

NEXO ÁGUA-ENERGIA-ALIMENTO NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ (PCJ) SOB CONDIÇÕES HISTÓRICAS E DE PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

TAMIRES LIMA DA SILVA¹; RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN²; HESSAM S. SARJOUGHIAN³ E MOSTAFA D. FARD⁴

¹ Engenharia rural e socioeconomia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, Av. Universitária, 3780, Altos do Paraíso, 18610-034, Botucatu, SP, Brasil, tamireslsilva@gmail.com

² Engenharia rural e socioeconomia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, Av. Universitária, 3780, Altos do Paraíso, 18610-034, Botucatu, SP, Brasil, rodrigo.roman@unesp.br

³ Ira A. Fulton Schools of Engineering, School of Computing and Augmented Intelligence, Arizona State University (ASU), S Mill Avenue, 699, 85287-8809, Tempe, AZ, Estados Unidos da América, Hessam.Sarjoughian@asu.edu

⁴ Ira A. Fulton Schools of Engineering, School of Computing and Augmented Intelligence, Arizona State University (ASU), S Mill Avenue, 699, 85287-8809, Tempe, AZ, Estados Unidos da América, sderakhs@asu.edu

1 RESUMO

A abordagem nexos água-energia-alimento (AEA) promove a integração entre gestão e governança em diferentes escalas e setores para o desenvolvimento socioeconômico sustentável. Este estudo objetivou modelar o nexos AEA nas Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ) sob condições históricas e em cenários de mudanças climáticas. Modelos foram desenvolvidos nos programas WEAP e LEAP, abrangendo o período de 1995 a 2019 para a condição histórica e de 2020 a 2070 para as projeções climáticas. Utilizando o WEAP-KIB-LEAP *framework*, estabeleceu-se um modelo de interação para troca de dados entre o WEAP e o LEAP. No WEAP, as alterações na vazão das Bacias PCJ devido às mudanças climáticas foram modeladas com dados do Modelo Climático Regional Eta para os cenários RCP4.5 e RCP8.5. Os resultados indicam que, nos cenários futuros, a geração de energia hidrelétrica será comprometida, enquanto a demanda hídrica e o consumo de energia elétrica para irrigação aumentarão 35,6% e 82,7%, respectivamente, impulsionados por um crescimento na produção de alimentos projetado de 21,3%. Esses resultados evidenciam a interdependência entre os recursos água, energia e alimento nas Bacias PCJ.

Palavras-chave: WEAP, LEAP, WEAP-KIB-LEAP *framework*, irrigação, agricultura.

SILVA, T. L.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; SARJOUGHIAN, H. S.; FARD, M. D.
WATER-ENERGY-FOOD NEXUS IN THE PIRACICABA, CAPIVARI, AND JUNDIAÍ
RIVER BASINS (PCJ) UNDER HISTORIC CONDITIONS AND CLIMATE CHANGE
PROJECTIONS

2 ABSTRACT

The water-energy-food (WEF) nexus approach promotes integrated management and governance across scales and sectors to achieve sustainable socioeconomic development. This study aimed to model the WEF nexus in the Piracicaba, Capivari, and Jundiaí (PCJ) river basins under historical conditions and future climate scenarios. Models were developed using WEAP and LEAP programs, covering the period from 1995 to 2019 for historical conditions and from 2020 to 2070 for climate projections. The WEAP-KIB-LEAP framework enabled data exchange between WEAP and LEAP to model interactions effectively. In WEAP, the projected impacts of climate change on streamflow in the PCJ basins were modeled using data from the Eta Regional Climate Model under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. The findings indicate that, in future scenarios, hydropower generation will be compromised, while water and electricity demand for irrigation will increase by 35.6% and 82.7%, respectively, driven by a projected food production growth of 21.3%. These results highlight the interdependence between water, energy, and food resources in the PCJ basins.

Keywords: WEAP, LEAP, WEAP-KIB-LEAP framework, irrigation, agriculture.

3 INTRODUÇÃO

A abordagem nexu água-energia-alimento (AEA) é um campo de estudo que permite uma compreensão aprofundada sobre as interdependências entre recursos hídricos, geração e consumo de energia, e produção de alimentos. Pesquisas que adotam o nexu AEA integram gestão e governança em diferentes escalas e setores, buscando aumentar a eficiência no uso de recursos e promover um desenvolvimento socioeconômico sustentável e equilibrado (Davies; Simonovic, 2010; Koundouri; Papadaki, 2020; Wicaksono; Kang, 2019).

Nos estudos sobre o nexu AEA, é essencial considerar fatores que afetam as interconexões entre água, energia e alimentos, como mudanças no uso e cobertura da terra e alterações climáticas. No Brasil, Getirana, Libonati e Cataldi (2021) destacaram a estreita relação entre a geração de energia e a produção de alimentos com a disponibilidade hídrica, pois a matriz energética nacional é amplamente dependente da energia hidrelétrica, enquanto a agricultura

necessita de água para o pleno desenvolvimento das culturas. Dessa forma, episódios de seca impactam diretamente tanto a produção de energia quanto a produtividade agrícola.

O “Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí 2020 a 2035” (Comitês PCJ; Agência das Bacias PCJ, 2020) informa que existem 13 hidrelétricas em operação nessas bacias, com uma potência instalada total de 59,3 MW. No setor agrícola, destacam-se o cultivo de cana-de-açúcar e de frutas, especialmente laranja (Irrigart, 2007).

A modelagem do nexu AEA, considerando tanto as condições históricas quanto os cenários de mudanças climáticas, pode contribuir para a gestão sustentável dos recursos hídricos nas Bacias PCJ. Tal modelagem é passível de integração ao Plano de Recursos Hídricos, um dos instrumentos de gestão estabelecidos pela Lei N° 9.433 de 1997, que instituiu o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e a Política Nacional de Recursos Hídricos (Brasil, 1997).

Portanto, esta pesquisa tem como objetivo modelar o nexo água-energia-alimento nas Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá sob condições históricas e cenários de mudanças climáticas.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização

As Bacias PCJ (Figura 1), com uma área de drenagem de aproximadamente 15.378 km², estão localizadas entre as longitudes 46° e 49° W e latitudes 22° e 23,5° S, abrangendo majoritariamente municípios de São Paulo (92,5%) e, em menor proporção, de Minas Gerais (7,5%). Nove rios principais compõem essas bacias: Atibaia, Atibainha, Cachoeira, Camanducaia, Capivari, Corumbataí, Jaguari, Jundiá e Piracicaba (Agência das Bacias PCJ, 2023).

Figura 1. Localização das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá e Hidrografia Principal



Fonte: Consórcio PCJ (2023)

4.2 Modelagem do nexo AEA

A modelagem do nexo AEA foi realizada com os programas “*Water Evaluation and Planning*” System (WEAP) e “*Low Emissions Analysis Platform*” (LEAP),

desenvolvidos pelo Instituto Ambiental de Estocolmo (Heaps, 2022; Sieber, 2023), para simular a gestão integrada de água e energia nas bacias e suas relações com a produção de alimentos. O WEAP permitiu modelar cenários hidrológicos, enquanto o LEAP

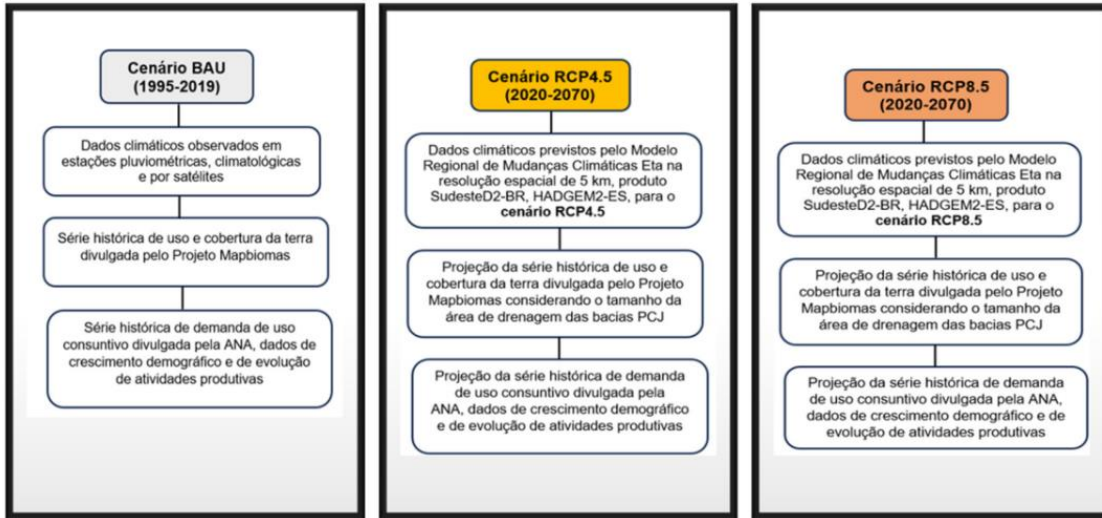
possibilitou o estudo da demanda e emissão energética. Ambos foram interligados por um Modelo de Interação (MI) baseado no WEAP-KIB-LEAP *framework* desenvolvido por Fard e Sarjoughian (2020), sendo acoplados via Web API.

4.3 Modelos WEAP e LEAP

Os modelos abrangeram o período histórico de 1995 a 2019, em sintonia com o Censo Agropecuário, e projeções climáticas

de 2020 a 2070. No WEAP, foram definidos três cenários (Figura 2): o histórico (BAU), e dois cenários de mudanças climáticas, RCP4.5 e RCP8.5, que representam diferentes projeções de emissões de gases de efeito estufa e suas consequências climáticas (Moss *et al.*, 2008). Por outro lado, O LEAP foi configurado para dois cenários: o histórico (BAU) e o de projeções climáticas (RCP), no qual os dados históricos foram projetados para o futuro por meio de regressão linear.

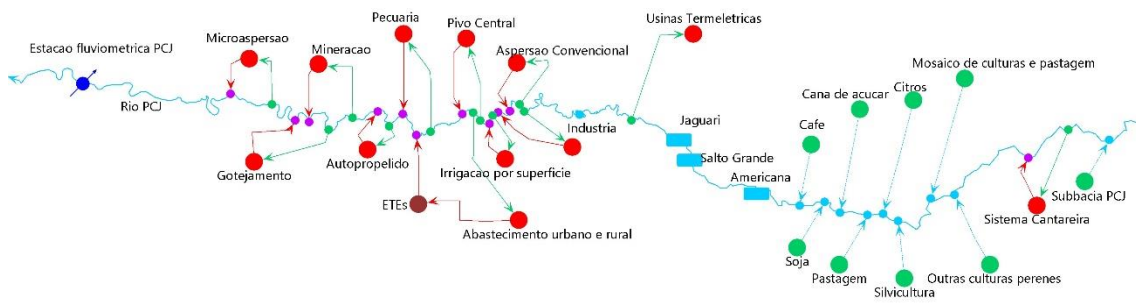
Figura 2. Caracterização dos cenários do modelo WEAP



O modelo WEAP incluiu doze demandas hídricas, nove sub-bacias, uma estação de tratamento de esgoto, que representava o somatório do volume de esgoto tratado nas Bacias PCJ, doze links de

transmissão, que representavam as tomadas de água, doze links de retorno, que representavam as vazões de retorno, três hidrelétricas e uma estação fluviométrica (Figura 3).

Figura 3. Modelo desenvolvido no WEAP para as Bacias PCJ



O Quadro 1 apresenta as fontes de dados consultadas para as demandas de uso da água, uso e cobertura da terra e clima. Esses dados abrangem o período histórico (1995-2019), utilizado no cenário BAU. Já para os cenários de mudanças climáticas RCP4.5 e RCP8.5 (2020-2070), os dados de

demandas de uso da água e uso e cobertura da terra foram os mesmos, sendo eles resultantes da projeção da série do período histórico por meio de regressão linear. Ressalta-se que, no modelo WEAP, os cenários RCP4.5 e RCP8.5 diferem apenas nos dados climáticos.

Quadro 1. Fontes de dados utilizadas para a parametrização do modelo WEAP

Dados	Fonte de dados
Clima	DAEE (2023); CIIAGRO (2023); <i>Nasa Power Project</i> (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 de uso da água	SNIRH (2022); SIDRA (2023); SEADE (2021)

Para validação do modelo WEAP com relação à vazão simulada, comparou-se os dados simulados com os observados na estação fluviométrica Artemis. As métricas de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), vies percentual (PBIAS) e razão entre a raiz do erro quadrático médio e o desvio padrão (RSR) foram usadas para avaliar o desempenho da modelagem, conforme a classificação de Moriasi *et al.* (2007).

O modelo LEAP foi configurado para simular as demandas energéticas na irrigação, considerando os seguintes métodos: irrigação

por superfície, aspersão convencional, pivô central, autopropelido, gotejamento e microaspersão. Os dados de demanda hídrica para cada sistema foram extraídos do WEAP e inseridos no LEAP após a execução do MI. O Quadro 2 apresenta os valores de intensidade de energia final adotados. Vale destacar que, como as demandas hídricas não variaram entre os cenários RCP4.5 e RCP8.5 no WEAP, o cenário de projeção de mudanças climáticas no LEAP foi denominado RCP.

Quadro 2. Intensidade energética anual dos métodos/sistemas de irrigação e respectivas fontes

Método/Sistema de irrigação	Intensidade de energia final anual (eletricidade)	Intensidade de energia final anual (diesel)	Fonte de dados
Irrigação por superfície	0,1561 kWh/m ³	0,0457 L/m ³	Scaloppi (1985) <i>apud</i> Medeiros e Rojas (1997)
Aspersão convencional	0,4456 kWh/m ³	0,1306 L/m ³	Scaloppi (1985) <i>apud</i> Medeiros e Rojas (1997)
Sistema autopropelido	0,7581 kWh/m ³	0,2222 L/m ³	Scaloppi (1985) <i>apud</i> Medeiros e Rojas (1997)
Pivô central	0,4699 kWh/m ³	0,1377 L/m ³	Scaloppi (1985) <i>apud</i> Medeiros e Rojas (1997)

Gotejamento	*0,2000 kWh/m ³	-	Marouelli e Silva (2011)
Microaspersão	**1.600 kWh/hectare	-	Vescove e Turco (2010)

*Dado calculado para a hortaliça tomate, cultivada em uma área de 80 ha, com evapotranspiração da cultura (ETc) máxima de 8 mm/dia; **dado calculado no ano de 2004 para a cultura perene laranja, variedade “Valência”, irrigada com 1 microaspersor por planta a fim de suprir 100% da ETc.

No WEAP, a escala temporal utilizada foi mensal, enquanto no LEAP, foi anual. Uma das principais vantagens do WEAP-KIB-LEAP *framework* é a possibilidade de integrar modelos com diferentes escalas temporais, o que amplia a flexibilidade das análises.

4.4 Dados climáticos históricos e de mudanças climáticas

Os dados mensais de precipitação (mm) das Bacias PCJ referentes ao cenário

BAU foram obtidos do site do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) do Estado de São Paulo (DAEE, 2023). Foram adquiridos dados de 20 (vinte) estações pluviométricas cujas informações estão presentes no Quadro 3. A média entre as 20 (vinte) estações foi calculada após o preenchimento de dados faltantes (falhas). As falhas presentes na série histórica mensal foram preenchidas por meio do método de Regressão Linear Múltipla.

Quadro 3. Informações das Estações Pluviométricas do DAEE

Estação	Município	Latitude	Longitude	Altitude
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

Fonte: DAEE (2023)

A temperatura mensal ($^{\circ}\text{C}$) para o cenário BAU nas Bacias PCJ foi obtida do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIAGRO) através do portal CIAGRO ONLINE (CIAGRO; IAC, 2023). Dados mensais de umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m/s), fração de cobertura de nuvens (%) e albedo foram obtidos da Plataforma NASA *Power Project* (NASA Power, 2023).

Os dados diários de precipitação, temperatura, velocidade do vento e umidade relativa do ar para os cenários de mudanças climáticas RCP4.5 e RCP8.5 foram obtidos da Plataforma Web Projeta, com base nas "Projeções de Mudança do Clima para a América do Sul Regionalizadas pelo modelo Eta" (Holbig *et al.*, 2018), usando o Modelo Climático Regional Eta com resolução de 5 km (produto SudesteD2-BR, HADGEM2-ES). Esses dados passaram por correção de viés pelo método de Escalonamento Linear (Lenderink; Buishand; Van Deursen, 2007), utilizando dados diários do NASA *Power Project*.

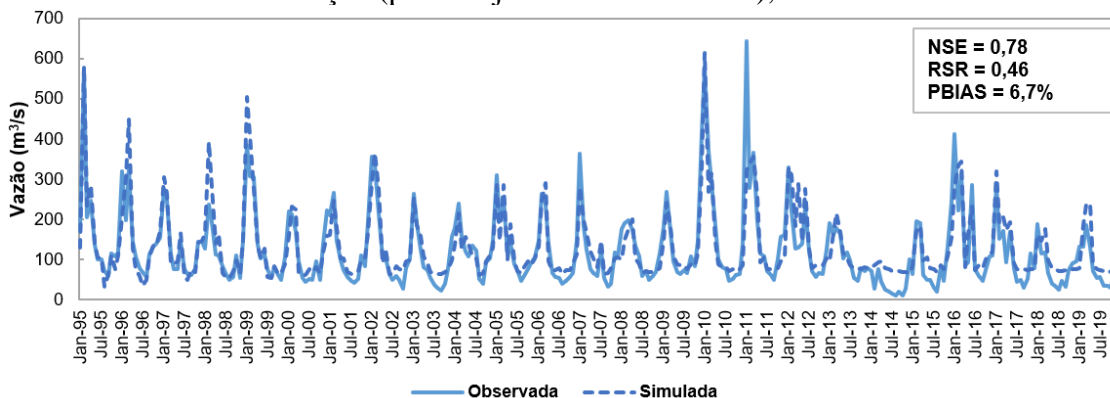
Na correção de viés nos dados de mudanças climáticas, aplicou-se a técnica de

correção multiplicativa para precipitação, umidade relativa do ar e velocidade do vento, enquanto a técnica de adição foi utilizada para a temperatura, conforme recomendado por Shrestha, Shrestha e Babel (2016). Após a correção, os dados dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 foram agrupados em escala mensal, que é a escala temporal adotada no modelo WEAP.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta as métricas de validação da vazão simulada pelo modelo desenvolvido no WEAP para o cenário BAU nas Bacias PCJ. Os resultados indicam uma boa performance do modelo, com coeficiente NSE de 0,78, RSR de 0,46 e PBIAS de 6,7%, classificando o modelo como "muito bom" segundo os critérios de Moriasi *et al.* (2007). A PBIAS positiva, de acordo com Gupta, Sorooshian e Yapo (1999), sugere uma leve subestimativa da vazão simulada em relação à observada na estação fluviométrica Artemis.

Figura 4. Comparação entre a vazão observada e a simulada no WEAP com apresentação de métricas de validação (período jan. 1995- dez. 2019), cenário BAU



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

Comparando a vazão média anual dos cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5, observou-

se uma redução de 79,6% e 84,9%, respectivamente, em relação ao cenário BAU, com a vazão anual média reduzindo de 131,0 m³/s (BAU) para 26,7 m³/s (RCP4.5) e 19,8 m³/s (RCP8.5), conforme apresentado na

Tabela 1. A análise dessa variação é essencial para avaliar o nexo água-energia-alimento, pois afeta diretamente tanto a capacidade de geração hidrelétrica nas Bacias PCJ quanto a disponibilidade de água para irrigação.

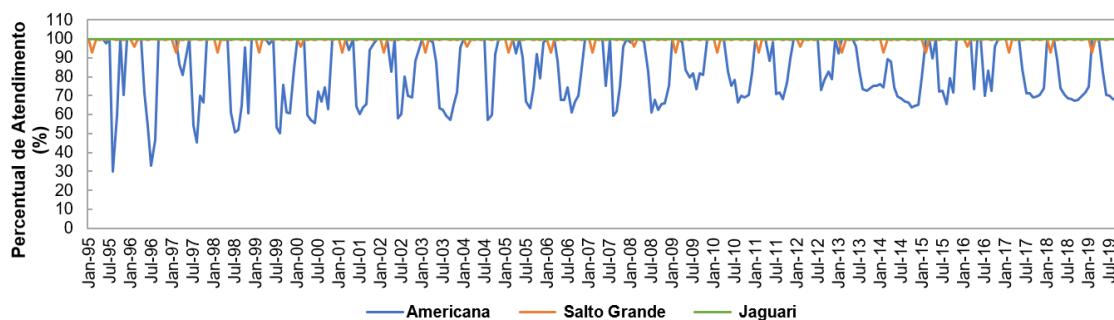
Tabela 1. Variação da vazão média anual entre os cenários BAU, RCP4.5 e RCP8.5

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

A Figura 5 mostra o percentual de atendimento do potencial de geração de energia elétrica pelas hidrelétricas Americana, Jaguari e Salto Grande no cenário BAU. A hidrelétrica Americana, de

maior potência, apresentou os maiores percentuais de não atendimento, com um mínimo registrado em agosto de 1995, quando gerou apenas 30,9% do seu potencial de 30 MW, equivalente a 9,3 MW.

Figura 5. Percentual de atendimento do potencial de geração de energia hidrelétrica nas Bacias PCJ no cenário BAU (jan. 1995 – dez. 2019)



Para as hidrelétricas Salto Grande e Jaguari, os percentuais de atendimento variaram, com Salto Grande mantendo 100% e Jaguari com valores entre 93,2% e 100% (Figura 5), refletindo as diferenças nas vazões turbinadas necessárias para atender suas capacidades: 34,9 m³/s para Jaguari e 21,5 m³/s para Salto Grande.

No cenário de mudanças climáticas RCP4.5, a geração hidrelétrica apresenta maior comprometimento, com uma previsão

mínima de atendimento em outubro de 2031. Para este período, o modelo projeta 13,0% do potencial para a hidrelétrica Americana (3,9 MW), 64,4% para Salto Grande (2,9 MW) e 54,1% para Jaguari (6,4 MW), relacionados a uma vazão crítica de 8,4 m³/s (Figura 6). No cenário RCP8.5, prevê-se um atendimento ainda menor em agosto de 2026, com Americana gerando 10,4% do seu potencial (3,1 MW), Salto Grande 51,6% (2,3 MW) e Jaguari 43,4% (5,1 MW) (Figura 7).

Figura 6. Percentual de atendimento do potencial de geração de energia hidrelétrica nas Bacias PCJ no cenário RCP4.5 (jan. 2020 – dez. 2070)

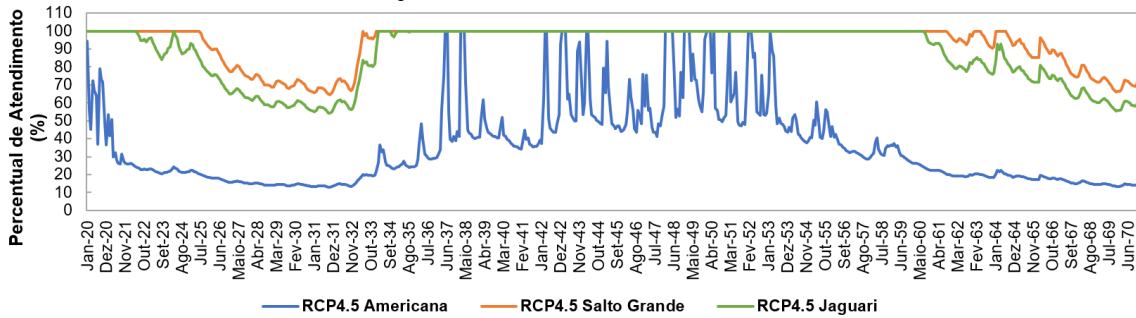
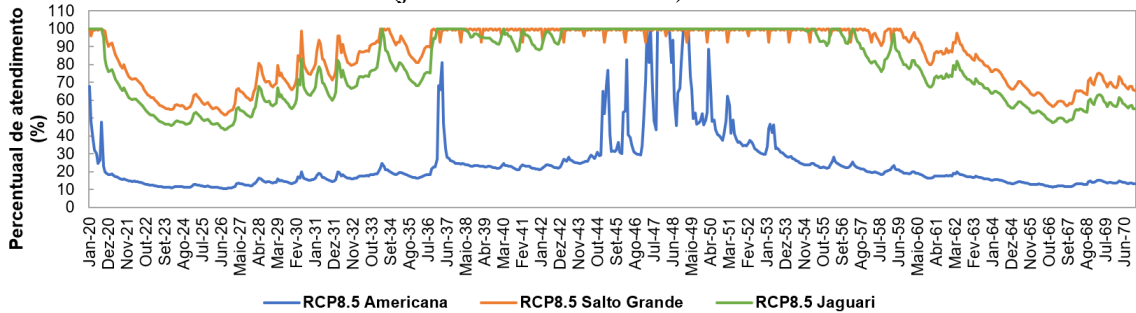


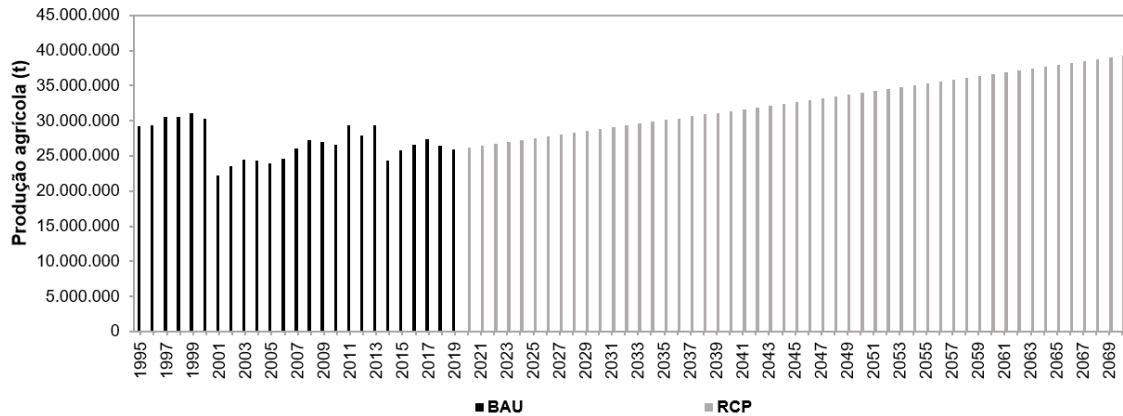
Figura 7. Percentual de atendimento do potencial de geração de energia hidrelétrica nas bacias PCJ no cenário RCP8.5 (jan. 2020 – dez. 2070)



É importante destacar que, durante períodos de escassez hídrica, o acionamento de usinas termelétricas para atender à demanda por energia elétrica eleva o preço pago pelos consumidores devido ao alto custo de produção dessas usinas. Desde 2015, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) implementou o Sistema de Bandeiras Tarifárias, que informa os consumidores sobre os aumentos nas tarifas em função desses custos adicionais. As tarifas variam conforme o acionamento das usinas, classificadas em bandeiras Verde, Amarela, Vermelha-Patamar 1 e Vermelha-

Patamar 2 (ANEEL, 2023; CPFL, 2023). Nesse contexto, em épocas de baixa vazão, o custo de produção da agricultura irrigada é mais alto.

A Figura 8 ilustra a produção agrícola nas Bacias PCJ no cenário BAU e as projeções para o cenário RCP, que abrange os cenários WEAP RCP4.5 e RCP8.5. No cenário BAU, a produção agrícola anual variou entre 20 e 30 milhões de toneladas. Já nas projeções do cenário RCP, espera-se um aumento gradual, atingindo aproximadamente 39 milhões de toneladas em 2070.

Figura 8. Produção agrícola anual, em toneladas (t), nas Bacias PCJ no cenário BAU (1995-2019) e RCP (2020-2070)

A análise da produção média anual no cenário BAU revela que as principais culturas produzidas incluem cana-de-açúcar, citros, milho, mandioca e batata. No cenário RCP, a ordem das culturas mais produzidas se mantém, mas com aumento na produção de

uva e soja e redução na produção de tomate e abacate. A produção agrícola total projetada para o cenário RCP é de 32,72 milhões de toneladas (Tabela 3), representando um incremento de aproximadamente 21,3% em relação ao cenário BAU (Tabela 2).

Tabela 2. Produção média das principais lavouras cultivadas nas Bacias PCJ no cenário BAU

Cultura	Produção média (t ano ⁻¹) no período 1995 a 2019*
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
Total	26.979.498

*Os dados de produção agrícola municipal foram obtidos de sidra (2023); t = toneladas.

Tabela 3. Produção média estimada para as principais lavouras das Bacias PCJ no cenário RCP

Cultura	Produção média (t ano⁻¹) no período 2020 a 2070
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
Total	32.720.201

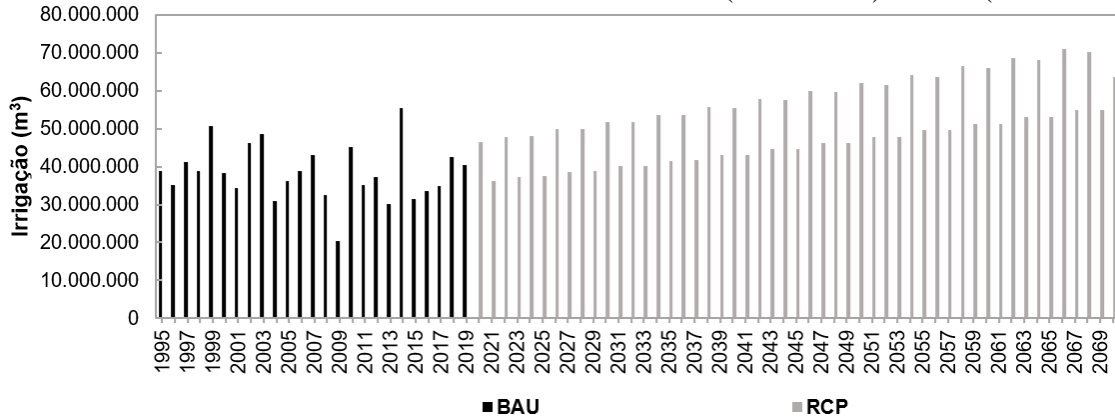
t = toneladas

A precipitação média projetada para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 é de 1.079,9 mm e 1.023,5 mm, respectivamente, representando uma redução significativa em relação ao cenário BAU, de 1.438,7 mm (Tabela 4). Esse déficit hídrico exigirá maior uso da irrigação para sustentar o aumento projetado na produção agrícola, como mostrado na Figura 9, que apresenta a demanda hídrica para irrigação nos cenários

BAU e RCP. No cenário BAU, observa-se que 2014 foi um ano marcado pelo aumento na instalação de sistemas de irrigação nas Bacias PCJ, em resposta à seca severa que afetou a região (Braga; Molian, 2018). Esse movimento sugere que, em períodos de estiagem, os produtores rurais tendem a adotar mais sistemas de irrigação para mitigar os riscos associados à incerteza climática, visando garantir a produtividade agrícola.

Tabela 4. Variação da precipitação anual média das Bacias PCJ nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 em relação ao cenário BAU

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

Figura 9. Demanda hídrica nas Bacias PCJ no cenário BAU (1995-2019) e RCP (2020-2070)

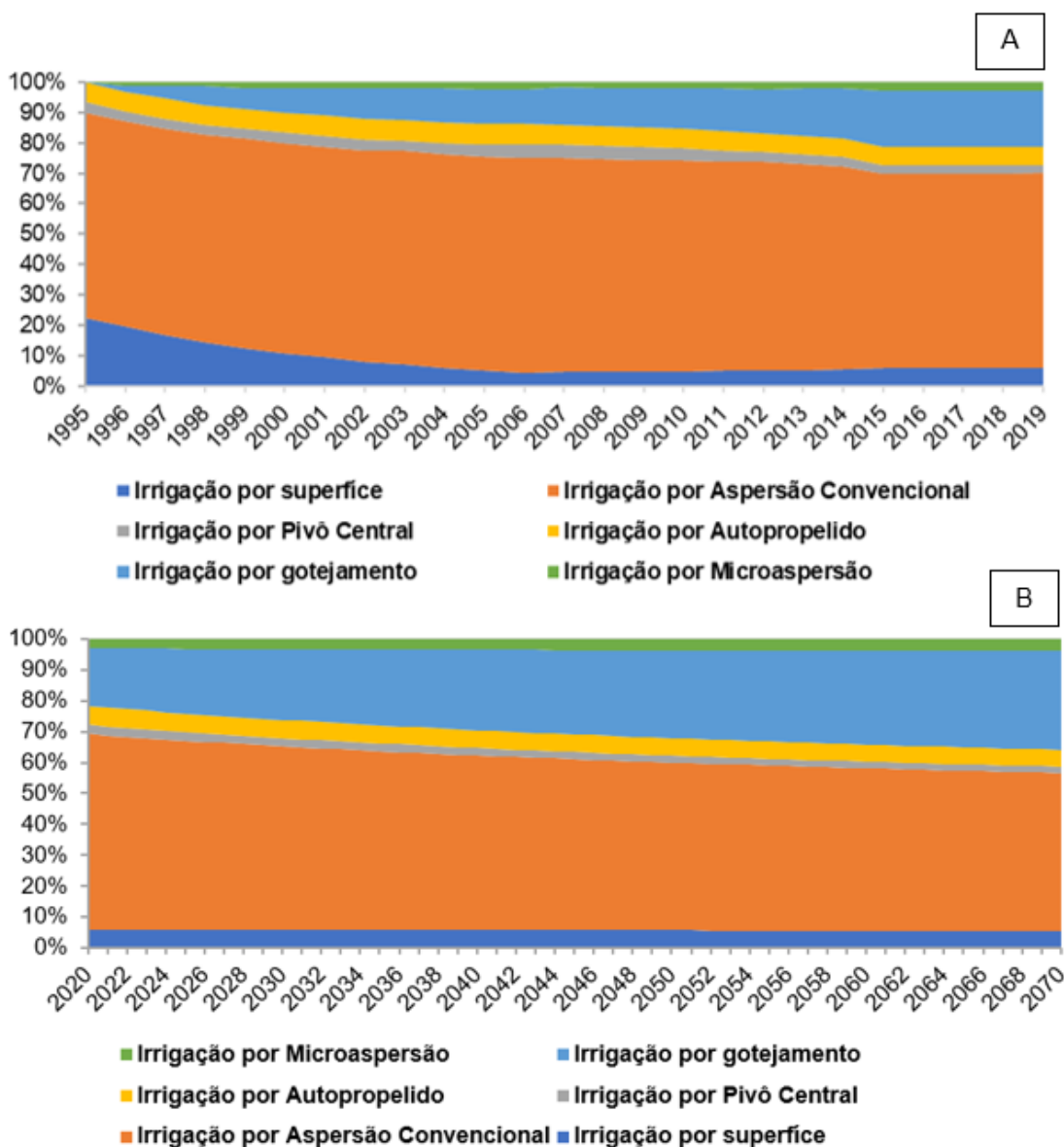
No cenário RCP, a demanda hídrica média para irrigação aumenta em 35,6% em relação ao cenário BAU (Tabela 5), o que também implicará uma maior demanda por energia. Em ambos os cenários, a irrigação

por aspersão convencional é o método mais utilizado, seguido pelo gotejamento, além de outros sistemas, como microaspersão, pivô central e autopropelido (Figura 10).

Tabela 5. Variação da demanda hídrica para irrigação nas Bacias PCJ no cenário RCP (2020-2070) em relação ao cenário BAU (1995-2019)

Cenário	Demanda hídrica média (m ³ ano ⁻¹)	Aumento (m ³ ano ⁻¹)	Aumento (%)
BAU	38.424.990,4	-	-
RCP	52.099.968,5	13.674.978,1	35,6%

Figura 10. Distribuição dos tipos de métodos/sistemas de irrigação empregados nas Bacias PCJ considerando: A) cenário BAU (1995-2019); B) cenário RCP (2020-2070)



Guirao e Teixeira Filho (2010) analisaram dados provenientes 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, e constataram que nas Bacias PCJ, a aspersão convencional e o gotejamento foram, respectivamente, o primeiro e segundo sistemas de irrigação

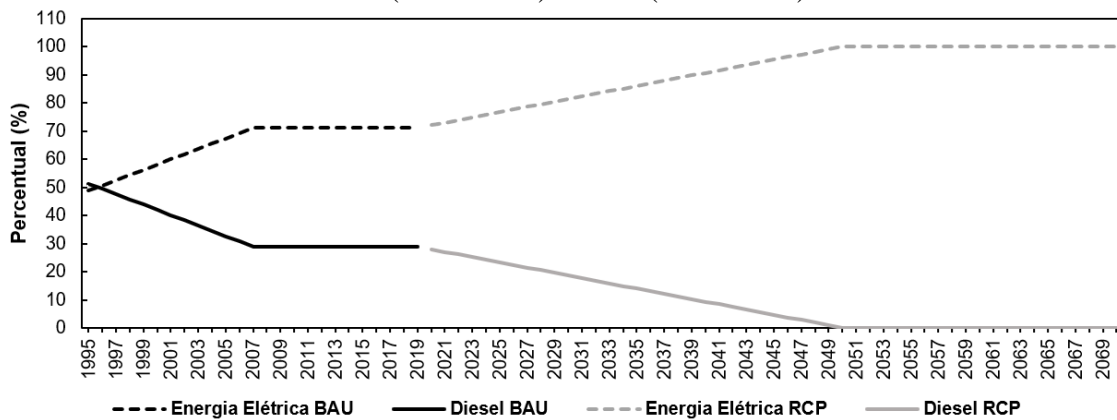
mais utilizados, concordando os resultados do presente estudo.

O uso de energia elétrica e diesel para o suprimento da demanda por energia da atividade de irrigação nas Bacias PCJ apresentou variação ao longo dos cenários BAU e RCP (Figura 11). Nota-se que o uso de diesel tem diminuído. Essa redução pode ser atribuída à criação de programas voltados

à eletrificação rural. No decorrer do cenário BAU, foram implementados os Programas: “Luz no Campo”, lançado em 1999 pelo presidente Fernando Henrique Cardoso, e “Luz para todos”, instituído em 2003 pelo presidente Luiz Inácio Lula da Silva (Braga, 1999; MME, 2021). Esse último programa foi

relançado em 2024 com orçamento estimado em R\$ 2,5 bilhões (Carregosa, 2023), reforçando a tendência de substituição do diesel pela energia elétrica no cenário RCP, que deve chegar a 100% de substituição em 2050.

Figura 11. Variação percentual do uso de energia elétrica e diesel em áreas irrigadas das Bacias PCJ nos cenários BAU (1995-2019) e RCP (2020-2070)



No cenário BAU, a atividade de irrigação nas Bacias PCJ consumiu em média 43.511,2 GJ por ano de energia elétrica. Em comparação, o consumo médio projetado

para o cenário de mudanças climáticas (RCP) é de 79.475,7 GJ por ano, representando um aumento de aproximadamente 82,7% (Tabela 6).

Tabela 6. Variação da demanda energética média por energia elétrica e diesel, em gigajoules, da atividade de irrigação nas Bacias PCJ entre os cenários BAU (1995-2019) e RCP (2020-2070)

Cenário	Média (GJ ano ⁻¹)	Diferença (GJ ano ⁻¹)	Varição (%)
Energia Elétrica			
BAU	43.511,2	-	-
RCP	79.475,7	↑35.964,6	↑82,7
Diesel			
BAU	63.509,8	-	-
RCP	16.446,0	↓47.063,8	↓74,1

Em contrapartida, a demanda média por diesel no cenário de mudanças climáticas (RCP) foi de 16.446,0 GJ por ano, enquanto no cenário histórico (BAU) foi de 63.509,8

GJ por ano, representando uma redução de aproximadamente 74,1% no consumo de diesel nas áreas irrigadas das Bacias PCJ (Tabela 6).

A substituição do diesel por energia elétrica na atividade de irrigação nas Bacias PCJ pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, mitigando, assim, o impacto das mudanças climáticas. O diesel é uma fonte de energia não renovável que libera quantidades substanciais de gases de efeito estufa na atmosfera (Perin *et al.*, 2015). Em contraste, as emissões relacionadas ao uso de eletricidade na irrigação variam conforme a matriz energética local, podendo ser nulas se apenas fontes renováveis, como a energia eólica e solar, forem adotadas.

6 CONCLUSÃO

Nas áreas irrigadas das Bacias PCJ, a energia elétrica tem substituído o diesel como principal fonte de energia, graças a programas de eletrificação rural. Em anos de baixa precipitação, os produtores rurais recorrem à irrigação para garantia futura do suprimento das necessidades hídricas das lavouras. Em cenários de escassez hídrica, o custo da energia elétrica aumenta devido à participação significativa das usinas hidrelétricas na matriz energética regional levando ao aumento do custo de produção na agricultura irrigada.

Nos cenários de mudanças climáticas RCP4.5 e RCP8.5, espera-se uma redução no potencial de geração de energia elétrica nas usinas hidrelétricas de Americana, Salto Grande e Jaguari, em função da diminuição da disponibilidade hídrica nas Bacias PCJ. De 2020 a 2070, projeta-se um crescimento da produção agrícola na região, o que acarretará uma demanda hídrica e um consumo de energia elétrica crescentes para a irrigação, visto que a agricultura de sequeiro será cada vez mais afetada pelas mudanças climáticas.

As projeções climáticas do Modelo Climático Regional Eta, com resolução de 5 km, indicam uma redução da precipitação anual em 24,9% no cenário RCP4.5 e em 28,9% no cenário RCP8.5, o que compromete significativamente a disponibilidade hídrica para agricultura. Essa relação de interdependência entre água, energia e alimento nas Bacias PCJ reflete um dos principais desafios para o planejamento sustentável e a resiliência da região diante das mudanças climáticas.

7 AGRADECIMENTOS

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.

8 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. **Localização**. Piracicaba: Agência das Bacias PCJ, 2023. 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.
- ANEEL. **Bandeiras Tarifárias**, 2023. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/bandeiras-tarifarias>. Acesso em: 28. ago. 2023.
- BRAGA, I. **Governo lança programa "Luz no Campo"**, 1999. Disponível em: <https://www.folhadelondrina.com.br/geral/go>

verno-lanca-programa-luz-no-campo-230762.html?d=1. Acesso em: 18 ago. 2023.

BRAGA, H.A.; MOLION, L.C.B.. The Droughts 2013/2014 in Southeast Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 41, n. 1, p. 100-107, 16 maio 2018. Instituto de Geociências - UFRJ.

http://dx.doi.org/10.11137/2018_1_100_107.

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/19433.htm. Acesso em: 03 fev. 2023.

CARREGOSA, L. **Governo prevê gastar R\$ 2,5 bilhões com programa Luz para Todos em 2024**, 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2023/08/28/governo-preve-gastar-r-25-bilhoes-com-programa-luz-para-todos-em-2024.ghtml> Acesso em: 28 ago. 2023.

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

COMITÊS PCJ; AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. **Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá, 2020 a 2035: Relatório Final**. Piracicaba, SP: Consórcio Profill-Rhama, 2020. 747 p. Executado por

Consórcio Profill-Rhama e organizado por Comitês PCJ/Agência das Bacias PCJ.

Disponível em:

https://www.comitespcj.org.br/index.php?option=com_content&view=article&id=957:pb-pcj-2020-2035. Acesso em: 2 out. 2023.

CONSÓRCIO PCJ. **Nossa Área de Atuação: as Bacias PCJ**, 2023. Disponível em:

<https://agua.org.br/nossa-area-de-atuacao/>. Acesso em: 18 jun. 2023.

CPFL. **Bandeiras Tarifárias**, 2023.

Disponível em:

<https://www.cpfl.com.br/bandeiras-tarifarias>. Acesso em: 28. ago. 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. Inderscience Publishers.

DOI:10.1504/ier.2010.037903. Disponível em:

<https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IER.2010.037903>. Acesso em: 2 out. 2023.

DAEE. **Hidrologia: banco de dados hidrológicos**, 2023. Disponível em:

<http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/> Acesso em: 18 jun. 2023.

FARD, M. D.; SARJOUGHIAN, H. S.

Coupling WEAP and LEAP models using interaction modeling. *In: SPRING SIMULATION MULTICONFERENCE (SPRINGSIM 2020)*, 1., 2020, Fairfax. **Anais [...]**. Online: 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.

FUNDAÇÃO SEAD. Sead População,

2023. Disponível em:

<https://populacao.seade.gov.br/populacao-urbana-e-rural/>. 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, p. 218-220, 9 dez. 2021. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/d41586-021-03625-w>. Acesso em: 26 ago. 2023.

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:

[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)). Disponível em:

<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291084-0699%281999%294%3A2%28135%29>.

Acesso em: 01 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.

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:

<http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v26i1.26366>.

Disponível em:

<https://seer.sct.embrapa.br/index.php/agrometeoros/article/view/26366>. Acesso em: 28 ago. 2023.

IRRIGART. **Caracterização das Bacias**

PCJ. Piracicaba, SP: Fundação Agência das Bacias PCJ, 2007. 119 p. Disponível em:

https://agencia.baciaspcj.org.br/wp-content/uploads/2021/01/RS-04-06_Capitulo-2.pdf. Acesso em: 2 out. 2023.

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. p. 96-116.

LENDERINK, G.; BUISHAND, 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:

<http://dx.doi.org/10.5194/hess-11-1145-2007>.

Disponível em:

<https://hess.copernicus.org/articles/11/1145/2007/>. Acesso em: 28 ago. 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). ISSN 1415-3033. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/75698/1/ct-98.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2023.
- 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.
- MME. **Programa Luz para Todos**: Sobre o Programa, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/destaques/Programa%20Luz%20para%20Todos/sobre-o-programa>. Acesso em: 18 ago. 2023.
- 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: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.23153>. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=23153&CID=t2007&v=50&i=3&T=1>. Acesso em: 18 ago. 2023.
- MOSS, R.; BABIKER, M.; BRINKMAN, S.; CALVO, E.; CARTER, T.; EDMONDS, J.; ELGIZOULI, I.; EMORI, S.; ERDA, L.; HIBBARD, K.; JONES, R.; KAINUMA, M.; KELLEHER, J.; LAMARQUE, J. F.; MANNING, M.; MATTHEWS, B.; MEEHL, J.; MEYER, L.; MITCHELL, J.; NAKICENOVIC, N.; O'NEILL, B.; PICHS, R.; RIAHI, K.; ROSE, S.; RUNCI, P.; STOUFFER, R.; VAN VUUREN, D.; WEYANT, J.; WILBANKS, T.; YPERSELE, J. P. V.; ZUREK, M. **Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies**. Intergovernmental Panel on Climate Change: Geneva, 2008. 132 p.
- NASA POWER. **The POWER Project**: data access viewer, 2023. Disponível em: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. Acesso em: 18 jun. 2023.
- PERIN, G. F.; SCHLOSSER, J. F.; FARIAS, M. S. de; ESTRADA, J. S.; TREICHEL, H.; GALON, L. Emissões de motor agrícola com o uso de diferentes tipos de diesel e concentrações de biodiesel na mistura combustível. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 50, n. 12, p. 1168-1176, dez. 2015. DOI: 10.1590/s0100-204x2015001200006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2015001200006>. Acesso em: 1 jul. 2023.
- PROJETO MAPBIOMAS (Brasil). **Coleções MAPBIOMAS**. Coleção [7.1] da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, 2023. Disponível em: <https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1>. Acesso em: 18 jun. 2023.
- SHRESTHA, S.; SHRESTHA, M.; BABEL, M. S. Modelling the potential impacts of climate change on hydrology and water resources in the Indrawati River Basin, Nepal. **Environmental Earth Sciences**, Heidelberg, v. 75, n. 4, p. 1-13, fev. 2016. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-015-5150-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-015-5150-8>. 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, 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. 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.

SIDRA. **Acervo**. Rio de Janeiro: Sistema Ibg de Recuperação Automática, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/acervo#/S/Q>. Acesso em: 28. ago. 2023.

SNIRH. **Portal de Metadados: Usos Consuntivos da Água no Brasil (1931-2040)**.

Brasília: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, 2022. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/5146c9ec-5589-4af1-bd64-d34848f484fd>. Acesso em: 28. ago. 2023.

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://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/8>. Acesso em: 2 out. 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, p. 70-87, jan. 2019. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.jher.2018.10.003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jher.2018.10.003>. Acesso em: 2 out. 2023.