as sub-bacias hidrográficas: citros, café, cana-de-açúcar, soja e mosaico de culturas e pastagem. Considerado 100% para as sub-bacias hidrográficas: bacia PCJ, silvicultura e outras culturas perenes. Para a sub-bacia hidrográfica pastagem, foi considerado o valor de 86%.
- h) **Valor inicial Z<sub>2</sub> (0 a 100%)** (*Initial Z2* no WEAP) - Considerado como 30% para todas as sub-bacias hidrográficas. Esse é um valor predefinido pelo programa WEAP.
- i) **Declive (°)** (*Slope* no WEAP)- Considerado como 0° para todas as sub-bacias hidrográficas. Esse é um valor predefinido pelo programa WEAP.

Para cada sub-bacia, também é possível inserir informações de “Rendimento” (*Yield* no WEAP). Dessa forma, no modelo criado para as bacias PCJ procedeu-se com a inserção de dados sobre “Produção” (*Production*, no WEAP) e “Valor Produção” (*Production Value*, no WEAP), uma vez que o IBGE por meio do SIDRA,

produto “Produção Agrícola Municipal<sup>16</sup>”, fornece esses dados em toneladas (t) para a Produção e em mil reais (R\$) para Valor Produção. Foram tabulados dados para as sub-bacias: mosaico de culturas e pastagem (culturas: abacate, arroz, banana, batata, feijão, mandioca, manga, milho, tomate e uva); citros, soja, cana-de-açúcar e café.

Para o **cenário BAU**, os dados inseridos foram provenientes do SIDRA, enquanto para os **cenários RCP4.5** e **RCP8.5**, os dados foram previstos utilizando o programa Microsoft Excel (Função Planilha de Previsão) baseado na série de dados do cenário BAU.

Para o elemento estação de tratamento de esgoto que recebeu a denominação ETEs no modelo criado para as bacias PCJ foram inseridos dados de “Capacidade diária” (*Daily Capacity* no WEAP), que representa a capacidade diária de tratamento de esgoto. A fim de determinar essa capacidade, em  $\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$ , para o **cenário BAU**, somou-se os dados anuais dos municípios inseridos nas bacias PCJ, referentes à informação “*ES006 - Volume de esgotos tratado*” presente no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS)<sup>17</sup>. Foram consultados dados para os estados de São Paulo e Minas Gerais, selecionando-se em seguida, os municípios pertencentes às bacias PCJ. O valor, expresso na unidade de medida  $1.000 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ , foi, então, transformado em  $\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$  ao ser multiplicado por 1.000, feito isso, o valor foi dividido por 365 que representa a quantidade de dias em um ano, obtendo-se, assim, o volume em  $\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$ .

Os dados de capacidade diária que alimentaram os **cenários RCP4.5** e **RCP8.5** foram previstos utilizando o programa Microsoft Excel (Função Planilha de Previsão) baseado na série de dados do **cenário BAU**.

Foram adicionados três elementos hidrelétrica no modelo elaborado para as bacias PCJ, que são usinas hidrelétricas em operação localizadas na área de drenagem da bacia hidrográfica cujas informações para alimentação do modelo estavam disponíveis, sendo elas: Americana, com potência instalada de 30 MW, Jaguari, com potência instalada de 11,8 MW e Salto Grande, com potência instalada de 4,55 MW.

---

<sup>16</sup> <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/5457>

<sup>17</sup> <http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/>

Para essas hidrelétricas foram inseridos dados de vazão turbinada (*Max. Turbine Flow* no WEAP); fator de capacidade<sup>18</sup>(*Plant Factor* no WEAP), que nesse caso refere-se à porcentagem de cada mês que a hidrelétrica está operando; eficiência de geração (*Generating Efficiency* no WEAP); altura da queda (*Fixed Head* no WEAP); prioridade da usina (*Hydropower Priority* no WEAP), único parâmetro que é definido pelo usuário; e produção de energia (*Energy Demand* no WEAP), em MWh, que refere-se à produção de energia em escala mensal, para obter esse valor deve-se multiplicar a potência instalada da usina pelo valor 720 que representa o número de horas em um mês (N° de dias = 30 vezes N° de horas no dia = 24). Esses dados são apresentados a seguir.

Parâmetro	Usina Hidrelétrica Americana	Usina Hidrelétrica Jaguari	Usina Hidrelétrica Salto Grande
Vazão turbinada	117 m <sup>3</sup> /s	34,9 m <sup>3</sup> /s	21,45 m <sup>3</sup> /s
Fator de capacidade	100%	100%	100%
Eficiência de geração	90%	90%	90%
Altura da queda	31,8 m	52 m	24 m
Prioridade da usina (1 a 99)	1	2	3
Produção de energia	21600 MWh	8496 MWh	3276 MWh

Destaca-se que com esses dados de entrada, é possível obter a quantidade de energia gerada ao longo do tempo e o percentual de atendimento da potência instalada das usinas, que foram obtidos tanto para o **cenário BAU** como para os **cenários RCP4.5 e RCP8.5**.

A quantidade de elementos vazões requeridas foi diferente entre os cenários. No **cenário BAU**, foram criadas três vazões requeridas, denominadas Q<sub>90</sub>, Q<sub>95</sub> e Q<sub>7,10</sub>, enquanto nos **cenários RCP4.5 e RCP8.5** foram inseridas duas vazões requeridas, denominadas como Q<sub>90</sub> e Q<sub>95</sub>.

Os dados anuais inseridos nas vazões requeridas Q<sub>90</sub>, Q<sub>95</sub> e Q<sub>7,10</sub> do **cenário BAU** foram calculados utilizando o programa “Sistema Computacional para Análise

<sup>18</sup> Fator de capacidade é usualmente definido como o quanto que uma usina produz em relação ao máximo que ela poderia produzir.

Hidrológica-SisCAH”<sup>19</sup>, versão 1.0, desenvolvido e distribuído gratuitamente pela Universidade Federal de Viçosa.

No SisCAH, foram inseridos dados de vazão, em formato TXT (arquivo de texto delimitado por ponto e vírgula), provenientes da estação fluviométrica operada pelo DAEE, denominada como Artemis (código 62715000). Esses dados foram obtidos do Portal HIDROWEB. A estação Artemis registra dados desde 1943 até a data atual. O procedimento para o cálculo das vazões de permanência  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$  no SisCAH, seguiu a seguinte ordem: 1° utilizando a ferramenta “Pré-processamento”, o ano de 1943 foi descartado por apresentar muitas falhas, também houve a identificação dos anos que apresentavam falhas; 2° as falhas foram preenchidas utilizando a ferramenta “Preenchimento”, que utiliza a regressão linear simples, tendo como critério de aceite um valor igual ou superior a 0,7 para o coeficiente de determinação e a existência de pelo menos oito pares de eventos entre as estações; 3° com a série sem falhas, procedeu-se com o cálculo das vazões de permanência clicando no ícone “Permanência”, para tal, foram utilizados todos os dados anteriores ao ano em questão, por exemplo, para o primeiro ano da série histórica (1995), empregou-se no cálculo os dados registrados entre 1944 e 1994. Executou-se o mesmo procedimento para os demais anos.

No cálculo da vazão  $Q_{7,10}$  também realizado no SisCAH, clicando no ícone “Mínimas”, foram utilizados todos os dados da estação Artemis (1944 a 2019) devido ao programa apresentar um valor individual por ano.

Nos **cenários RCP4.5** e **RCP8.5**, que são projeções futuras de vazão sob cenários de mudanças climáticas, as vazões de permanência  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  foram calculadas usando a função Percentil do Microsoft Excel.

Após a inserção do elemento estação fluviométrica, que foi denominado como Estação Fluviométrica PCJ, foram inseridos dados de vazão observados no período do **cenário BAU** na estação fluviométrica Artemis. Esses dados foram comparados à vazão simulada pelo modelo elaborado, sendo a base do processo de calibração/validação do modelo.

---

<sup>19</sup> [https://www.gprh.ufv.br/software/Instalador\\_SisCAH\\_1\\_0.exe](https://www.gprh.ufv.br/software/Instalador_SisCAH_1_0.exe)

## APÊNDICE B – Modelo LEAP

No modelo criado para as bacias PCJ no LEAP, 20 demandas pelo uso de energia foram adicionadas. Para cada demanda (*Demand* no LEAP), dados referentes ao nível de atividade (*Activity Level* no LEAP) dessa demanda em escala temporal anual e à intensidade de energia final (*Final Energy Intensity* no LEAP), que corresponde à taxa de uso por unidade de atividade, foram inseridos.

A seguir estão descritos os dados de entrada de cada demanda. Destaca-se que para o modelo desenvolvido no LEAP foram criados dois cenários: o **cenário BAU** que engloba os dados de **1995 a 2019** e o **cenário RCP**, que engloba os dados previstos para o horizonte de **2020 a 2070**, baseados nos valores do cenário BAU, por meio da Função Planilha de Previsão no Excel.

a) **Indústria- Nível de atividade:** Nos **cenários BAU e RCP**, o nível de atividade consistiu com os mesmos valores apresentados no Modelo WEAP (Apêndice A) para o número de indústrias.

*Intensidade de energia final:* Para o **cenário BAU**, a intensidade de energia final foi calculada por meio da divisão do consumo de energia anual, em MWh, para a classe de consumo de energia elétrica “Industrial”, dado extraído do site do Grupo de Dados Energéticos da Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do estado de São Paulo, pelo número de indústrias. Obtendo-se, portanto, o valor unitário do consumo de energia (MWh/indústria).

b) **ETEs (Estações de Tratamento de Esgoto)- Nível de atividade:** Volume de esgoto tratado nas bacias PCJ ( $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$ ), esse dado foi preenchido após o acoplamento do LEAP com o WEAP por meio do Modelo de Interação, sendo proveniente da variável “Capacidade Diária” de tratamento. Esse valor é transmitido pelo WEAP em  $\text{m}^3 \text{mês}^{-1}$ , por isso deve ser multiplicado por 30 (número médio de dias em um mês) após o acoplamento com o WEAP.

*Intensidade de energia final:* No **cenário BAU**, o valor em  $\text{kWh m}^{-3}$  foi retirado do SNIS, especificamente, do indicador “IN059 - Índice de consumo de energia elétrica em sistemas de esgotamento sanitário”. Foram consultados dados para os estados de São Paulo e Minas Gerais, selecionando-se em seguida, os municípios pertencentes às bacias PCJ. Por fim, calculou-se a

média. Os dados para esse índice estavam disponíveis a partir de 2003, por conta disso, para o preenchimento dos dados para os anos anteriores à 2003 foi empregado o método Regra de Três Simples, estabelecendo-se uma relação entre a informação “ES006-Volume de esgoto tratado” e o “IN059-Índice de consumo de energia elétrica”, empregando-se como valores conhecidos, os dados para o ano 2003 (primeiro ano com dados para o índice), conforme esquema mostrado a seguir:

*ES006-Volume de esgoto tratado IN059- Índice de consumo de energia*

Valor ano 2003	Valor ano 2003
Valor ano 1995	Valor a determinar

Procedeu-se assim para os demais anos: 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001 e 2002.

c) **ETAs (Estações de Tratamento de Água)- Nível de atividade:** Consistiu no resultado para a demanda “Abastecimento urbano e rural” ( $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$ ), calculado no WEAP, para todos os cenários. O preenchimento desse dado ocorreu após o acoplamento do LEAP com o WEAP por meio do Modelo de Interação.

*Intensidade de energia final:* Retirado do SNIS, indicador: “IN058-Índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água” para a série histórica do **cenário BAU**. Assim como no item anterior, primeiro, procedeu-se com a seleção desse dado para os estados de São Paulo e Minas Gerais, em seguida, foram filtradas as informações apenas para os municípios pertencentes às bacias PCJ. Por fim, calculou-se a média. Os dados para esse índice também só estavam disponíveis a partir de 2003, em vista disso, iniciou-se o preenchimento para o período 1995-2002, empregando-se a mesma metodologia do item anterior (Regra de Três Simples), utilizando os valores conhecidos para as informações do SNIS: “AG006-Volume de água produzido” e “IN058-Índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água” para o ano de 2003.

d) **Pecuária- Nível de atividade:** No **cenário BAU**, os dados de entrada foram o número de máquinas registradas no Levantamento Censitário das Unidades de Produção Agropecuária do Estado de São Paulo (LUPA). O

LUPA apresenta dados para os anos 1995, 2007 e 2016, em escala estadual, regional e municipal. Foram selecionados os dados para os municípios pertencentes às bacias PCJ. O preenchimento de dados dos anos compreendidos no período 1995-2016 ocorreu por interpolação, realizada no Microsoft Excel. Enquanto, os dados dos anos 2017, 2018 e 2019 foram estimados por previsão também por meio do uso do Microsoft Excel (Função Planilha de Previsão), tendo como base a série de dados 1995-2016.

As máquinas selecionadas são aquelas usualmente empregadas na criação animal, sendo elas: desintegrador-picador-moedor (DPM), ensiladeira, misturador de ração, ordenhadeira e resfriador de leite.

*Intensidade de energia final:* Consistiu no uso de dados médios de consumo transformados para consumo anual retirados de publicações acadêmicas apresentados no Quadro a seguir. O consumo unitário anual de cada maquinário foi considerado constante ao longo do tempo, ou seja, o mesmo valor para toda a série dos cenários.

<b>Equipamento</b>	<b>Intensidade de energia final anual</b>	<b>Fonte consultada</b>
Desintegrador, picador e moedor	3974,4 kWh/ máquina	Salum (2000) <i>apud</i> Pereira <i>et al.</i> (2002)
Ensiladeira	5299,2 kWh/ máquina	Salum (2000) <i>apud</i> Pereira <i>et al.</i> (2002)
Misturador de ração	2649,6 kWh/ máquina	Salum (2000) <i>apud</i> Pereira <i>et al.</i> (2002)
Ordenhadeira	6716, 0 kWh/ máquina	Souza <i>et al.</i> (1998) <i>apud</i> Hardoim e Gonçalves (2003)
Resfriador de leite	11512,1 kWh/ máquina	Souza <i>et al.</i> (1998) <i>apud</i> Hardoim e Gonçalves (2003)

e) **Residencial Urbano- Nível de atividade:** População urbana, em número de habitantes, calculada com os dados levantados para a demanda no WEAP “abastecimento urbano e rural” (entrada de dados: *atividade anual*) para os cenários.

*Intensidade de energia final:* No **cenário BAU**, os dados do período: 2006-2019 consistiram no valor obtido pela divisão do consumo registrado para a classe “Residencial” (em kWh) pelo Grupo de Dados Energéticos da Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do estado de São Paulo pela

população urbana, obtendo-se o resultado em kWh/per capita. Para o preenchimento dos dados do período 1995-2005, primeiro, no Microsoft Excel foi plotado um gráfico de dispersão com os dados de consumo per capita do período 2006-2019, verificou-se uma tendência linear, por isso, prosseguiu-se com a escolha do modelo linear e a plotagem da reta, com a exibição da sua equação de 1° grau e coeficiente  $r^2$ . Com um alto  $r^2$  ( $> 0,75$ ), verificou-se pela análise do coeficiente angular, o valor do crescimento anual do consumo per capita. Esse valor foi então subtraído do ano 2006 e passou a corresponder ao dado para o ano 2005. No cálculo para o ano 2004, o mesmo valor foi subtraído só que agora do resultado para o ano 2005, procedeu-se assim para os demais anos (2003, 2002, 2001, 2000, 1999, 1998, 1997, 1996 e 1995).

Essa demanda teve um tratamento especial que foi a sua definição como “*categoria com intensidade de energia*” em vez de apenas “*categoria*”, o que permite que o uso de energia seja dividido em partes (percentuais). Dessa forma, o uso residencial per capita de energia elétrica foi dividido em: iluminação; conforto térmico; aquecimento da água; lazer; preservação de alimentos; e outros usos. Estavam disponíveis valores para os anos 1987 (Brasil), 1999, 2005 e 2019 (Região Sudeste). Esses valores foram interpolados no Microsoft Excel a fim de obter-se os valores para os demais anos da série histórica do **cenário BAU**.

f) **Irrigação por superfície; aspersão convencional; autopropelido; pivô central; gotejamento e microaspersão-** *Nível de atividade*: Para os métodos/sistemas: irrigação por superfície, aspersão convencional, autopropelido, pivô central e gotejamento, o nível de atividade consistiu no resultado para a demanda hídrica anual ( $m^3$ ) de cada método/sistema calculado no WEAP. Enquanto, para o sistema de irrigação por microaspersão, o nível de atividade consistiu na área irrigada com esse sistema, valor também obtido do WEAP. O preenchimento dos dados se deu após o acoplamento do LEAP com o WEAP por meio do Modelo de Interação. O procedimento foi o mesmo para todos os cenários.

*Intensidade de energia final*: Considerada constante ao longo da série de dados. Para os métodos/sistemas de irrigação: irrigação por superfície,

irrigação por aspersão convencional, irrigação por autopropelido e irrigação por pivô, a intensidade de energia final consistiu no consumo anual de energia elétrica para o bombeamento de 1 m<sup>3</sup> de água a uma altura de recalque de 25 m, esse valor foi obtido por meio da interpolação entre os valores para o bombeamento de 1 m<sup>3</sup> nas alturas de recalque 0 e 50 m que eram os valores apresentados na fonte consultada. Para os mesmos métodos/sistemas, também foi considerado o uso de diesel como fonte de energia. Por meio do percentual de propriedades agrícolas com acesso à eletricidade, obtido do LUPA, obteve-se o valor referente ao uso de diesel ao subtrair o percentual de propriedades agrícolas com acesso à eletricidade do valor do todo (100%). No LUPA, os dados estavam disponíveis para os anos: 1995, 2007 e 2016, portanto, o preenchimento da série se deu primeiro, por interpolação, período (1995-2016), seguida da previsão dos valores para o período (2017-2019), ambos os cálculos foram realizados no Microsoft Excel. Para o sistema de irrigação gotejamento, a intensidade de energia final consistiu no consumo anual, exclusivamente de energia elétrica, necessário para o bombeamento de 1 m<sup>3</sup> de água a uma altura de recalque de 25 m. Enquanto para o sistema de irrigação microaspersão, a intensidade de energia final consistiu no consumo anual de energia elétrica por hectare de área irrigada. O Quadro a seguir apresenta os valores de intensidade de energia final anual adotados para os métodos/sistemas de irrigação.

<b>Método/Sistema de irrigação</b>	<b>Intensidade de energia final anual (eletricidade)</b>	<b>Intensidade de energia final anual (diesel)</b>	<b>Fonte consultada</b>
Irrigação por superfície	0,1561 kWh/m <sup>3</sup>	0,0457 L/m <sup>3</sup>	Scaloppi (1985) <i>apud</i> Medeiros e Rojas (1997)
Aspersão convencional	0,4456 kWh/m <sup>3</sup>	0,1306 L/m <sup>3</sup>	Scaloppi (1985) <i>apud</i> Medeiros e Rojas (1997)
Autopropelido	0,7581 kWh/m <sup>3</sup>	0,2222 L/m <sup>3</sup>	Scaloppi (1985) <i>apud</i> Medeiros e Rojas (1997)
Pivô central	0,4699 kWh/m <sup>3</sup>	0,1377 L/m <sup>3</sup>	Scaloppi (1985) <i>apud</i> Medeiros e Rojas (1997)
Gotejamento	0,2000 kWh/m <sup>3</sup>	-	Marouelli e Silva (2011)
Microaspersão	1.600 kWh/hectare	-	Vescove e Turco (2010)

g) **Soja gradeamento, soja semeadora, soja pulverização, soja escarificador e soja colheita-** *Nível de atividade:* Nos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5, o nível de atividade consistiu no valor da área plantada com a soja, em hectares, dado de entrada na guia “*uso da Terra*” da sub-bacia soja no WEAP. Os valores foram obtidos após o acoplamento do LEAP com o WEAP por meio do Modelo de Interação.

*Intensidade de energia final:* A intensidade de energia final, em L ha<sup>-1</sup> é apresentada no Quadro a seguir. Neste caso, avaliou-se o consumo de energia (diesel) para o cultivo da soja, considerando-se diferentes técnicas de preparo do solo antecedentes ao plantio, que foram:

- Cultivo mínimo, técnica na qual antes do plantio há uso do escarificador (soja escarificador), seguido pelo uso da semeadora (soja semeadora).
- Plantio direto, técnica na qual antes do plantio há somente uso da semeadora (soja semeadora); e
- Cultivo convencional, técnica na qual antes do plantio há uso de grade (soja gradeamento), seguido pelo uso da semeadora (soja semeadora).

Além disso, foram verificadas as demandas energéticas durante a prática de pulverização (soja pulverização) e na colheita (soja colheita).

<b>Técnica de preparo do solo</b>	<b>Intensidade de energia final anual do diesel (L ha<sup>-1</sup>)</b>
Gradeamento	12,34 L ha <sup>-1</sup>
Escarificador	15,62 L ha <sup>-1</sup>
Semeadora	5,72 L ha <sup>-1</sup>
<b>Atividade</b>	
Pulverização	4,34 L ha <sup>-1</sup>
Colheita	8,27 L ha <sup>-1</sup>

**Fonte:** Tavares (2012, p. 59)

h) **Café-** *Nível de atividade:* Em todos os cenários, o nível de atividade consistiu no valor da área plantada com a café, em hectares, dado de entrada na guia “*uso da terra*” da sub-bacia café no WEAP. Obteve-se os valores após o acoplamento do LEAP com o WEAP por meio do Modelo de Interação.

Como os dados foram exportados pelo WEAP em escala mensal, eles foram divididos por 12 (número de meses em um ano) após a execução do Modelo de Interação.

*Intensidade de energia final:* A intensidade de energia final consistiu no consumo de energia (diesel) no manejo do café, sendo igual a  $8,12 \text{ GJ ha}^{-1}$ .

i) **Citros- *Nível de atividade:*** Para todos os cenários, o nível de atividade consistiu no valor da área plantada com a citros, em hectares, dado de entrada na guia “*uso da terra*” da sub-bacia citros no WEAP. Os valores foram obtidos após o acoplamento do LEAP com o WEAP por meio do Modelo de Interação. Como os dados foram exportados pelo WEAP em escala mensal, eles foram divididos por 12 após a execução do Modelo de Interação.

*Intensidade de energia final:* A intensidade de energia final consistiu no consumo de energia (diesel) no manejo de citros, sendo igual a  $14,76 \text{ GJ ha}^{-1}$ .

j) **Pastagem- *Nível de atividade:*** Considerado como a área plantada com a pastagem, em hectares, dado de entrada na guia “*uso da Terra*” da sub-bacia pastagem no WEAP em todos os cenários. Os valores foram obtidos após o acoplamento do LEAP com o WEAP por meio do Modelo de Interação. Como os dados foram exportados pelo WEAP em escala mensal, eles foram divididos por 12 após a execução do Modelo de Interação.

*Intensidade de energia final:* A intensidade de energia final, em  $\text{L ha}^{-1}$ , consistiu no consumo de energia (diesel) em pastagem manejadas, sendo equivalente à  $224 \text{ L ha}^{-1}$ .

k) **Colheitadeira de cana-de-açúcar- *Nível de atividade:*** Em todos os cenários, o nível de atividade consistiu na produção, em toneladas, de cana-de-açúcar, cujos valores foram obtidos da guia “rendimento”, subguia “produção” no WEAP. O preenchimento dos dados ocorreu após o acoplamento do LEAP com o WEAP por meio do Modelo de Interação. Como os dados foram exportados pelo WEAP em escala mensal, eles foram divididos por 12 após a execução do Modelo de Interação.

*Intensidade de energia final:* A intensidade de energia final, em litros por toneladas ( $\text{L t}^{-1}$ ), consistiu no consumo de energia (diesel) de colheitadeiras

de cana-de-açúcar operando sob a rotação de 1.000 rpm e velocidade de 7,0 km h<sup>-1</sup>, sendo igual a 0,7 L t<sup>-1</sup>.

Além da definição das demandas, no modelo desenvolvido para as bacias PCJ foram inseridas oito transformações, que representam as usinas de geração de eletricidade existentes dentro da bacia hidrográfica.

O Sistema de Informações de Geração (SIGA) da ANEEL<sup>20</sup> fornece dados para todo o território nacional referentes às usinas de energia elétrica em operação com a identificação do estado, município e bacia hidrográfica onde a usina está localizada, além do fornecimento das coordenadas geográficas. Além disso, há dados sobre a data de início da operação da usina, a fonte de combustível utilizada e a potência outorgada. Nas bacias PCJ, há usinas hidrelétricas, termelétricas e solares cujas informações quanto à potência instalada é apresentada a seguir:

- **Hidrelétrica Americana-** com potência outorgada de 30,00 MW;
- **Hidrelétrica Jaguari-** com potência outorgada de 11,80 MW;
- **Hidrelétrica Salto Grande-** com potência outorgada de 4,55 MW;
- **Hidrelétrica Corumbataí-** com potência outorgada de 1,70 MW;
- **Hidrelétrica Macaco Branco-** com potência outorgada de 2,36 MW;
- **Hidrelétrica Engenheiro Bernardo Figueiredo-** com potência outorgada de 0,00169 MW;
- **Hidrelétrica Ribeirão do Pinhal-** com potência outorgada de 1,20 MW;
- **Hidrelétrica Piracicaba (Antiga Boyes)-** com potência outorgada de 1,12 MW;
- **Hidrelétrica Luiz Queiroz-** com potência outorgada de 2,88 MW;
- **Hidrelétrica Museu da Água-** com potência outorgada de 0,386 MW;
- **Hidrelétrica Santa Tereza-** com potência outorgada de 0,588 MW;

As hidrelétricas foram agrupadas como uma única transformação denominada “**Hidrelétricas**”, totalizando uma potência instalada de 56,59 MW.

- **Usinas Solares-** com somatório da potência outorgada variando de 0,13 a 1,4 MW ao longo dos anos do **cenário BAU**;
- **Usinas de Biomassa-** com somatório da potência outorgada variando de 49,9 a 222,8 MW ao longo dos anos do **cenário BAU**. A fonte de combustível é o bagaço de cana-de-açúcar;

---

<sup>20</sup> <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>

- **Usinas à Diesel-** com somatório da potência outorgada variando de 65,8 a 112,4 MW ao longo dos anos do **cenário BAU**;
- **Usina a Óleo Residual-** com potência outorgada de 4,5 MW;
- **Usinas a Gás Natural-** com somatório da potência outorgada variando de 21,6 a 49,7 MW ao longo dos anos do **cenário BAU**;
- **Usina Termelétrica Ripasa-** com potência outorgada de 53,5 MW. Essa usina pertence à empresa Suzano Papel e Celulose S.A, que foi autorizada pela ANEEL em 2014 por meio da Resolução Autorizativa Nº 4.528, a operar utilizando lixívia de madeira, cavaco de madeira e gás natural como combustíveis.
- **Usinas de Biogás-** com somatório da potência outorgada variando de 0,8 a 2,7 MW ao longo dos anos do **cenário BAU**.

Vale ressaltar que ao inserir uma transformação, deve-se definir um processo que leva à geração de eletricidade por meio do uso de recursos de fontes primárias<sup>21</sup> não renováveis como o gás natural ou renováveis como a água e o sol ou fontes secundárias <sup>22</sup> como o diesel. Dessa forma, as informações sobre fonte de combustível utilizada na usina fornecida pelo SIGA da ANEEL é valiosa para o preenchimento correto desses campos.

Após adicionar os oito processos de transformação, os seguintes campos foram alimentados com dados:

- Regra de despacho (*Dispatch Rule* no LEAP) representa a ordem de uso das usinas;
- Primeiro ano de simulação (*First Simulation Year* no LEAP) representa o primeiro ano em que o LEAP apresentará os resultados;
- Porcentagem de participação do processo (*Process Share* no LEAP) representa a porcentagem de participação da usina em relação ao total de energia elétrica produzida, sendo variável ao longo do tempo;
- Eficiência do processo (*Process Efficiency* no LEAP) representa a eficiência da usina;
- Capacidade exógena (*Exogenous Capacity* no LEAP) representa a potência instalada da usina;

---

<sup>21</sup> Recursos encontrados diretamente na natureza, sendo empregados na geração de energia.

<sup>22</sup> Recursos que surgem após a transformação dos recursos primários.

- Capacidade endógena (Endogenous Capacity no LEAP) representa a potência adicionada devido à ampliação da capacidade de geração da usina;
- Disponibilidade máxima (Maximum Availability no LEAP) representa a disponibilidade ao longo do ano;
- Crédito de capacidade (Capacity Credit no LEAP) representa a contribuição da capacidade nominal para a margem de reserva. Apresenta o valor 100% como valor predefinido. Será calculado somente quando o campo “Capacidade endógena” for preenchido.
- Ordem de mérito (Merit Order no LEAP) é a ordem de mérito do processo no primeiro período de despacho. Valor predefinido como 1 que representa a carga de base. Carga de base, por sua vez, representa a quantidade mínima de energia elétrica fornecida pela usina.
- Despachável (Dispatchable no LEAP), deve-se preencher com não (*No*, em inglês) se a disponibilidade do recurso (ex.: radiação solar, água ou vento) ao longo do tempo resulta em uma redução na produção de energia pela usina. Caso contrário, preencher com sim (*Yes*, em inglês).
- Tempo de vida (Lifetime no LEAP) representa o tempo médio de vida da usina em relação ao desgaste dos equipamentos que precisam ser trocados ou passar por manutenção.
- Taxa de juros (Interest Rate no LEAP) é a taxa de juros real usada para amortizar custos de capital da usina.
- Utilização mínima (Minimum Utilization no LEAP) é o valor em percentual referente à fração mínima de horas de uso da usina ao longo do tempo. O valor predefinido é 0.

Os dados inseridos no **cenário BAU** para cada processo de transformação são apresentados no Quadro a seguir.

Dado	H	S	BS	D	OR	GN	UTR	B
Regra de Despacho	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS
Primeiro ano de simulação	BaseYear	BaseYear	BaseYear	BaseYear	BaseYear	BaseYear	BaseYear	BaseYear
Porcentagem de participação (%)	11,25 a 28,51	0,05 a 0,33	24,25 a 55,28	20,75 a 34,8	0,89 a 2,27	6,87 a 11,42	0,00 a 11,48	0,00 a 0,56
Eficiência (%)	90	25	40	35	40	45	40	30
Capacidade exógena (MW)	56,59	0,13 a 1,4	49,9 a 222,8	65,8 a 112,4	4,5	21,6 a 49,7	53,5	0,80 a 2,7
Capacidade Endógena	-	-	-	-	-	-	-	-
Disponibilidade de Máxima (%)	100	100	100	100	100	100	100	100
Crédito de Capacidade (%)	100	100	100	100	100	100	100	100
Ordem de Mérito	1	1	1	1	1	1	1	1
Despachável	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Tempo de Vida	30	25	35	30	30	30	30	30
Taxa de Juros	DR	DR	DR	DR	DR	DR	DR	DR
Utilização Mínima (%)	0	0	0	0	0	0	0	0

PS = *PercentShare*, é o percentual compartilhado; *BaseYear* = equivalente ao ano base, o primeiro ano do cenário (1995); DR= *DiscountRate*, estabelecida com 5% na configuração da criação do modelo; H= Hidrelétricas; S = Usinas Solares; BS = Usinas de Biomassa; D = Usinas a Diesel; OR = Usina Óleo Residual; GN = Usinas a Gás Natural; UTR = Usina Termelétrica Ripasa; B = Usinas de biogás.

Os dados inseridos no **cenário RCP** para cada processo de transformação são apresentados no Quadro apresentado a seguir.

Dado	H	S	BS	D	OR	GN	UTR	B
Regra de Despacho	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS
Primeiro ano de simulação	BaseYear	BaseYear	BaseYear	BaseYear	BaseYear	BaseYear	BaseYear	BaseYear
Porcentagem de participação (%)	8,79 14,26	0,27 0,42	47,49 66,96	8,42 21,64	0,42 0,87	7,67 8,23	5,01 10,29	0,63 1,75
Eficiência (%)	90	25	40	35	40	45	40	30
Capacidade exógena (MW)	56,59 93,89	1,4 4,5	246,7 715,0	89,9 112,4	4,5	41,2 87,9	53,5	3,25 18,68
Capacidade Endógena	-	-	-	-	-	-	-	-
Disponibilidade de Máxima (%)	100	100	100	100	100	100	100	100
Crédito de Capacidade (%)	100	100	100	100	100	100	100	100
Ordem de Mérito	1	1	1	1	1	1	1	1
Despachável	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Tempo de Vida	30	25	35	30	30	30	30	30
Taxa de Juros	DR	DR	DR	DR	DR	DR	DR	DR
Utilização Mínima (%)	0	0	0	0	0	0	0	0

PS = *PercentShare*, é o percentual compartilhado; *BaseYear* = equivalente ao ano base, o primeiro ano do cenário (1995); DR= *DiscountRate*, estabelecida com 5% na configuração da criação do modelo; H= Hidrelétricas; S = Usinas Solares; BS = Usinas de Biomassa; D = Usinas a Diesel; OR = Usina Óleo Residual; GN = Usinas a Gás Natural; UTR = Usina Termelétrica Ripasa; B = Usinas de biogás.

No modelo desenvolvido para as bacias PCJ, em ambos os cenários, também foram adicionados efeitos múltiplos (*Multiple Effects* no LEAP) que representam efeitos ambientais da poluição atmosférica local e a contabilização da emissão de

gases de efeito estufa ligados a uma demanda energética ou recurso empregado na geração de energia. Os valores de emissão dos gases de efeito estufa referem-se aos listados nos Relatórios do IPCC (AR1 a AR5).

Depois da inclusão dos efeitos múltiplos, verificou-se os valores das cargas ambientais em “*Avg Environmental Loading*” (Carga Ambiental Média), apresentados nos Quadros a seguir, as expressões apresentadas na nota de rodapé do Quadro representam o cálculo da carga feito baseado no teor de carbono contido na fonte de combustível.

Geração de Energia Elétrica								
	CO <sub>2</sub> (t/TJ)	CO <sub>2</sub> Biogênico (t/TJ)	CO (kg/TJ)	CH <sub>4</sub> (kg/TJ)	NMVOCs (kg/TJ)	NO <sub>x</sub> (kg/TJ)	N <sub>2</sub> O (kg/TJ)	SO <sub>2</sub> (kg/kg)
Bagaço de cana-de-açúcar	-	109,56 <sup>a</sup>	1.000	30	50	100	4	-
Diesel	72,55 <sup>b</sup>	-	15	3	5	200	0,6	0,01
Gás natural	55,78 <sup>c</sup>		20	1	5	150	0,1	-
Óleo combustível residual	72,55 <sup>b</sup>	-	15	3	5	200	0,6	0,04
Resíduos de madeira	-	109,56 <sup>a</sup>	1.000	30	50	100	4	-
Resíduos sólidos urbanos	-	109,56 <sup>a</sup>	1.000	30	50	100	4	-
Uso Máquinas Agrícolas e Bombas Hidráulicas								
Diesel	73,3 <sup>d</sup>	-	0,6	0,011	0,23	1,5	0,002	-

<sup>a</sup> Expressão = 29,9\*Fração oxidada\*(CO<sub>2</sub>/C); <sup>b</sup> Expressão = 20\* Fração oxidada\*(CO<sub>2</sub>/C);

<sup>c</sup> Expressão = 15,3\*Fração oxidada\*(CO<sub>2</sub>/C); <sup>d</sup> Expressão = 20,2\*Fração oxidada\*(CO<sub>2</sub>/C).

Após a execução do modelo, na seção de resultados, foram verificados os valores do potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential-GWP*, em inglês) para o horizonte temporal de 100 anos (100-year GWP).

Pode-se afirmar que o modelo elaborado para as bacias PCJ no LEAP poderá guiar a criação do modelo em outras bacias hidrográficas, inclusive é possível criar um modelo, dando uma nova denominação, e o mesmo ser baseado em um modelo existente, neste caso o modelo das bacias PCJ.

## APÊNDICE C – Modelo de Interação WEAP-KIB-LEAP *Framework*

Na descrição do Modelo de Interação referente à abordagem WEAP-KIB-LEAP *framework*, os programas WEAP e LEAP serão mencionados como sistema WEAP e sistema LEAP a fim de conceitualizar que eles são um conjunto de entidades (partes) que estão organizados, se relacionam entre si e recebem dados de entrada, provendo saídas, resultados.

Os sistemas WEAP e LEAP tem entidades pré-definidas, no caso do WEAP essas entidades são nós, *links* e *flow* enquanto no LEAP, elas são demanda, transformação, processo, recurso e efeito. Ambos possuem APIs predefinidas que permitem o acesso a maioria de suas entidades e controle de execução. O C-WEAP e C-LEAP *frameworks* permitem o uso dos sistemas WEAP e LEAP como uma ferramenta baseada em componentes (*component-based*) que é suportada dentro de um RESTful *framework*, apresentando componentes para todas as entidades dos sistemas WEAP e LEAP (componentização), por isso a denominação em inglês como *componentized-WEAP* (C-WEAP) e *componentized-LEAP* (C-LEAP).

O Modelo de Interação, baseado no KIB *approach*, apresenta interfaces do C-WEAP e C-LEAP *frameworks*. As interfaces WEAP e LEAP são definidas como uma parte do Modelo de Interação que permitem comunicações síncronas e bidirecionais, mediando a comunicação entre os serviços Web RESTful do C-WEAP e C-LEAP e os módulos do modelo.

Os módulos do Modelo de Interação apresentam portas de entrada (*input ports*) e saídas (*output ports*). Os dados definidos por meio dessas portas são, então, transformados para uso no outro sistema (transformação do WEAP para LEAP ou do LEAP para o WEAP), em seguida, ocorre o acoplamento/conexão entre as portas. Os módulos e suas transformações podem ser executados sob um regime de controle baseado no tempo. No protocolo de execução, é prescrito o regime de controle cíclico que é suportado por chamadas e retornos sincronizados de dados, habilitados pelos serviços Web RESTful e JSON<sup>23</sup> (*JavaScript Object Notation*). O gerenciamento do tempo permite a sincronização de diferentes resoluções de tempo empregadas nos modelos criados no WEAP e LEAP (diária, mensal ou anual).

---

<sup>23</sup> É uma maneira de notação de objetos JavaScript (JS) para que eles consigam ser representados de uma forma que seja comum a diversas linguagens.

Para estabelecer uma interação entre os programas, o código criado deve obedecer a estrutura apresentada no Quadro a seguir.

**Estrutura de uma conexão pelo Modelo de Interação por meio da abordagem  
WEAP-KIB-LEAP framework**

<b>Passo</b>	<b>Estrutura do Código de Execução</b>
<b>1.</b> Definição das portas dos módulos	<pre><b>InputFromWEAP</b> in1 = new InputFromWEAP("in1", new WeapParameters(WEAP_PROJECT_NAME, ComponentTypes.DemandSite, "Component Name" , PortTypes.Output, "Variable Name", "Scenario Name"));  <b>OutputToLEAP</b> out1 = new OutputToLEAP("out1", new LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME, kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Component Name", kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, " Variable Name", "Scenario Name"))</pre>
<b>2.</b> Adição das portas dos módulos	<pre>addInput(in1); addOutput(out1);</pre>
<b>3.</b> Definição das portas de transformação dos dados	<pre><b>WEAP_LEAP_Transformation</b> tran1 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-Tran1");</pre>
<b>4.</b> Adição da transformação	<pre>addTransformation(tran1);</pre>
<b>5.</b> Definição do acoplamento entre as portas dos módulos e da transformação	<pre><b>Coupling</b> c1 = new Coupling(in1, tran1.getInput("in1")); <b>Coupling</b> c2 = new Coupling(tran1.getOutput("out1"), out1);</pre>
<b>6.</b> Adição do acoplamento	<pre>addCoupling(c1); addCoupling(c2);</pre>

Para melhor entendimento, seguem alguns esclarecimentos. No exemplo do Quadro, estamos obtendo um dado do programa WEAP, transformando-o e inserindo-o no programa LEAP. A denominação WEAP\_PROJECT\_NAME e LEAP\_PROJECT\_NAME refere-se ao nome do modelo criado no WEAP e no LEAP, respectivamente, do qual pretende-se obter o dado em questão.

Já os ComponentTypes referem-se ao tipo de entidade/componente do sistema. No WEAP elas podem ser do tipo, tipo:

- a) Nó: *DemandSite* (Demanda), *Groundwater* (Água subterrânea), *Reservoir* (Reservatório), *OtherSupplies* (Outras fontes hídricas),

*WastewaterTreatment* (Estação de Tratamento de Esgoto) e *Catchment* (Sub-bacia hidrográfica);

b) *Link: Transmissions* (Link de transmissão), *Runoffs* (Escoamento) e *ReturnFlows* (Vazão de retorno); e

c) *Flow: Rivers* (Rio) e *Diversions* (Desvios).

Enquanto no LEAP, os *ComponentTypes* podem ser *Resource* (Recurso), *Transformations* (transformações), *Process* (Processo), *Demand* (Demanda) e *Effect* (Efeito).

Em *Component Name*, define-se o nome do componente, por exemplo, para um *ComponentType* do modelo WEAP do tipo *Catchment* (sub-bacia hidrográfica), considerando o modelo desenvolvido para as bacias PCJ, a *Component Name* poderia ser “Pastagem”. Já um *ComponentType* do modelo LEAP do tipo *Demand* (demanda), também considerando o modelo para as bacias PCJ, poderia ter como *Component Name* “Indústria”.

Em *PortTypes*, define-se o tipo de porta, a mesma pode ser uma entrada (*Input*) ou saída/resultado (*Output*) do modelo criado no WEAP ou no LEAP.

Em *Variable Name*, define-se o nome das variáveis com as quais deseja-se efetuar a interação entre os programas WEAP e LEAP. Considerando o exemplo apresentado no parágrafo destinado à explicação de *Component Name*, uma variável presente no modelo WEAP como saída/resultado (*Output*) da sub-bacia “Pastagem” é a *Water Demand* (Demanda Hídrica), logo, a *Variable Name* poderia ser “Water Demand”. Ao mesmo tempo, no modelo LEAP, uma variável presente que é uma entrada de dados no modelo é a *Activity Level* (Nível de Atividade), dessa maneira, a *Variable Name* poderia ser “Activity Level”.

Em *Scenario Name*, define-se o nome do cenário. O WEAP, assim como o LEAP, permite a criação de cenários baseados em pressupostos, apesar disso, ambos possuem cenários predefinidos que não apresentam possibilidade de exclusão. No WEAP, eles recebem a denominação de *Current Accounts* (Conta Atual, em tradução livre), que é referente ao primeiro ano da série histórica, e *Reference* (Referência), que engloba os demais anos da série. Ao passo que no LEAP, os cenários predefinidos são *Current Accounts* e *Baseline* (Linha de base, em tradução livre). Eles seguem os mesmos princípios apresentados na descrição dos cenários WEAP, *Current Accounts* refere-se ao primeiro ano da série de dados e *Baseline* engloba os demais anos da série. Portanto, são opções de *Scenario Name*

para o WEAP: “Current Accounts”, “Reference”, ou qualquer nome dado a um cenário criado; para o LEAP, as opções são: “Current Accounts”, “Baseline” ou qualquer nome dado a um cenário criado.

O código do Modelo de Interação, presente no Apêndice D, foi escrito em NodeJS no Vs Code. Além desses programas, para executar as interações entre o WEAP e LEAP por meio da abordagem WEAP-KIB-LEAP *framework*, será necessária a instalação do Java 8, Java 20, Python 2.7 e Microsoft visual C++. Ademais, é imprescindível a instalação das seguintes extensões no Vs Code: C/C++, Intellicode API, Extension Pack for Java; JavaScript (ESG) code Snippets; Node.js Exec; Node.js code Snippets; Prettier-code formatter; TSLint Snippets; TSLint Vue; TSLint Vue-TSX; e TypeScript + Webpack Problem.

Os tutoriais elaborados podem ser consultados nos links: <https://drive.google.com/drive/folders/1rmjebYEQgMJvQNbaaZL07QQ9weGAPD5z> (tutorial em português) e [https://www.dropbox.com/home/Tutorial\\_Videos](https://www.dropbox.com/home/Tutorial_Videos) (tutorial em inglês).

## APÊNDICE D – Código do Modelo de Interação

```

package models.NexoAEA.modules;

import models.NexoAEA.transformations.LEAP_WEAP_Transformation;
import models.NexoAEA.transformations.WEAP_LEAP_Transformation;
import kib.core.domain.Coupling;
import kib.core.domain.Module;
import kib.few.leap.ports.InputFromLEAP;
import kib.few.leap.ports.OutputToLEAP;
import kib.few.leap.ports.params.LeapParameters;
import kib.few.weap.ports.InputFromWEAP;
import kib.few.weap.ports.OutputToWEAP;
import kib.few.weap.ports.params.WeapParameters;
import kib.few.weap.utilities.enums.ComponentTypes;
import kib.few.weap.utilities.enums.PortTypes;
import kib.utilities.exceptions.kib.KIBModelException;

public class SimpleModule extends Module {
    private final static String WEAP_PROJECT_NAME = "Cenario BAU";
    private final static String LEAP_PROJECT_NAME = "Cenario BAU";

    public SimpleModule(String name) throws KIBModelException {
        super(name);
        initialization();
    }

    private void initialization() throws KIBModelException {
        InputFromWEAP in1 = new InputFromWEAP("in1", new
        WeapParameters(WEAP_PROJECT_NAME, ComponentTypes.DemandSite,
        "Abastecimento urbano e rural" , PortTypes.Output, "Water Demand", "Reference"));
        OutputToLEAP out1 = new OutputToLEAP("out1", new
        LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,

```

```
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "ETAs",
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Baseline"));
```

```
InputFromWEAP in2 = new InputFromWEAP("in2", new
WeapParameters(WEAP_PROJECT_NAME, ComponentTypes.DemandSite,
"Irigacao por superficie" , PortTypes.Output, "Water Demand", "Reference"));
OutputToLEAP out2 = new OutputToLEAP("out2", new
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Irigacao por superficie",
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Baseline"));
```

```
InputFromWEAP in3 = new InputFromWEAP("in3", new
WeapParameters(WEAP_PROJECT_NAME, ComponentTypes.DemandSite,
"Aspersao Convencional" , PortTypes.Output, "Water Demand", "Reference"));
OutputToLEAP out3 = new OutputToLEAP("out3", new
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Aspersao Convencional",
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Baseline"));
```

```
InputFromWEAP in4 = new InputFromWEAP("in4", new
WeapParameters(WEAP_PROJECT_NAME, ComponentTypes.DemandSite,
"Autopropelido" , PortTypes.Output, "Water Demand", "Reference"));
OutputToLEAP out4 = new OutputToLEAP("out4", new
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Autopropelido",
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Baseline"));
```

```
InputFromWEAP in5 = new InputFromWEAP("in5", new
WeapParameters(WEAP_PROJECT_NAME, ComponentTypes.DemandSite, "Pivo
Central" , PortTypes.Output, "Water Demand", "Reference"));
OutputToLEAP out5 = new OutputToLEAP("out5", new
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Pivo Central",
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Baseline"));
```

```
InputFromWEAP in6 = new InputFromWEAP("in6", new  
WeapParameters(WEAP_PROJECT_NAME, ComponentTypes.DemandSite,  
"Gotejamento" , PortTypes.Output, "Water Demand", "Reference"));
```

```
OutputToLEAP out6 = new OutputToLEAP("out6", new  
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,  
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Gotejamento",  
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Baseline"));
```

```
InputFromWEAP in7 = new InputFromWEAP("in7", new  
WeapParameters(WEAP_PROJECT_NAME, ComponentTypes.DemandSite,  
"Microaspersao" , PortTypes.Input, "Annual Activity Level", "Reference"));
```

```
OutputToLEAP out7 = new OutputToLEAP("out7", new  
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,  
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Microaspersao",  
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Baseline"));
```

```
InputFromWEAP in8 = new InputFromWEAP("in8", new  
WeapParameters(WEAP_PROJECT_NAME,  
ComponentTypes.WastewaterTreatment, "ETEs" , PortTypes.Input, "Daily Capacity",  
"Reference"));
```

```
OutputToLEAP out8 = new OutputToLEAP("out8", new  
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,  
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "ETEs",  
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Baseline"));
```

```
InputFromWEAP in9 = new InputFromWEAP("in9", new  
WeapParameters(WEAP_PROJECT_NAME,  
ComponentTypes.WastewaterTreatment, "ETEs" , PortTypes.Input, "Daily Capacity",  
"Current Accounts"));
```

```
OutputToLEAP out9= new OutputToLEAP("out9", new  
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,  
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "ETEs",  
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Current Accounts"));
```

```

InputFromWEAP in10 = new InputFromWEAP("in10", new
WeapParameters(WEAP_PROJECT_NAME, ComponentTypes.Catchment, "Cana
de acucar" , PortTypes.Input, "Production", "Reference"));
OutputToLEAP out10= new OutputToLEAP("out10", new
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Colheitadeira de cana de
acucar", kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Baseline"));

```

```

InputFromWEAP in11 = new InputFromWEAP("in11", new
WeapParameters(WEAP_PROJECT_NAME, ComponentTypes.Catchment, "Cana
de acucar" , PortTypes.Input, "Production", "Current Accounts"));
OutputToLEAP out11= new OutputToLEAP("out11", new
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Colheitadeira de cana de
acucar", kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Current
Accounts"));

```

```

InputFromWEAP in12 = new InputFromWEAP("in12", new
WeapParameters(WEAP_PROJECT_NAME, ComponentTypes.Catchment, "Cafe" ,
PortTypes.Input, "Area", "Reference"));
OutputToLEAP out12= new OutputToLEAP("out12", new
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Cafe",
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Baseline"));

```

```

InputFromWEAP in13 = new InputFromWEAP("in13", new
WeapParameters(WEAP_PROJECT_NAME, ComponentTypes.Catchment, "Cafe" ,
PortTypes.Input, "Area", "Current Accounts"));
OutputToLEAP out13= new OutputToLEAP("out13", new
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Cafe",
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Current Accounts"));

```

```
InputFromWEAP in14 = new InputFromWEAP("in14", new  
WeapParameters(WEAP_PROJECT_NAME, ComponentTypes.Catchment,  
"Pastagem" , PortTypes.Input, "Area", "Reference"));
```

```
OutputToLEAP out14= new OutputToLEAP("out14", new  
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,  
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Pastagem",  
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Baseline"));
```

```
InputFromWEAP in15 = new InputFromWEAP("in15", new  
WeapParameters(WEAP_PROJECT_NAME, ComponentTypes.Catchment,  
"Pastagem" , PortTypes.Input, "Area", "Current Accounts"));
```

```
OutputToLEAP out15= new OutputToLEAP("out15", new  
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,  
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Pastagem",  
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Current Accounts"));
```

```
InputFromWEAP in16 = new InputFromWEAP("in16", new  
WeapParameters(WEAP_PROJECT_NAME, ComponentTypes.Catchment, "Citros" ,  
PortTypes.Input, "Area", "Reference"));
```

```
OutputToLEAP out16= new OutputToLEAP("out16", new  
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,  
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Citros",  
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Baseline"));
```

```
InputFromWEAP in17 = new InputFromWEAP("in17", new  
WeapParameters(WEAP_PROJECT_NAME, ComponentTypes.Catchment, "Citros" ,  
PortTypes.Input, "Area", "Current Accounts"));
```

```
OutputToLEAP out17= new OutputToLEAP("out17", new  
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,  
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Citros",  
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Current Accounts"));
```

```
InputFromWEAP in18 = new InputFromWEAP("in18", new
WeapParameters(WEAP_PROJECT_NAME, ComponentTypes.Catchment, "Soja" ,
PortTypes.Input, "Area", "Reference"));
OutputToLEAP out18= new OutputToLEAP("out18", new
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Soja Gradeamento",
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Baseline"));
OutputToLEAP out19= new OutputToLEAP("out19", new
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Soja Semeadora",
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Baseline"));
OutputToLEAP out20= new OutputToLEAP("out20", new
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Soja Pulverizacao",
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Baseline"));
OutputToLEAP out21= new OutputToLEAP("out21", new
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Soja Colheita",
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Baseline"));
OutputToLEAP out22= new OutputToLEAP("out22", new
LeapParameters(LEAP_PROJECT_NAME,
kib.few.leap.utilities.enums.ComponentTypes.Demand, "Soja Escarificador",
kib.few.leap.utilities.enums.PortTypes.Input, "Activity Level", "Baseline"));

in1.setPriority(1);

addInput(in1);
addInput(in2);
addInput(in3);
addInput(in4);
addInput(in5);
addInput(in6);
addInput(in7);
addInput(in8);
```

```
addInput(in9);  
addInput(in10);  
addInput(in11);  
addInput(in12);  
addInput(in13);  
addInput(in14);  
addInput(in15);  
addInput(in16);  
addInput(in17);  
addInput(in18);
```

```
addOutput(out1);  
addOutput(out2);  
addOutput(out3);  
addOutput(out4);  
addOutput(out5);  
addOutput(out6);  
addOutput(out7);  
addOutput(out8);  
addOutput(out9);  
addOutput(out10);  
addOutput(out11);  
addOutput(out12);  
addOutput(out13);  
addOutput(out14);  
addOutput(out15);  
addOutput(out16);  
addOutput(out17);  
addOutput(out18);  
addOutput(out19);  
addOutput(out20);  
addOutput(out21);  
addOutput(out22);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran1 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran1");
```

```
addTransformation(tran1);
```

```
Coupling c1 = new Coupling(in1, tran1.getInput("in1"));
```

```
Coupling c2 = new Coupling(tran1.getOutput("out1"), out1);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran2 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran2");
```

```
addTransformation(tran2);
```

```
Coupling c3 = new Coupling(in2, tran2.getInput("in1"));
```

```
Coupling c4 = new Coupling(tran2.getOutput("out1"), out2);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran3 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran3");
```

```
addTransformation(tran3);
```

```
Coupling c5 = new Coupling(in3, tran3.getInput("in1"));
```

```
Coupling c6 = new Coupling(tran3.getOutput("out1"), out3);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran4 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran4");
```

```
addTransformation(tran4);
```

```
Coupling c7 = new Coupling(in4, tran4.getInput("in1"));
```

```
Coupling c8 = new Coupling(tran4.getOutput("out1"), out4);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran5 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran5");
```

```
addTransformation(tran5);
```

```
Coupling c9 = new Coupling(in5, tran5.getInput("in1"));
```

```
Coupling c10 = new Coupling(tran5.getOutput("out1"), out5);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran6 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran6");
```

```
addTransformation(tran6);
```

```
Coupling c11 = new Coupling(in6, tran6.getInput("in1"));
```

```
Coupling c12 = new Coupling(tran6.getOutput("out1"), out6);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran7 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran7");
```

```
addTransformation(tran7);
```

```
Coupling c13 = new Coupling(in7, tran7.getInput("in1"));
```

```
Coupling c14 = new Coupling(tran7.getOutput("out1"), out7);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran8 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran8");
```

```
addTransformation(tran8);
```

```
Coupling c15 = new Coupling(in8, tran8.getInput("in1"));
```

```
Coupling c16 = new Coupling(tran8.getOutput("out1"), out8);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran9 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran9");
```

```
addTransformation(tran9);
```

```
Coupling c17 = new Coupling(in9, tran9.getInput("in1"));
```

```
Coupling c18 = new Coupling(tran9.getOutput("out1"), out9);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran10 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran10");
```

```
addTransformation(tran10);
```

```
Coupling c19 = new Coupling(in10, tran10.getInput("in1"));
```

```
Coupling c20 = new Coupling(tran10.getOutput("out1"), out10);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran11 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran11");
```

```
addTransformation(tran11);
```

```
Coupling c21 = new Coupling(in11, tran11.getInput("in1"));
```

```
Coupling c22 = new Coupling(tran11.getOutput("out1"), out11);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran12 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran12");
```

```
addTransformation(tran12);
```

```
Coupling c23 = new Coupling(in12, tran12.getInput("in1"));
```

```
Coupling c24 = new Coupling(tran12.getOutput("out1"), out12);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran13 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran13");
```

```
addTransformation(tran13);
```

```
Coupling c25 = new Coupling(in13, tran13.getInput("in1"));
```

```
Coupling c26 = new Coupling(tran13.getOutput("out1"), out13);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran14 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran14");
```

```
addTransformation(tran14);
```

```
Coupling c27 = new Coupling(in14, tran14.getInput("in1"));
```

```
Coupling c28 = new Coupling(tran14.getOutput("out1"), out14);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran15 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran15");
```

```
addTransformation(tran15);
```

```
Coupling c29 = new Coupling(in15, tran15.getInput("in1"));
```

```
Coupling c30 = new Coupling(tran15.getOutput("out1"), out15);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran16 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran16");
```

```
addTransformation(tran16);
```

```
Coupling c31 = new Coupling(in16, tran16.getInput("in1"));
```

```
Coupling c32 = new Coupling(tran16.getOutput("out1"), out16);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran17 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran17");
```

```
addTransformation(tran17);
```

```
Coupling c33 = new Coupling(in17, tran17.getInput("in1"));
```

```
Coupling c34 = new Coupling(tran17.getOutput("out1"), out17);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran18 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran18");
```

```
addTransformation(tran18);
```

```
Coupling c35 = new Coupling(in17, tran18.getInput("in1"));
```

```
Coupling c36 = new Coupling(tran18.getOutput("out1"), out18);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran19 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran19");
```

```
addTransformation(tran19);
```

```
Coupling c37 = new Coupling(in17, tran19.getInput("in1"));
```

```
Coupling c38 = new Coupling(tran19.getOutput("out1"), out19);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran20 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran20");
```

```
addTransformation(tran20);
```

```
Coupling c39 = new Coupling(in17, tran20.getInput("in1"));
```

```
Coupling c40 = new Coupling(tran20.getOutput("out1"), out20);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran21 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran21");
```

```
addTransformation(tran21);
```

```
Coupling c41 = new Coupling(in17, tran21.getInput("in1"));
```

```
Coupling c42 = new Coupling(tran21.getOutput("out1"), out21);
```

```
WEAP_LEAP_Transformation tran22 = new WEAP_LEAP_Transformation("W-L-  
Tran22");
```

```
addTransformation(tran22);
```

```
Coupling c43 = new Coupling(in17, tran22.getInput("in1"));
```

```
Coupling c44 = new Coupling(tran22.getOutput("out1"), out22);
```

```
addCoupling(c1);
```

```
addCoupling(c2);
```

```
addCoupling(c3);
```

```
addCoupling(c4);
```

```
addCoupling(c5);
```

```
addCoupling(c6);
```

```
addCoupling(c7);
```

```
addCoupling(c8);
```

```
addCoupling(c9);
```

```
addCoupling(c10);
```

```
addCoupling(c11);
```

```
addCoupling(c12);
```

```
addCoupling(c13);
```

```
addCoupling(c14);
```

```
addCoupling(c15);
```

```
addCoupling(c16);
```

```
addCoupling(c17);
```

```
addCoupling(c18);
```

```
addCoupling(c19);
addCoupling(c20);
addCoupling(c21);
addCoupling(c22);
addCoupling(c23);
addCoupling(c24);
addCoupling(c25);
addCoupling(c26);
addCoupling(c27);
addCoupling(c28);
addCoupling(c29);
addCoupling(c30);
addCoupling(c31);
addCoupling(c32);
addCoupling(c33);
addCoupling(c34);
addCoupling(c35);
addCoupling(c36);
addCoupling(c37);
addCoupling(c38);
addCoupling(c39);
addCoupling(c40);
addCoupling(c41);
addCoupling(c42);
addCoupling(c43);
addCoupling(c44);
```

```
}
}
```

## APÊNDICE E – Correção de Viés

A correção de viés por Escalonamento Linear para dados de precipitação, umidade relativa do ar e velocidade do vento ocorreu pela técnica de correção multiplicativa conforme as Equações 6 e 7 (precipitação), 8 e 9 (umidade relativa), e 10 e 11 (velocidade do vento). Enquanto a técnica de adição foi aplicada na correção de viés de dados de temperatura (Equações 12 e 13), posto que assegura que não haja modificações nas alterações absolutas de temperatura, garantindo, em contrapartida, que os dados de temperatura sejam ajustados aos valores observados. Destaca-se que posterior à correção de viés, os dados foram agrupados em escala mensal, que é escala temporal adotada no modelo do WEAP.

$$P_{his}(d)^* = P_{his}(d) \times \left[ \mu_m(P_{obs}(d)) / \mu_m(P_{his}(d)) \right] \quad (6)$$

$$P_{RCP}(d)^* = P_{RCP}(d) \times \left[ \mu_m(P_{obs}(d)) / \mu_m(P_{his}(d)) \right] \quad (7)$$

$$UR_{his}(d)^* = UR_{his}(d) \times \left[ \mu_m(UR_{obs}(d)) / \mu_m(UR_{his}(d)) \right] \quad (8)$$

$$UR_{RCP}(d)^* = UR_{RCP}(d) \times \left[ \mu_m(UR_{obs}(d)) / \mu_m(UR_{his}(d)) \right] \quad (9)$$

$$V_{his}(d)^* = V_{his}(d) \times \left[ \mu_m(V_{obs}(d)) / \mu_m(V_{his}(d)) \right] \quad (10)$$

$$V_{RCP}(d)^* = V_{RCP}(d) \times \left[ \mu_m(V_{obs}(d)) / \mu_m(V_{his}(d)) \right] \quad (11)$$

$$T_{his}(d)^* = T_{his}(d) + \left[ \mu_m(T_{obs}(d)) / \mu_m(T_{his}(d)) \right] \quad (12)$$

$$T_{RCP}(d)^* = T_{RCP}(d) + \left[ \mu_m(T_{obs}(d)) / \mu_m(T_{his}(d)) \right] \quad (13)$$

Em que, his(d)\* equivale ao dado diário da variável do período histórico corrigido (1995-2005); his(d) equivale ao dado bruto diário da variável do período histórico gerado pelo modelo Eta (1995-2005);  $\mu_m$  equivale à média mensal; obs(d) equivale ao valor observado para o período histórico (1995-2005); RCP(d)\* equivale ao valor corrigido para o período de mudança climática (2020-2070); e RCP(d) equivale ao dado diário bruto da variável simulado pelo Modelo Climático Regional Eta-HadGEM2-ES para os cenários RCP4.5 ou RCP8.5 (2020-2070).

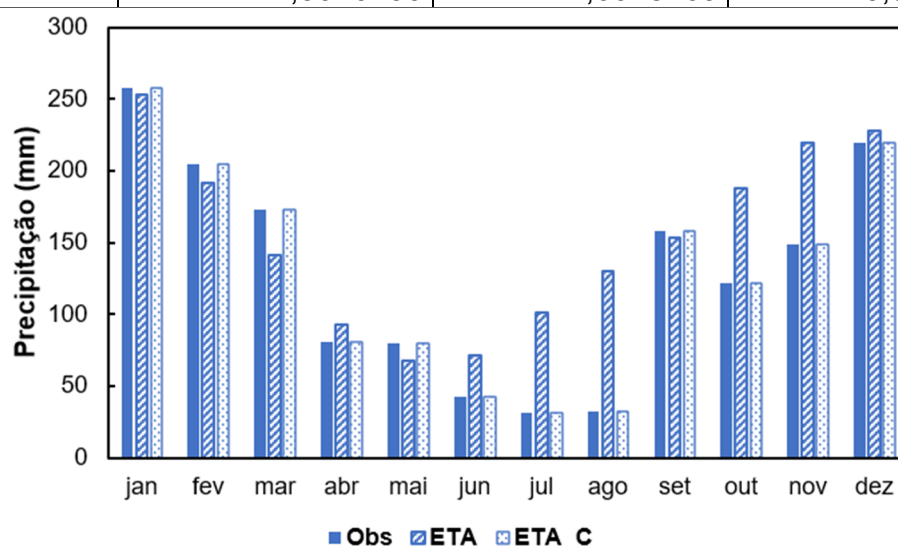
Ressalta-se que o período histórico correspondeu ao intervalo de 1995 a 2005 em virtude de o Modelo Climático Regional Eta-HadGEM2-ES apresentar dados

históricos que se estendem somente até dezembro de 2005, não cobrindo, assim, toda a série de dados do cenário BAU.

Na correção de viés dos dados climáticos de saída do Modelo Climático Regional Eta-HadGEM2-ES foram empregados os dados diários observados obtidos da Plataforma NASA *Power Project* em virtude da não apresentação de falhas.

O Quadro a seguir apresenta os fatores de correção da precipitação. Esse valor refere-se à precipitação diária. Os valores mensais corrigidos são apresentados na Figura inserida abaixo do Quadro e correspondem ao valor diário multiplicado pelo número de dias de cada mês, sendo adotado o valor de 28 dias para o mês de fevereiro.

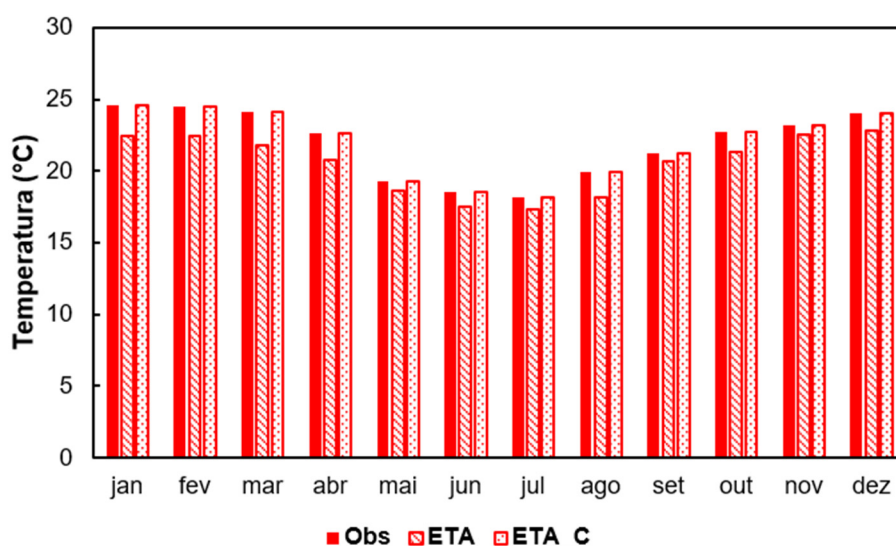
Mês	Dado observado	Dado bruto	Fator de correção
1	8,5897014	8,4472981	1,0168579
2	7,3158776	6,8352214	1,0703205
3	5,7526632	4,7173765	1,2194624
4	2,6837674	3,0904404	0,8684093
5	2,6635243	2,2511350	1,1831917
6	1,4212500	2,3909801	0,5944215
7	1,0543785	3,3698076	0,3128898
8	1,0697674	4,3214970	0,2475456
9	5,2759306	5,1057077	1,0333397
10	4,0455451	6,2675043	0,6454794
11	4,9655625	7,2999131	0,6802221
12	7,3016736	7,6028769	0,9603830



Obs = média dos dados de precipitação observados; ETA = média dos dados brutos de precipitação advindos do Modelo Climático Regional Eta-HadGEM2-ES; ETA\_C = média dos dados de precipitação advindos do Modelo Climático Regional Eta-HadGEM2-ES corrigidos pelo método de escalonamento linear.

O Quadro apresentado a seguir contém os fatores de correção da temperatura, enquanto a Figura inserida abaixo dele apresenta as médias mensais.

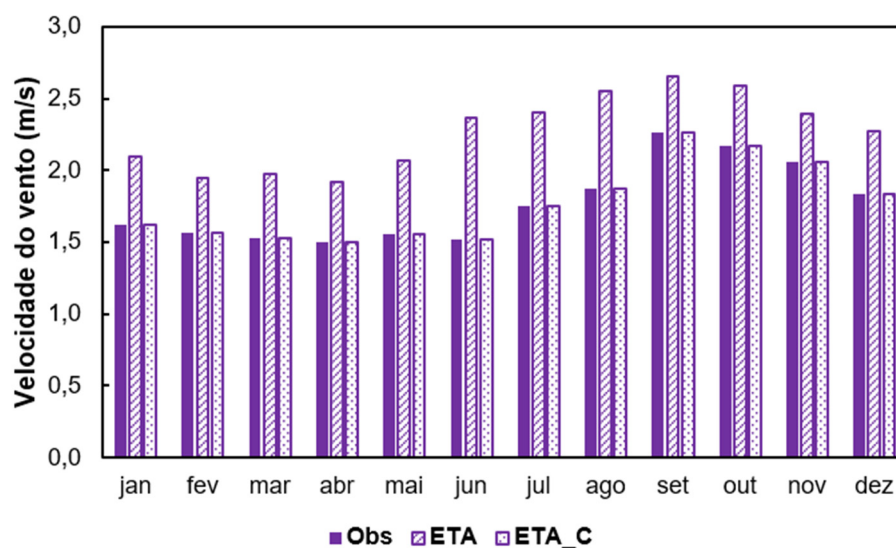
Mês	Dado observado	Dado bruto	Fator de correção
1	24,605404	22,457270	2,1481339
2	24,523580	22,495316	2,0282640
3	24,137980	21,807307	2,3306733
4	22,604141	20,818958	1,7851837
5	19,296869	18,621778	0,6750902
6	18,525000	17,501108	1,0238919
7	18,196010	17,355503	0,8405067
8	19,943636	18,151391	1,7922457
9	21,244747	20,662148	0,5825998
10	22,715758	21,335730	1,3800275
11	23,185101	22,515299	0,6698016
12	24,037323	22,830880	1,2064433



Obs = média dos dados de temperatura observados; ETA = média dos dados brutos de temperatura advindos do Modelo Climático Regional Eta-HadGEM2-ES; ETA\_C = média dos dados de temperatura advindos do Modelo Climático Regional Eta-HadGEM2-ES corrigidos pelo método de escalonamento linear.

O Quadro apresentado abaixo contém os fatores de correção da velocidade do vento, enquanto a Figura inserida após ele apresenta as médias mensais.

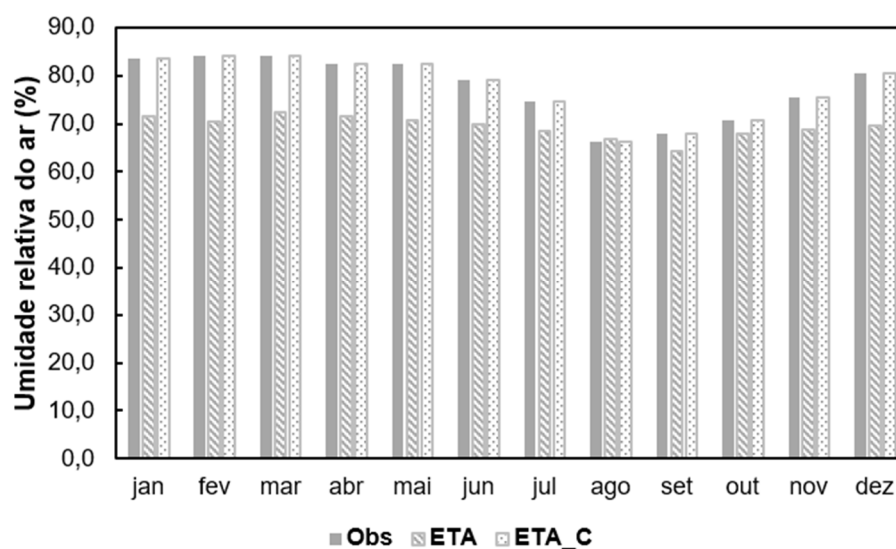
Mês	Dado observado	Dado bruto	Fator de correção
1	1,624	2,093	0,7757585
2	1,569	1,952	0,8035910
3	1,527	1,973	0,7741044
4	1,497	1,918	0,7803473
5	1,552	2,071	0,7493461
6	1,521	2,364	0,6434972
7	1,749	2,400	0,7289068
8	1,869	2,556	0,7312171
9	2,260	2,660	0,8496550
10	2,170	2,588	0,8386121
11	2,061	2,391	0,8620357
12	1,832	2,271	0,8064286



Obs = média dos dados de velocidade do vento observados; ETA = média dos dados brutos de velocidade do vento advindos do Modelo Climático Regional Eta- HadGEM2-ES; ETA\_C = média dos dados de velocidade do vento advindos do Modelo Climático Regional Eta- HadGEM2-ES corrigidos pelo método de escalonamento linear.

Quadro abaixo apresenta os fatores de correção da umidade relativa do ar, enquanto a Figura inserida após ele apresenta as médias mensais.

Mês	Dado observado	Dado bruto	Fator de correção
1	83,524364	71,426661	1,1693724
2	84,021254	70,541002	1,1910981
3	84,134311	72,503500	1,1604172
4	82,530091	71,528198	1,1538120
5	82,461220	70,812423	1,1645022
6	79,236750	69,780983	1,1355064
7	74,564947	68,371238	1,0905894
8	66,364864	66,770972	0,9939179
9	68,026000	64,335862	1,0573574
10	70,858955	68,031882	1,0415551
11	75,502629	68,876907	1,0961966
12	80,448265	69,684323	1,1544672

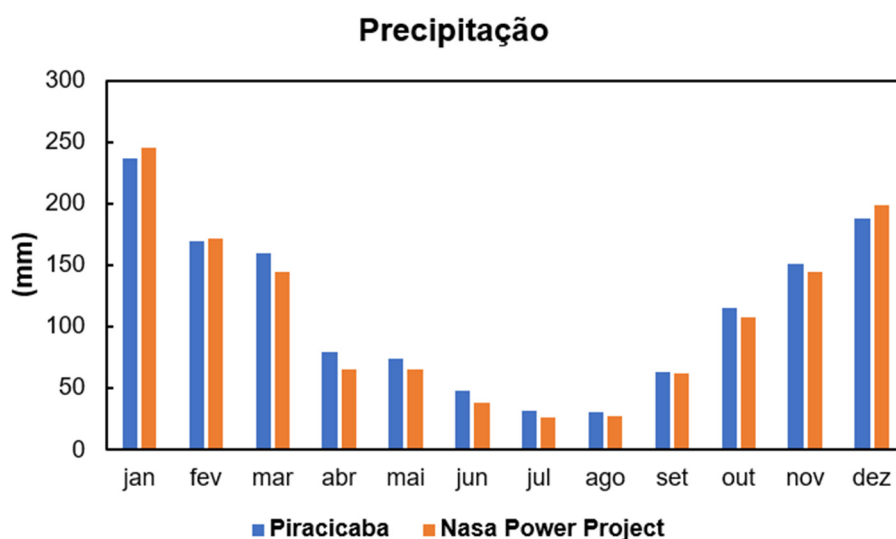


Obs = média dos dados de umidade relativa do ar observados; ETA = média dos dados brutos de umidade relativa do ar advindos do Modelo Climático Regional Eta-HadGEM2-ES; ETA\_C = média dos dados de umidade relativa do ar advindos do Modelo Climático Regional Eta-HadGEM2-ES corrigidos pelo método de escalonamento linear.

## APÊNDICE F – Validação dos dados da Plataforma Nasa *Power Project*

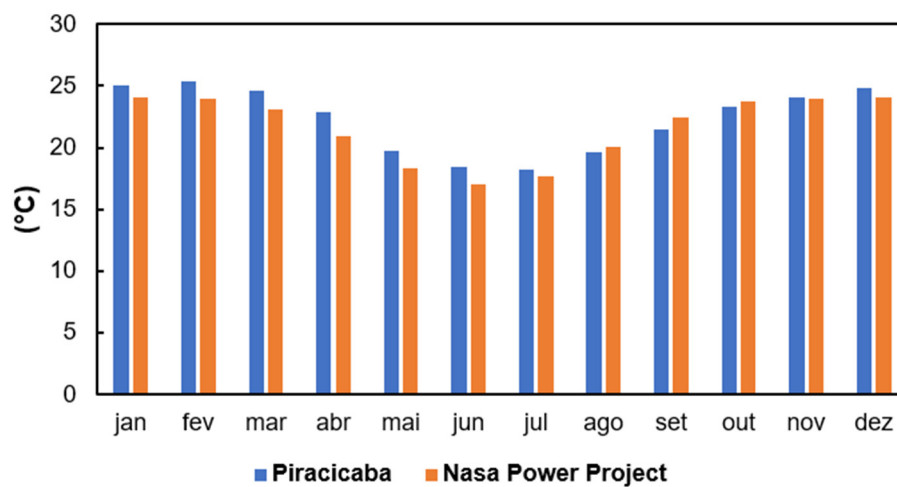
Os dados observados por satélite presentes na Plataforma Nasa *Power Project* foram comparados com os dados registrados no Posto Meteorológico da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", que está localizado na cidade de Piracicaba. Esse posto foi selecionado devido à localização, visto que se encontra dentro dos limites da área de drenagem das bacias PCJ, e em virtude do longo período de dados disponíveis, desde 1917 para temperatura e precipitação e desde 1943 para velocidade do vento e umidade relativa do ar.

A seguir são apresentados os gráficos de comparação para variáveis climáticas: precipitação, temperatura, velocidade do vento e umidade relativa do ar, seguidos das tabelas referentes ao teste de correlação de Pearson. Os valores apresentados, representam a média mensal do período 1981 a 2019. Esse recorte temporal foi escolhido porque o ano de 1981, é o primeiro ano com informações completas para as variáveis estudadas na Plataforma Nasa *Power Project*.



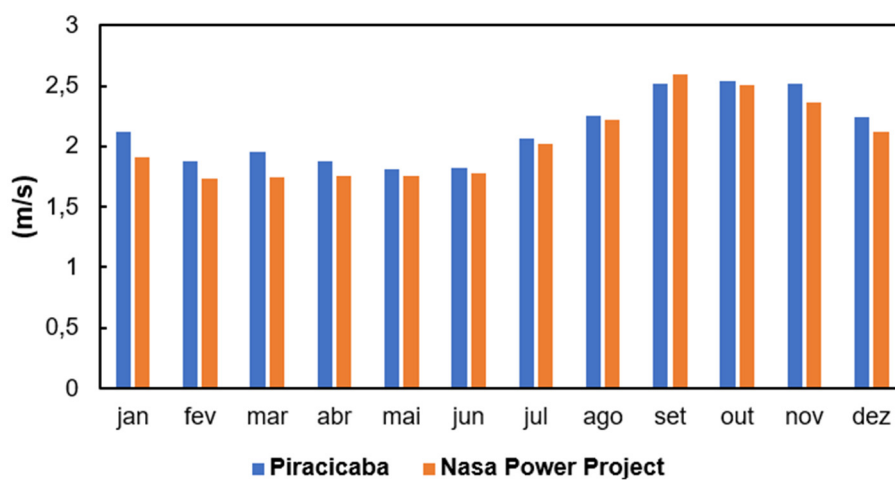
<b>Precipitação</b>	<i>Piracicaba</i>	<i>Nasa Power Project</i>
Piracicaba	1	
Nasa Power Project	0,99554	1

## Temperatura

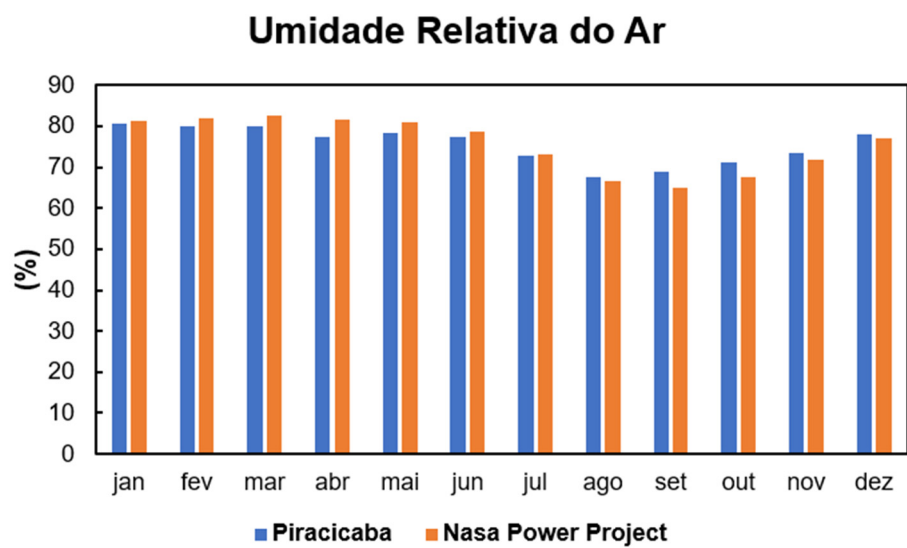


<i>Temperatura</i>	<i>Piracicaba</i>	<i>Nasa Power Project</i>
Piracicaba	1	
Nasa Power Project	0,939785	1

## Velocidade do Vento



<i>Velocidade do Vento</i>	<i>Piracicaba</i>	<i>Nasa Power Project</i>
Piracicaba	1	
Nasa Power Project	0,967563	1



<i>Umidade Relativa do Ar</i>	<i>Piracicaba</i>	<i>Nasa Power Project</i>
Piracicaba	1	
Nasa Power Project	0,96558863	1

## APÊNDICE G – Área das sub-bacias hidrográficas no cenário BAU

Ano	Café (km <sup>2</sup> )	Cana-de-açúcar (km <sup>2</sup> )	Citros (km <sup>2</sup> )	Mosaico de culturas e pastagem (km <sup>2</sup> )	Outras culturas perenes (km <sup>2</sup> )	Soja (km <sup>2</sup> )	Silvicultura (km <sup>2</sup> )	Pastagem (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ (km <sup>2</sup> )	Total (km <sup>2</sup> )
1995	18,3	1.731,0	4,1	4.768,7	0,1	138,8	84,2	4.709,3	3.923,5	15.378,0
1996	17,2	1.724,1	7,4	4.995,3	0,1	82,7	91,5	4.516,3	3.943,6	15.378,0
1997	16,8	1.727,2	6,0	5.079,6	0,1	54,7	99,3	4.406,9	3.987,6	15.378,0
1998	19,3	1.740,4	4,8	5.100,6	0,1	72,2	102,6	4.330,8	4.007,1	15.378,0
1999	21,3	1.773,4	5,2	5.096,9	0,1	64,8	112,8	4.264,1	4.039,6	15.378,0
2000	24,4	1.760,2	4,6	5.105,5	0,1	122,8	130,1	4.209,2	4.021,2	15.378,0
2001	24,0	1.760,8	6,9	5.069,0	0,1	189,2	142,5	4.139,3	4.046,1	15.378,0
2002	24,1	1.829,4	8,5	5.075,0	0,3	216,5	149,7	4.009,2	4.065,6	15.378,0
2003	21,3	1.893,0	9,4	5.050,3	0,3	257,8	156,4	3.905,7	4.083,8	15.378,0
2004	20,0	1.987,8	9,6	5.019,3	0,3	198,7	159,1	3.871,1	4.112,2	15.378,0
2005	17,8	2.041,7	5,7	4.989,1	0,3	175,1	173,6	3.817,8	4.156,9	15.378,0
2006	16,4	2.074,3	4,1	4.989,7	0,3	163,0	192,3	3.752,2	4.185,7	15.378,0
2007	16,5	2.102,1	6,3	5.083,5	0,3	153,5	216,8	3.590,7	4.208,2	15.378,0
2008	14,6	2.177,7	9,2	5.204,7	0,3	118,5	233,0	3.376,7	4.243,3	15.378,0
2009	14,2	2.193,8	15,2	5.300,6	0,3	131,7	259,3	3.180,4	4.282,6	15.378,0
2010	13,5	2.197,3	16,6	5.415,7	0,3	158,1	286,1	2.963,6	4.326,9	15.378,0
2011	12,9	2.188,3	35,9	5.526,3	0,3	118,8	317,3	2.795,7	4.382,5	15.378,0
2012	12,3	2.217,5	40,2	5.484,8	0,4	143,9	347,7	2.703,3	4.427,9	15.378,0
2013	13,5	2.186,2	65,4	5.456,8	0,4	120,4	377,2	2.653,1	4.505,1	15.378,0
2014	13,3	2.226,7	66,6	5.230,6	0,4	286,6	417,4	2.610,1	4.526,2	15.378,0
2015	14,2	2.224,2	73,5	5.057,8	1,3	320,6	430,3	2.681,9	4.574,1	15.378,0
2016	14,8	2.250,2	77,7	4.966,2	2,7	301,6	448,1	2.694,4	4.622,4	15.378,0
2017	15,4	2.201,1	75,1	5.024,7	4,9	318,0	463,7	2.645,6	4.629,5	15.378,0
2018	16,5	2.181,0	71,4	5.070,7	5,3	317,7	476,7	2.604,5	4.634,3	15.378,0
2019	17,0	2.043,2	75,6	5.217,7	6,0	311,5	526,6	2.594,5	4.586,1	15.378,0

### Divisão da Sub-bacia PCJ (Continua)

Ano	Sub-bacia PCJ\ Aflo-ramento Rochoso (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\ Campo Alagado e Pantanosa (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\ Formação Campes-tre (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\ Formação Florestal (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\ Formação Savânica (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\ Infraestru-tura Urbana (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\ Ou-tras Áreas não Vegeta-das (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\ Rio Lago e Oceano (km <sup>2</sup> )	Total Sub-bacia PCJ (km <sup>2</sup> )
1995	1,3	29,6	2,2	2.753,3	14,9	761,7	47,2	313,3	3.923,5
1996	1,3	29,0	2,2	2.733,4	14,6	801,4	48,1	313,6	3.943,6
1997	1,2	27,3	2,2	2.724,8	14,8	854,5	47,7	315,1	3.987,6
1998	1,5	26,8	2,2	2.706,8	15,5	888,8	49,3	316,2	4.007,1
1999	1,5	29,5	2,1	2.688,6	15,7	937,6	48,6	316,0	4.039,6
2000	1,8	32,0	2,1	2.668,2	15,5	970,1	54,2	277,2	4.021,2
2001	1,9	35,3	2,1	2.665,2	15,3	996,2	57,8	272,2	4.046,1
2002	1,8	37,4	2,0	2.650,3	15,0	1.024,7	57,7	276,8	4.065,6

### Divisão da Sub-bacia PCJ (Continuação)

Ano	Sub-bacia PCJ\ Aflo-ramento Rochoso (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\Camp o Alagado e Área Pantanosa (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\Forma-ção Campes-tre (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\Forma-ção Florestal (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\Forma-ção Savânica (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\ Infraestru-tura Urbana (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\Ou -tras Áreas não Vegeta-das (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\Ri o Lago e Oceano (km <sup>2</sup> )	Total Sub-bacia PCJ (km <sup>2</sup> )
2003	1,7	36,1	1,9	2.645,5	14,8	1.056,0	57,6	270,0	4.083,8
2004	1,8	36,3	1,9	2.649,2	15,2	1.076,8	61,2	270,0	4.112,2
2005	1,8	36,5	1,9	2.653,8	15,5	1.107,1	62,8	277,6	4.156,9
2006	1,7	37,1	1,6	2.659,0	16,0	1.130,4	61,4	278,5	4.185,7
2007	1,7	35,6	1,4	2.666,9	16,0	1.149,9	61,2	275,6	4.208,2
2008	1,7	32,4	1,3	2.681,7	15,8	1.172,2	62,9	275,1	4.243,3
2009	1,7	31,5	1,3	2.697,9	16,0	1.193,9	63,7	276,8	4.282,6
2010	1,7	31,1	1,3	2.714,8	15,7	1.218,8	65,0	278,5	4.326,9
2011	1,6	31,0	1,4	2.745,6	15,4	1.242,6	65,5	279,4	4.382,5
2012	1,6	31,8	1,5	2.763,3	15,3	1.270,6	67,4	276,5	4.427,9
2013	1,7	32,6	1,5	2.824,4	15,3	1.293,3	73,6	262,7	4.505,1
2014	1,8	32,8	1,5	2.832,7	16,1	1.310,1	79,8	251,4	4.526,2
2015	1,7	32,4	1,7	2.859,2	16,4	1.327,0	81,3	254,5	4.574,1
2016	1,7	32,0	1,7	2.882,5	17,1	1.343,7	78,3	265,3	4.622,4
2017	1,8	33,0	1,8	2.879,9	17,6	1.354,6	75,4	265,5	4.629,5
2018	1,8	32,1	2,1	2.879,2	17,9	1.370,4	76,3	254,4	4.634,3
2019	1,8	30,4	2,4	2.822,2	17,7	1.380,4	76,3	255,0	4.586,1

**APÊNDICE H – Área das sub-bacias hidrográficas nos cenários RCP4.5 e  
RCP8.5**

(Continua)

<b>Ano</b>	<b>Café (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Cana- de- açúcar (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Citros (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Mosaico de culturas e pastagem (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Outras culturas perenes (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Soja (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Silvicultura (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Pastagem (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Sub- bacia PCJ (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Total (km<sup>2</sup>)</b>
2020	18,1	2.018,2	76,4	4.660,8	561,8	357,9	544,3	2.574,8	4.565,7	15.378,0
2021	16,3	2.362,9	82,6	4.656,9	186,3	322,1	619,0	2.532,3	4.599,7	15.378,0
2022	16,0	2.387,2	86,1	4.652,9	119,9	330,4	665,2	2.501,2	4.619,2	15.378,0
2023	15,7	2.411,4	89,6	4.649,0	53,5	338,7	711,4	2.470,1	4.638,6	15.378,0
2024	15,4	2.422,8	93,1	4.645,0	0,0	347,0	757,7	2.439,0	4.658,1	15.378,0
2025	15,1	2.384,3	96,6	4.641,1	0,0	355,3	803,9	2.408,0	4.673,8	15.378,0
2026	14,8	2.408,7	100,1	4.637,1	0,0	363,6	779,9	2.376,9	4.697,0	15.378,0
2027	14,5	2.432,9	103,6	4.633,1	0,0	372,0	759,7	2.345,8	4.716,4	15.378,0
2028	14,2	2.457,3	107,1	4.629,2	0,0	380,3	739,5	2.314,7	4.735,9	15.378,0
2029	13,9	2.481,6	110,6	4.625,2	0,0	388,6	719,2	2.283,6	4.755,3	15.378,0
2030	13,6	2.505,8	114,1	4.621,3	0,0	396,9	785,0	2.252,6	4.688,8	15.378,0
2031	13,3	2.510,2	117,6	4.617,3	0,0	405,2	791,2	2.221,5	4.701,7	15.378,0
2032	13,0	2.422,5	121,1	4.613,3	0,0	413,5	797,5	2.190,4	4.806,7	15.378,0
2033	12,7	2.413,4	124,6	4.609,4	0,0	421,8	803,7	2.159,3	4.833,1	15.378,0
2034	12,4	2.401,2	128,1	4.605,4	0,0	430,1	819,9	2.128,2	4.852,6	15.378,0
2035	12,1	2.407,5	131,6	4.601,5	0,0	438,4	826,1	2.097,2	4.863,6	15.378,0
2036	11,8	2.421,7	135,1	4.597,5	0,0	446,7	832,4	2.066,1	4.866,7	15.378,0
2037	11,5	2.436,1	138,6	4.593,6	0,0	455,1	848,6	2.035,0	4.859,6	15.378,0
2038	11,3	2.448,6	142,1	4.589,6	0,0	463,4	849,8	2.003,9	4.869,4	15.378,0
2039	11,0	2.460,8	145,6	4.585,6	0,0	471,7	851,0	1.972,9	4.879,5	15.378,0
2040	10,7	2.464,0	149,1	4.581,7	0,0	480,0	853,3	1.941,8	4.897,6	15.378,0
2041	10,4	2.468,4	152,6	4.577,7	0,0	488,3	863,5	1.910,7	4.906,5	15.378,0
2042	10,1	2.477,7	156,1	4.573,8	0,0	496,6	869,7	1.879,6	4.914,5	15.378,0
2043	9,8	2.482,0	159,6	4.569,8	0,0	504,9	875,9	1.848,5	4.927,5	15.378,0
2044	9,5	2.486,3	163,1	4.565,8	0,0	513,2	877,2	1.817,5	4.945,5	15.378,0
2045	9,2	2.500,7	166,6	4.561,9	0,0	521,5	878,4	1.786,4	4.953,4	15.378,0
2046	8,9	2.514,9	170,1	4.557,9	0,0	529,9	880,6	1.755,3	4.960,5	15.378,0
2047	8,6	2.519,2	173,6	4.554,0	0,0	538,2	885,8	1.724,2	4.974,4	15.378,0
2048	8,3	2.533,6	177,1	4.550,0	0,0	546,5	887,1	1.693,2	4.982,4	15.378,0
2049	8,0	2.537,8	180,6	4.546,1	0,0	554,8	892,4	1.662,1	4.996,3	15.378,0
2050	7,7	2.546,8	184,1	4.542,1	0,0	563,1	899,5	1.631,0	5.003,8	15.378,0
2051	7,4	2.551,5	187,6	4.538,1	0,0	571,4	906,7	1.599,9	5.015,3	15.378,0
2052	7,1	2.552,5	191,1	4.534,2	0,0	579,7	912,0	1.568,8	5.032,7	15.378,0
2053	6,8	2.565,1	194,6	4.530,2	0,0	588,0	918,4	1.537,8	5.037,1	15.378,0
2054	6,5	2.574,5	198,1	4.526,3	0,0	596,3	924,4	1.506,7	5.045,3	15.378,0
2055	6,2	2.578,7	201,6	4.522,3	0,0	604,7	930,6	1.475,6	5.058,3	15.378,0
2056	5,9	2.588,1	205,1	4.518,3	0,0	613,0	936,9	1.444,5	5.066,3	15.378,0
2057	5,6	2.592,4	208,5	4.514,4	0,0	621,3	943,1	1.413,5	5.079,2	15.378,0
2058	5,3	2.596,8	212,0	4.510,4	0,0	629,6	949,3	1.382,4	5.092,2	15.378,0
2059	5,0	2.601,0	215,5	4.506,5	0,0	637,9	954,9	1.351,3	5.105,8	15.378,0

(Continuação)

Ano	Café (km <sup>2</sup> )	Canade-açúcar (km <sup>2</sup> )	Citros (km <sup>2</sup> )	Mosaico de culturas e pastagem (km <sup>2</sup> )	Outras culturas perenes (km <sup>2</sup> )	Soja (km <sup>2</sup> )	Silvicultura (km <sup>2</sup> )	Pastagem (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ (km <sup>2</sup> )	Total (km <sup>2</sup> )
2060	4,7	2.605,4	219,0	4.502,5	0,0	646,2	961,8	1.320,2	5.118,2	15.378,0
2061	4,4	2.609,6	222,5	4.498,6	0,0	654,5	968,0	1.289,1	5.131,2	15.378,0
2062	4,1	2.614,0	226,0	4.494,6	0,0	662,8	970,2	1.258,1	5.148,2	15.378,0
2063	3,8	2.618,3	229,5	4.490,6	0,0	671,1	980,4	1.227,0	5.157,1	15.378,0
2064	3,5	2.622,6	233,0	4.486,7	0,0	679,5	986,7	1.195,9	5.170,2	15.378,0
2065	3,2	2.626,9	236,5	4.482,7	0,0	687,8	991,9	1.164,8	5.184,1	15.378,0
2066	2,9	2.634,2	240,0	4.478,8	0,0	696,1	999,1	1.133,7	5.193,1	15.378,0
2067	2,6	2.637,6	243,5	4.474,8	0,0	704,4	1.005,3	1.102,7	5.207,0	15.378,0
2068	2,3	2.643,8	247,0	4.470,8	0,0	712,7	1.011,6	1.071,6	5.218,1	15.378,0
2069	2,0	2.650,2	250,5	4.466,9	0,0	721,0	1.017,8	1.040,5	5.229,0	15.378,0
2070	1,7	2.655,8	254,0	4.462,9	0,0	729,3	1.025,0	1.009,4	5.239,8	15.378,0

## Divisão da Sub-bacia PCJ (Continua)

Ano	Sub-bacia PCJ\ Aflo-ramen-to Ro-choso (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\Campo Alagado e Área Pantanosa (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\For-mação Campes-tre (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\ Formação Florestal (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\ Formação Savânica (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\ Infraestra-utura Urbana (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\Ou-tras Áreas não Vegeta-das (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\Rio Lago e Oceano (km <sup>2</sup> )	Total Sub-bacia PCJ (km <sup>2</sup> )
2020	1,9	28,6	2,5	2.826,3	17,3	1.382,3	57,4	249,4	4.565,7
2021	1,9	28,6	2,3	2.838,0	17,9	1.404,1	57,4	249,4	4.599,7
2022	1,9	28,6	2,3	2.846,0	18,0	1.415,6	57,4	249,4	4.619,2
2023	1,9	28,6	2,3	2.853,9	18,1	1.427,0	57,4	249,4	4.638,6
2024	1,9	28,6	2,3	2.861,8	18,2	1.438,5	57,4	249,4	4.658,1
2025	1,9	28,6	2,3	2.869,7	18,3	1.446,2	57,4	249,4	4.673,8
2026	1,9	28,6	2,2	2.877,7	18,4	1.461,3	57,4	249,4	4.697,0
2027	1,9	28,6	2,2	2.885,6	18,5	1.472,8	57,4	249,4	4.716,4
2028	1,9	28,6	2,2	2.893,5	18,6	1.484,2	57,4	249,4	4.735,9
2029	1,9	28,6	2,2	2.901,5	18,7	1.495,7	57,4	249,4	4.755,3
2030	1,9	28,6	2,2	2.823,4	18,8	1.507,1	57,4	249,4	4.688,8
2031	1,9	28,6	2,2	2.825,3	18,9	1.518,0	57,4	249,4	4.701,7
2032	1,9	28,6	2,1	2.925,3	19,0	1.523,0	57,4	249,4	4.806,7
2033	1,9	28,6	2,1	2.933,2	19,1	1.541,4	57,4	249,4	4.833,1
2034	1,9	28,6	2,1	2.941,1	19,2	1.552,9	57,4	249,4	4.852,6
2035	1,9	28,6	2,1	2.949,0	19,3	1.555,9	57,4	249,4	4.863,6
2036	1,9	28,6	2,1	2.957,0	19,4	1.550,9	57,4	249,4	4.866,7
2037	1,9	28,6	2,0	2.938,6	19,5	1.562,2	57,4	249,4	4.859,6
2038	1,9	28,6	2,0	2.942,8	19,6	1.567,6	57,4	249,4	4.869,4
2039	1,9	28,6	2,0	2.950,5	19,7	1.570,1	57,4	249,4	4.879,5
2040	1,9	28,6	2,0	2.962,0	19,8	1.576,5	57,4	249,4	4.897,6
2041	1,9	28,6	2,0	2.966,6	19,9	1.580,8	57,4	249,4	4.906,5
2042	1,9	28,6	1,9	2.969,5	20,0	1.585,7	57,4	249,4	4.914,5
2043	1,9	28,6	1,9	2.972,5	20,1	1.595,7	57,4	249,4	4.927,5

### Divisão da Sub-bacia PCJ (Continuação)

Ano	Sub-bacia PCJ\ Aflo-ramen-to Ro-choso (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\Campo Alagado e Pantanosa (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\For-mação Campes-tre (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\ Formação Florestal (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\ Formação Savânica (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\ Infraestru-tura Urbana (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\Ou -tras Áreas não Vegeta-das (km <sup>2</sup> )	Sub-bacia PCJ\Rio Lago e Oceano (km <sup>2</sup> )	Total Sub-bacia PCJ (km <sup>2</sup> )
2044	1,9	28,6	1,9	2.980,4	20,2	1.605,7	57,4	249,4	4.945,5
2045	1,9	28,6	1,9	2.983,3	20,3	1.610,6	57,4	249,4	4.953,4
2046	1,9	28,6	1,9	2.988,3	20,4	1.612,7	57,4	249,4	4.960,5
2047	1,9	28,6	1,8	2.989,2	20,5	1.625,6	57,4	249,4	4.974,4
2048	1,9	28,6	1,8	2.992,1	20,6	1.630,5	57,4	249,4	4.982,4
2049	1,9	28,6	1,8	2.998,0	20,7	1.638,5	57,4	249,4	4.996,3
2050	1,9	28,6	1,8	3.003,0	20,8	1.640,9	57,4	249,4	5.003,8
2051	1,9	28,6	1,8	3.008,0	20,9	1.647,4	57,4	249,4	5.015,3
2052	1,9	28,6	1,8	3.013,8	21,0	1.658,8	57,4	249,4	5.032,7
2053	1,9	28,6	1,7	3.016,8	21,1	1.660,2	57,4	249,4	5.037,1
2054	1,9	28,6	1,7	3.019,7	21,2	1.665,4	57,4	249,4	5.045,3
2055	1,9	28,6	1,7	3.027,6	21,3	1.670,4	57,4	249,4	5.058,3
2056	1,9	28,6	1,7	3.030,6	21,4	1.675,4	57,4	249,4	5.066,3
2057	1,9	28,6	1,7	3.033,5	21,5	1.685,3	57,4	249,4	5.079,2
2058	1,9	28,6	1,6	3.041,4	21,6	1.690,3	57,4	249,4	5.092,2
2059	1,9	28,6	1,6	3.049,3	21,7	1.695,9	57,4	249,4	5.105,8
2060	1,9	28,6	1,6	3.057,3	21,8	1.700,2	57,4	249,4	5.118,2
2061	1,9	28,6	1,6	3.060,2	21,9	1.710,3	57,4	249,4	5.131,2
2062	1,9	28,6	1,6	3.073,1	22,0	1.714,2	57,4	249,4	5.148,2
2063	1,9	28,6	1,5	3.081,1	22,1	1.715,2	57,4	249,4	5.157,1
2064	1,9	28,6	1,5	3.084,0	22,2	1.725,2	57,4	249,4	5.170,2
2065	1,9	28,6	1,5	3.088,9	22,3	1.734,1	57,4	249,4	5.184,1
2066	1,9	28,6	1,5	3.094,8	22,4	1.737,1	57,4	249,4	5.193,1
2067	1,9	28,6	1,5	3.102,8	22,5	1.743,0	57,4	249,4	5.207,0
2068	1,9	28,6	1,4	3.109,9	22,6	1.746,9	57,4	249,4	5.218,1
2069	1,9	28,6	1,4	3.114,3	22,7	1.753,3	57,4	249,4	5.229,0
2070	1,9	28,6	1,4	3.117,6	22,8	1.760,7	57,4	249,4	5.239,8

## APÊNDICE I – Produção agrícola nas bacias PCJ

### Cenário BAU- Os dados de produção agrícola municipal foram obtidos de SIDRA (2023)

Ano	Abacate	Banana	Feijão	Mandioca	Milho	Uva	Manga	Batata	Arroz	Tomate	Soja	Café	Cana-de-açúcar	Citros	Total
1995	47.535	488	7.606	89.663	156.221	61.981	23.111	97.773	10.531	123.838	3.243	17.191	20.673.371	7.945.272	29.257.824,0
1996	45.954	1.125	7.274	19.539	128.223	61.014	23.043	101.995	7.467	126.899	4.023	27.023	22.103.736	6.713.028	29.370.343,0
1997	39.641	462	6.898	83.462	131.654	133.740	20.650	97.844	6.510	102.865	3.969	24.308	20.559.949	9.415.050	30.627.002,0
1998	41.926	539	5.951	70.168	133.672	61.950	23.699	115.271	4.565	77.800	3.602	30.100	20.802.444	9.156.789	30.528.476,0
1999	34.219	529	7.214	90.518	144.386	62.147	23.648	122.690	5.401	88.258	3.299	26.328	20.216.778	10.304.891	31.130.306,0
2000	42.408	991	6.734	84.639	176.003	78.744	23.433	94.500	3.726	71.138	3.211	33.985	19.522.064	10.165.087	30.306.663,0
2001	30.303	9.131	6.351	93.058	206.414	88.961	10.245	106.542	4.510	82.370	3.204	26.931	20.008.168	1.499.677	22.175.865,0
2002	34.802	18.059	7.229	132.770	201.706	90.988	13.393	126.598	2.972	113.110	4.569	21.852	21.460.208	1.387.080	23.615.336,0
2003	38.460	16.063	7.797	168.046	204.647	82.333	13.797	113.823	2.919	105.255	4.631	14.174	22.305.913	1.350.561	24.428.419,0
2004	28.277	17.104	7.180	201.623	204.506	67.803	13.825	105.811	3.965	88.505	6.153	17.832	22.198.058	1.359.919	24.320.561,0
2005	24.397	17.466	6.731	126.584	200.928	71.032	10.712	121.816	3.008	85.762	6.836	16.213	21.771.580	1.430.288	23.893.353,0
2006	25.770	17.534	7.199	129.519	215.981	74.171	9.444	94.641	3.191	84.243	5.202	24.074	22.343.862	1.522.699	24.557.530,0
2007	23.916	17.546	8.635	86.845	175.054	79.566	9.781	147.729	2.301	75.373	5.199	20.749	24.020.320	1.338.773	26.011.787,0
2008	15.363	17.964	7.056	125.460	231.576	75.360	8.480	87.550	2.710	85.809	5.090	21.933	25.089.053	1.527.629	27.301.033,0
2009	15.619	13.818	5.833	121.267	216.198	72.550	7.748	83.549	1.113	49.634	5.490	20.211	24.982.871	1.386.452	26.982.353,0
2010	20.180	15.742	4.869	137.101	193.521	71.792	7.652	63.276	1.599	31.442	4.043	22.264	24.578.770	1.447.401	26.599.652,0
2011	24.142	15.394	4.976	160.940	245.235	72.973	13.652	69.774	1.820	51.604	7.185	26.213	27.201.620	1.515.302	29.410.830,0
2012	24.416	17.219	3.515	138.148	245.660	70.190	13.644	54.445	880	51.159	5.218	27.426	26.006.919	1.235.985	27.894.824,0
2013	23.441	21.880	4.410	152.105	274.223	53.511	12.090	58.651	316	48.458	5.729	22.654	27.468.890	1.199.804	29.346.162,0
2014	17.768	20.576	3.053	144.563	165.571	49.082	9.393	45.679	136	20.858	9.597	22.244	22.984.980	917.430	24.410.930,0
2015	18.206	17.944	3.208	151.014	220.534	48.241	10.332	45.091	95	49.665	13.265	23.061	24.387.710	857.848	25.846.214,0
2016	19.066	18.343	3.192	155.137	231.078	47.621	10.378	49.798	64	46.074	25.927	25.789	25.207.732	812.818	26.653.017,0
2017	23.462	19.310	3.285	142.615	248.755	49.949	10.164	42.114	54	52.805	27.309	22.199	25.876.261	841.930	27.360.212,0
2018	25.987	20.598	2.852	143.082	232.221	48.818	4.057	39.840	48	69.957	33.728	23.365	25.047.104	820.626	26.512.283,0
2019	21.906	19.237	3.396	133.178	273.920	55.865	6.102	40.455	47	89.175	42.448	22.695	24.394.314	843.745	25.946.483,0

### Cenários RCP4.5 e RCP8.5- Dados estimados (Continua)

Ano	Abacate	Banana	Feijão	Mandioca	Milho	Uva	Manga	Batata	Arroz	Tomate	Soja	Café	Cana-de-açúcar	Citros	Total
2020	15.322	20.317	3.345	170.127	263.097	54.918	12.336	126.875	74	59.674	30.242	22.772	24.648.804	765.575	26.193.478,2
2021	14.505	21.179	3.296	173.299	267.654	56.199	12.356	112.183	74	58.914	31.305	22.725	24.903.295	760.896	26.437.879,1
2022	19.168	22.041	3.247	176.471	272.211	57.480	12.376	123.618	74	58.153	32.367	22.678	25.157.785	756.216	26.713.884,8
2023	23.092	22.902	3.198	179.643	276.768	58.761	12.396	130.842	74	57.393	33.430	22.631	25.412.276	751.537	26.984.942,8
2024	23.494	23.764	3.149	182.815	281.325	60.042	12.416	116.161	74	56.632	34.493	22.584	25.666.766	746.858	27.230.573,3
2025	22.083	24.626	3.100	185.987	285.882	61.323	12.436	127.606	74	55.872	35.555	22.537	25.921.257	742.178	27.500.515,9
2026	14.961	25.488	3.051	189.159	290.439	62.605	12.456	134.840	74	55.111	36.618	22.490	26.175.747	737.499	27.760.536,9
2027	14.144	26.350	3.002	192.331	294.996	63.886	12.476	120.169	74	54.350	37.681	22.443	26.430.238	732.820	28.004.958,8
2028	18.806	27.211	2.953	195.503	299.553	65.167	12.496	131.623	74	53.590	38.743	22.396	26.684.728	728.141	28.280.984,5
2029	22.730	28.073	2.904	198.675	304.110	66.448	12.517	138.866	74	52.829	39.806	22.349	26.939.218	723.461	28.552.059,5
2030	23.133	28.935	2.855	201.847	308.667	67.729	12.537	124.203	74	52.069	40.869	22.302	27.193.709	718.782	28.797.709,0
2031	21.721	29.797	2.806	205.019	313.224	69.010	12.557	135.666	74	51.308	41.932	22.255	27.448.199	714.103	29.067.669,6
2032	14.599	30.659	2.757	208.191	317.782	70.291	12.577	142.916	74	50.548	42.994	22.208	27.702.690	709.424	29.327.708,6
2033	13.782	31.520	2.708	211.363	322.339	71.572	12.597	128.260	74	49.787	44.057	22.161	27.957.180	704.744	29.572.143,5
2034	18.445	32.382	2.658	214.535	326.896	72.853	12.617	139.730	74	49.027	45.120	22.113	28.211.671	700.065	29.848.186,1
2035	22.369	33.244	2.609	217.707	331.453	74.134	12.637	146.987	74	48.266	46.182	22.066	28.466.161	695.386	30.119.276,2

**Cenários RCP4.5 e RCP8.5- Dados estimados (Continuação)**

Ano	Abacate	Banana	Feijão	Mandioca	Milho	Uva	Manga	Batata	Arroz	Tomate	Soja	Café	Cana-de-açúcar	Citros	Total
2036	22.771	34.106	2.560	220.879	336.010	75.416	12.657	132.337	74	47.505	47.245	22.019	28.720.651	690.706	30.364.936,6
2037	21.360	34.968	2.511	224.051	340.567	76.697	12.677	143.813	74	46.745	48.308	21.972	28.975.142	686.027	30.634.911,3
2038	14.238	35.829	2.462	227.223	345.124	77.978	12.697	151.075	74	45.984	49.370	21.925	29.229.632	681.348	30.894.960,1
2039	13.421	36.691	2.413	230.395	349.681	79.259	12.717	136.432	74	45.224	50.433	21.878	29.484.123	676.669	31.139.410,0
2040	18.083	37.553	2.364	233.566	354.238	80.540	12.737	147.912	74	44.463	51.496	21.831	29.738.613	671.989	31.415.459,5
2041	22.007	38.415	2.315	236.738	358.795	81.821	12.758	155.180	74	43.703	52.559	21.784	29.993.104	667.310	31.686.561,8
2042	22.410	39.277	2.266	239.910	363.352	83.102	12.778	140.541	74	42.942	53.621	21.737	30.247.594	662.631	31.932.234,2
2043	20.998	40.138	2.217	243.082	367.909	84.383	12.798	152.027	74	42.182	54.684	21.690	30.502.084	657.951	32.202.216,9
2044	13.876	41.000	2.168	246.254	372.466	85.664	12.818	159.299	74	41.421	55.747	21.643	30.756.575	653.272	32.462.276,7
2045	13.059	41.862	2.119	249.426	377.023	86.946	12.838	144.665	74	40.661	56.809	21.596	31.011.065	648.593	32.706.734,7
2046	17.722	42.724	2.070	252.598	381.580	88.227	12.858	156.154	74	39.900	57.872	21.549	31.265.556	643.914	32.982.796,3
2047	21.646	43.586	2.021	255.770	386.138	89.508	12.878	163.431	74	39.139	58.935	21.502	31.520.046	639.234	33.253.906,5
2048	22.048	44.447	1.972	258.942	390.695	90.789	12.898	148.800	74	38.379	59.997	21.455	31.774.537	634.555	33.499.587,8
2049	20.637	45.309	1.923	262.114	395.252	92.070	12.918	160.294	74	37.618	61.060	21.408	32.029.027	629.876	33.769.579,6
2050	13.515	46.171	1.873	265.286	399.809	93.351	12.938	167.574	74	36.858	62.123	21.361	32.283.518	625.197	34.029.647,3
2051	12.698	47.033	1.824	268.458	404.366	94.632	12.958	152.947	74	36.097	63.185	21.314	32.538.008	620.517	34.274.111,3
2052	17.360	47.895	1.775	271.630	408.923	95.913	12.978	164.443	74	35.337	64.248	21.267	32.792.498	615.838	34.550.178,9
2053	21.284	48.756	1.726	274.802	413.480	97.194	12.999	171.727	74	34.576	65.311	21.220	33.046.989	611.159	34.821.297,1
2054	21.687	49.618	1.677	277.974	418.037	98.475	13.019	157.103	74	33.816	66.374	21.173	33.301.479	606.479	35.066.983,4
2055	20.275	50.480	1.628	281.146	422.594	99.757	13.039	166.487	74	33.055	67.436	21.125	33.555.970	601.800	35.334.866,1
2056	13.153	51.342	1.579	284.318	427.151	101.038	13.059	167.822	74	32.294	68.499	21.078	33.810.460	597.121	35.588.988,3
2057	12.336	52.204	1.530	287.490	431.708	102.319	13.079	169.156	74	31.534	69.562	21.031	34.064.951	592.442	35.849.415,3
2058	16.999	53.065	1.481	290.662	436.265	103.600	13.099	170.491	74	30.773	70.624	20.984	34.319.441	587.762	36.115.320,8
2059	20.923	53.927	1.432	293.834	440.822	104.881	13.119	171.825	74	30.013	71.687	20.937	34.573.931	583.083	36.380.487,8
2060	21.325	54.789	1.383	297.006	445.379	106.162	13.139	173.160	74	29.252	72.750	20.890	34.828.422	578.404	36.642.135,2
2061	19.914	55.651	1.334	300.178	449.936	107.443	13.159	174.494	74	28.492	73.812	20.843	35.082.912	573.724	36.901.965,7
2062	12.792	56.513	1.285	303.350	454.493	108.724	13.179	175.829	74	27.731	74.875	20.796	35.337.403	569.045	37.156.088,3
2063	11.975	57.374	1.236	306.521	459.051	110.005	13.199	177.163	74	26.971	75.938	20.749	35.591.893	564.366	37.416.514,3
2064	16.637	58.236	1.187	309.693	463.608	111.286	13.219	178.498	74	26.210	77.001	20.702	35.846.384	559.687	37.682.421,7
2065	20.561	59.098	1.138	312.865	468.165	112.568	13.240	179.832	74	25.450	78.063	20.655	36.100.874	555.007	37.947.588,9
2066	20.964	59.960	1.088	316.037	472.722	113.849	13.260	181.167	74	24.689	79.126	20.608	36.355.365	550.328	38.209.236,0
2067	19.552	60.821	1.039	319.209	477.279	115.130	13.280	182.501	74	23.928	80.189	20.561	36.609.855	545.649	38.469.067,6
2068	12.430	61.683	990	322.381	481.836	116.411	13.300	183.836	74	23.168	81.251	20.514	36.864.345	540.970	38.723.189,4
2069	11.613	62.545	941	325.553	486.393	117.692	13.320	185.170	74	22.407	82.314	20.467	37.118.836	536.290	38.983.615,3
2070	16.643	62.545	941	328.725	490.950	118.973	13.340	186.505	74	21.647	83.377	20.420	37.373.326	531.611	39.249.076,5

**APÊNDICE J – Toneladas de CO<sub>2</sub>e por megawatt-hora em função do uso de diesel na agricultura irrigada**

<b>Ano</b>	<b>Irrigação Diesel (tCO<sub>2</sub>e)</b>	<b>Irrigação Diesel (MWh)</b>	<b>Irrigação Diesel (tCO<sub>2</sub>e)/MWh)</b>
<b>Cenário BAU</b>			
1995	6.818,0	25546,5	0,2669
1996	6.069,2	22740,7	0,2669
1997	6.906,1	25876,5	0,2669
1998	6.295,8	23589,6	0,2669
1999	7.892,2	29571,1	0,2669
2000	5.752,7	21554,6	0,2669
2001	4.914,2	18413,2	0,2669
2002	6.309,7	23641,8	0,2669
2003	6.318,9	23676,4	0,2669
2004	3.792,9	14211,6	0,2669
2005	4.211,2	15778,9	0,2669
2006	4.276,3	16022,7	0,2669
2007	4.435,2	16618,2	0,2669
2008	3.322,8	12450,1	0,2669
2009	2.095,3	7850,8	0,2669
2010	4.593,0	17209,5	0,2669
2011	3.567,8	13368,2	0,2669
2012	3.761,2	14092,7	0,2669
2013	3.020,3	11316,9	0,2669
2014	5.520,2	20683,6	0,2669
2015	3.065,3	11485,5	0,2669
2016	3.269,3	12249,7	0,2669
2017	3.406,4	12763,3	0,2669
2018	4.146,4	15536,2	0,2669
2019	3.947,8	14792,1	0,2669

(Continua)

<b>Ano</b>	<b>Irrigação Diesel (tCO<sub>2e</sub>)</b>	<b>Irrigação Diesel (MWh)</b>	<b>Irrigação Diesel (tCO<sub>2e</sub>)/MWh)</b>
<b>Cenário RCP</b>			
2020	4406,53	16510,8	0,2669
2021	3255,25	12197,1	0,2669
2022	4149,32	15547,1	0,2669
2023	3046,33	11414,3	0,2669
2024	3886,68	14563,0	0,2669
2025	2834,62	10621,0	0,2669
2026	3617,43	13554,1	0,2669
2027	2618,06	9809,6	0,2669
2028	3340,31	12515,8	0,2669
2029	2399,49	8990,6	0,2669
2030	3058,95	11461,6	0,2669
2031	2176,83	8156,4	0,2669
2032	2770,49	10380,7	0,2669
2033	1952,94	7317,5	0,2669
2034	2478,59	9287,0	0,2669
2035	1726,98	6470,8	0,2669
2036	2180,32	8169,4	0,2669
2037	1498,08	5613,1	0,2669
2038	1879,41	7042,0	0,2669
2039	1269,11	4755,2	0,2669
2040	1574,59	5899,8	0,2669
2041	1037,99	3889,2	0,2669
2042	1264,53	4738,1	0,2669
2043	807,57	3025,9	0,2669
2044	953,01	3570,8	0,2669
2045	577,00	2162,0	0,2669
2046	637,03	2386,9	0,2669
2047	345,44	1294,3	0,2669
2048	320,37	1200,4	0,2669

(Continuação)

<b>Ano</b>	<b>Irrigação Diesel (tCO<sub>2</sub>e)</b>	<b>Irrigação Diesel (MWh)</b>	<b>Irrigação Diesel (tCO<sub>2</sub>e)/MWh)</b>
<b>Cenário RCP</b>			
2049	115,73	433,6	0,2669
2050	1,72	6,4	0,2669
2051	0,00	0,0	0,0000
2052	0,00	0,0	0,0000
2053	0,00	0,0	0,0000
2054	0,00	0,0	0,0000
2055	0,00	0,0	0,0000
2056	0,00	0,0	0,0000
2057	0,00	0,0	0,0000
2058	0,00	0,0	0,0000
2059	0,00	0,0	0,0000
2060	0,00	0,0	0,0000
2061	0,00	0,0	0,0000
2062	0,00	0,0	0,0000
2063	0,00	0,0	0,0000
2064	0,00	0,0	0,0000
2065	0,00	0,0	0,0000
2066	0,00	0,0	0,0000
2067	0,00	0,0	0,0000
2068	0,00	0,0	0,0000
2069	0,00	0,0	0,0000
2070	0,00	0,0	0,0000

**APÊNDICE L – Toneladas de CO<sub>2</sub>e por megawatt-hora devido à geração de energia elétrica nas bacias PCJ**

<b>Ano</b>	<b>Emissão (tCO<sub>2</sub>e)</b>	<b>Geração de eletricidade (MWh)</b>	<b>Fator de emissão (tCO<sub>2</sub>e)/MWh)</b>
<b>Cenário BAU</b>			
1995	549.669,7	1.739.035,2	0,3161
1996	549.669,7	1.739.035,2	0,3161
1997	549.669,7	1.739.035,2	0,3161
1998	549.669,7	1.739.035,2	0,3161
1999	549.669,7	1.739.035,2	0,3161
2000	549.669,7	1.739.035,2	0,3161
2001	549.669,7	1.739.035,2	0,3161
2002	549.669,7	1.739.035,2	0,3161
2003	549.669,7	1.739.035,2	0,3161
2004	549.669,7	1.739.035,2	0,3161
2005	549.669,7	1.739.035,2	0,3161
2006	549.669,7	1.739.035,2	0,3161
2007	558.692,4	1.756.292,4	0,3181
2008	580.338,4	1.785.200,4	0,3251
2009	592.801,3	1.801.844,4	0,3290
2010	700.505,4	3.355.868,4	0,2087
2011	717.818,7	3.427.174,8	0,2094
2012	752.687,6	3.487.706,4	0,2158
2013	807.130,6	3.560.414,4	0,2267
2014	854.095,2	4.080.583,2	0,2093
2015	940.358,2	4.204.975,2	0,2236
2016	940.741,4	4.221.268,8	0,2229
2017	941.745,9	4.278.208,8	0,2201
2018	1.000.833,6	4.411.273,2	0,2269
2019	1.000.833,6	4.411.273,2	0,2269
<b>Média</b>	<b>679.384,8</b>	<b>2.626.020,2</b>	<b>0,2587</b>

(Continua)

<b>Ano</b>	<b>Emissão (tCO<sub>2e</sub>)</b>	<b>Geração de eletricidade (MWh)</b>	<b>Fator de emissão (tCO<sub>2e</sub>)/MWh)</b>
<b>Cenário RCP</b>			
2020	971.604,7	4.550.995,2	0,2135
2021	968.769,7	4.634.478,0	0,2090
2022	971.572,5	4.724.793,6	0,2056
2023	973.968,7	4.814.233,2	0,2023
2024	975.724,2	4.903.672,8	0,1990
2025	978.527,0	4.993.988,4	0,1959
2026	980.921,1	5.083.340,4	0,1930
2027	982.676,6	5.171.904,0	0,1900
2028	985.479,4	5.263.095,6	0,1872
2029	987.875,6	5.352.535,2	0,1846
2030	989.631,0	5.767.846,8	0,1716
2031	992.433,8	5.859.038,4	0,1694
2032	994.830,0	5.948.478,0	0,1672
2033	996.583,4	6.036.954,0	0,1651
2034	999.386,2	6.128.145,6	0,1631
2035	1.001.126,2	6.215.833,2	0,1611
2036	1.003.929,0	6.307.024,8	0,1592
2037	1.006.340,6	6.397.340,4	0,1573
2038	1.008.080,6	6.485.028,0	0,1554
2039	1.010.883,4	6.576.219,6	0,1537
2040	1.013.293,0	6.665.571,6	0,1520
2041	1.015.033,0	6.754.135,2	0,1503
2042	1.017.835,8	6.845.326,8	0,1487
2043	1.020.247,5	6.934.766,4	0,1471
2044	1.021.987,5	7.023.330,0	0,1455
2045	1.024.790,2	7.114.521,6	0,1440
2046	1.027.201,9	7.203.961,2	0,1426
2047	1.028.939,8	7.292.437,2	0,1411
2048	1.031.742,6	7.382.752,8	0,1398

(Continuação)

<b>Ano</b>	<b>Emissão (tCO<sub>2</sub>e)</b>	<b>Geração de eletricidade (MWh)</b>	<b>Fator de emissão (tCO<sub>2</sub>e)/MWh</b>
<b>Cenário RCP</b>			
2049	1.034.154,3	7.473.068,4	0,1384
2050	1.035.894,3	7.561.632,0	0,1370
2051	1.038.697,1	7.651.947,6	0,1357
2052	1.041.108,7	7.742.263,2	0,1345
2053	1.042.848,7	7.829.950,8	0,1332
2054	1.045.649,4	7.921.054,8	0,1320
2055	1.047.389,4	8.009.618,4	0,1308
2056	1.050.192,2	8.099.934,0	0,1297
2057	1.052.603,9	8.190.249,6	0,1285
2058	1.054.343,9	8.278.813,2	0,1274
2059	1.057.146,7	8.369.128,8	0,1263
2060	1.059.556,3	8.459.356,8	0,1253
2061	1.061.296,3	8.547.044,4	0,1242
2062	1.064.099,1	8.638.236,0	0,1232
2063	1.066.510,7	8.728.551,6	0,1222
2064	1.068.250,7	8.816.239,2	0,1212
2065	1.071.053,5	8.907.430,8	0,1202
2066	1.073.465,2	8.997.746,4	0,1193
2067	1.075.203,1	9.085.346,4	0,1183
2068	1.078.005,9	9.176.538,0	0,1175
2069	1.080.417,5	9.265.977,6	0,1166
2070	1.082.157,5	9.354.541,2	0,1157
<b>Média</b>	<b>1.024.734,5</b>	<b>7.049.733,7</b>	<b>0,1454</b>