



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21d/2024/04.26.15.02-TDI

**PROPOSTA DE METODOLOGIA NEXO  
ÁGUA-ENERGIA-ALIMENTOS: APLICAÇÃO NA  
BACIA DO PARAÍBA DO SUL**

Erica Acioli Canamary

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Javier Tomasella, e Victor Marchezini, aprovada em 19 de abril de 2024.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/4B7FMJE>>

INPE  
São José dos Campos  
2024

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)  
Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
CEP 12.227-010  
São José dos Campos - SP - Brasil  
Tel.:(012) 3208-6923/7348  
E-mail: pubtc@inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**

**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

**Membros:**

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)  
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)  
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)  
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon  
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21d/2024/04.26.15.02-TDI

**PROPOSTA DE METODOLOGIA NEXO  
ÁGUA-ENERGIA-ALIMENTOS: APLICAÇÃO NA  
BACIA DO PARAÍBA DO SUL**

Erica Acioli Canamary

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Javier Tomasella, e Victor Marchezini, aprovada em 19 de abril de 2024.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/4B7FMJE>>

INPE  
São José dos Campos  
2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Canamary, Erica Acioli.

Ca16p Proposta de metodologia nexa água-energia-alimentos:  
aplicação na Bacia do Paraíba do Sul / Erica Acioli Canamary. –  
São José dos Campos : INPE, 2024.  
xx + 122 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2024/04.26.15.02-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto  
Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2024.  
Orientadores : Drs. Javier Tomasella, e Victor Marchezini.

1. Nexa. 2. Segurança. 3. Recursos hídricos. 4. Desenvolvimento  
sustentável. I.Título.

CDU 556.18:502.131.1(282.281)

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÃO



## INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

### DEFESA FINAL DE TESE DE ERICA ACIOLI CANAMARY BANCA Nº 064/2024, REGISTRO 691351/2020

No dia 19 de abril de 2024, às 09:00 horas, por videoconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Doutora em Ciência do Sistema Terrestre, com a exigência de que o trabalho final a ser publicado deverá incorporar as correções sugeridas pela Banca Examinadora, com revisão pelo(s) orientador(es).

**Novo título: "Proposta de metodologia Nexo Água-Energia-Alimentos: aplicação na Bacia do Paraíba do Sul".**

#### Membros da Banca:

Dr. Daniel Andrés Rodriguez – Presidente – UFRJ

Dr. Javier Tomasella – Orientador – INPE

Dr. Victor Marchezini - Orientador - CEMADEN

Dr. Francisco de Assis de Souza Filho – Membro Externo – UFC

Dra. Maria Clara Fava – Membro Externo – UFSCar



Documento assinado eletronicamente por **Javier Tomasella, Tecnologista**, em 23/04/2024, às 10:04 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **daniel andres rodriguez (E), Usuário Externo**, em 24/04/2024, às 08:41 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Clara Fava (E), Usuário Externo**, em 26/04/2024, às 09:57 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Victor Marchezini, Pesquisador**, em 27/04/2024, às 06:48 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **FRANCISCO DE ASSIS DE SOUZA FILHO (E), Usuário Externo**, em 07/05/2024, às 14:24 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.mcti.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **11891562** e o código CRC **45AF38E0**.

---

**Referência:** Processo nº 01340.003207/2024-23

SEI nº 11891562

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, especialmente meus pais, pela constante dedicação, apoio e compreensão oferecidos ao longo desses anos que decide ingressar na vida acadêmica.

Aos meus orientadores, destaco a presença constante de Javier Tomasella, mesmo em longos debates, com diversos questionamentos, e o interesse contínuo de Victor Marchezini em contribuir. Também agradeço aos demais membros da banca pela atenção e disponibilidade em participar da defesa da tese e por todas as contribuições.

A CAPES e ao CNPq pelo auxílio recebido ao longo do trabalho, o que foi fundamental para a concretização da pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Também foi fundamental o financiamento oriundo do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processos 306846 / 2017-9, 304695/2020-3, e 428995/2018-7).

Aos meus colegas de doutorado, Gisele e Murilo, pela constante colaboração e auxílio, Felipe por toda a consultoria sobre o funcionamento do setor energético, Meiri pelo interesse em escutar as minhas ideias confusas, Minella, Ana e Pâmela por sempre responderem aos meus inúmeros questionamentos.

À Ângela, minha sincera gratidão por sempre estar disponível para esclarecer dúvidas e auxiliar em diversas situações.

Aos meus professores Francisco de Assis e Sérgio Koide pela inspiração e por terem me apoiado nessa jornada e pelo contínuo comprometimento em compartilhar o conhecimento, e Dirceu Reis por ter me mostrado uma hidrologia mais interessante, apesar de complicada.

Ao Davi e a Rachel que nunca deixaram de estar presentes apesar da distância. A minha psicóloga por ter continuamente buscado novas ferramentas para me ajudar.

E a Cristal por me dar muitos problemas para resolver, mas também alegrias.



## RESUMO

Ao longo dos anos, a necessidade de impulsionar o desenvolvimento sustentável cresce continuamente. Entretanto, mesmo com a implantação de diversas medidas voltadas para a ampliação da eficiência de exploração e do acesso aos recursos, pesquisas apontam para a fragilidade do progresso alcançado. A análise de dados observados evidencia um aumento na ocorrência de eventos extremos, mudanças no padrão histórico de variáveis do clima, crescimento da demanda por bens e serviços, dentre outros processos que desencadeiam uma redução da confiabilidade dos sistemas de abastecimento dessas demandas, como água e energia. Esses conflitos tornam fundamental a adaptação da sociedade e das políticas públicas às novas condições do meio. Nesse contexto, a aplicação da abordagem integrativa do Nexo, considerando os eixos água, energia e alimentos, é vista como uma alternativa interessante para auxiliar na melhoria da eficiência de exploração desses recursos. No Brasil, a Bacia do Rio Paraíba do Sul, uma região fundamental para o desenvolvimento do país, tem sofrido com o aumento de conflitos associados à gestão dos recursos. Essa região já foi intensamente modificada pela ação antrópica e auxilia no abastecimento de água e na geração de energia das regiões metropolitanas de São Paulo e Rio de Janeiro, às quais não estão localizadas dentro dos limites desta bacia. Diante da significativa dependência dos recursos hídricos para garantia da segurança hídrica, energética e alimentar, além da necessidade de implantação de uma gestão integrada desses recursos na Bacia do Rio Paraíba do Sul, a tese aplica a abordagem Nexo, para analisar a condição futura de exploração dos recursos hídricos, considerando a influência de políticas públicas, as tendências de uso e ocupação do solo e as mudanças climáticas no horizonte de 2050. Nesse contexto, foram propostos indicadores que contemplam as metas propostas pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável que têm como objetivo a eliminação da fome e a promoção da agricultura sustentável (ODS 2), água potável e saneamento básico para todos (ODS 6) e a garantia de acesso à energia limpa (ODS 7). Dentre os resultados dessa análise, as projeções das vazões da bacia evidenciam uma tendência de aumento dos eventos extremos, principalmente de secas. A redução da disponibilidade hídrica impacta no aumento da frequência de falhas dos sistemas de abastecimento de água e geração de energia, principalmente nos cenários de maiores emissões das últimas décadas avaliadas. Em relação às taxas de acesso à coleta e tratamento de esgoto, a estagnação das taxas atuais desses serviços implicará uma redução da qualidade dos mananciais superficiais e, conseqüentemente, em uma limitação da disponibilidade hídrica. Em relação à aplicação de políticas de redução do uso da água, a atividade agrícola realizada na bacia não impacta significativamente nos indicadores avaliados. Por fim, a redução na quantidade de energia gerada nas hidrelétricas pode ser compensada pela expansão da geração fotovoltaica distribuída. Assim, é necessária a diversificação das políticas de gestão de recursos aplicadas na Bacia do Paraíba do Sul para garantir a sustentabilidade do desenvolvimento

nacional e a adaptação da população à tendência de redução da disponibilidade de recursos hídricos.

Palavras-chave: Nexo. Segurança. Recursos hídricos. Desenvolvimento sustentável.

# **PROPOSAL FOR A WATER-ENERGY-FOOD NEXUS METHODOLOGY: APPLICATION IN THE PARAÍBA DO SUL BASIN**

## **ABSTRACT**

Over the years, the need to boost sustainable development has grown steadily. However, even with the implementation of various strategies that aim to increase the efficiency of exploitation and access to resources, research points to the fragility of the progress achieved. The analysis of observed data shows an increase in the occurrence of extreme events, changes in the historical pattern of climate variables, growth in demand for goods and services, among other processes that may trigger a reduction in the reliability of supply systems, such as water and energy. These conflicts make it essential for society and public policies to adapt to new environmental conditions. In this context, the application of the integrative nexus approach, considering the water, energy and food axes, is seen as an interesting alternative to improve the efficiency of resource use. In Brazil, the Paraíba do Sul Basin is an important region for the country's development, where there has been an increase in conflicts associated with resource management. This region has already been intensely modified by anthropogenic action and supports the water supply and energy generation of the metropolitan regions of São Paulo and Rio de Janeiro, which are not located within the basin's boundaries. Given the significant dependence on water resources to guarantee water, energy and food security, as well as the need to implement integrated management of these resources in the Paraíba do Sul River Basin, the thesis applies the nexus approach to analyze the future condition of water resource exploitation, considering the influence of public policies, land use and occupation trends and climate change in the 2050 horizon. In this context, indicators were proposed, considering the targets proposed by the Sustainable Development Goals, which aim to eliminate hunger and promote sustainable agriculture (SDG 2), to offer clean water and basic sanitation for all (SDG 6) and to guarantee access to clean energy (SDG 7). Among the results of this analysis, the basin's flow projections show a tendency towards an increase in extreme events, especially droughts. The reduction in water availability has an impact on the increased frequency of failures in water supply and energy generation systems, especially in the higher emissions scenarios of the last few decades evaluated. In terms of access to sewage collection and treatment, the current rates of these services will imply a reduction in the water quality and, consequently, a limitation in water availability. Concerning the application of policies to reduce water use, agricultural activity does not have a significant impact on the indicators assessed. Finally, the reduction in the amount of energy generated by hydroelectric plants could be offset by the expansion of distributed photovoltaic generation. It is therefore necessary to diversify the resource management policies applied in the Paraíba do Sul Basin in order to guarantee the

sustainability of national development and the population's adaptation to the trend of water resources decreasing in availability.

Keywords: Nexus. Security. Water resources. Sustainable development.

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 4.1 - Exemplos de relações entre água, energia e alimentos.....	8
Figura 4.2 - Evolução das palavras-chave escolhidas pelos autores.....	11
Figura 4.3 - Associação da ocorrência das palavras-chave escolhidas pelos autores em estudos associados à abordagem Nexo WEF.....	12
Figura 4.4 - Expansão dos trabalhos Nexo WEF. ....	13
Figura 5.1 - D Tabela 5.4 - Dados considerados na clusterização dos municípios.elimitação da área de estudo. ....	24
Figura 5.2 - Representação dos processos hidrológicos realizada pelo MHD-INPE.....	27
Figura 5.3 - Compartimentação do solo considerada no MHD-INPE. ....	28
Figura 5.4 - Balanço hídrico do MHD-INPE em cada célula, considerando os fluxos calculados pelo modelo AquaCrop. ....	40
Figura 5.5 - Composição dos cenários futuros. ....	42
Figura 6.1 - Detalhamento dos clusters do consumo per capita de água.....	59
Figura 6.2 - Projeção dos consumos per capita de água. ....	64
Figura 6.3 - Detalhamento dos clusters do consumo per capita de energia.....	67
Figura 6.4 - Projeção dos consumos per capita de energia. ....	69
Figura 6.5 - Diagrama Loop Causal das relações relações entre as variáveis que impactam na segurança hídrica energética e alimentar da bacia do Paraíba do Sul .....	72
Figura 6.6 - Vazões futuras afluentes às sub-bacias simuladas para múltiplos cenários de UOS (A - atual, O - otimista e P - pessimista); para cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5 e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). A linha pontilhada corresponde ao período histórico (1990 - 2015). ....	76
Figura 6.7 - Energia média gerada nas usinas hidrelétricas para múltiplos cenários de UOS (A - atual, O - otimista e P - pessimista); para cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5 e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e	

F2 (2036 - 2055). A linha pontilhada corresponde ao período histórico (1990 - 2015).....	79
Figura 6.8 - Curva de permanência do reservatório do Jaguari, para os períodos histórico e futuros dos cenários de UOS (A - atual, O - otimista e P - pessimista); para cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5 e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). As linhas pontilhadas correspondem aos limites operacionais do reservatório. ....	80
Figura 6.9 - Curva de permanência do reservatório do Paraibuna, para os períodos histórico e futuros dos cenários de UOS (A - atual, O - otimista e P - pessimista); para cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5 e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). As linhas pontilhadas correspondem aos limites operacionais do reservatório. ....	81
Figura 6.10 - Curva de permanência do reservatório de Santa Branca, para os períodos histórico e futuros dos cenários de UOS (A - atual, O - otimista e P - pessimista); para cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5 e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). As linhas pontilhadas correspondem aos limites operacionais do reservatório. ....	82
Figura 6.11 - Curva de permanência do reservatório do Funil, para os períodos histórico e futuros dos cenários de UOS (A - atual, O - otimista e P - pessimista); para cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5 e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). As linhas pontilhadas correspondem aos limites operacionais do reservatório. ....	83
Figura 6.12 - Percentual de atendimento à vazão mínima afluente ao reservatório de Jaguari, 9,13 m <sup>3</sup> /s, e Santa Cecília, 190 m <sup>3</sup> /s, para diferentes cenários de uso e ocupação do solo (Otimista - O, Pessimista - P e Atual - A); para os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5; e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). A linha vertical tracejada corresponde aos valores de referência (1990 - 2015).....	84
Figura 6.13 - Percentual do tempo em que as vazões defluentes dos reservatórios estão fora dos limites de operação nas sub-bacias da bacia do Paraíba do Sul (WQI), para diferentes cenários de uso e ocupação do solo (Otimista - O, Pessimista - P e Atual - A); para os cenários de emissões RCP 4.5	

e RCP 8.5; e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). A linha vertical tracejada corresponde aos valores de referência (1990 - 2015). 86

Figura 6.14 - Percentual do tempo em que a demanda é superior à oferta de água nas sub-bacias da bacia do Paraíba do Sul (WDI), para diferentes cenários de uso e ocupação do solo (Otimista - O, Pessimista - P e Atual - A); para os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5; e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). A linha vertical tracejada corresponde aos valores de referência (1990 - 2015). ..... 88

Figura 6.15 - Percentual do tempo em que a energia firme não é alcançada ou excedida nas sub-bacias da bacia do Paraíba do Sul (EQI), para diferentes cenários de uso e ocupação do solo (Otimista - O, Pessimista - P e Atual - A); para os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5; e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). A linha vertical tracejada corresponde aos valores de referência (1990 - 2015). ..... 91

Figura 6.16 - Média da razão entre o somatório da energia renovável (hidráulica e solar) e a demanda das sub-bacias da bacia do Paraíba do Sul (EDI), para diferentes cenários de uso e ocupação do solo (Otimista - O, Pessimista - P e Atual - A) para os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5; e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). A linha vertical tracejada corresponde aos valores de referência (1990 - 2015). ..... 92

Figura 6.17 - Energia média gerada nas usinas hidrelétricas e solares para múltiplos cenários de UOS (A - atual, O - otimista e P - pessimista); para cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5 e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). As linhas tracejadas correspondem aos valores de referência (1990 - 2015). ..... 94

Figura 6.18 - Comparação entre a capacidade de geração média mensal de energia fotovoltaica e hidráulica por modelo climático, para os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5; e para os períodos de tempo histórico (1990 - 2015), F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). A linha vertical tracejada corresponde aos valores de referência (1990 - 2015). ..... 96

Figura 6.19 - Percentual de tempo em que a DBO ultrapassa esse limite da classe II, nas sub-bacias da bacia do Paraíba do Sul (FQI), para diferentes

cenários de uso e ocupação do solo (Otimista - O, Pessimista - P e Atual - A); para os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5; e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). A linha vertical tracejada corresponde aos valores de referência (1990 - 2015). ..... 99

Figura 6.20 - Produção total de arroz da área de estudo para diferentes técnicas de irrigação, na bacia do Paraíba do Sul (FDI), para os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5; e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). A linha pontilhada vertical corresponde aos valores do cenário base (1990 - 2015). ..... 102



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 4.1 - Conceitos de segurança hídrica, energética e alimentar.....	17
Tabela 5.1 - Características dos reservatórios da área de estudo. ....	24
Tabela 5.2 - Regras de Operação dos Reservatórios. ....	31
Tabela 5.3 - Caracterização dos cenários futuros. ....	36
Tabela 5.4 - Dados considerados na clusterização dos municípios .....	38
Tabela 5.5 - Quantificação da segurança hídrica. ....	47
Tabela 5.6 - Potência média das unidades de consumo de energia. ....	50
Tabela 5.7 - Quantificação da segurança energética. ....	51
Tabela 5.8 - Quantificação da segurança alimentar. ....	55
Tabela 6.1 - Consumo per capita de água por município (L/pessoa/dia). ....	60
Tabela 6.2 - Consumo per capita de energia por município (KWh/pessoa/dia). ... .....	68



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AQF	AquaCrop Fortran
BDGD	Base de Dados Geográfica da Distribuidora
BPS	Bacia do Paraíba do Sul
CANESM2	Global <i>Canadian Earth System Model</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CMIP	<i>Model Intercomparison Project</i>
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
EMPLASA	Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
Eta	Modelo de circulação regional Eta
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
GCM	Modelo de circulação
GD	Geração Distribuída
HadGem2-ES	<i>Hadley Global Environment Model 2 - Earth System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
IQA	Índice de Qualidade de Água
ISH	Índice de Segurança Hídrica
MCTI	Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação
MHD-INPE	Modelo Hidrológico Distribuído do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MIROC5	<i>Model for Interdisciplinary Research on Climate on Climate</i> , versão 5
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
ONS	Operador Nacional do Sistema
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto

PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
PNSH	Plano Nacional de Segurança Hídrica
RCP	Representative Concentration Pathway
RHs	Regiões hidrográficas
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
SIGA	Sistema de Informações da Geração
SIN	Sistema interligado Nacional
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
URH	Unidade de Resposta Hidrológica
VAB	Valor Adicionado Bruto

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>4</b>
<b>3 OBJETIVOS e HIPÓTESES.....</b>	<b>6</b>
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>7</b>
4.1 Abordagem nexu água, energia e alimentos .....	7
4.2 Visão integrativa na adaptação aos efeitos das mudanças climáticas: uma amostra de planos nacionais.....	14
4.3 Segurança hídrica, energética e alimentar no Brasil.....	17
<b>5 METODOLOGIA.....</b>	<b>21</b>
5.1 Área de estudo .....	21
5.2 Modelo hidrológico distribuído do INPE.....	25
5.2.1 Balanço hídrico .....	25
5.2.2 Geração de energia.....	29
5.3 Cenários futuros .....	31
5.3.1 Modelos climáticos.....	31
5.3.2 Uso e ocupação do solo.....	34
5.3.3 Uso da água para abastecimento e indústria .....	35
5.3.4 Uso da água para irrigação .....	39
5.3.5 Consumo de energia.....	40
5.3.6 Composição dos cenários futuros .....	40
5.4 Indicadores nexu .....	42
5.4.1 Segurança hídrica .....	45
5.4.2 Segurança energética.....	47
5.4.3 Segurança alimentar.....	51
5.5 Sistematização das conexões entre os elementos do nexu .....	55
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>57</b>
6.1 Acesso aos recursos.....	57
6.2 Demandas por recursos.....	58
6.2 Conexões entre segurança hídrica, energética e alimentar.....	70

6.3	Variações da disponibilidade dos recursos na bacia .....	74
6.4	Indicadores nexos .....	85
6.4.1	Segurança hídrica .....	85
6.4.2	Segurança energética .....	90
6.4.3	Segurança alimentar .....	98
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>103</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>108</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A intensificação de aglomerações em centros urbanos, combinada ao crescimento contínuo do consumo e as maiores variações na disponibilidade de recursos, aumentam a insegurança com a garantia da oferta de bens e serviços necessários para a manutenção e o desenvolvimento da sociedade. Al-Saidi e Elagib (2017) citam preocupações de gestores com a oferta de bens, tendo em vista o crescimento contínuo das demandas, depois da Segunda Guerra Mundial. Na década de 70, Meadows et al. (1970) destacaram ser fundamental a busca pelo equilíbrio e sustentabilidade da relação entre as sociedades e o meio ambiente.

Mesmo com esses sucessivos alertas, o crescimento acelerado dos padrões de exploração continua se intensificando. Segundo Miralles-Wilhelm (2016), nos próximos 40 anos, economias emergentes, como China, Índia e Brasil deverão dobrar o seu consumo de energia. Leese e Meisch (2015) destacam que, até 2030, haverá um crescimento de 30% na demanda mundial de água, 40% de energia e 50% de alimento.

O aumento contínuo do consumo, além de provocar um aumento da produção, também pode ser associado à utilização ineficiente dos recursos e à degradação do meio ambiente. Krishnan et al. (2020) destacam que a necessidade de garantir o abastecimento da demanda por alimentos estimula não apenas a melhoria do rendimento das culturas, mas também o uso indiscriminado de recursos no processo produtivo. A expansão no setor de alimentos é responsável por uma larga parcela de perda da biodiversidade, e grande parte das políticas empregadas na gestão da água, que modificam os cursos de água e desequilibram o ecossistema (KOK et al., 2014).

Os desafios associados ao equilíbrio entre a oferta e a demanda ainda são agravados pelas mudanças climáticas. Estudos mostram que existe apenas uma probabilidade de 5% das temperaturas globais atingirem níveis inferiores a 2 graus celsius acima dos valores pré-industriais até 2100, como firmado no Acordo de Paris, considerando o comportamento atual das emissões de gases do efeito estufa (LIU; RAFTERY, 2021). Essas mudanças são responsáveis por

impactos em processos fundamentais para a manutenção da vida no sistema terrestre. O sexto relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (em inglês, Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) (2021) destacou que impactos associados ao crescimento das emissões de gases do efeito estufa, como a elevação da temperatura dos oceanos e a redução da camada de gelo, atingiram estágios que não são possíveis de serem revertidos antes de períodos de séculos ou milênios (IPCC, 2021). Há um consenso de aumento da incidência de eventos extremos de seca e cheias, como consequência do aquecimento global, apesar dos modelos climáticos indicarem diferentes padrões de mudança no comportamento futuro das variáveis climáticas. As pesquisas apresentadas no relatório também mostram que, mesmo havendo uma não uniformidade dos efeitos, predominam processos de degradação da biodiversidade e de serviços ecossistêmicos.

O Brasil, mesmo sendo conhecido por sua grande disponibilidade e diversidade de recursos, já foi cenário de diversos eventos de escassez, com impactos significativos em múltiplas escalas e setores. Em 2001, a acentuada redução na disponibilidade de água, combinada ao elevado crescimento da demanda, incompatível com a expansão da capacidade instalada, originaram uma crise energética e a imposição de uma política de racionamento. Essa decisão favoreceu a diminuição do consumo e a recuperação dos níveis dos reservatórios, mas não impossibilitou a redução da produção industrial Hunt, Stilpen e De Freitas (2018).

Posteriormente, na Região Sudeste do País, ocorreu uma seca severa entre os anos de 2014 e 2015, quando as vazões do Sistema Cantareira atingiram valores inferiores aos menores registros disponíveis, referentes ao ano de 1953 (NOBRE et al., 2016). Para evitar novas crises, o governo do estado de São Paulo solicitou a interligação da represa de Atibainha, integrante do Sistema Cantareira, e a represa de Jaguari, afluente ao Rio Paraíba do Sul, desencadeando conflitos, resolvidos apenas após sua judicialização (CAVALCANTI; MARQUES, 2016).

A implantação de uma nova transposição das águas da Bacia do Paraíba do Sul (BPS), onde já existe para a bacia do Guandu, no Rio de Janeiro, tornam essa



região responsável pela manutenção da segurança hídrica dos municípios localizados nas suas fronteiras, onde estão localizados importantes polos industriais, e das regiões metropolitanas de São Paulo e Rio de Janeiro. A preocupação com a compatibilização entre essas demandas e a oferta e a necessidade da adequação das medidas de gestão às características da região é destacada no Plano Integrado de Recursos Hídricos da bacia (CEIVAP, 2021).

Como resposta a esses processos, pesquisas recentes têm destacado que políticas públicas e mudanças no padrão de comportamento da população têm efeitos significativos na intensidade de emissões (SOERGEL et al., 2021). Assim, a menor confiabilidade das reservas de recursos naturais estimulou a proposição de ferramentas e abordagens focadas no uso eficiente e não apenas na produção de bens. O reconhecimento da complexidade e importância da gestão, tendo em vista a limitação e a variabilidade dos recursos, fundamentou a proposição do Nexo água, energia e alimentos (em inglês, Nexus water, energy and food) (Nexo WEF), uma perspectiva fundamentada na percepção das relações existentes entre esses elementos por meio de uma análise integrativa (HOFF, 2011).

Nesse contexto, a proposta desta tese é aplicar a abordagem Nexo WEF na BPS, com o objetivo de verificar a condição futura de disponibilidade de recursos hídricos e, assim, fornecer subsídios para os gestores orientarem a implantação das políticas e de ações na região. Para identificação do comportamento futuro desses múltiplos recursos foram propostos indicadores alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODSs), cujas metas propõem a universalização sustentável do acesso a bens e serviços, assegurando a resiliência da sociedade e do meio ambiente (UN, 2015). A ideia de conexão destacada pelo Nexo é fundamental para a análise do progresso do ODS, em virtude dessa visão integrativa ser mandatória para garantir a qualidade do meio e a quantidade de recursos necessários para garantir o acesso de todos (SIMPSON et al., 2022). Muitas pesquisas realizaram a quantificação dos ODSs (SIMPSON et al., 2022), mas poucos estudos se propõem a entender as relações entre diferentes objetivos, sendo o Nexo WEF uma abordagem valiosa para o cumprimento desse objetivo.

## 2 JUSTIFICATIVA

A Bacia do Paraíba do Sul (BPS), situada entre três importantes estados brasileiros - São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais -, é uma área de grande relevância para o desenvolvimento nacional, sendo responsável, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), em média, por 6,3% do Produto Interno Bruto Nacional (PIB), entre os anos de 2002 e 2018.

O desenvolvimento da BPS foi baseado em uma intensa exploração dos recursos disponíveis e modificação da paisagem, desencadeando diversos impactos negativos, como a degradação da floresta nativa (CARRIELLO et al., 2016) e o comprometimento dos recursos hídricos (ANA, 2017a). A manutenção da prosperidade dessa região, entretanto, pode ser afetada pela dificuldade de compatibilização entre a oferta e a demanda, tendo em vista os múltiplos interesses a serem considerados.

Ao analisarem a segurança hídrica da BPS, Paiva et al. (2020) projetaram, até 2050, um aumento de 38%, na quantidade de água captada em parcela da BPS para atender o consumo da área urbana. Ao considerarem os consumos humano e industrial, os autores salientaram que o crescimento urbano pode desencadear mudanças em outros setores e áreas, como a intensificação agrícola e a redução das áreas ocupadas por florestas, o que poderia aumentar ainda mais as pressões futuras. Em outro estudo recente realizado na bacia, Marques, Veras e Rodriguez (2022), ao considerarem demandas disponibilizadas por entidades de gestão de recursos hídricos, verificaram que o clima exerce grande influência na manutenção das demandas na bacia, enquanto as políticas de gestão das demandas não foram suficientes para garantir a sustentabilidade do sistema de abastecimento.

Esses estudos indicam a possibilidade de falha do abastecimento da região e a necessidade de investigação da efetividade da aplicação de políticas públicas. Nesse contexto, a utilização de indicadores que refletem os ODSs permite a análise simplificada de múltiplas dimensões e interesses impactados pelo aumento das pressões sobre os recursos hídricos na região, fornecendo

subsídios para o aprimoramento da eficiência de exploração dos recursos hídricos.

### 3 OBJETIVOS E HIPÓTESES

No contexto de intensificação do desequilíbrio entre oferta e demanda e de crescentes disputas por recursos, torna-se imprescindível a elaboração de políticas públicas capazes de integrar diferentes setores. Assim, o objetivo geral da tese é desenvolver uma metodologia para aplicação da abordagem Nexo Água, Energia e Alimento na BPS, por meio da análise comparativa de múltiplos cenários futuros no horizonte 2050, no âmbito das mudanças climáticas e de uso e ocupação do solo. Para atingir esse objetivo foram considerados os objetivos específicos:

- Propor indicadores para aplicação da abordagem nexos água, energia e alimentos;
- Elaborar cenários de exploração dos recursos hídricos que considerem as mudanças climáticas e de uso e cobertura do solo;
- Analisar o potencial de expansão da geração fotovoltaica distribuída;
- Analisar os impactos na segurança hídrica, energética e alimentar associados às mudanças climáticas, de uso da terra e de uso dos recursos, a partir da aplicação da abordagem Nexo, com foco na disponibilidade hídrica.

Esta tese se fundamenta em hipóteses: i) de que as mudanças climáticas serão responsáveis pela intensificação da fragilidade dos sistemas de abastecimento de água, geração de energia e produção de alimentos; e, ii) que a combinação de políticas de ampliação e melhoria dos serviços de abastecimento de água e coleta de esgoto, de estímulo à adoção de técnicas de irrigação mais eficientes e de mudanças no padrão de consumo de água aumentam a disponibilidade hídrica futura da BPS. Essas hipóteses serão verificadas para entender como a atividade humana impacta na disponibilidade hídrica futura da BPS.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão explorados temas que oferecem a base teórica para o desenvolvimento da tese. Assim, é apresentada a abordagem Nexo WEF e exemplos de sua aplicação, além da análise dos desafios enfrentados por gestores na BPS para balancear as demandas hídricas relacionadas a interesses econômicos, sociais e ambientais.

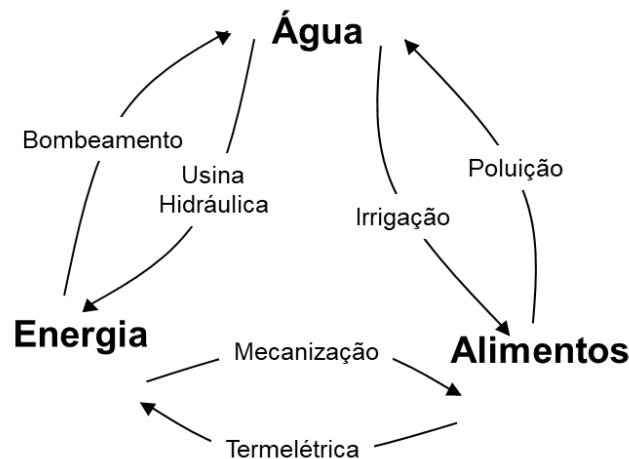
### 4.1 Abordagem nexo água, energia e alimentos

O significado da palavra Nexo é conexão. Assim, a abordagem Nexo tem como foco o entendimento das conexões, das relações entre múltiplos interesses para promover a gestão sustentável dos recursos necessários para a manutenção da sociedade e do meio ambiente (SIMPSON; JEWITT, 2019). Existem muitas formas de empregar essa abordagem, dependendo dos recursos considerados, sendo a maior parte dos estudos concentrados na análise de água, energia e alimentos. Destaca-se, entretanto, que estudos que aplicam o Nexo água, energia e alimentos também têm incorporado variáveis capazes de influenciar direta ou indiretamente nessas conexões, como serviços ecossistêmicos, mobilidade e cidades inteligentes (LAZARO et al., 2022).

Em um contexto de escassez cada vez mais intensa, e de conflitos pela posse de recursos, a aplicação do Nexo produz ferramentas capazes de auxiliar no balanceamento entre a demanda e a oferta, através da identificação das relações de sinergia e *trade-offs*, caracterizadas por perdas e/ou ganhos à disponibilidade de um recurso devido à exploração de outro recurso.

As relações que interligam os recursos água, energia e alimentos são inúmeras, conforme apresentado na Figura 4.1. A água em movimento através de turbinas de usinas hidrelétricas gera energia. A água também é fundamental para o desenvolvimento das culturas agrícolas e na diluição de contaminantes presentes nos efluentes de estações de tratamento de esgoto. A energia é indispensável para o funcionamento dos sistemas de irrigação e de abastecimento. A atividade agrícola pode auxiliar na produção de energia a partir do cultivo de biocombustíveis.

Figura 4.1 - Exemplos de relações entre água, energia e alimentos.



Fonte: Adaptada de Karlberg et al. (2015).

Como apresentado na Figura 4.1, a abordagem Nexo auxilia na conservação do ecossistema ao permitir o conhecimento da demanda, a integração de múltiplos setores, e o estímulo às conexões entre instituições e planos de gestão (KARLBERG et al., 2015).

Quando essas inter-relações não são consideradas, sendo a análise concentrada na geração de energia hidrelétrica, por exemplo, pode ocorrer uma melhoria de desempenho desse setor, mas os efeitos não serão duradouros (BAZILIAN et al., 2011), com possibilidade de redução futura da disponibilidade hídrica para outras atividades em situações de escassez. A influência da exploração de um elemento na disponibilidade de outro é destacada por Liu et al. (2018), em decorrência da expansão do uso de biocombustíveis, como alternativa aos combustíveis fósseis. Essa fonte de energia pode impactar na segurança hídrica e alimentar por requerer muito mais água para produção, processamento e distribuição que outras fontes, e por necessitar de grandes extensões de área para produção em larga escala, restringindo o desenvolvimento de outras culturas agrícolas, dentre outras características.

A implantação de instrumentos capazes de demonstrar a exploração de múltiplos recursos de forma integrativa, oferece mais segurança para o processo de tomada de decisão, por possibilitar o controle dos *trade-offs* - competição que gera vantagens para um elemento e desvantagens para outro - e a maximização das sinergias - colaboração, relação em que todos ganham (HOFF, 2011), tendo como

consequência a redução dos resíduos e gastos gerados, a partir da adequação das propostas à realidade do local.

Iniciativas que exploram a abordagem Nexo WEF já acontecem há alguns anos. Entretanto, os dois marcos fundamentais para a análise simultânea desses três recursos que oficializaram a sua apresentação, ocorreram em 2011, durante o Fórum Mundial de Economia, realizado em Davos, Suíça, e na Conferência Nexo de Segurança Hídrica, Energética e Alimentar - Soluções para a Economia Verde, conhecida como Conferência de Bonn (ABOELNGA et al., 2018).

Apesar do grande interesse sobre o tema, principalmente após a realização desses encontros, muitos estudiosos questionaram o seu caráter inovador, alegando que essas ideias já haviam sido debatidas anteriormente. Wichelns (2017), por exemplo, destaca que, desde a década de 1940, muitos propuseram uma análise interconectada de recursos ambientais, refletindo em recomendações que estão inseridas na abordagem do Nexo WEF. Um exemplo foi a Conferência das Nações Unidas sobre Água realizada, em 1977, na Argentina, cujo relatório mostra a preocupação com o entendimento das diversas relações entre água, energia e alimentos, além de recomendar a necessidade de uma visão integrativa na política de investimentos. Entretanto, o autor associa o elevado interesse na abordagem Nexo WEF à falha de aplicação de outras propostas, como a Gestão Integrada de Recursos Naturais, em decorrência da deficiência da base teórica existente e a não incorporação dos princípios em políticas públicas.

O próprio conceito de desenvolvimento sustentável proposto na década de 1980, que associa o desenvolvimento econômico à conservação ambiental, já incorpora a visão de necessidade de entendimento das inter relações entre os componentes de um sistema; e entre o sistema e o ambiente em que ele está inserido (HAIMES, 1992).

Pesquisadores ainda ressaltam que muitos estudos que propõem a aplicação da abordagem Nexo WEF não consideram a garantia de acesso de todos aos recursos, focando na manutenção da segurança em larga escala (SIMPSON; JEWITT, 2019). Porém, Liu et al. (2018) defendem que esse amplo acesso da população a múltiplos bens e serviços essenciais, de forma sustentável, eficiente e igualitária, que é o princípio dos ODSs, pode ser alcançado com o uso da

abordagem Nexo WEF, que evidencia aos gestores o dever de considerar as conexões entre múltiplos setores, escalas e regiões.

Outra questão que motiva a ampliação da aceitação da abordagem Nexo WEF é o crescente temor de uma possível escassez dos recursos naturais frente à intensificação dos efeitos das mudanças climáticas e o contínuo crescimento das pressões e conflitos por recursos (LECK et al., 2015). A relação entre a adoção da abordagem Nexo WEF e a preocupação com os efeitos das mudanças climáticas pode ser atestada no interesse crescente da comunidade científica que aplica essa abordagem, ao analisar<sup>1</sup> 1.561 artigos publicados entre 1995 e 2023, e disponíveis nas plataformas *Web of Science* e *Scopus*.

A identificação do termo “mudanças climáticas” como uma das palavras-chave mais utilizadas pelos autores dos estudos que adotam a abordagem Nexo, indica a preocupação com os efeitos desse processo na gestão dos recursos (Figura 4.2).

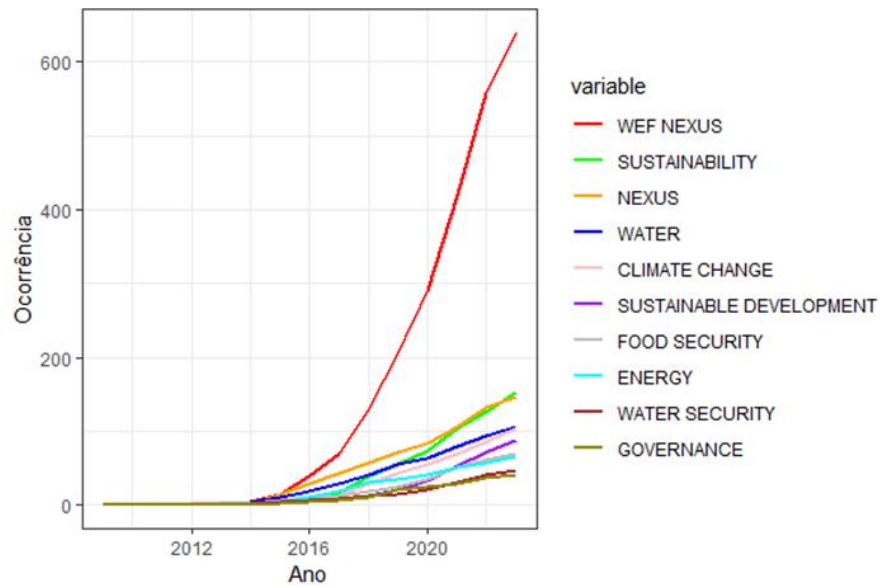
Muitos estudos focam na temática da água. A maior incidência do termo “water” nas palavras-chave dos artigos selecionados, em relação à “energy” e “food” (Figura 4.2), além da presença de termos relacionados a esse recurso em várias associações de palavras-chave, como “irrigação” e “pegada hídrica” (Figura 4.3), mostra a tendência das pesquisas em focar nesse recurso. Lazaro et al. (2022) destacam, porém, que apesar das questões relacionadas aos recursos hídricos serem os temas de maior frequência nos estudos que adotam a abordagem Nexo WEF, atualmente pode ser observada uma ascensão de conteúdos que antes não recebiam muita atenção, como energias renováveis e análise da escala urbana.

---

<sup>1</sup> O estudo foi feito a partir da seleção de artigos e revisões cujo conteúdo do *abstract* incluía, simultaneamente, as expressões em inglês *nexus*, *water*, *energy* e *food*, com o auxílio do pacote *Bibliometrix*, disponível no software de programação computacional R (ARIA; CUCCURULLO, 2017).

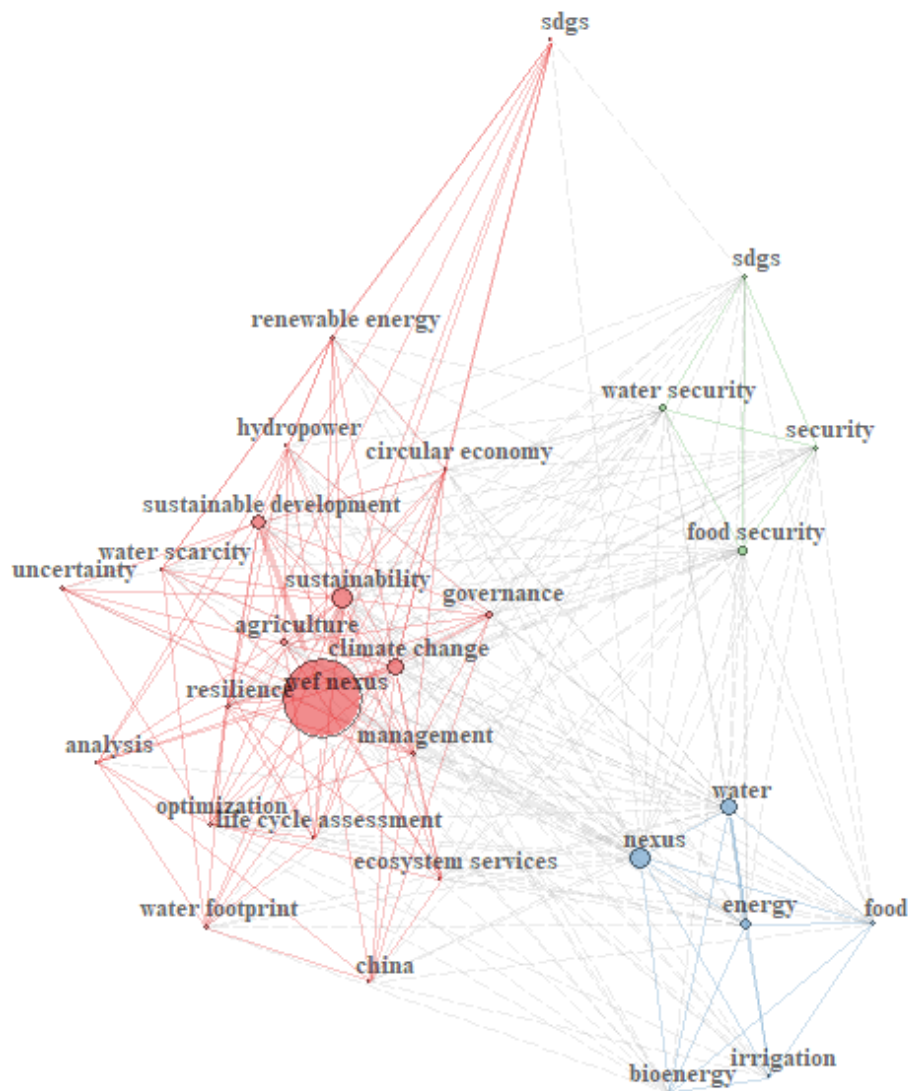


Figura 4.2 - Evolução das palavras-chave escolhidas pelos autores.



A Figura 4.3 também aponta para a incidência dos termos “governança” e “gerenciamento”, de forma associada com “sustentabilidade”, “resiliência” e “ODS”. Essa relação confirma a demanda por estudos que auxiliem gestores na formulação de políticas públicas, em decorrência de alterações nos padrões de comportamento do clima e do ecossistema, da maior complexidade dos sistemas de abastecimento, com a diversificação de fontes dos recursos, além da realização de interligações para reduzir a possibilidade de falhas no atendimento das demandas, como transposições de água (LECK et al., 2015).

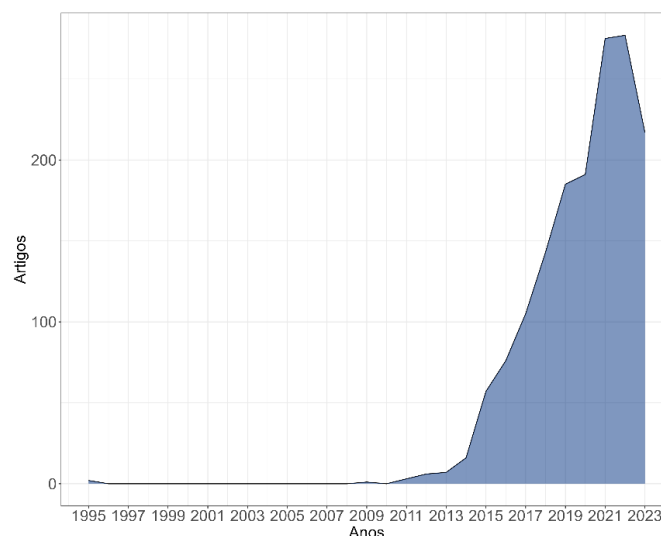
Figura 4.3 - Associação da ocorrência das palavras-chave escolhidas pelos autores em estudos associados à abordagem Nexo WEF.



Mesmo com a expansão contínua das pesquisas envolvendo a abordagem Nexo WEF (Figura 4.4), no Brasil ainda existem limitações em relação à sua aplicação. Dentre os 1.561 artigos avaliados, apenas 54 se referem a pesquisas realizadas no país, os quais foram identificados a partir da verificação daqueles que possuem “Brazil” no resumo. Um exemplo é o estudo desenvolvido por Zhong et al. (2021) que quantificou as mudanças nas demandas por terra e água para produção de biocombustível, com base em cenários futuros de expansão da atividade agrícola e da irrigação, considerando a ocorrência de mudanças climáticas e a aplicação de políticas públicas. Os cenários foram construídos a partir da combinação de um modelo de mapeamento do potencial de produção agrícola e outro para análise

dos fluxos de oferta e demanda de água e terra entre os países da América do Sul e Central. Outro estudo conduzido por Amaral et al. (2021) analisou as injustiças sociais entre os municípios da Região Metropolitana de São Paulo com o uso de indicadores. Os autores identificaram que aqueles responsáveis pela provisão da maior parcela dos recursos da região, também são os que possuem os menores níveis de acesso a serviços de saúde, educação e emprego, além de taxas de consumo de recursos mais baixas. Considerando a vasta disponibilidade de indicadores para análise de sustentabilidade, Arcoverde et al. (2023) propuseram uma metodologia colaborativa para construção de indicadores e índices para avaliar a situação dos Biomas da Caatinga e do Cerrado frente aos 17 ODSs e as dimensões do Nexo WEF. Na escala da bacia hidrográfica, a unidade principal para a gestão dos recursos hídricos no Brasil, Bof et al. (2021) quantificaram os *trade-offs* econômicos existentes entre a geração de energia hidrelétrica e a irrigação na bacia do rio de São Marcos, localizada entre o Distrito Federal e os Estados de Minas Gerais e Goiás. Os autores aplicaram um modelo hidro econômico para representar as demandas e quantificar os processos hidrológicos, além de identificar a configuração da alocação de água que resulta no maior benefício econômico.

Figura 4.4 - Expansão dos trabalhos Nexo WEF.



A evolução das pesquisas que aplicam a abordagem Nexo WEF no Brasil ocorreu principalmente após a publicação, em 2017, pelo Conselho Nacional de

Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e o Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação (MCTI), das chamadas públicas NEXUS I e NEXUS II para financiamento de projetos relacionados à busca pela segurança dos recursos disponíveis nos cinco biomas brasileiros. Entretanto, Dalla Fontana et al. (2020) ressaltam que os estudos desenvolvidos no país seguem o foco da literatura internacional, envolvendo, por exemplo, a maximização da eficiência, a identificação de impactos e a modelagem de cenários futuros. Em contrapartida, questões importantes, como os problemas desencadeados pelo processo de urbanização, o acesso aos serviços de saneamento, ainda são pouco discutidas.

Outra questão importante é que ainda são escassos os estudos que aplicam a abordagem Nexo WEF na escala da bacia hidrográfica, que é considerada, pela Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1987), como a unidade territorial principal para implementação de política e atuação na gestão dos recursos hídricos. Além disso, o setor elétrico brasileiro também considera a bacia hidrográfica como unidade de planejamento. O Sistema Interligado Nacional (SIN) é composto principalmente por usinas hidrelétricas, localizadas em bacias com regimes hidrológicos distintos. Essa disposição faz com que os subsistemas sejam complementares, permitindo a transferência de energia entre eles, de acordo com as variações na disponibilidade energética de cada região. Outra característica importante a ser destacada é a possibilidade de participação social no processo de tomada de decisão por meio dos comitês de bacias, caracterizados por um grupo de representantes de múltiplas entidades - poder público, usuários e entidades da sociedade - que se reúnem para deliberar sobre os usos da água.

#### **4.2 Visão integrativa na adaptação aos efeitos das mudanças climáticas: uma amostra de planos nacionais**

Os efeitos das mudanças climáticas já estão sendo constatados no clima atual. Dados observados mostram que a ação humana tem provocado mudanças no padrão de comportamento de variáveis climáticas (IPCC, 2021). Tomasella et al. (2023) identificaram uma tendência da incidência de secas mais longas em áreas que coincidem com áreas densamente povoadas do leste do Brasil e a região do MATOPIBA, que engloba o bioma do Cerrado pertencente aos Estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia e vem sendo intensamente explorada para

expansão da produção agrícola. Para a Região Nordeste do Brasil, Dantas et al. (2022) destacaram que as projeções de modelos climáticos globais indicam a possibilidade de redução dos níveis anuais de precipitação superior a 20% até 2100. Os autores ressaltam que esses cenários mais pessimistas são caracterizados por maiores acréscimos de emissões e temperatura até o fim do século.

Essas mudanças dificultam a projeção da oferta dos recursos hídricos e o planejamento das atividades humanas que dependem desse recurso, além de tornar inevitável a proposição de medidas de adaptação que possibilitem a convivência da população com essas novas tendências climáticas. Ao longo dos anos, a configuração e o propósito das medidas adaptativas sofreram diversas alterações, passando de uma preocupação inicial em construir uma infraestrutura capaz de resistir aos impactos das mudanças do clima, para o entendimento dos fatores que tornavam a população vulnerável a esse processo. Assim, medidas setoriais passaram a propor a composição de sistemas integrativos, capazes de identificar as fragilidades locais e atuar na melhoria das condições de vida da população (RASUL; SHARMA, 2016).

No Brasil, entretanto, essa visão integrativa ainda é pouco aplicada no desenvolvimento de políticas setoriais. Existe, em geral, pouca conexão entre as legislações federais inseridas nas três dimensões do Nexu WEF (TORRES et al., 2021). Uma legislação recente que faz menção à essa necessidade de integração entre os planos setoriais é o Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (BRASIL, 2022a), mas com ações pontuais mais concentradas na quantificação das demandas, como a elaboração de uma resolução para proposição da área de expansão da agricultura irrigada, considerando a demanda para geração de energia, e a melhoria das estimativas de demanda de água para irrigação. No PNRH existe um programa com foco na adaptação às mudanças climáticas, o qual faz menção ao impacto nos setores de energia e agricultura, e é delimitada uma ação referente à avaliação dos efeitos das mudanças climáticas nos setores que demandam água. Entretanto, no PNRH não são especificadas quais medidas devem ser realizadas.

Também com foco no planejamento dos recursos hídricos, uma iniciativa federal de sistematização de informações de múltiplas dimensões para quantificação da

segurança hídrica, é o Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), elaborado pela Agência Nacional de Águas (ANA), juntamente com o então Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) (ANA, 2019), atualmente Ministério da Integração e Desenvolvimento Regional (MIDR). O objetivo do PNSH é estabelecer um conjunto de orientações sobre o planejamento e a implantação da infraestrutura hídrica até 2035, além de realizar estudos sobre a segurança hídrica nacional. Para retratar as múltiplas dimensões inseridas na segurança hídrica - humana, econômica, ecossistêmica e de resiliência -, com foco no atendimento das demandas e nos prejuízos econômicos desencadeados por uma situação de escassez, foi proposto o Índice de Segurança Hídrica (ISH), que detalha a situação desse recurso em todo o território nacional. Em relação às propostas de intervenção, existe um foco para a execução de obras estruturais, a partir da análise da qualidade e quantidade das infraestruturas propostas para as diversas regiões do País, a fim de verificar se elas são capazes de resolver os problemas identificados pelo ISH. No cálculo do indicador, em relação à produção de alimentos, pode ser destacado o uso de dados referentes à demanda de água para irrigação e as perdas econômicas da produção agrícola, caso a disponibilidade de água seja insuficiente. Entretanto, quanto ao setor energético, apenas é feita uma menção sobre a necessidade de revisar a metodologia de cálculo do ISH, para que sejam consideradas as variações do volume de água disponível nos reservatórios existentes e planejados do sistema hidrelétrico.

O primeiro Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA) foi publicado em 2016, após a sua formalização como um dos instrumentos da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), de 2009 (BRASIL, 2009). Essa legislação instituiu a necessidade de elaboração de políticas para promoção da adaptação à mudança do clima. O PNA teve como horizonte o período de quatro anos e no objetivo principal foi destacada a preocupação em realizar a gestão do risco climático, considerando a articulação entre diferentes instrumentos de gestão de múltiplos setores, com foco principal na segurança hídrica, energética e alimentar. Dentre as metas, existia a proposição de criação da plataforma para propagar o conhecimento sobre adaptação, que resultou na implantação do AdaptaBrasil, onde são disponibilizados índices e indicadores de múltiplos setores que auxiliam na análise dos impactos das mudanças climáticas, além da proposição de políticas

públicas de adaptação (BRASIL, 2016). Apesar da iniciativa, o relatório final pondera a carência de medidas de integração e sinergia entre setores e órgãos responsáveis, sendo uma sugestão o aprimoramento da estrutura de governança em um novo ciclo do PNA (BRASIL, 2021). Mesmo o relatório final destacando que apenas 8% das metas propostas pelo plano não tiveram sua execução iniciada e 42% foram concluídas (BRASIL, 2021), a deficiência de coordenação das ações em decorrência da falta de integração entre os gestores e interesses diversos é destacada por Milhorange, Sabourin e Mendes (2019).

### 4.3 Segurança hídrica, energética e alimentar no Brasil

Na literatura científica podem ser encontrados diversos conceitos relativos à segurança hídrica, energética e alimentar. No documento adotado como base teórica para os debates realizados na Conferência de Bonn (HOFF, 2011), onde foi divulgada a abordagem do Nexo WEF, foram destacadas as definições apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Conceitos de segurança hídrica, energética e alimentar.

Segurança	Descrição	Referência
Hídrica	Acesso à água em quantidade e qualidade adequada para garantir a saúde, os meios de subsistência da população, a manutenção dos ecossistemas e a produção econômica, respeitando um nível aceitável de riscos associados à oferta de água para as pessoas, ambientes e economias.	Grey e Sadoff, 2007
Energética	Acesso a uma quantidade adequada de energia, por um valor razoável e de forma contínua.	IEA, 2009
Alimentar	Acesso físico e econômico, de todas as pessoas, a qualquer tempo, de uma quantidade suficiente, segura e nutritiva de alimentos.	FAO, 2006

Em uma extensa revisão da literatura acadêmica, Cook e Bakker (2012) identificaram quatro temas mais frequentemente explorados em pesquisas referentes à segurança hídrica: a disponibilidade em relação às demandas, vulnerabilidade humana aos eventos extremos, as necessidades humanas e a sustentabilidade.

Em relação à segurança energética, existem quatro elementos principais: a disponibilidade, a possibilidade de acesso ao recurso, que pode ser atrelada à capacidade de pagamento, e a sustentabilidade ambiental (IEA, 2009; KRUYT et al., 2009). Quanto à situação de segurança alimentar, a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (em inglês, *Food and Agriculture Organization* - FAO) (FAO, 2006) e Gundersen e Ziliak (2015) destacam a garantia de uma alimentação em quantidade e qualidade apropriada, para todos os indivíduos, a qualquer tempo.

De forma geral, o conceito de segurança referente às três dimensões do Nexo WEF está fundamentado na garantia de acesso contínuo, em quantidade e qualidade, para manutenção dos meios de subsistência da população, além da manutenção do ecossistema de origem do recurso.

Ao analisar a situação desses recursos no Brasil é comum ser destacada a elevada disponibilidade hídrica. Entretanto, esses recursos não estão distribuídos uniformemente no território. Dentre as doze regiões hidrográficas (RHs) que delimitam os corpos hídricos existentes no País, somente a Amazônica dispõe de cerca de 80% dos recursos hídricos superficiais. Em contrapartida, essa região possui uma baixa densidade demográfica e a menor demanda por água (ANA, 2017a).

O consumo de água, além de ser influenciado pela magnitude da densidade demográfica, também é ajustado pelo comportamento da sociedade. Na década de 1940, o abastecimento humano era a atividade que mais demandava água. Atualmente, os maiores volumes são direcionados para o setor agrícola (ANA, 2017a). O elevado consumo pode ser relacionado ao crescimento da área irrigada, sendo o país atualmente reconhecido como detentor de uma das maiores áreas irrigadas do mundo, com uma perspectiva de crescimento desta área em 4,2 milhões de hectares até 2040 (ANA, 2021).

Outro uso significativo da água é para a geração de energia, sendo as hidrelétricas responsáveis por dois terços da capacidade total instalada em 2019, no Brasil (MME, 2020). Apesar do crescimento da oferta derivada de outras fontes de energia renováveis - biomassa, solar e eólica - a fonte hidráulica continuará com grande predominância no horizonte do Plano Decenal (EPE, 2022a), sendo as



usinas hidrelétricas centralizadas responsáveis por 53% da geração total de eletricidade em 2031. Em um contexto de necessidade de diversificação das fontes renováveis para garantir a segurança energética frente à variabilidade climática também se destaca a expansão da energia solar descentralizada, que até 2031 alcançará o patamar de 5% da eletricidade total gerada, e as usinas solares centralizadas, que serão responsáveis por 2% do montante.

Para atender esses múltiplos interesses, os estudos realizados com base no ISH (detalhado no tópico anterior) indicaram a necessidade da realização de 166 intervenções, a maioria relacionada a sistemas adutores e barramentos para armazenamento da água até 2035 (ANA, 2019). Esse prognóstico sobre intervenções necessárias não considera a aplicação de políticas públicas ou projeções futuras de variáveis hidrológicas associadas ao processo de mudanças climáticas. Apenas a execução de obras pode não ser suficiente para garantir a oferta de água, pois estudos de quantificação da segurança hídrica, considerando projeções de modelos climáticos apresentados pela Quarta Comunicação Nacional (MCTI, 2021), indicam uma elevada probabilidade de redução das vazões e aumento da incidência de eventos extremos de secas e cheias em todos os biomas. Essa redução da disponibilidade hídrica impacta na capacidade de geração de energia hidrelétrica, a qual pode ser minimizada pela utilização de outras fontes de energia. Existe, por exemplo, uma complementaridade entre a energia hidrelétrica gerada na bacia do São Francisco e a energia eólica gerada em parques localizados nos biomas do Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica. Em relação à agricultura, além da maior variabilidade da precipitação impactar na produtividade das culturas, as mudanças climáticas também elevam a ocorrência de temperaturas extremas, que podem interferir no desenvolvimento do cultivo. Cada variedade de planta está adaptada a determinadas condições climáticas, assim a maior frequência de eventos extremos de precipitação e temperatura será responsável por impactos no seu desenvolvimento (IPCC, 2021).

Em uma nova perspectiva, a Quarta Comunicação Nacional, considerou fatores climáticos e não climáticos para proposição de medidas de adaptação às novas condições climáticas. Essa abordagem reconhece a influência direta das condições socioeconômicas da população nos impactos dos eventos extremos. Assim, durante a composição desse documento, representantes do governo e da

academia colaboraram na identificação das medidas de adaptação que melhor se ajustavam aos impactos atuais e futuros, além de vulnerabilidades identificadas na análise da segurança hídrica, energética, alimentar e sócioeconômica do país (COUTINHO et al., 2020).

Nessa abordagem para entendimento das vulnerabilidades da população, quando são consideradas áreas urbanas densamente povoadas, a dificuldade para garantir qualidade e quantidade dos recursos é ampliada. Nessas situações as obras a serem executadas demandam maiores investimentos, além de serem mais complexas pois, muitas vezes, implicam a extração de recursos de áreas distantes dos locais onde é observado o desequilíbrio entre oferta e demanda, agravando os impactos (HOEKSTRA; BUURMAN; VAN GINKEL, 2018). No Estado de São Paulo, Bortoleto et al. (2021) realizaram uma análise do impacto das crescentes demandas da população por água e energia, com o uso da abordagem Nexo. Os dados avaliados indicam um acréscimo significativo da demanda por energia para garantir a qualidade da água e o atendimento aos padrões de lançamento dos esgotos, alcançando um patamar de 115% de crescimento entre 2006 e 2019. Os autores ainda destacam as sucessivas reduções no nível dos reservatórios, em função da maior variabilidade dos recursos hídricos, além do crescimento do despejo de esgotos não tratados nos corpos hídricos, devido ao aumento das demandas e de despejos realizados em áreas de ocupação irregular nas proximidades dos reservatórios.

Recentemente, a influência de eventos extremos de temperatura no Brasil acarretou aumento no consumo de energia. A atualização do relatório mensal do Operador Nacional do Sistema (ONS) referente à semana com início no dia 18 de novembro de 2023, destacou que as elevadas temperaturas, registradas nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste na semana anterior à sua publicação, resultaram em cargas de energia acima das previstas para o mês de novembro principalmente para as Regiões Sudeste/Centro-Oeste (14,6%) e Norte (17,0%) (ONS, 2023). Segundo relatório do INMET, em quase todos os meses de 2023 foram registradas temperaturas acima dos 40°C em diversas regiões como resultado dos efeitos do forte El Niño, mas no mês de novembro a elevação das temperaturas foi mais abrangente no tempo e no espaço (INMET; SEPEA, 2023).

## **5 METODOLOGIA**

Neste capítulo serão explorados as ferramentas e conceitos que servirão de base para o desenvolvimento da tese: apresentação da área de estudo, uma introdução sobre o modelo Hidrológico Distribuído do INPE e a apresentação dos indicadores a serem empregados na análise integrada da segurança hídrica, energética e alimentar.

### **5.1 Área de estudo**

A BPS, possui uma área de cerca de 62.074 Km<sup>2</sup> e está situada ao longo dos estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro -, representados por 184 municípios. O Rio Paraíba do Sul tem origem na confluência dos rios Paraibuna e Paraitinga, em São Paulo, e se estende por aproximadamente 1.150 Km, até desaguar no Oceano Atlântico, em São João da Barra, Rio de Janeiro (CEIVAP, 2021).

O bioma em que a bacia está inserida é a Mata Atlântica, intensamente alterado desde a chegada dos portugueses ao Brasil. Alguns exemplos de momentos em que se observou uma intensa modificação da vegetação natural foi a expansão das fazendas de café em 1770 (IORIS, 2008) e, posteriormente, a expansão de plantações de eucalipto, destinados à produção de fibra celulósica em 1960 (CARRIELLO et al., 2016). Como ocorre em outras regiões do Brasil, a população residente nessa área cresceu significativamente ao longo dos anos. Segundo dados do Censo do IBGE, entre 1970 e 2010, houve um acréscimo de cerca de 113% da população total da bacia, caracterizado por um aumento de 197% da parcela residente na área urbana e um decréscimo de 50% da população rural (IBGE, 2010). Esse comportamento pode ser associado ao intenso processo de industrialização, significativamente superior ao desempenho da atividade agropecuária. Em 2019, a parcela do PIB referente ao primeiro setor foi de cerca de 30,4%, enquanto o componente agropecuário representava 1,2% (IBGE, 2021). Essa tendência de crescimento continua nos anos mais recentes, segundo dados do último censo, o crescimento total da população entre 1970 e 2022 foi de 125% (IBGE, 2023).

A disponibilidade de recursos naturais permitiu, ao longo das últimas décadas, um acentuado crescimento econômico da região, com um crescimento do PIB entre 2002 e 2019 de 295% (IBGE, 2021). Porém, esse aumento foi responsável por uma considerável modificação das condições naturais do meio, provocando a redução da disponibilidade e na qualidade dos recursos. Apesar de uma tendência atual de recuperação das áreas de floresta, a extensão ocupada pelo bioma original da região se restringe a apenas 11% da bacia (CEIVAP, 2014). O Plano Integrado de Recursos Hídricos (CEIVAP, 2021) destaca que grande parte da vegetação foi substituída por campos e pastagens, além de se observar um elevado grau de modificação pela ação humana nas áreas de preservação permanente, ao longo dos cursos de água. Segundo dados do Mapbiomas, até 2022, 27,4% da área bacia era ocupada por florestas e 68,6% por atividades agropecuárias (SOUZA et al., 2020).

As principais atividades dependentes da água da bacia são o abastecimento humano e industrial, a irrigação, a geração de energia e a diluição de esgotos. Além da demanda interna, parte desse recurso ainda é desviada com o objetivo de suprir as necessidades da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Atualmente, uma vazão de 119 m<sup>3</sup>/s é desviada na estação elevatória de Santa Cecília, localizada no Estado do Rio de Janeiro, para o reservatório de Santana na Bacia do rio Guandu (ANA, 2015). Outra obra mais recente, que também retira recursos hídricos da BPS, é a interligação entre as represas Jaguari e Atibainha, componente do Sistema Cantareira, com uma retirada anual média de 5,13 m<sup>3</sup>/s (ANA, 2017b).

Diferente da transposição para a bacia do Guandu, a remoção de água para o Sistema Cantareira e o seu inverso, deve ter início apenas em situações de escassez hídrica. A Resolução Conjunta da ANA/DAEE N° 925/2017 (ANA; DAEE, 2017) estabelece o início do bombeamento da água do Jaguari quando o Sistema Cantareira estiver operando com um volume que caracterize situação de atenção ou pior.

Em relação ao potencial elétrico, segundo dados disponíveis no Sistema de Informações da Geração (SIGA) da Agência Nacional de Energia Elétrica

(ANEEL), a principal fonte de energia é a hidrelétrica, com um total aproximado de 1,6 mil MW em operação.

Esta tese se concentrou em parte da BPS (Figura 5.1), onde estão inseridas as duas transposições que auxiliam no abastecimento das regiões metropolitanas de São Paulo e Rio de Janeiro, sendo esta última responsável pelo atendimento de 10 milhões de pessoas (CEIVAP, 2014). Em toda a BPS residem 9,2 milhões de pessoas segundo dados do censo de 2022. Em estudos anteriores realizados nessa área da bacia por nossa equipe de pesquisa, Rezende et al. (2018) identificaram o impacto futuro da expansão das plantações de eucalipto em cenários futuros de uso e ocupação do solo na região do Vale do Paraíba Paulista. Posteriormente, Paiva (2020) analisou o impacto das mudanças futuras de uso e ocupação do solo na segurança hídrica, em um panorama de mudanças climáticas, considerando as demandas para abastecimento humano e industrial, sem a influência da aplicação de políticas públicas. Mais recentemente, Paiva et al. (2024) verificaram a segurança hídrica considerando a combinação de cenários climáticos e de uso da terra, além do aumento do consumo de água para abastecimento humano e industrial.

A área de estudo é de grande importância no contexto da Região Sudeste por considerar as duas transposições necessárias para a manutenção da segurança hídrica e energética das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Rio de Janeiro. Na área de estudo estão localizadas importantes usinas hidrelétricas da BPS (Tabela 5.1), as quais são responsáveis por 28,8% da potência hidráulica instalada. Também destaca-se a disponibilidade de resultados de outros estudos necessários para realização da pesquisa, como a tese de Paiva (2020), defendida no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre (PGCST/INPE).

Figura 5.1 - Delimitação da área de estudo.

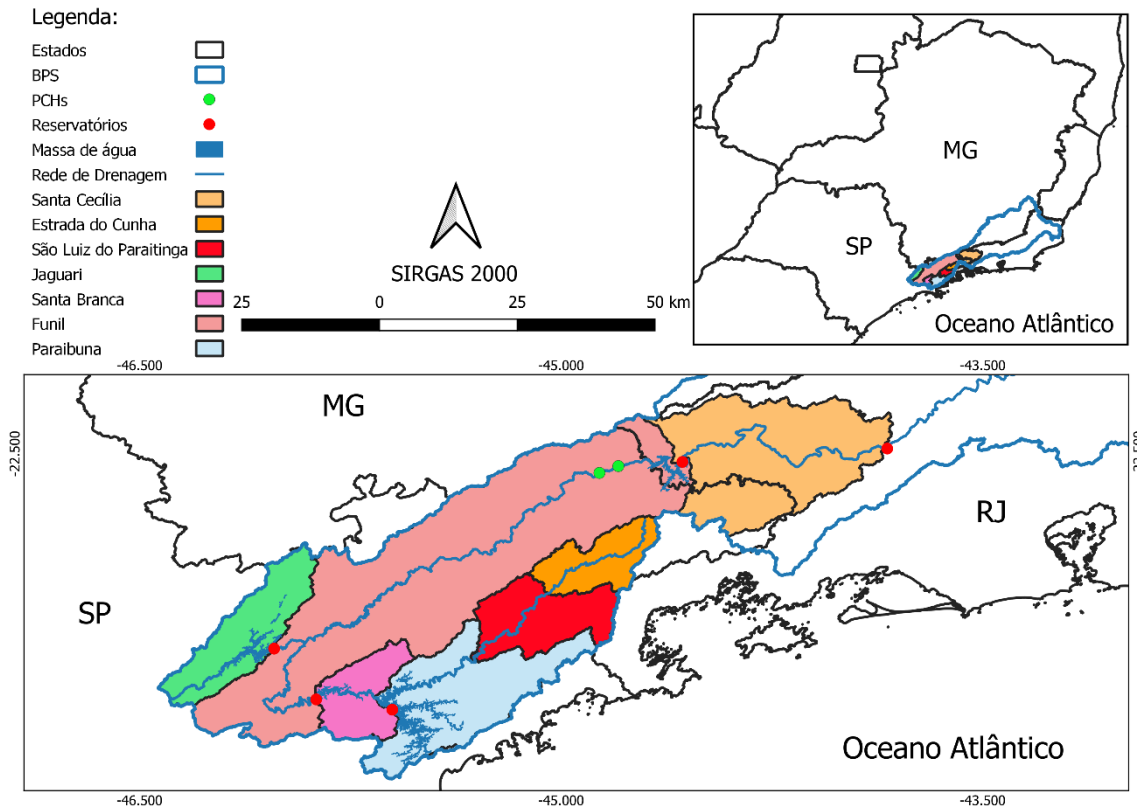


Tabela 5.1 - Características dos reservatórios da área de estudo.

Reservatório	Potência Instalada (MW)	Volume Útil (hm <sup>3</sup> )
Jaguari	27,60	793
Paraibuna	87,02	2636
Santa Branca	56,05	308
Funil	216	606
Santa Cecília (Elevatória)	-	-
Lavrinhas	30,00	-
Queluz	30,00	-

A significativa perda da vegetação original, dentre outros fatores, intensifica a suscetibilidade a processos como deslizamentos e inundações. As estiagens prolongadas também se tornaram mais críticas devido à falta de cobertura vegetal (CEIVAP, 2014).

Apesar das intensas mudanças de uso e ocupação do solo, uma significativa parcela das áreas de floresta ainda está preservada. Segundo dados do Projeto Mapbiomas (SOUZA et al., 2020) existe uma predominância de terras ocupadas

por florestas (33,3%) e pastagem (38,2%). Enquanto as porções caracterizadas como urbanas estão concentradas em apenas 3,6% da região.

A preservação de parte das florestas é facilitada pela declividade acentuada de determinadas regiões e pela implantação de Unidades de Conservação. Essas características ainda limitam a atividade agrícola, favorecendo a expansão de pequenos agricultores e dificultando a exploração em larga escala. Silva et al. (2017) associam essas características à evasão de pessoas das áreas rurais para as urbanas do Vale do Paraíba Paulista, a procura de empregos nas indústrias, sendo um resultado desse movimento a regeneração das florestas localizadas nas propriedades abandonadas de pasto.

Essa região é caracterizada por elevados níveis de acesso aos serviços de abastecimento de água (98,3%) e energia elétrica (99,8%) (IBGE, 2010). A quantidade de domicílios com esgoto coletado também é significativa (95,5%), entretanto esse percentual reduz significativamente (69,2%), quando é quantificada a população, cujo esgoto é tratado (ANA, 2017c). As elevadas demandas, que sobrecarregam os cursos de água, somadas à variabilidade na disponibilidade e às cargas de poluentes lançados nos rios, também impactam na oferta de água. Ao longo de toda a extensão da bacia localizam-se diversos centros urbanos, responsáveis pelo despejo de efluentes nos mananciais.

## **5.2 Modelo hidrológico distribuído do INPE**

### **5.2.1 Balanço hídrico**

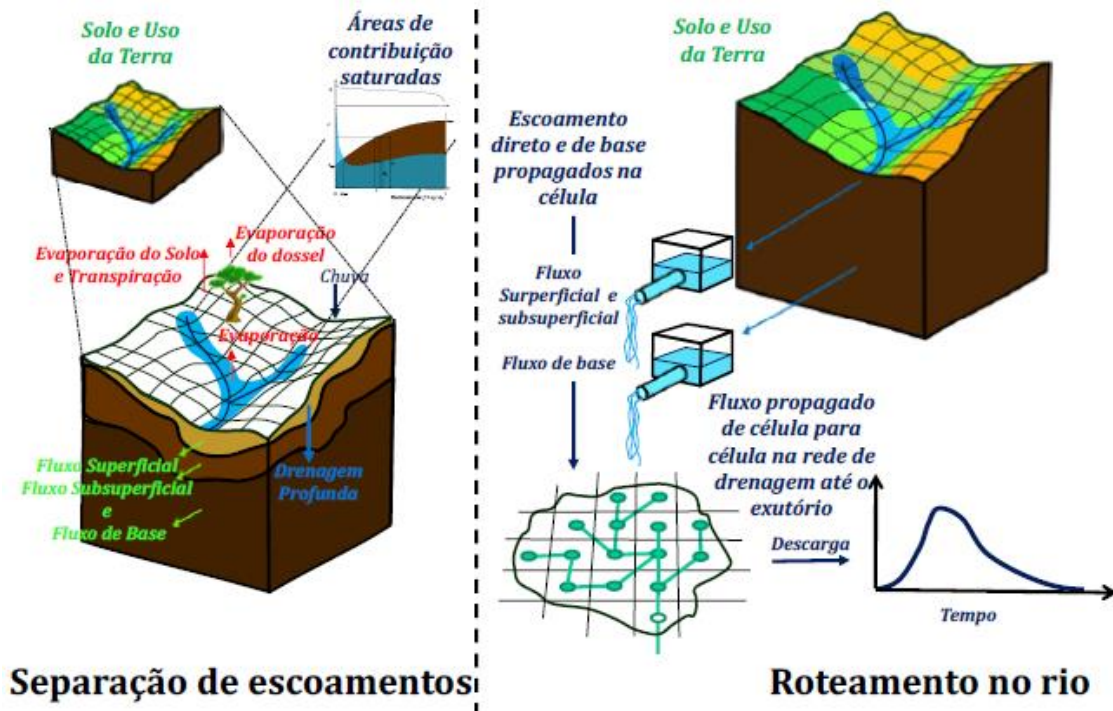
Para representar os processos hidrológicos incidentes na BPS foi adotado o Modelo Hidrológico Distribuído do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (MHD-INPE). Pesquisas que aplicaram o MHD-INPE na avaliação da resposta hidrológica de bacia às mudanças climáticas, obtiveram resultados satisfatórios. Siqueira Júnior, Tomasella e Rodriguez (2015), por exemplo, consideraram os efeitos das mudanças climáticas na quantificação do impacto das mudanças de uso e cobertura da terra nas vazões da bacia do rio Madeira. Os resultados mostraram que o modelo foi capaz de representar satisfatoriamente as vazões observadas na região, apesar de diferenças serem verificadas na análise dos

valores extremos. Tomasella et al. (2019), por sua vez, analisaram a qualidade das vazões previstas na bacia do rio Doce, com uma antecedência de 24 a 120 horas. Apesar de fatores como a área, a forma e o posicionamento das sub-bacias terem impactado nos resultados, em geral não foram verificadas grandes variações na performance das previsões. Outro estudo conduzido por Melo et al. (2022) obteve valores de vazão e evapotranspiração semelhantes aos observados na simulação de uma bacia de pequeno porte no MHD-INPE. Os impactos associados às mudanças de uso e ocupação do solo também vêm sendo analisadas com o uso desse modelo hidrológico. A simulação do MHD-INPE na bacia do rio Aguapeí (SP) por Oliveira et al. (2022), por exemplo, mostraram que a expansão da cana de açúcar sobre áreas ocupadas por outras culturas agrícolas ou pastagens é responsável pela redução da vazão dos rios e acréscimo na evapotranspiração, sendo esses efeitos principalmente observados nas áreas a montante da bacia.

O MHD-INPE é uma ferramenta caracterizada como um modelo determinístico e distribuído, e representa o espaço como uma grade regular. Cada célula, como sintetizado na Figura 5.2, é formada por múltiplas Unidades de Resposta Hidrológicas (URHs), resultantes da combinação de diferentes tipos de vegetação, de solo e de usos do solo. Nessas unidades é resolvido o balanço hídrico, sendo o excedente de água do conjunto de URHs de cada célula transmitido ao longo da rede de drenagem, segundo a metodologia de Muskingum-Cunge (RODRIGUEZ; TOMASELLA, 2016). A forma de representação espacial adotada favorece o seu uso em estudos de avaliação dos processos desencadeados pelas mudanças climáticas, pois os dados provenientes de modelos atmosféricos normalmente estão distribuídos da mesma forma (TOMASELLA et al., 2022).



Figura 5.2 - Representação dos processos hidrológicos realizada pelo MHD-INPE.



Fonte: Tomasella et al. (2022)

Para quantificação da resposta de cada célula à precipitação, o modelo divide o solo em três unidades (Figura 5.3), as quais possuem uma capacidade máxima de armazenamento dependendo da sua espessura e do tipo de solo. A camada externa é responsável pela formação de escoamento na superfície e as interações com a atmosfera, enquanto na zona inferior ocorre o fluxo subterrâneo. O fluxo de água entre essas duas regiões, além do armazenamento de água destinado à vegetação com raízes mais profundas, é realizado por meio da camada intermediária (TOMASELLA et al., 2022).

O escoamento superficial horizontal ( $Q_{sup}$ ) ocorre por saturação de uma área da célula ( $A_{sat}$ ), associada a ocorrência de uma precipitação ( $P$ ).

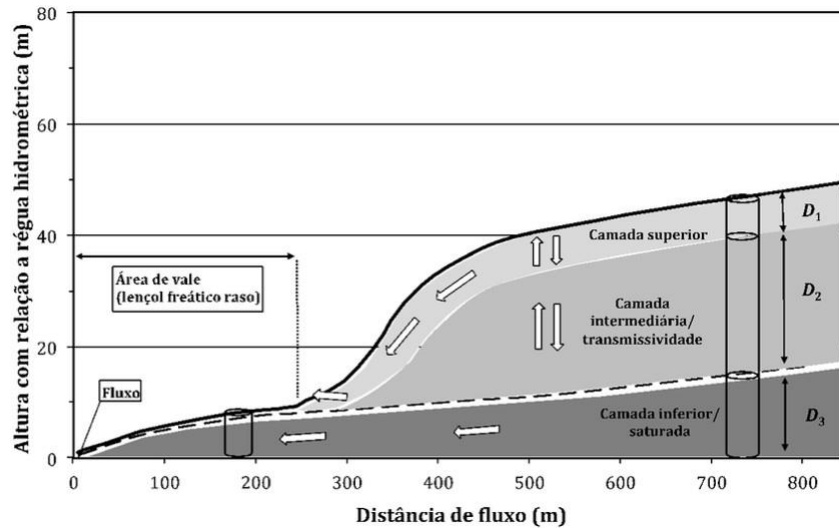
$$Q_{sup} = A_{sat} \cdot P \quad (5.1)$$

Na camada superior do solo ocorre o fluxo horizontal, representado pelo escoamento subsuperficial ( $Q_{ss}$ ), que retarda a ocorrência da infiltração para as camadas mais profundas.

$$Q_{ss} = \frac{\alpha D_1 K_{ss} \tan \beta}{\lambda_n^\eta} \cdot \left( \frac{SS_t}{SS_{m\acute{a}x}} \right)^\eta \quad (5.2)$$

Onde  $\alpha$  é a anisotropia do solo,  $D_1$  é a espessura da camada de solo,  $K_{ss}$  é a condutividade hidráulica,  $\tan \beta$  é a declividade média do lençol freático na célula,  $\lambda_n$  é um parâmetro topográfico médio da célula,  $\eta$  é o parâmetro de condutividade de Brooks Corey,  $SS_t$  é o armazenamento médio na célula no tempo  $t$  e  $SS_{m\acute{a}x}$  é a capacidade máxima de armazenamento.

Figura 5.3 - Compartimentação do solo considerada no MHD-INPE.



Fonte: Negrão et al. (2016).

O transporte de água entre a camada superior e a intermediária ocorre por meio do fluxo vertical ( $Q_v$ ).

$$Q_v = \frac{K_{ss} \lambda}{\lambda_n^\eta} \cdot \left( \frac{SS_t}{SS_{m\acute{a}x}} \right)^\eta \cdot \left( 1 - \frac{\alpha D_1}{\lambda} \right) \quad (5.3)$$

Na camada intermediária ocorre apenas o fluxo vertical ( $Q_r$ ) que comunica as camadas superior e inferior.

$$Q_r = K_{ss} \cdot \left( \frac{SR_t}{SS_{m\acute{a}x}} \right)^\eta \quad (5.4)$$

Onde  $SR_t$  é o armazenamento médio da camada intermediária no instante  $t$ .

O fluxo horizontal na camada inferior do solo ( $Q_{sub}$ ) será máximo quando a quantidade de água armazenada no solo atinge o nível máximo.

$$Q_{sub} = \frac{T_{sub} \tan \beta}{\lambda_{\mu}^{\mu}} \cdot \left[ 1 - \frac{S_{m\acute{a}x} - S_t}{S_{m\acute{a}x}(1 - \varepsilon)} \right]^{\eta} \quad (5.5)$$

Onde  $T_{sub}$  é a transmissividade quando o lençol freático atinge a superfície,  $S_{m\acute{a}x}$  e  $S_t$  são, respectivamente, a capacidade máxima e média no instante  $t$  de armazenamento,  $\varepsilon$  é a razão entre o armazenamento na capacidade de campo e o máximo,  $\mu$  representa a variação de transmissividade com a profundidade,  $\lambda_{\mu}$  é a média na grade da área de contribuição a montante por unidade de contorno.

O processo de evapotranspiração é estimado segundo a equação de Penman-Monteith, que considera dados relativos à temperatura do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica, radiação solar e umidade relativa do ar. Informações detalhadas sobre o modelo podem ser encontradas nos manuais de implementação (NEGRÃO et al., 2016; TOMASELLA et al., 2022).

### 5.2.2 Geração de energia

A quantificação da energia gerada nas usinas hidrelétricas considera o princípio da conservação da massa para quantificar a vazão defluente dos reservatórios segundo a variação do volume.

$$\frac{dV}{dt} = Q_{afl.} - Q_{def.} \quad (5.6)$$

$$V_i = V_{i-1} + (Q_{afl.} - Q_{def.}) \cdot \frac{86400}{10^6} + \frac{1}{1000 \cdot A_L} \cdot (P - E) \quad (5.7)$$

Onde  $V_i$  é o volume do reservatório no instante  $i$ , ( $\text{hm}^3$ )  $V_{i-1}$  é o volume do reservatório no instante anterior ( $\text{hm}^3$ ),  $Q_{afl.}$  é a vazão afluyente ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $Q_{def.}$  é a

vazão defluente ( $m^3/s$ ),  $A_L$  é a área da superfície livre do reservatório ( $km^2$ ),  $P$  é a precipitação ( $mm/dia$ ),  $E$  é a evapotranspiração ( $mm/dia$ ).

Enquanto o volume do reservatório estiver dentro dos limites de operação descritos na Tabela 5.2, a vazão defluente ( $Q_{def}$ ) é definida com base nas seguintes equações:

$$Q_{def} = Q_{tur} \quad (5.8)$$

$$Q_{tur} = \min \left[ Q_{reg}; \frac{(V_i - V_{min}) \cdot 10^6}{86400} \right] \quad (5.9)$$

$$Q_{ver} = 0 \quad (5.10)$$

Onde  $Q_{tur}$  é a vazão turbinada ( $m^3/s$ ),  $Q_{reg}$  é a vazão regularizada ( $m^3/s$ ),  $Q_{ver}$  é a vazão vertida ( $m^3/s$ ) e  $V_{max}$  é o volume máximo do reservatório ( $hm^3$ ).

A vazão regularizada ( $Q_{reg}$ ) está associada à energia firme. Esse termo corresponde à máxima geração hidrelétrica durante o período de maior escassez hídrica (ANEEL, 2005). No cálculo foi considerado o potencial de falha de 5%, utilizado na gestão do setor elétrico. Esse conceito é importante para a operação do SIN, pois permite o conhecimento da capacidade de atendimento da usina mesmo em situações de seca, além de ser utilizada para comparação de custo benefício entre diferentes usinas (KELMAN et al., 2004).

Na situação em que o volume do reservatório ultrapassar o limite máximo considerado seguro, a vazão defluente será a soma entre a vazão máxima possível de ser turbinada ( $Q_{tmx}$ ), correspondente a vazão de engolimento na Tabela 5.2, e a vazão vertida ( $Q_{ver}$ ), que corresponde ao excedente da vazão turbinada, como descrito abaixo.

$$Q_{def} = Q_{tur} + Q_{ver} \quad (5.11)$$

$$Q_{ver} = \max \left[ \frac{(V_i - V_{max}) \cdot 10^6}{86400} - Q_{tur}; 0 \right] \quad (5.12)$$

$$Q_{tur} = Q_{tmx} \quad (5.13)$$

Onde  $V_{max}$  é o volume máximo do reservatório ( $hm^3$ ).

Tabela 5.2 - Regras de Operação dos Reservatórios.

Reservatório	Vazão Mínima (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Máxima (m <sup>3</sup> /s)	Volume Útil (hm <sup>3</sup> )	Volume Máximo Operativo (hm <sup>3</sup> )	Volume Mínimo Operativo (hm <sup>3</sup> )	Vazão de engolimento (m <sup>3</sup> /s)
Paraibuna	10	120	2636	2096	4732	120
Santa Branca	30	300	308	131	439	150
Jaguari	4	60	793	443	1236	50
Funil	70	700	606	283	888	378

Fonte: ANA (2015) e ONS (2018).

As regras de operação dos reservatórios podem ser modificadas em situações de emergência ou para adequar a vazão aos múltiplos usos, assim, na etapa de calibração do MHD-INPE, realizada por Paiva et al. (2024), as vazões defluentes ao reservatório foram substituídas pelo histórico de operação do SIN (TOMASELLA et al., 2022). Enquanto na etapa de simulação do modelo foi considerada a regra associada à energia firme.

A potência ( $P_{ot}$ ) produzida pela passagem da vazão defluente através das turbinas é quantificada pela equação a seguir.

$$P_{ot} = k \cdot H \cdot Q_{tur} \quad (5.14)$$

Onde  $k$  é o coeficiente de produtividade da turbina (0.0084 MW.s/m<sup>4</sup>),  $H$  é a diferença entre os níveis de montante e jusante do reservatório (m).

### 5.3 Cenários futuros

#### 5.3.1 Modelos climáticos

As condições climáticas futuras foram inseridas na modelagem com a utilização de previsões climáticas produzidas pelo *downscaling* dinâmico do modelo de circulação regional Eta, com 20 Km de resolução espacial, forçado por três modelos de circulação globais (em inglês, *General Circulation Model* - GCM): o japonês *Model for Interdisciplinary Research on Climate on Climate*, versão 5 (MIROC5) (WATANABE et al., 2010), o inglês *Hadley Global Environment Model 2 - Earth System* (HadGem2-ES) (COLLINS et al., 2011) e o canadense

*Canadian Earth System Model* (CANESM2) (ARORA et al., 2011). Os resultados foram ainda interpolados para uma grade de 5 km na Região Sudeste do País.

Dentre as variáveis resultantes dessa simulação, foram consideradas no presente estudo a precipitação total (mm), a temperatura a 2 m da superfície (°C), a temperatura do ponto de orvalho a 2 m da superfície (°C), a velocidade do vento a 10m da superfície (m/s), a pressão a superfície (mb) e a radiação global incidente de onda curta (MJ/m<sup>2</sup>).

Devido à existência de erros sistemáticos nos dados resultantes da simulação do modelo climático regional Eta, foi extraída do estudo de Martins et al. (2023) a correção prévia do viés das saídas do modelo. Esses erros estão associados a problemas constantes nas simulações, como simplificações do modelo e erros nas condições iniciais. Nessa etapa foi aplicada a transformação quantil-quantil (BÁRDOSSY; PEGRAM, 2011) a partir do ajuste das curvas de distribuição de probabilidade dos dados previstos e observados.

O modelo regional Eta (CHOU et al., 2014) foi introduzido no Brasil pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) para melhorar as previsões numéricas, atualmente ele é operacionalmente utilizado na instituição para emissões de previsões de tempo e clima, sendo adotado em estudos que avaliaram cenários de mudanças climáticas na América do Sul. Um exemplo foi o uso das projeções regionalizadas do Eta, aninhado ao HadGem2-ES, ao MIROC5 e ao *Brazilian Earth System Model* (BESM) para elaboração das análises apresentadas na Terceira Comunicação Nacional sobre Mudanças Climáticas, onde foi detalhado o balanço das emissões antrópicas de gases do efeito estufa e medidas de redução das emissões (MCTI, 2021). A partir da avaliação dos extremos climáticos para a América do Sul, produzidos pelo modelo regional Eta, forçado por três modelos climáticos globais (CanESM2, HadGEM2-ES e MIROC5), Dereczynski et al. (2020) destacaram uma maior similaridade dos padrões de comportamento das temperaturas simuladas e observadas, que das precipitações, apesar das projeções serem capazes de perceber os aumentos das precipitações.

Esses modelos globais compõem o conjunto de modelos estudados no *Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5), uma iniciativa do *World Climate Research Programme* (WCRP), criado em 1980, por iniciativa da *World Meteorological Organization* (WMO), juntamente com o *International Council for Science* (ISC), com foco na necessidade de produzir conhecimento científico sobre os processos climáticos para agir na minimização das mudanças climáticas produzidas pelo homem. Dentre as diversas pesquisas produzidas pelo WCRP, o *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP) produz uma série de previsões meteorológicas usadas de base para diversas pesquisas (SOMMERIA; TOUZÉ-PEIFFER, 2019). O CMIP tem como objetivo a comparação e a evolução de modelos climáticos desenvolvidos pelos principais centros de modelagem existentes no mundo, possibilitando a elaboração de um protocolo de simulação, a unificação dos resultados, o que torna possível a comparação e o entendimento das múltiplas respostas dos diferentes modelos. Os resultados dessas pesquisas são utilizados em diversos estudos climáticos, os quais servem de base para a produção dos relatórios do IPCC.

Embora o CMIP6, adotado no sexto relatório do IPCC (IPCC, 2021) tenha sido disponibilizado recentemente, as avaliações sobre a América do Sul revelaram apenas ligeiras melhorias em comparação com o relatório anterior do IPCC (KIM et al., 2020; ALMAZROUI et al., 2021), além de outras deficiências em comparação com CMIP5 (LI et al., 2021). Kim et al. (2020), por exemplo, detalham que, de maneira geral, o CMIP6 representa precipitações e temperaturas extremas de forma similar ao CMIP5, mas com menores desvios das temperaturas mais quentes e das menores precipitações em relação ao período histórico (1981 a 2000) em algumas regiões, como a América do Sul. Entretanto, as maiores precipitações simuladas pelo CMIP6 são mais intensas.

Nas regiões da América Central e do Sul, as análises realizadas por Ortega et al (2021) demonstram que as duas versões do CMIP são capazes de identificar as periódicas da precipitação e principalmente de temperatura. Entretanto, apesar da melhor qualidade na quantificação da precipitação em relação ao CMIP5, o CMIP6 continua apresentando erros sistemáticos, sendo um exemplo as subestimativas de precipitação, devido a problemas na representação da Zona

de Convergência Intertropical (ZCIT). Apesar de avanços na representação das variáveis climáticas, Seneviratne e Hauser (2020) ressaltam algumas das principais deficiências do CMIP6 em relação à versão anterior, como o aumento dos valores máximos de temperatura na região do sistema de monções da América do Sul, a qual tem significativa influência na formação de precipitação na Região Central e Sudeste do Brasil, e maiores índices de precipitação extrema na África Ocidental e na Região do Sahel do continente.

Para representar as tendências futuras de emissões de gases do efeito estufa, foram consideradas as projeções indicadas pelos *Representative Concentration Pathways* (RCPs) 4.5 e 8.5. O primeiro é um cenário intermediário, com uma forçante radioativa máxima de  $4.5 \text{ W/m}^2$  em 2100. O segundo caracteriza o cenário mais pessimista dentre os cenários adotados nos relatórios do IPCC, com uma forçante radioativa de  $8.5 \text{ W/m}^2$  em 2100 (IPCC, 2014).

### **5.3.2 Uso e ocupação do solo**

As mudanças históricas e futuras de uso e ocupação do solo foram extraídas dos estudos realizados por Rezende et al. (2018) e complementados por Paiva et al. (2020). Primeiramente, Rezende et al. (2018) analisaram a expansão das plantações de eucalipto na região do vale do Paraíba paulista, entre os anos de 2010 e 2050, com foco nos três cenários descritos a seguir:

- Cenário Otimista (O): o enfraquecimento da atividade produtiva, reduz o crescimento da silvicultura, estimula a conservação de áreas de preservação permanente e a redução das taxas de desmatamento, favorecendo a recuperação das florestas;
- Cenário atual (A): continuidade de expansão da demanda por eucalipto observada no período atual, e dos padrões atuais de comportamento das áreas de vegetação natural e pastagens;
- Cenário Pessimista (P): aceleração da atividade econômica, com aumento da demanda por celulose e papel, resultando no crescimento das áreas ocupadas por silvicultura, agricultura e pasto, além da



ampliação do desmatamento.

O período histórico da pesquisa realizada por Rezende et al. (2018) teve como referência a classificação de uso e cobertura da região realizada por Neves, Andres Rodriguez e Carriello (2013) para os anos de 1995 e 2010. Posteriormente, Paiva et al. (2020) consideraram o mapeamento dos anos de 2005 e 2010 elaborados por Rezende et al. (2018), para quantificar a expansão da área urbana na mesma região, sendo essa classe sobreposta às projeções de uso e ocupação do solo elaborados por Rezende et al. (2018).

### **5.3.3 Uso da água para abastecimento e indústria**

Dada a necessidade de ampliação da oferta dos serviços de água e esgoto, o novo marco do saneamento, a Lei Nº 14.026 de 2020 (BRASIL, 2020), propõe a minimização da marginalização, a partir da universalização do acesso, com uma meta de 99% da população atendida com água potável e 90% com coleta e tratamento de esgoto até 31 de dezembro de 2033. Mesmo os contratos em vigor, antes da vigência da Lei, devem se adaptar às novas metas.

Assim, considerando as premissas dos cenários propostos por Rezende et al. (2018), além das propostas apresentadas no Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) (MDR, 2019) e no Novo Marco do Saneamento (BRASIL, 2020), foram definidos três cenários futuros de uso da água, cujas metas estão especificadas na Tabela 5.3<sup>2</sup>.

- Cenário atual (A): estabilização de políticas do estado, com estagnação da oferta nos setores de saneamento e de energia. As demandas desses setores são mantidas nos patamares atuais.
- Cenário pessimista (P): a diminuição dos estímulos no setor de saneamento, resultam em menores taxas de expansão de acesso aos

---

<sup>2</sup> Ressalta-se que as taxas referentes ao cenário atual (A) representam o valor médio para a área de estudo.

serviços e maiores consumos per capita de água. Como os níveis dos serviços<sup>3</sup> de água e esgoto são elevados na região, o acesso ao abastecimento, a coleta e ao tratamento de esgoto adotados serão aqueles propostos pelo PLANSAB (MDR, 2019).

- Cenário otimista (O): maior preocupação com a expansão dos investimentos permitem a ampliação do setor de saneamento e a garantia de que a totalidade da população tenha acesso aos serviços<sup>4</sup> de abastecimento, coleta e tratamento de esgoto. A implantação de programas de educação e de estímulo ao uso de tecnologias mais eficientes desencadeia uma redução dos níveis de consumo de água e energia.

Ressalta-se que os componentes do saneamento considerados foram apenas o abastecimento de água, a coleta e tratamento de esgoto. Em relação às pessoas atendidas pelos serviços de água e esgoto foram consideradas tanto as soluções coletivas como individuais, caracterizadas como adequadas no PLANSAB (MDR, 2019).

Tabela 5.3 - Caracterização dos cenários futuros.

Ano	Índice de Perdas			Taxa de abastecimento		
	A*	O	P	A*	O	P
2030	42,8%	30%	45%	98,3%	100%	100%
2050		20%	30%		100%	100%
Ano	Coleta de esgoto			Tratamento de esgoto		
	A*	O	P	A*	O	P
2030	95,5%	100%	98%	69,2%	100%	90%
2050		100%	98%		100%	90%

<sup>3</sup> Em relação às perdas no sistema de distribuição, foi considerado o percentual fixado no cenário factível do Plano Estadual de Recursos do Estado do Rio de Janeiro (PERHI-RJ), onde estão localizadas cidades com elevados valores desse índice (COPPETEC, 2014).

<sup>4</sup> As perdas respeitam os limiares estabelecidos para o cenário otimista do PERHI-RJ (COPPETEC, 2014).

O consumo per capita de água foi calculado com base nos dados de volume de água registrado nos hidrômetros e quantidade de economias fornecidos pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), responsável pelo fornecimento de água em parte dos municípios paulistas localizados na área de estudo. Para aqueles não atendidos pela SABESP, foram considerados os valores do indicador de consumo micromedido por economia calculado e disponibilizado anualmente pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS).

Como alguns dos municípios não atendidos pela SABESP não tinham dados disponíveis no SNIS ou apresentavam falhas na série histórica, os municípios foram agrupados segundo as variações do consumo per capita de água e características socioeconômicas. Nessa etapa foram obtidos sete *clusters*.

Para composição dos clusters foi aplicado o algoritmo k-mean, que considera a distância em relação aos centroides de cada agrupamento, implementado com o uso da linguagem R e verificados com base nos dados observados de consumo per capita de água. As características dos municípios consideradas nessa análise, bem como as fontes dos dados, são apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Dados considerados na clusterização dos municípios.

Dados	Fonte
Produto Interno Bruto a preços correntes (Mil Reais/pessoa)	IBGE, 2019
Percentual do valor adicionado bruto a preços correntes referente à agropecuária (%)	IBGE, 2019
Percentual do valor adicionado bruto a preços correntes referente à indústria (%)	IBGE, 2019
Percentual do valor adicionado bruto a preços correntes referente aos serviços, exclusive administração, defesa, educação e saúde públicas e seguridade social (%)	IBGE, 2019
Percentual do valor adicionado bruto a preços correntes da administração, defesa, educação e saúde públicas e seguridade social (%)	IBGE, 2019
Percentual da população na área urbana (%)	IBGE, 2010
Densidade demográfica (habitante/Km <sup>2</sup> )	IBGE, 2010

Como o cenário atual considera a mesma tendência do consumo per capita histórico, essa projeção corresponde à média dos consumos per capita de cada *cluster*. Em relação aos cenários pessimista e otimista, as projeções foram calculadas considerando o desvio padrão médio dos dados históricos de cada *cluster*.

A esses valores foram acrescidas as perdas reais, associadas a processos físicos, como vazamentos e extravasamento, que correspondem a 90% do indicador do SNIS de perdas na distribuição. O SNIS foi adotado devido à disponibilidade de dados anuais sobre os componentes do saneamento básico, disponibilizados pelas responsáveis pela prestação do serviço (BORGES et al., 2022).

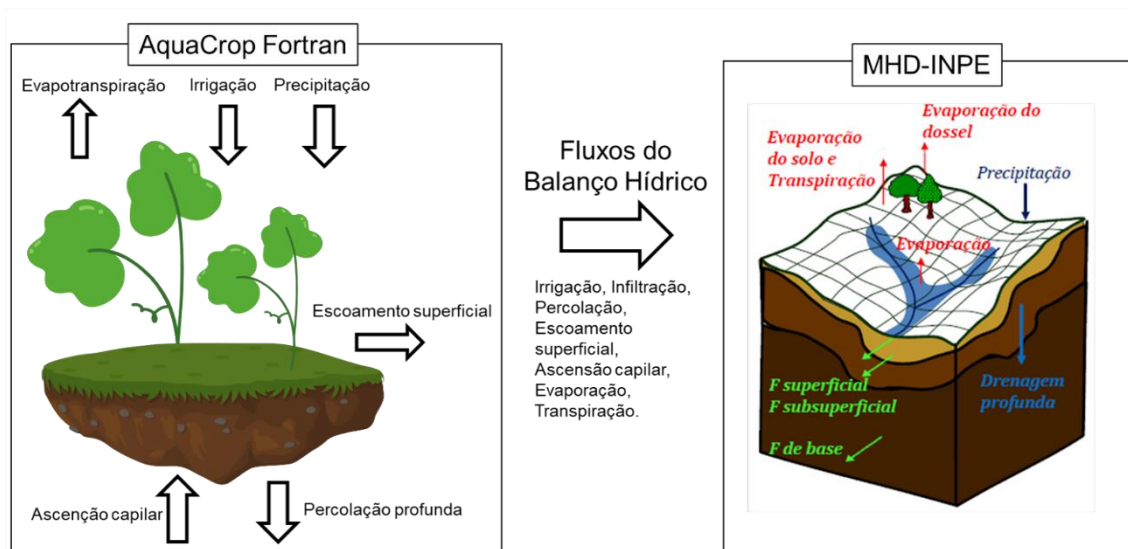
### 5.3.4 Uso da água para irrigação

Em relação à agricultura, foi considerado o consumo das áreas irrigadas de arroz por inundação, cuja produção demanda a maior parcela de água do setor agrícola da porção paulista da área de estudo (ANA, 2021), informações que foram extraídas da pesquisa de Martins et al. (2023). Os autores avaliaram as alterações futuras da demanda por água dessa cultura, considerando diferentes técnicas de manejo, como a irrigação contínua e a intermitente. A primeira técnica é caracterizada por uma lâmina de água contínua sobre a superfície do solo durante todo o ciclo da cultura, enquanto na segunda, uma lâmina de 40 mm é aplicada sempre que o nível de água atinge o nível da superfície do solo. A primeira técnica de irrigação, que é a mais utilizada atualmente, foi considerada na composição dos cenários atual e pessimista. Já a técnica de irrigação intermitente, considerada mais eficiente em relação ao uso da água, foi incorporada ao cenário otimista.

Na pesquisa de Martins et al. (2023) foi utilizado o modelo de simulação de culturas agrícolas AquaCrop, desenvolvido pela FAO, com foco na quantificação da resposta da cultura a mudanças na disponibilidade de água, em função da variação da biomassa e do rendimento (STEDUTO et al., 2009). Para permitir a introdução das séries distribuídas no tempo e no espaço das variáveis produzidas por modelos climáticos e de discretização da área estudada, foi utilizada uma versão em código aberto do AquaCrop, desenvolvida com o uso da linguagem de programação fortran, a AquaCrop Fortran (AQF) (TOMASELLA; MARTINS; SHRESTHA, 2023).

O Modelo AquaCrop realiza o balanço vertical no perfil do solo calculando a quantidade de água infiltrada, a extração radicular, que inclui a evaporação do solo e a transpiração da cultura, e a percolação em cada passo de tempo do cálculo. Estes fluxos calculados no modelo AquaCrop são inseridos de forma off-line no MHD-INPE, após a realização da simulação das células onde a cultura está localizada no modelo AQF, como exemplifica a Figura 5.4. Finalmente, a demanda para irrigação calculada pelo AQF é adicionada às demais demandas fornecidas ao MHD-INPE.

Figura 5.4 - Balanço hídrico do MHD-INPE em cada célula, considerando os fluxos calculados pelo modelo AquaCrop.



Fonte: Adaptado de Negrão et al. (2016) e Raes et al. (2009).

### 5.3.5 Consumo de energia

Aos cenários futuros também foram incorporadas variações no consumo de energia. O cenário pessimista assumiu o aumento do consumo para garantir a manutenção da expansão econômica, enquanto o cenário otimista considerou a redução do consumo como consequência de campanhas de conscientização da população e do estímulo à geração de energia, em indústrias e residências. Por último, o cenário atual considerou o consumo referente a 2020 extraído da Base de Dados Geográfica da Distribuidora (BDGD), gerenciada pela ANEEL. De forma semelhante ao cálculo do consumo per capita de água, a demanda per capita de energia foi determinada considerando os municípios agrupados segundo os níveis de consumo, obtendo-se cinco *clusters*.

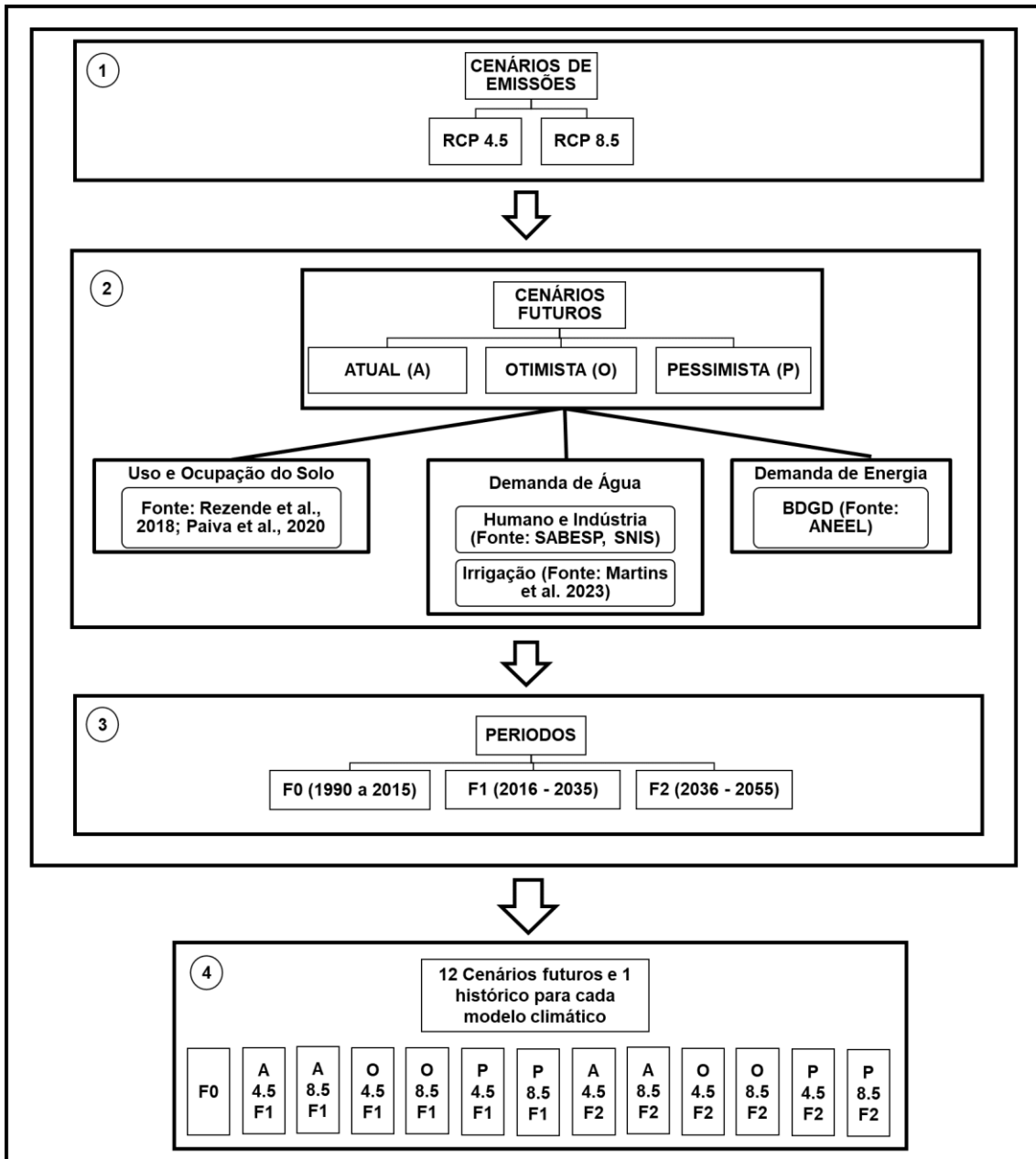
### 5.3.6 Composição dos cenários futuros

Os cenários futuros foram montados a partir da combinação de variáveis extraídas de três modelos climáticos, considerando dois cenários de emissões RCP 4.5 e 8.5, os três cenários de uso e ocupação do solo, aos quais foram incorporadas as premissas de consumo da água para abastecimento humano,

industrial e consumo agrícola, em dois períodos futuros (F1 - 2016 a 2035; F2 - 2036 a 2055) e o histórico (F0 - 1990 a 2015). Essas combinações resultaram em 12 cenários futuros (Figura 5.5), para cada modelo climático, além do histórico, como detalhado nas seções seguintes.

Esses cenários referentes ao período histórico e futuro foram simulados no MHD-INPE, considerando a calibração do modelo realizada por Paiva et al. (2024). Os autores analisaram a segurança hídrica na área de estudo para cenários futuros, considerando os efeitos do crescimento da demanda de água para uso humano e industrial, das mudanças climáticas e de uso e ocupação do solo. Os resultados mostraram que o modelo foi capaz de representar satisfatoriamente as vazões observadas nas sub-bacias consideradas, com valores do coeficiente Nash-Sutcliffe entre 0,63 e 0,89; e Log-Nash entre 0,62 a 0,89.

Figura 5.5 - Composição dos cenários futuros.



#### 5.4 Indicadores nexu

O uso de indicadores na análise dos *trade-offs* e sinergias entre água, energia e alimentos, foco da abordagem Nexu WEF, possibilita a simplificação de análises que envolvem múltiplos interesses, pois cada indicador pode indicar o desempenho de um processo, que compõe um problema complexo (HIREMATH et al., 2013). Assim, a escolha adequada dos indicadores, considerando as



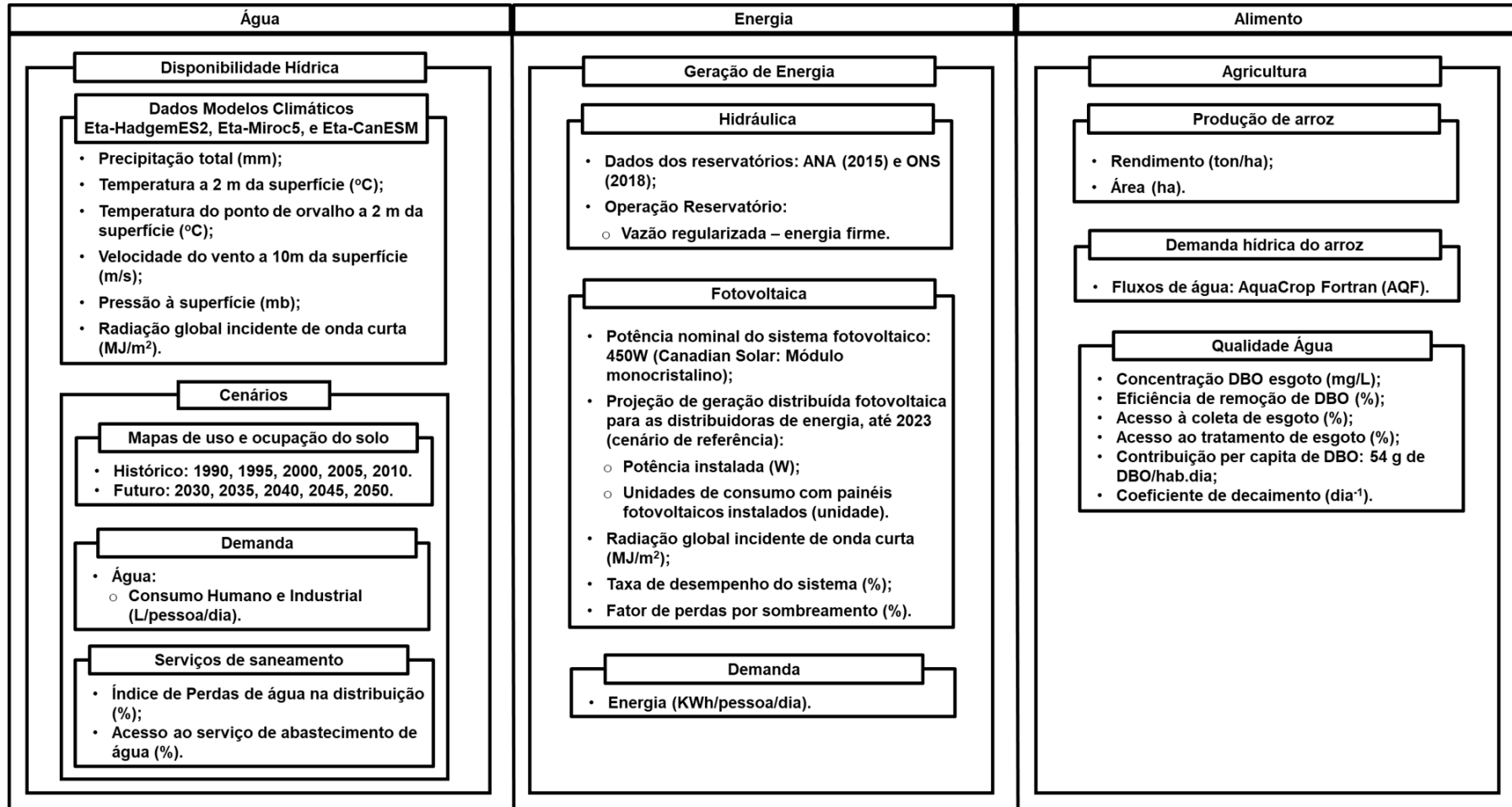
especificidades da região analisada, pode auxiliar os gestores, por indicar as áreas com maiores deficiências e setores que mais demandam investimentos.

A partir da convergência entre os ODSs com a visão integrativa e o foco na sustentabilidade proposto pela abordagem Nexo, a tese optou por uma análise holística dos problemas ao propor indicadores alinhados aos ODSs para analisar a condição futura da segurança hídrica, energética e alimentar na BPS.

O Nexo considera a igualdade de importância entre múltiplos setores e tem possibilidades de aplicação muito diversas. Nesta tese tentou-se elaborar métricas simples a serem aplicadas na escala da bacia e que permitam a comparação dos cenários atuais e futuros. Assim, a avaliação das fragilidades relacionadas à efetivação e manutenção da segurança hídrica, energética e alimentar foi focada em métricas fundamentadas na disponibilidade e na qualidade da água. Ou seja, estudos futuros poderão incorporar questões relacionadas ao estilo de vida da sociedade ou a capacidade dessas propostas efetivamente atingirem a população, por exemplo.

Apesar da tese ter foco principal no recurso hídrico, para composição dos indicadores do Nexo foram utilizados dados associados aos eixos água, energia e alimentos, os quais são apresentados na Figura 5.6.

Figura 5.6 - Discretização dos dados considerados na composição dos indicadores Nexo.



### 5.4.1 Segurança hídrica

Mudanças introduzidas pela ação humana no sistema terrestre, somadas à variabilidade natural dos recursos, desencadeiam uma série de impactos, muitas vezes negativos, observados em diversos setores (CHARLES; GODFRAY; GARNETT, 2014). Siqueira Júnior, Tomasella e Rodriguez (2015), por exemplo, constataram, na Bacia do Rio Madeira, o maior contribuinte do Rio Amazonas, a influência da redução das áreas de florestas no aumento dos valores das vazões máximas.

Nesse sentido, na avaliação da quantidade disponível de água será baseada no indicador da ODS 6, 6.4.2, *nível de stress hídrico*, que reflete a proporção entre as retiradas e o total de recursos de água doce disponíveis. Os usos consuntivos considerados foram o abastecimento humano e industrial ( $U$ ). Já a disponibilidade hídrica da região fornecida pela simulação do MHD-INPE ( $D$ ), foi reduzida à vazão necessária para a manutenção dos ecossistemas aquáticos ( $Q$ ), as retiradas destinadas a irrigação do arroz ( $I$ ) e às transposições ( $T$ ) para a bacia do Guandu e o Sistema Cantareira.

$$DEFICIT = \frac{U}{D - Q - I - T} \quad (5.15)$$

A diferença, no denominador, entre a vazão disponível em cada sub-bacia e os valores correspondentes à irrigação, à manutenção do ecossistema e à transposição, considera que esses usos são primários em relação ao abastecimento humano e industrial. O abastecimento humano é considerado um uso prioritário, segundo a Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1987), e a indústria tem uma significativa parcela de contribuição para o desenvolvimento econômico da área de estudo. Assim, o cálculo desse quociente permite entender os impactos das demais atividades realizadas na bacia nesses usos. Destaca-se, entretanto, que essa equação pode ser modificada dependendo dos setores considerados prioritários para a região estudada ou o objetivo da pesquisa.

Apesar do MHD-INPE representar o espaço como uma grade celular, a vazão é calculada de forma concentrada para cada sub-bacia. Assim, foi considerada que a disponibilidade hídrica (U) corresponde à vazão afluente ao exultório de cada sub-bacia, representados pelos reservatórios e postos fluviométricos, calculada pelo modelo.

O valor do indicador corresponde à frequência em que a disponibilidade hídrica não foi suficiente para atender a demanda, sendo o *DEFICIT* maior do que um ou negativo.

Nos trechos sem reservatório foi considerada para conservação do ecossistema a vazão com 95% de permanência ( $Q_{95}$ ). Apesar da simplicidade do método, a vazão  $Q_{95}$  é utilizada como referência pela Resolução Nº 1.938/2017, responsável por dispor sobre as solicitações de outorgas e direito de uso de recursos hídricos (ANA, 2017d). Entretanto, nos segmentos entre os reservatórios, optou-se por considerar as vazões mínimas defluentes dos reservatórios, fixadas pela Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA Nº 1.382/2015 (ANA, 2015).

É importante destacar que, na obtenção do  $Q_{95}$  são utilizados valores históricos de vazão. Entretanto, autores destacam que não são consideradas demandas das espécies aquáticas, o que pode resultar em valores insuficientes de vazão para atender as necessidades do ecossistema local e, conseqüentemente, na deterioração do habitat no longo prazo (NIKGHALB et al., 2016).

Quanto às transposições, para a Bacia do Guandu, segundo a Resolução Conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA Nº 1.382/2015, foi fixada uma remoção de 119  $m^3/s$  do reservatório de Santa Cecília (ANA, 2015). No caso do Sistema Cantareira, de acordo com a Resolução Nº 1.931/2017 da ANA, é realizada a remoção de uma vazão média diária de 5,13  $m^3/s$  do reservatório do Jaguari (ANA, 2017b).

A qualidade do recurso hídrico foi associada à verificação da manutenção da oferta em níveis adequados, não apenas para atendimento das demandas, mas também para garantir a proteção contra eventos de cheias. Nesse contexto foi adotado o indicador da ODS 6, 6.4.1, *alteração da eficiência no uso da água ao*

*longo do tempo*. As variações foram verificadas com base na quantificação do percentual de tempo em que a vazão defluente dos reservatórios se encontra fora dos limites operacionais estabelecidos pelo ONS, como realizado por Paiva (2020).

Para determinar as vazões mínimas, Zambon (2015) destaca a necessidade de considerar a proteção dos habitats e atender às demandas consuntivas a jusante, havendo situações em que são utilizados dados históricos, no caso de carência de estudos mais detalhados. Já em relação às vazões máximas, o Caderno de Informações Operacionais da BPS cita preocupações com a integridade da estrutura dos reservatórios e a possibilidade de cheias em cidades a jusante (ONS, 2018).

Uma tabela resumo dos indicadores propostos para cada uma das dimensões da segurança hídrica é apresentada a seguir (Tabela 5.5):

Tabela 5.5 - Quantificação da segurança hídrica.

Dimensão	Indicador ODS	Indicador Nexso
Quantidade	6.4.2 - Nível de estresse hídrico: proporção das retiradas de água doce em relação ao total dos recursos de água doce disponíveis	Nível de stress hídrico $DEFICIT = \frac{U}{D - Q - I - T}$ Frequência em que a demanda é superior a oferta de água = DEFICIT > 1 ou DEFICIT < 0
Qualidade	6.4.1 - Alteração da eficiência no uso da água ao longo do tempo	Percentual de tempo em que a vazão defluente dos reservatórios se encontra fora dos limites operativos

#### 5.4.2 Segurança energética

A garantia da segurança energética está intimamente relacionada à variabilidade da matriz. Quanto maior a diversificação das fontes de geração, menor a possibilidade de falha no atendimento da demanda. O Brasil, mesmo se destacando por uma matriz com uma larga exploração de recursos renováveis, possui uma grande dependência da fonte hídrica, aumentando a vulnerabilidade a eventos de escassez, associados frequentemente à variabilidade climática

(MME, 2020), que ao longo dos anos tem reduzido a confiabilidade dessa fonte, devido à redução da disponibilidade hídrica. Em períodos de diminuição dos níveis de precipitação, o SIN garante o atendimento da demanda com a ativação de outras fontes, como termelétrica e eólica, ou o transporte da energia excedente em outras regiões, para garantir a continuidade da oferta. Entretanto, o planejamento energético deve considerar a necessidade de limitação da exploração de usinas termelétricas, devido à larga utilização de combustíveis fósseis, e à redução da dependência das fontes hídricas, pois estudos projetam a redução da disponibilidade hídrica dos subsistemas do SIN, mesmo considerando diferentes cenários (MCTI, 2021).

Uma modalidade de produção de energia que tem contribuído para a diversificação das fontes renováveis é a geração distribuída (GD). Segundo a Lei Nº 14.300 (BRASIL, 2022b), considerada um marco regulatório do setor, existem duas modalidades de geração de energia distribuída: a minigeração, com potência instalada entre 75 kW e 5 MW, para as fontes despacháveis, ou inferior a 3 MW para as fontes não despacháveis, e a microgeração, com potência de até 75 kW. Ambas estão conectadas na rede de distribuição e podem optar por integrar o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), em que a energia excedente da unidade pode ser injetada na rede distribuidora e, posteriormente, compensada na conta da unidade de escolha do consumidor. Em geral, a geração centralizada está associada a maiores potências e distâncias dos centros de consumo, e existe a possibilidade de comercialização da energia no mercado livre, onde são realizadas operações de compra e venda por meio de contratos livremente negociados.

A adoção da GD tem crescido rapidamente, alcançando um patamar de 16,9 GW em 2022, dos quais praticamente 99% correspondem a usinas fotovoltaicas, segundo relação de unidades com GD fornecida pela ANEEL<sup>5</sup>. A possibilidade de instalação de usinas de geração, de menores proporções, em áreas próximas ao local de consumo, reduz a demanda a ser atendida pelo SIN e,

---

<sup>5</sup> Esse dado foi extraído da base de dados na ANEEL no dia 19 de janeiro de 2023

consequentemente, auxilia na diminuição das perdas e dos picos de demanda, dependendo da variabilidade do recurso ao longo do ano (PEREIRA et al., 2017).

Mesmo com as incertezas relativas à adesão à geração distribuída, esta representa uma significativa parcela da energia produzida na área estudada, com 121,3 MW de potência instalada até 2022. Quanto à geração de energia fotovoltaica centralizada, existe apenas um empreendimento em operação, com 880 kW de potência instalada. Nesse contexto, na análise da segurança energética, optou-se por somar a energia produzida nas usinas hidrelétricas à proveniente de sistemas fotovoltaicos distribuídos. Esse dado foi calculado com base nas projeções de potência de geração distribuída instalada por distribuidora até 2032, para o cenário referencial, segundo o tipo de unidade de consumo (residencial, residencial remoto, comercial baixa tensão, comercial remoto de alta tensão e comercial de alta tensão), disponíveis no Painel de Dados de Micro e Minigeração Distribuída da EPE, com última atualização em maio de 2023. Esse cenário considera que apenas a partir de 2029 a taxa de uso do sistema elétrico de distribuição, a TUSD, será cobrada por completo, antes disso, 50% dos encargos são subsidiados (EPE, 2022a). De forma semelhante, o marco legal da geração distribuída (BRASIL, 2022b) instituiu uma cobrança gradual dos custos até 2029, para aqueles conectados à rede de distribuição após um período de 12 meses da sua publicação.

Assim, as projeções da potência instalada e da quantidade de unidades de consumo por município para os períodos histórico e futuro foram estimadas considerando os dados fornecidos pela EPE.

Para a confirmação da disponibilidade de espaço foi comparada a área para instalação do número de painéis fotovoltaicos necessários para atingir as potências calculadas para os períodos histórico e futuros, com as áreas classificadas como pasto ou urbana, que não ocupam unidades de conservação, de reservatórios e dos rios principais da bacia, acrescidos às suas respectivas áreas de influência, além das regiões com declividade superior a 5 graus, no caso das áreas de pasto. Nessa etapa foram adotadas as dimensões dos

módulos monocristalinos de 450 W especificadas pela fabricante Solar Canadian e as potências médias adotadas para cada unidade de consumo especificadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Potência média das unidades de consumo de energia.

Descrição Unidade de Consumo	Potência do Sistema (kWp)
Residencial	5,4
Comercial baixa tensão	22,5
Comercial alta tensão remoto	697,5
Comercial Alta tensão	110,25

Com base nessas informações, o indicador de quantidade foi calculado a partir da média das relações entre a soma das parcelas de energia gerada nas usinas hidráulicas ( $EH$ ) e aquela associada aos sistemas fotovoltaicos distribuídos ( $EF$ ), com as demandas observadas ( $DE$ ).

$$ID = \frac{(EH + EF)}{DE} \quad (5.16)$$

A energia hidráulica considerada na equação 5.16 corresponde à potência calculada pelo MHD-INPE em cada uma das hidrelétricas inseridas na área de estudo, sendo os cálculos realizados com base nas equações descritas no Item 5.2.2. Para o cálculo da energia gerada pelo sistema fotovoltaico ( $EF$ ), em MWh/dia, foi utilizada a equação apresentada por Lorenzo (2002) a seguir:

$$EF = P_N \cdot \left(\frac{H}{G^*}\right) \cdot FS \cdot PR \quad (5.17)$$

Onde  $P_N$  é a potência nominal do sistema fotovoltaico, em condições padrões de teste, correspondentes à irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura da célula de 25°C (kWp),  $H$  é a irradiação global incidente sobre a superfície do painel (MWh/m<sup>2</sup>.dia),  $G$  é a irradiância que determina a potência nominal dos módulos (normalmente é adotado o valor de 1 kW/m<sup>2</sup>),  $PR$  é a taxa de desempenho do



sistema e *FS* o fator que considera as perdas por sombreamento (varia de 0, permanentemente na sombra, a 1, permanentemente na luz).

Os valores da irradiação corresponderam à variável radiação de onda curta, emitida pelo sol, incidente à superfície dos modelos climáticos adotados. Já a taxa de desempenho do sistema adotada foi a média dos valores obtidos para as cidades de Rio de Janeiro e São Paulo, 77% (GASPARIN; KRENZINGER, 2017) e o fator de sombreamento corresponde a uma média dos valores mensais calculados para uma edificação em São Paulo, 84% (MELO, 2012).

A dimensão da qualidade foi analisada em função do percentual de tempo em que a energia firme (Item 5.2.2), calculada para o período histórico, não é alcançada ou superada pelas usinas hidrelétricas localizadas na área de estudo.

Na dimensão energética foram observados os indicadores da ODS 7, 7.2.1 e 7.1.1, *participação das energias renováveis na Oferta Interna de Energia (OIE)* e *percentagem da população com acesso à eletricidade*, respectivamente. A Tabela 5.7 mostra o resumo dos indicadores propostos para cada uma das dimensões.

Tabela 5.7 - Quantificação da segurança energética.

Dimensão	Indicador ODS	Indicador Nexso
Quantidade	7.2.1 - Participação das energias renováveis na Oferta Interna de Energia (OIE)	Relação entre a oferta hidráulica e solar de energia e a demanda $ID = \frac{(EH + EF)}{DE}$
Qualidade	7.1.1 - Percentagem da população com acesso à eletricidade	Percentual de tempo em que a energia firme não foi alcançada ou superada

#### 5.4.3 Segurança alimentar

O relatório de acompanhamento dos ODSs referente ao ano de 2020 mostrava um aumento do número de pessoas afetadas pela insegurança alimentar, mesmo antes do início da pandemia deflagrada pelo novo coronavírus, o SARS-CoV2. Entre 2014 e 2019, a quantidade de pessoas que sofrem com desnutrição

passou de 607 para 650 milhões (UN, 2020). Em 2020, quando a pandemia da Covid-19 foi deflagrada, a magnitude das pessoas afetadas pode ter atingido 811 milhões (UN, 2021). Essa tendência ainda é influenciada pelo processo de mudanças climáticas. Diversas pesquisas verificaram que mudanças nos processos climáticos resultam na maior incidência de eventos extremos de seca e chuva, além de mudanças na temperatura, que limitam o desenvolvimento das plantas, o que provoca a redução do rendimento e qualidade de culturas agrícolas, a mortalidade de algumas espécies, dentre outros impactos (IPCC, 2021). Mesmo que em algumas regiões o acréscimo de dióxido de carbono possa desencadear um aumento da produtividade agrícola e uma redução da demanda por água, essa adaptação depende do emprego de determinadas técnicas de manejo para evitar a perda de nutrientes (ANDERSON; BAYER; EDWARDS, 2020).

Em relação à produção de alimentos nas áreas rurais do Vale do Paraíba, Eskinazi e Souza (2013) destacam a expansão do cultivo de eucalipto a partir da década de 1970, destinado principalmente à exportação. Essa expansão impactou na redução das áreas ocupadas por pastagens e produção de alimentos, que eram voltadas principalmente para o abastecimento do mercado interno.

Cabe destacar ainda a significativa retração nas safras de arroz no Estado de São Paulo ao longo do século XXI (CONAB, 2015). Apesar dessa tendência e da maior parte do arroz consumido no Estado ser proveniente do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, a produção de São Paulo está concentrada no Vale do Paraíba. Essa cultura ainda corresponde à maior área irrigada da área de estudo (ANA, 2021).

Para garantir a disponibilidade de alimentos é importante a elevação e a manutenção da produtividade das culturas agrícolas. Assim, a dimensão quantitativa foi avaliada com base na produção total da cultura de arroz, em toneladas/ano.

Mesmo sendo uma variável importante, o aumento isolado da produção não resolve o desafio de garantir o acesso da população à alimentação. Outro fator

importante é garantir a qualidade da água utilizada na irrigação, para evitar a disseminação de doenças, não apenas no processo produtivo, mas também durante o preparo.

Apesar da atividade agrícola também ser uma fonte de poluentes, devido ao uso de fertilizantes e agrotóxicos, a combinação de uma elevada concentração populacional nos centros urbanos e a carência de tratamento adequado do esgoto em algumas cidades é frequentemente destacada como a principal fonte de degradação dos recursos hídricos.

Na análise do impacto de uma plantação de arroz, situada em Taubaté, na qualidade da água do rio Paraíba do Sul, Andrade et al. (2010) verificaram que a elevação da concentração de matéria orgânica (DBO) associada à essa atividade não ultrapassa o limite estabelecido para os usos considerados na região. Os autores destacaram que as elevações mais significativas da DBO se referem a pontos próximos ao lançamento do esgoto de Taubaté. Em relação à concentração de fósforo, muitas amostras ultrapassaram o limite estabelecido na legislação, entretanto os pontos com os maiores valores dessa substância foram aqueles que receberam contribuição de efluentes domésticos, sendo o maior valor da concentração de fósforo verificado em um ponto a montante da saída da plantação. Para verificar o impacto desses dejetos, foi considerado o indicador ODS 6.3.2, *proporção de corpos hídricos com boa qualidade ambiental*.

De forma indireta, optou-se por adotar a metodologia proposta pela ANA para a composição do balanço hídrico qualitativo dos rios (ANA, 2017c). A ideia foi analisar a capacidade de depuração das cargas orgânicas dos esgotos domésticos, considerando a demanda bioquímica de oxigênio (DBO).

A quantidade de esgoto lançada no corpo hídrico foi calculada com base no consumo médio per capita de água, disponibilizado pela SABESP e complementado com dados do SNIS. Do total da água utilizado, foi considerado que uma parcela de 80% é lançada nos rios, segundo coeficiente de retorno (C) proposto pela NBR 9649 de Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário (ABNT, 1986).

O esgoto produzido está associado a uma carga orgânica de 54 g de DBO/hab.dia (ANA, 2017c), descontada a capacidade de remoção da matéria orgânica das estações de tratamento municipais e das soluções individuais, como fossas sépticas, considerando o percentual atual da população municipal com acesso à coleta e tratamento de esgoto, extraídos do Atlas de Esgoto da (ANA, 2017c), enquanto para as projeções futuras foram considerados os percentuais fixados para os cenários de uso da água (Tabela 5.3). A eficiência de remoção da DBO dos municípios localizados no Estado de São Paulo foi extraída da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2020). No caso dos municípios do Rio de Janeiro, os dados foram coletados do Atlas de Esgoto (ANA, 2017c). Para cenários futuros foi convencionado o percentual mínimo de 60%, estipulado pela CONAMA 430 (BRASIL, 2011).

Na análise do processo de diluição foi convencionado que os rios estão enquadrados na classe II da Resolução CONAMA Nº 357/2005, cujo limite máximo da DBO é de 5 mg/L (BRASIL, 2005). As cargas de DBO lançadas nos rios se misturam com a carga existente, sendo posteriormente abatidas ao longo do seu comprimento, como mostram as equações abaixo.

$$C_0 = \frac{C_r \cdot Q_r + C_s \cdot Q_s}{Q_r + Q_s} \quad (5.18)$$

Onde  $C_0$ ,  $C_r$  e  $C_s$  são as concentrações de DBO depois da mistura, do rio a montante da mistura e do esgoto, respectivamente, (mg/L) e;  $Q_r$  e  $Q_s$  são as vazões do rio e do esgoto, respectivamente ( $m^3/s$ ).

Após a mistura, a concentração de DBO decai segundo uma função exponencial de primeira ordem.

$$C = C_0 \cdot e^{K_d \cdot t} \quad (5.19)$$

Onde  $C$  é a concentração de DBO (mg/L) ao longo do tempo  $t$  (dia),  $C_0$  é a concentração inicial de DBO (mg/L), e  $K_d$  é o coeficiente de decaimento ( $dia^{-1}$ ).

Por fim, o indicador corresponde ao percentual de tempo em que a essa concentração se manteve superior à fixada para a classe II.

Conforme mencionado anteriormente, o MHD-INPE calcula as vazões dos rios por sub-bacia. Portanto, a determinação da DBO remanescente nos trechos de rio foi realizada de forma agregada por sub-bacia. Essa abordagem simplificada não leva em conta o ponto de lançamento dos esgotos e, conseqüentemente, as mudanças nos comprimentos dos trechos de rio ao longo dos quais ocorre o processo de diluição, cujos valores são necessários na determinação do tempo, considerado na equação 5.19.

Uma tabela resumo dos indicadores propostos para cada uma das dimensões da segurança alimentar é apresentada a seguir (Tabela 5.8):

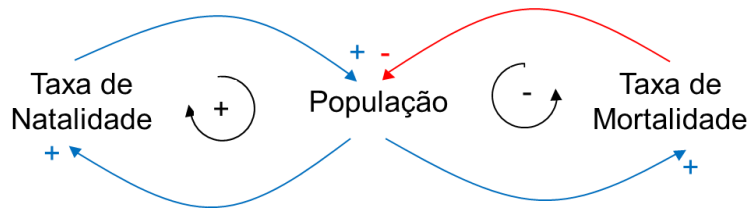
Tabela 5.8 - Quantificação da segurança alimentar.

Dimensão	Indicador ODS	Indicador Nexso
Quantidade		Produção total
Qualidade	6.3.2 - Proporção de corpos hídricos com boa qualidade ambiental	Percentual de tempo em que a DBO é superior ao limite da classe II

## 5.5 Sistematização das conexões entre os elementos do nexso

Uma forma simplificada que tem sido frequentemente adotada para capturar múltiplas relações entre elementos de sistemas complexos, de forma acessível para gestores de diferentes áreas, são os Diagramas de Loop Causais (em inglês, Causal Loop Diagrams - CLD) (PURWANTO et al., 2019). Segundo Sterman (2000), nesse diagrama as relações causais entre variáveis reais são representadas por setas que expressam a consequência da mudança de uma variável, identificadas pelo sinal de positivo (+) ou de negativo (-), referente aos efeitos de acréscimo ou decréscimo, respectivamente. Também podem ser reproduzidas relações de *feedback* de reforço ou equilíbrio, caracterizadas por loops positivos ou negativos, respectivamente (Figura 5.7).

Figura 5.7 - Exemplo de representação dos elementos de um Diagrama de Loop Causal.



Fonte: Adaptada de Sterman (2000).

Para garantir entendimento das relações entre as diferentes variáveis do Nexso consideradas na Tese, foi elaborado um CLD, considerando os elementos que tiveram efeitos relevantes na manutenção da segurança hídrica, energética e alimentar da área estudada.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Acesso aos recursos

Mesmo que um recurso esteja disponível em quantidade e qualidade satisfatórias, parte de uma população pode sofrer com restrições de acesso, devido à amplitude dos sistemas de distribuição ou a indisponibilidade de recursos financeiros para sua aquisição. A abordagem Nexo WEF considera tanto a eficiência da gestão dos recursos para atendimento das demandas, como também a equidade de acesso, assim como os ODSs destacam a preocupação com a universalização do acesso.

Como destacado em tópico anterior, a região estudada possui elevados níveis de acesso aos serviços de abastecimento de água (98,3%), coleta de esgoto (95,5%) e energia elétrica (99,8%). Esses níveis foram calculados segundo dados do Censo de 2010 (IBGE, 2010), os quais consideram o domicílio estar ligado à rede geral de distribuição de água, de coleta de esgoto e ter energia no domicílio, respectivamente.

Diferente da água que é um bem que não pode ser substituído, entre 2016 e 2022 foram observados acréscimos da quantidade de pessoas que utilizam lenha ou carvão na preparação de alimentos, sendo o percentual médio de pessoas que utilizam esse combustível de 2,0% e 4,3% nos Estados de Rio de Janeiro e São Paulo, respectivamente, conforme destaca a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua Anual (PNADCA). A PNADCA e o Censo 2010 do IBGE são pesquisas realizadas com metodologias diferentes, mas chama a atenção o fato do percentual de pessoas com acesso à energia desses estados ter sido de 99,9% em 2010. Essa tendência pode indicar que uma quantidade maior de pessoas não tem acesso à energia, provavelmente por questões de renda.

Ainda com foco no acesso à energia, na área de estudo, a comparação entre o potencial fotovoltaico instalado nas unidades de consumo até 2020 com a renda per capita e o PIB municipal (IBGE, 2010), mostram a existência de uma correlação linear de 0,62 e 0,71, destacando que a renda é um fator limitante na expansão da geração distribuída. Observando essa relação, Lampis et al. (2022)

ressalta que, mesmo com existência de programas de redução dos custos para adesão à geração distribuída, essa modalidade ainda não é uma opção para uma significativa parcela da população.

## **6.2 Demandas por recursos**

O agrupamento dos municípios segundo os dados de consumo per capita de água resultou na obtenção de sete *clusters*, especializados na Figura 6.1. O detalhamento do consumo associado a cada cluster é apresentado na Tabela 6.1.



Figura 6.1 - Detalhamento dos clusters do consumo per capita de água.

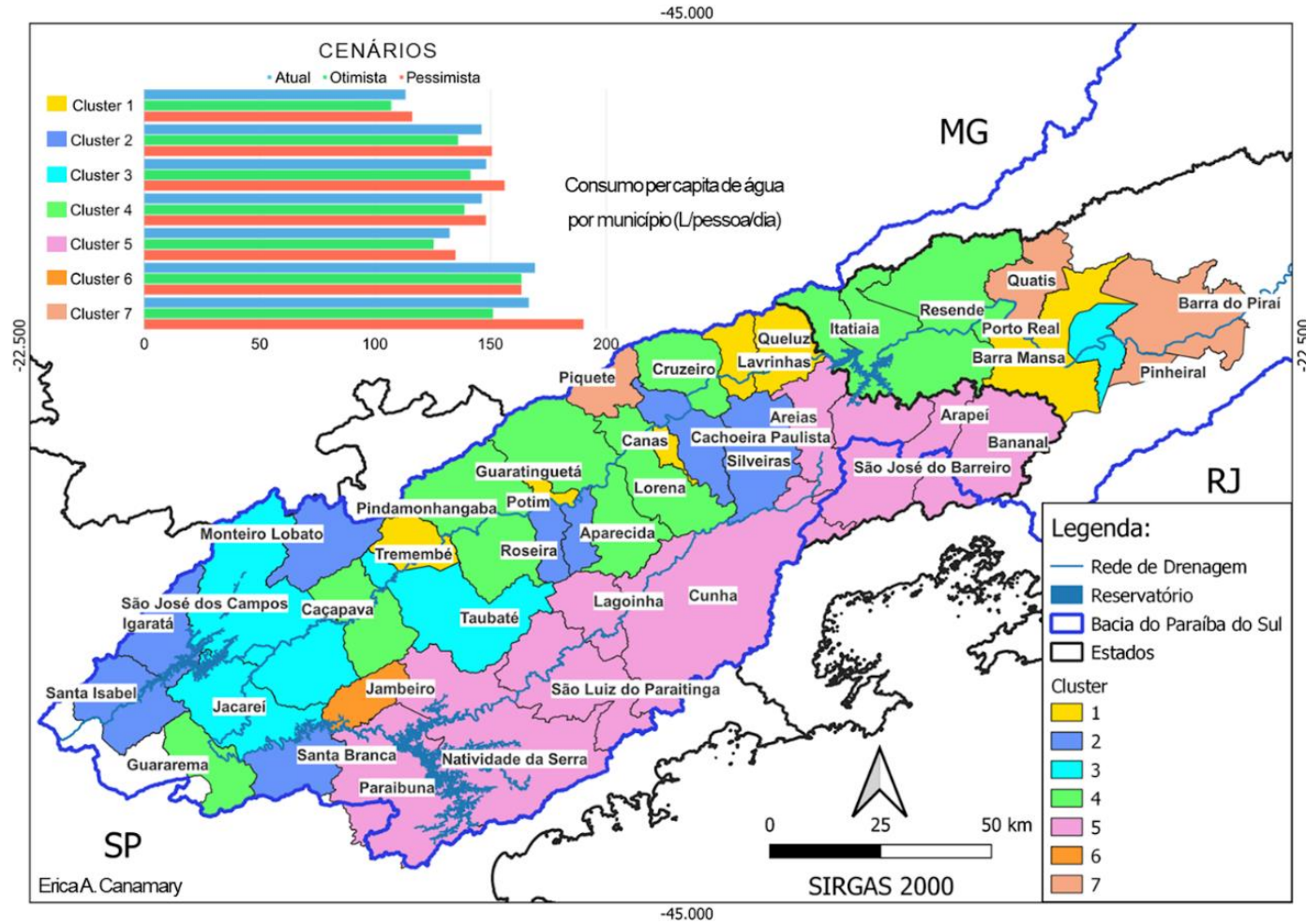


Tabela 6.1 - Consumo per capita de água por município (L/pessoa/dia).

Cluster	Municípios	Atual	Otimista	Pessimista
1	Barra Mansa (RJ), Canas (SP), Lavrinhas (SP), Potim (SP), Queluz (SP), Tremembé (SP)	113,27	107,01	116,09
2	Aparecida (SP), Cachoeira Paulista (SP), Santa Isabel (SP), Igaratá (SP), Silveiras (SP), Monteiro Lobato (SP), Roseira (SP), Santa Branca (SP)	146,12	135,97	150,60
3	Volta Redonda (RJ), Jacareí (SP), São José dos Campos (SP), Taubaté (SP)	148,15	141,33	156,06
4	Itatiaia (RJ), Porto Real (RJ), Rezende (RJ), Caçapava (SP), Cruzeiro (SP), Guararema (SP), Guaratinguetá (SP), Lorena (SP), Pindamonhangaba (SP)	146,20	138,62	147,98
5	Arapeí (SP), Areias (SP), São Luiz do Paraitinga (SP), Bananal (SP), Lagoinha (SP), Redenção da Serra (SP), Cunha (SP), Natividade da Serra (SP), Paraibuna (SP), São José do Barreiro (SP)	132,31	125,39	134,82
6	Jambeiro (SP)	169,29	163,38	163,38
7	Pinheiral (RJ), Barra do Piraí (RJ), Quatis (RJ), Piquete (SP)	166,63	151,08	190,26

A análise<sup>6</sup> do consumo per capita por município obtido para cada cenário (Tabela 6.1) indica as cidades que apresentaram o maior consumo per capita ao final do período histórico, como Jambeiro (SP) (*cluster* 6) Pinheiral, Barra do Piraí, Quatis e Piquete (*cluster* 7). Entretanto, quando se quantifica o volume total se destacam municípios com grandes populações, com mais de 100 mil habitantes<sup>7</sup>

---

<sup>6</sup> Os dados relativos à ocupação e às atividades desenvolvidas nas cidades analisadas foram extraídos de relatórios desenvolvidos pela Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano (EMPLASA), disponibilizados no site do Observatório Regional Vale do Paraíba e Litoral Norte, desenvolvido pela Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP, [s.d.]). Já os dados socioeconômicos foram disponibilizados pelo IBGE.

<sup>7</sup> O IBGE classifica os municípios segundo o número de habitantes em 7 classes: mais de 500 mil, entre 500 mil e 100 mil, entre 100 mil e 50 mil, entre 50 mil e 20 mil, entre 20 mil e 10 mil, entre 10 mil e 5 mil, e menos de 5 mil.

como São José dos Campos, Taubaté, Volta Redonda, Jacareí e Pindamonhangaba.

O *cluster 7* é formado por cidades que possuem características socioeconômicas diferentes, mas apresentaram um perfil de consumo per capita de água semelhante, segundo os dados do SNIS.

Jambeiro é um município de pequeno porte, com uma população de 6.397 habitantes segundo dados do último censo (IBGE, 2023), com cerca da metade da população vivendo na área rural, segundo o censo de 2010 (IBGE, 2010). Entretanto, algumas atividades realizadas no município podem justificar o elevado consumo per capita. Existe uma intensa plantação de eucalipto localizada no município, além da exploração da mineração, atividade que mais demanda água no país (ANA, 2020), e dois distritos industriais que realizam, principalmente, as atividades de usinagem e de calderaria. Jambeiro ainda se destaca por variações da população em função de festividades realizadas ao longo do ano.

Também apresentam uma maior ocupação das áreas rurais as cidades pertencentes ao *cluster 5*, sem ou com pequena atividade industrial. Nessas localidades, em geral, observam-se, principalmente, a exploração das atividades de silvicultura e pastagem, além da presença de áreas de conservação da floresta nativa (Parque Estadual da Serra do Mar e o Parque Nacional da Serra da Bocaina), com alguma atividade agrícola.

Dentre essas cidades do *cluster 5* existe um destaque turístico para Cunha e São Luiz do Paraitinga, com aumentos mais significativos da população em determinadas épocas do ano. Em São Luiz do Paraitinga, o tombamento de diversas construções viabilizou o enquadramento do município como estância turística paulistana. Esse título possibilita que o município receba incentivos voltados ao desenvolvimento dessa atividade, que passou a ser base da economia local, com destaque para o carnaval, a festa do Divino e as atividades de aventura (MARCHEZINI et al., 2017). De forma semelhante, Cunha também é considerado estância turística e explora a prática de esportes radicais, além de

ser conhecido por seus ateliês de cerâmica e um extenso calendário de eventos, que atrai visitantes durante o ano todo (CELIDÓRIO et al., 2020).

O menor consumo per capita, referente ao *cluster 1*, é representado por cidades com uma maior concentração da população nas áreas urbanas, comparado ao *cluster 5*, com cerca de 80% da população, no mínimo, na área urbana. Entretanto, as cidades de Canas, Lavrinhas, Potim e Queluz apresentam uma atividade industrial pouco significativa e um comércio mais simples. Nesse conjunto, nas cidades com populações acima de 10 mil habitantes - Barra Mansa (169.894 habitantes), Potim (20.392 habitantes) e Tremembé (51.173) - são observados deslocamentos diários de parcela da população para trabalhar em municípios próximos. Parte da população de Potim trabalha no setor de comércio e serviços associado ao Santuário de Nossa Senhora Aparecida. Em relação a Tremembé, um pouco mais da metade da população trabalha no município (57%), os demais precisam se deslocar principalmente para Taubaté (IPPLAN, 2016). Por fim, Barra Mansa apresenta uma baixa relação entre população e emprego (22,8%) o que sugere uma movimentação da população para municípios próximos (NASCIMENTO; VIEIRA, 2016).

No próximo agrupamento, o *cluster 2*, integra cidades com economias fortemente fundamentadas no turismo religioso - Aparecida e Cachoeira Paulista -, com a presença de hotéis e comércio voltados para essa atividade. Outra atividade nesses municípios, que também deve ser destacada quando se analisa a demanda por água, é a extração de minerais. As duas cidades desse *cluster*, que combinam pequenas populações e maior parcela vivendo na área rural, são Silveiras (6.186 habitantes) e Monteiro Lobato (4.138 habitantes). Elas apresentam dificuldades de expansão das áreas urbanas por estarem localizadas em áreas de proteção ambiental, o que, entretanto favorece a exploração do turismo em propriedades rurais. Outro município de pequeno porte populacional, cujo crescimento é restrito devido à existência de uma área de proteção ambiental é Igaratá (SP) (10.605 habitantes). Entretanto, a presença do reservatório do Jaguari no seu território tornara a região atrativa para a instalação de pousadas, residências de alto padrão, restaurantes, dentre outras construções. Limítrofe ao município de Igaratá, está Santa Isabel (53.174

habitantes), também inserido em uma área de proteção ambiental. Entretanto, a vizinhança com o município de Guarulhos cria possibilidades de empregos para a população. Por fim, Santa Branca (13.975 habitantes) e Roseira (10.832 habitantes) possuem tamanho populacional semelhante à Igaratá, mas com uma concentração da população nas áreas urbanas um pouco maior, cerca de 90%, e com presença de algumas indústrias no seu território. Nas áreas rurais das cidades desse *cluster* também se destacam plantações de arroz, submetida a pressões devido à expansão urbana, além das atividades de pecuária e silvicultura.

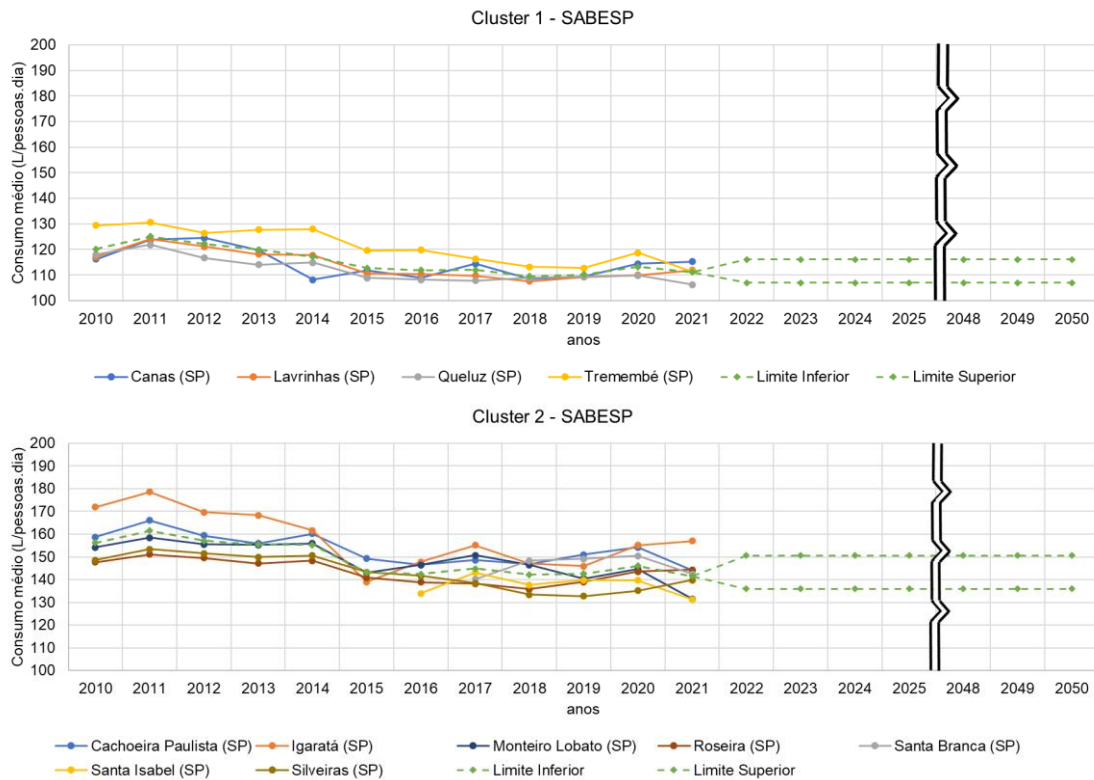
No *cluster* 3 estão os municípios com os maiores PIBs da área de estudo. Nos núcleos urbanos estão concentrados cerca de 98% da população ou mais. A elevada concentração e diversificação de indústrias são responsáveis por significativa parcela do desenvolvimento econômico desses municípios, além de exercer um fator de atração populacional, representando 67,4% do valor adicionado bruto (VAB) referente à indústria em 2019 da área de estudo.

No *cluster* 4 também estão inseridas cidades com elevada urbanização e produção industrial, com maior destaque para os municípios de Pindamonhangaba, Resende, Guaratinguetá e Caçapava, os quais detêm 19,7% do VAB referente à indústria em 2019 da área de estudo. Os municípios de Lorena, Porto Real, Itatiaia e Cruzeiro apresentam um nível de industrialização menor, com 7,1% do VAB referente à indústria em 2019, mas ainda representativo na região, pois os 30 municípios que não estão inseridos nos *clusters* 3 e 4, detêm apenas 5,8% do VAB referente à indústria em 2019. Por fim, o município de Guararema apresenta o menor nível de industrialização do *cluster* 4, mas um PIB per capita semelhante ao de municípios de Pindamonhangaba, Guaratinguetá e Caçapava, 48,3 mil reais/pessoa.

A análise da variação dos dados históricos de consumo per capita de água (Figura 6.2), calculados com base nos dados disponibilizados pela SABESP e pelo SNIS, mostram que em todos os *clusters* houve uma redução da demanda entre os anos de 2010 e 2020. Nobre et al. (2016) destacaram que a seca severa observada na Região Sudeste teve início em 2011, mas entre os anos de 2013

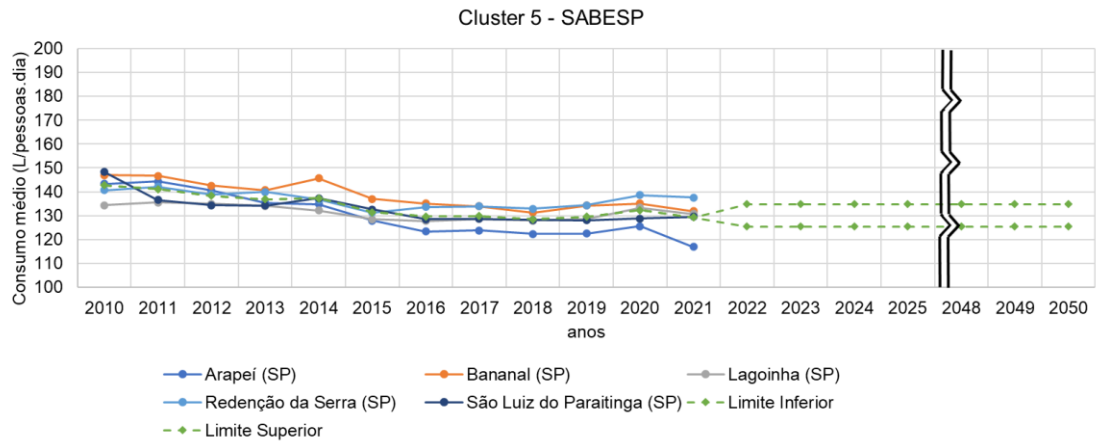
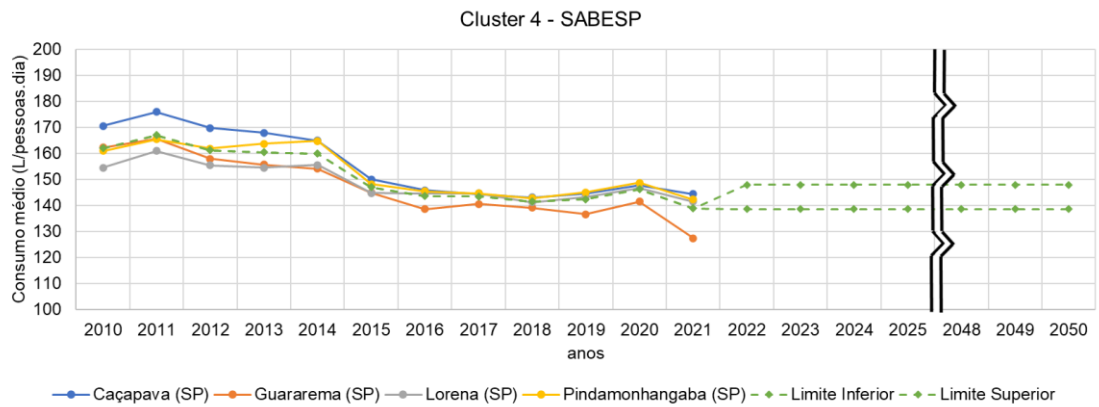
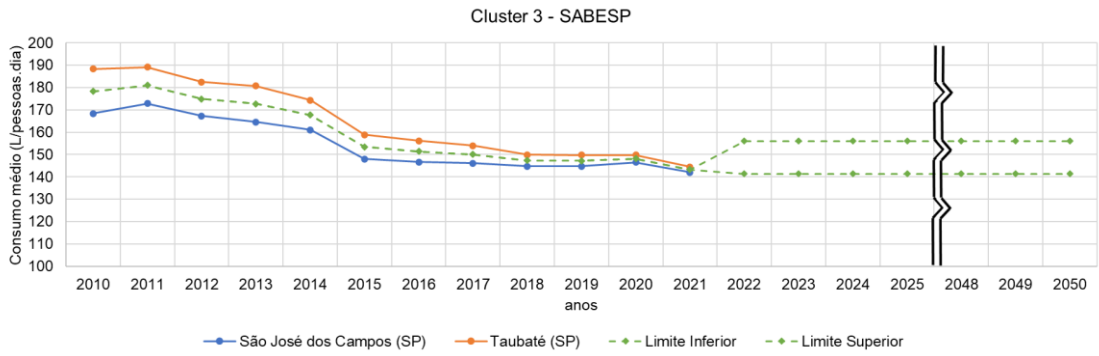
e 2014 foi observado o verão com maiores temperaturas e menores níveis de precipitação desde 1961, com valores de vazão média mensais afluentes ao sistema Cantareira inferiores aos registrados entre 1930 e 2013. Sobre a redução do consumo de água é interessante ressaltar a estabilização em níveis inferiores aos verificados no passado, o que pode revelar uma mudança de padrão de comportamento da população. Dentre as medidas adotadas durante a seca severa, a SABESP aplicou um bônus na fatura daqueles que conseguissem diminuir o consumo e cobrou uma tarifa de contingência daqueles que possuísssem demandas superiores ao valor médio de referência calculado durante a crise.

Figura 6.2 - Projeção dos consumos per capita de água.



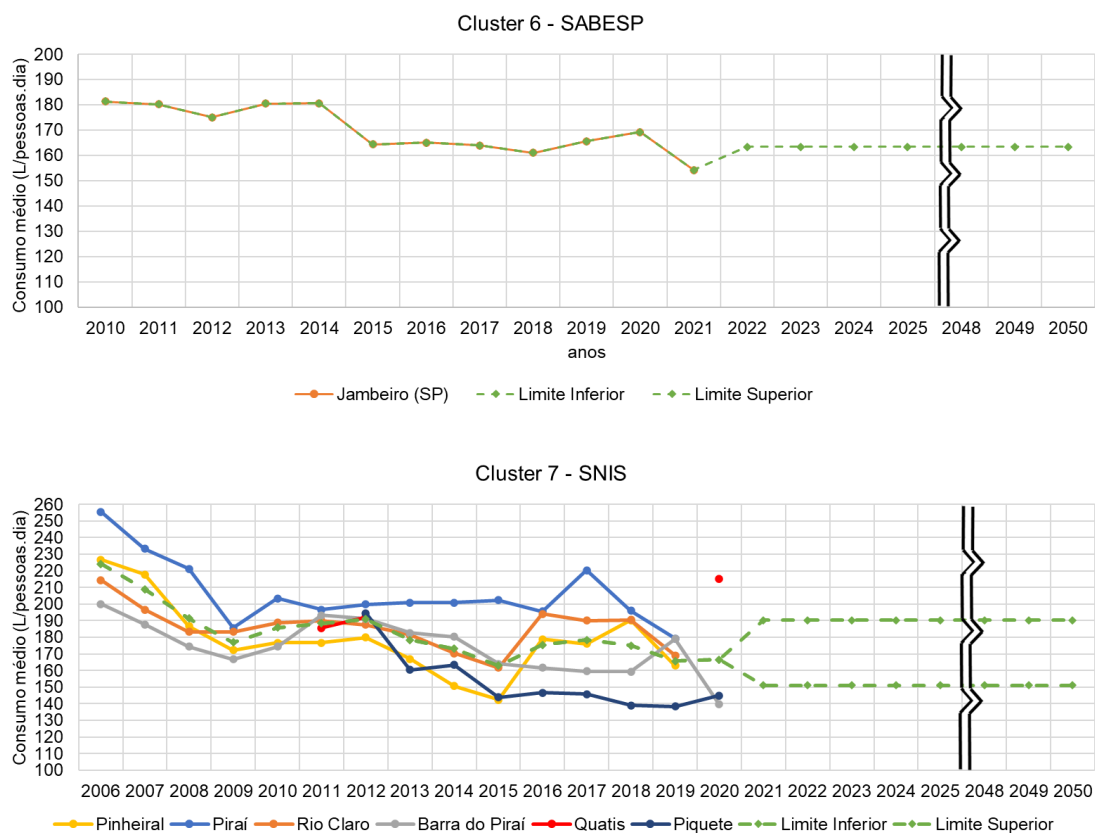
(continua)

Figura 6.2 - Continuação.



(continua)

Figura 6.2 - Conclusão.



O comportamento dos consumos per capita de energia permitiu a identificação de 5 *clusters*, apresentados na Figura 6.3 e detalhados na Tabela 6.2.



Figura 6.3 - Detalhamento dos clusters do consumo per capita de energia.

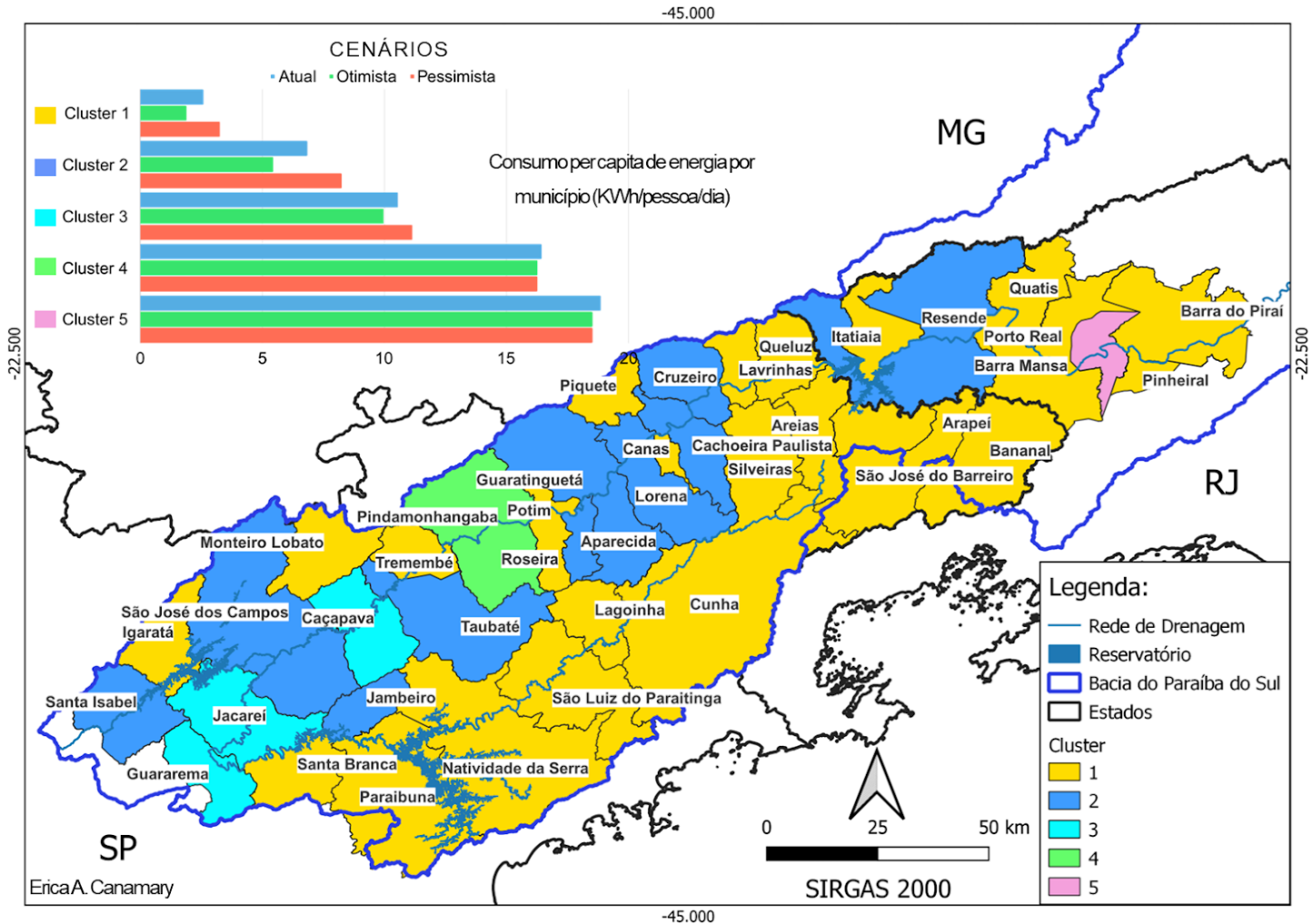


Tabela 6.2 - Consumo per capita de energia por município (KWh/pessoa/dia).

Cluster	Municípios	Atual	Otimistia	Pessimistia
1	Barra do Piráí (RJ), Igaratá (SP), Piquete (SP), São José do Barreiro (SP), Barra Mansa (RJ), Arapeí (SP), Lagoinha (SP), Potim (SP), São Luís do Paraitinga (SP), Itatiaia (SP), Areias (SP), Lavrinhas (SP), Queluz (SP), Silveiras (SP), Pinheiral (SP), Bananal (SP), Monteiro Lobato (SP), Redenção da Serra (SP), Tremembé (SP), Porto Real (SP), Canas (SP), Natividade da Serra (SP), Roseira (SP), Quatis (SP), Cunha (SP), Paraibuna (SP), Santa Branca (SP)	2,59	1,90	3,27
2	Resende (RJ), Jambuí (SP), Aparecida (SP), Lorena (SP), Cachoeira Paulista (SP), Santa Isabel (SP), Cruzeiro (SP), São José dos Campos (SP), Guaratinguetá (SP), Taubaté (SP)	6,85	5,45	8,25
3	Caçapava (SP), Guararema (SP), Jacareí (SP)	10,56	9,97	11,15
4	Pindamonhangaba (SP)	16,44	16,27	16,27
5	Volta Redonda (RJ)	18,87	18,53	18,53

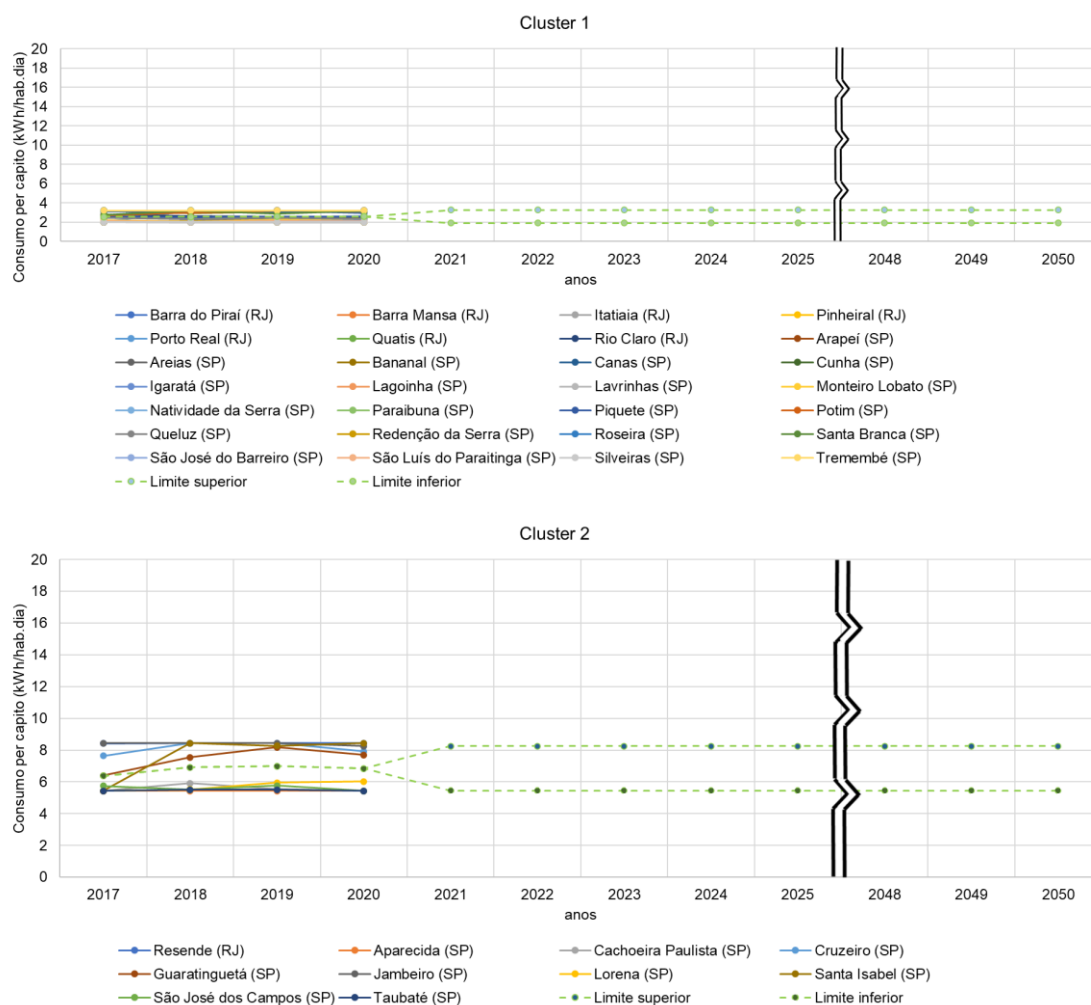
Os municípios que apresentaram os maiores valores per capita de consumo de energia atual (Tabela 6.2), Volta Redonda e Pindamonhangaba, correspondem ao quinto e ao quarto maiores VAB referente à indústria em 2019, respectivamente. Nesses municípios estão instaladas indústrias que compõem o parque produtor de aço no Brasil, a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e a Gerdau, respectivamente. Esse é o setor que representa uma significativa parcela da demanda de energia, 6,3% do consumo do país em 2021 e 18,7% da parcela da indústria (EPE, 2022b).

A maior parte dos municípios pertencentes até o *cluster 2*, com exceção de Cachoeira Paulista e Aparecida, faz parte do conjunto de 50% dos municípios com VAB mais elevado na indústria. Considerando dados referentes aos municípios do Estado de São Paulo, o setor industrial é o que demanda mais energia, mesmo que em 65% dos municípios avaliados o setor residencial tenha a maior demanda (SIMA, 2021). Nos municípios do *cluster 1* predomina esse

segundo comportamento. Enquanto no *cluster 3*, são cidades que têm uma atividade industrial significativa, com uma demanda energética preponderante sobre os demais setores, entretanto a relação dessa demanda com a magnitude da população, que varia entre as classes de 20 a 500 mil do IBGE, reduz a relevância do consumo per capita. A distribuição dos municípios nos agrupamentos, portanto, está principalmente associada à atividade econômica e à magnitude da população.

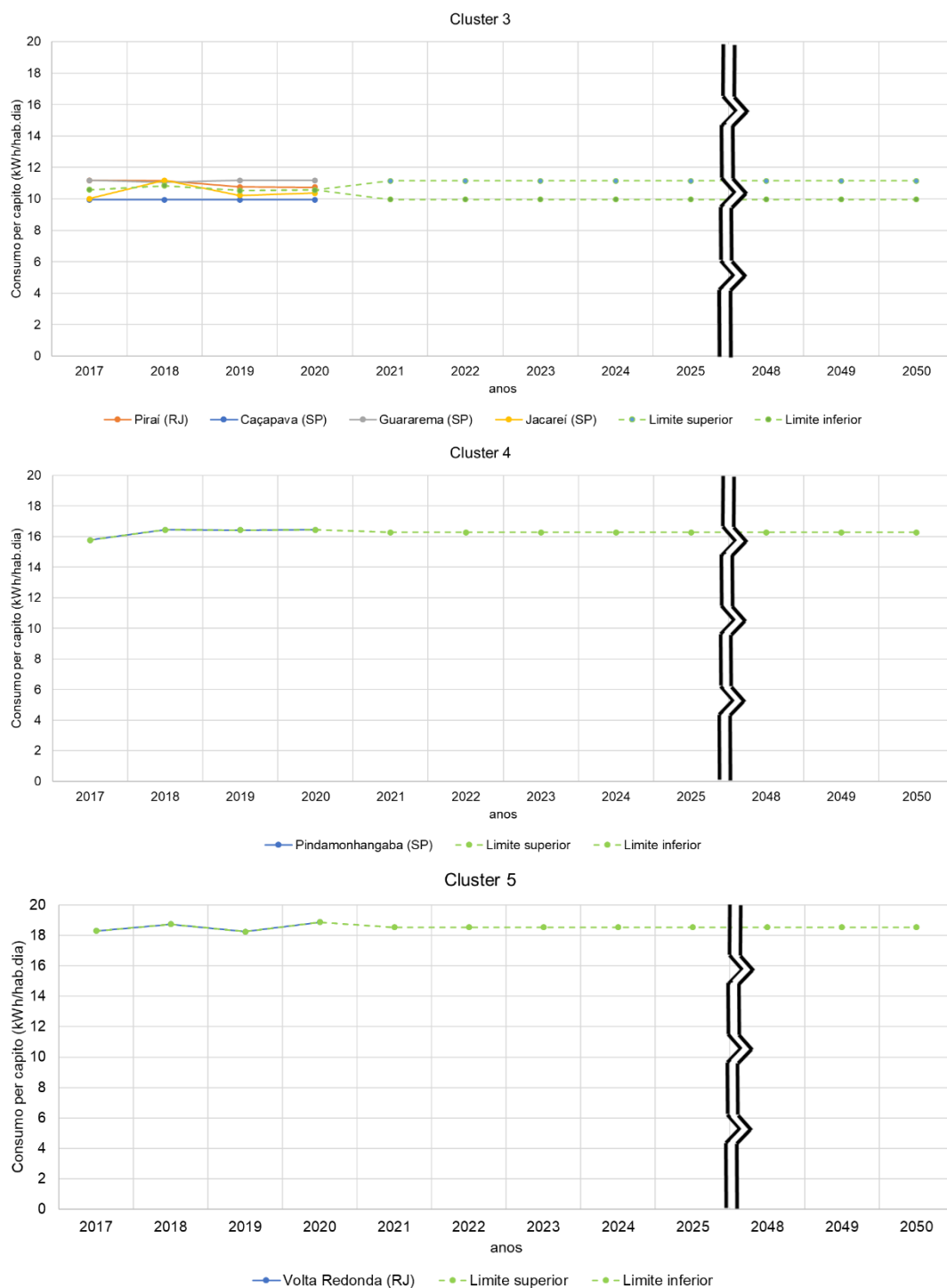
A série histórica de dados de consumo per capita de energia por município disponibilizados pela ANEEL (Figura 6.4) se estende entre os anos de 2017 e 2020. A pequena extensão da série impossibilita a identificação de mudanças de padrões de comportamento ao longo do tempo.

Figura 6.4 - Projeção dos consumos per capita de energia.



(continua)

Figura 6.4 - Conclusão.



## 6.2 Conexões entre segurança hídrica, energética e alimentar

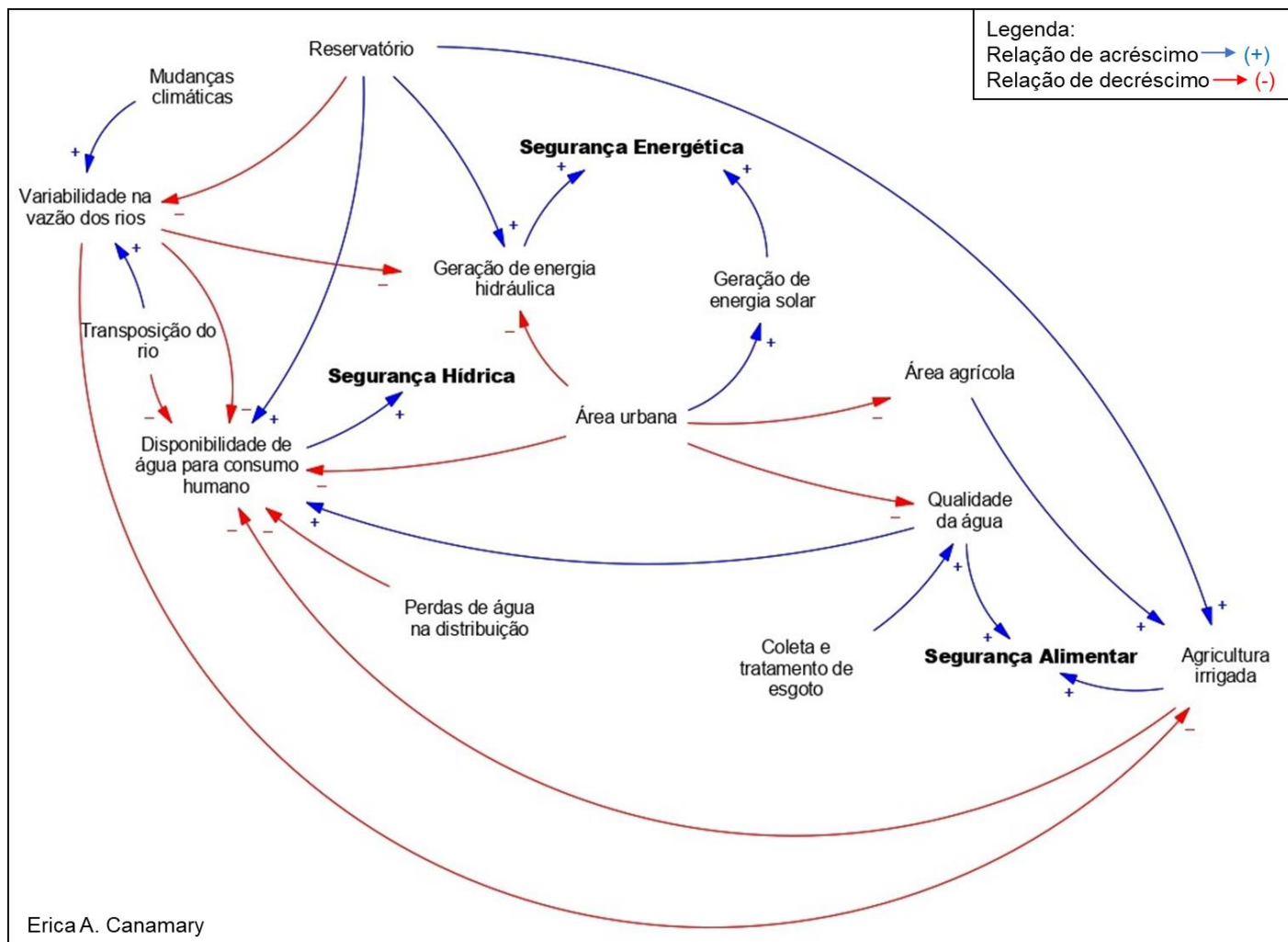
A análise combinada dos resultados dos indicadores do nexos propostos foi realizada a partir da elaboração de um diagrama de loop causal (Figura 6.5), que

apresenta as inter-relações entre as múltiplas variáveis consideradas na obtenção dos indicadores e seus efeitos sobre a segurança hídrica, energética e alimentar na área de estudo.

Como destacado anteriormente (Item 5.5), nesse diagrama as relações causais entre variáveis reais são representadas por setas que sinalizam a consequência da mudança de uma variável, identificadas pelo sinal de positivo (+) (efeito de acréscimo) ou de negativo (-) (efeito de decréscimo) (STERMAN, 2000).

A Figura 6.5 mostra que as condições climáticas futuras serão um importante fator para a limitação da oferta de água na área de estudo. Essa relação é verificada a partir da análise da variação da disponibilidade hídrica entre os cenários atuais e futuros que consideram diferentes trajetórias de concentrações de gases do efeito estufa (RCP 4.5 e RCP 8.5). Essa tendência está associada à maior frequência de ocorrência de eventos extremos, vazões máximas e principalmente mínimas, resultando em uma menor regularização de vazões, o que impacta negativamente na segurança hídrica, energética e alimentar.

Figura 6.5 - Diagrama Loop Causal das relações entre as variáveis que impactam na segurança hídrica energética e alimentar da bacia do Paraíba do Sul.



A redução do impacto dessa maior variabilidade hídrica pode ser possível pela presença de reservatórios na área de estudo, que permitem o armazenamento das vazões, garantindo a continuidade da oferta de água para os usos múltiplos, como consumo humano, geração de energia hidráulica e agricultura irrigada. Essa capacidade permite que essas estruturas tenham um impacto positivo na segurança hídrica, energética e alimentar da bacia.

Em contrapartida, as transposições implantadas na área de estudo atuam na redução da disponibilidade hídrica para as atividades dos municípios inseridos na bacia, impactando negativamente na segurança hídrica e prejudicando a regularização de vazões na bacia.

De forma similar, a ampliação das áreas urbanas dos municípios é acompanhada por um acréscimo da densidade populacional, que aumenta a demanda por recursos, com a consequente redução da disponibilidade hídrica para os múltiplos usos, como abastecimento humano e geração de energia. O crescimento das áreas urbanas também pressiona as áreas agrícolas à medida que a ocupação agrícola é substituída por áreas urbanas.

Outro fator que também diminui a oferta hídrica são as perdas de água ao longo da rede de distribuição, devido à existência de vazamentos associados a pressões elevadas, desgaste da tubulação, dentre outros processos. Na área de estudo, em média, 43% da água captada é perdida na rede de distribuição, o que aumenta significativamente a quantidade de água disponível para atender aos usos na bacia.

A manutenção da qualidade da água também é fundamental para promoção da segurança hídrica. Na área de estudo, o esgoto produzido por cerca de 31% da população, que em grande parte vive nas áreas urbanas, é lançado sem o devido tratamento no meio, o que deteriora os padrões de qualidade da água e intensifica a limitação da disponibilidade deste recurso. Essa relação destaca a urgência da universalização do acesso à coleta e tratamento de esgoto.

Quanto à segurança alimentar, as variações na área agrícola precisam estar associadas à garantia da qualidade e da quantidade da água ofertada para a produção de alimentos. Assim, variações nas áreas destinadas à essa atividade

têm uma relevante influência na demanda por água para irrigação. Destaca-se, entretanto, que a agricultura, apesar da demanda significativa por água, não teve um impacto relevante na disponibilidade hídrica da área de estudo, sendo observada uma tendência de redução da área plantada ao longo dos anos.

Por fim, a projeção de uma maior incidência de valores extremos de vazão no futuro, resulta na diminuição da capacidade de geração de energia hidráulica, devido a maior dificuldade de fornecimento contínuo dessa forma de energia. Assim, para garantir a segurança energética futura é fundamental a redução da dependência dessa fonte. Nesse contexto, a expansão da geração distribuída de energia fotovoltaica, observada nos últimos anos na região, pode permitir um balanceamento das variações da geração hidráulica e auxiliar na garantia da segurança energética. É interessante também destacar que como na geração distribuída a energia elétrica é produzida nas unidades de consumo, a expansão das cidades atua favoravelmente para a expansão da geração distribuída dessa fonte.

A análise dos valores históricos e futuros dos indicadores propostos para aplicação donexo, cujos resultados serão apresentados nos itens a seguir, revela maiores falhas na geração de energia hidráulica em comparação com outras atividades consideradas no estudo. Isso se deve à maior variabilidade dos valores de vazão, combinada com a elevada vazão demandada nas usinas, o que resulta em uma maior frequência de falhas na produção desse recurso, em relação ao observado no passado, mesmo nas usinas com maiores volumes de reservação.

### **6.3 Variações da disponibilidade dos recursos na bacia**

A análise das variações da disponibilidade dos recursos futuros foi inicialmente realizada a partir da comparação entre as vazões médias afluentes às sub-bacias (Figura 6.6) e a energia média produzida pelas usinas hidrelétricas (Figura 6.7).

De forma geral, para cada período, é perceptível a variação entre as vazões dos cenários climáticos futuros de emissões, RCP 4.5 e 8.5. Quanto aos cenários

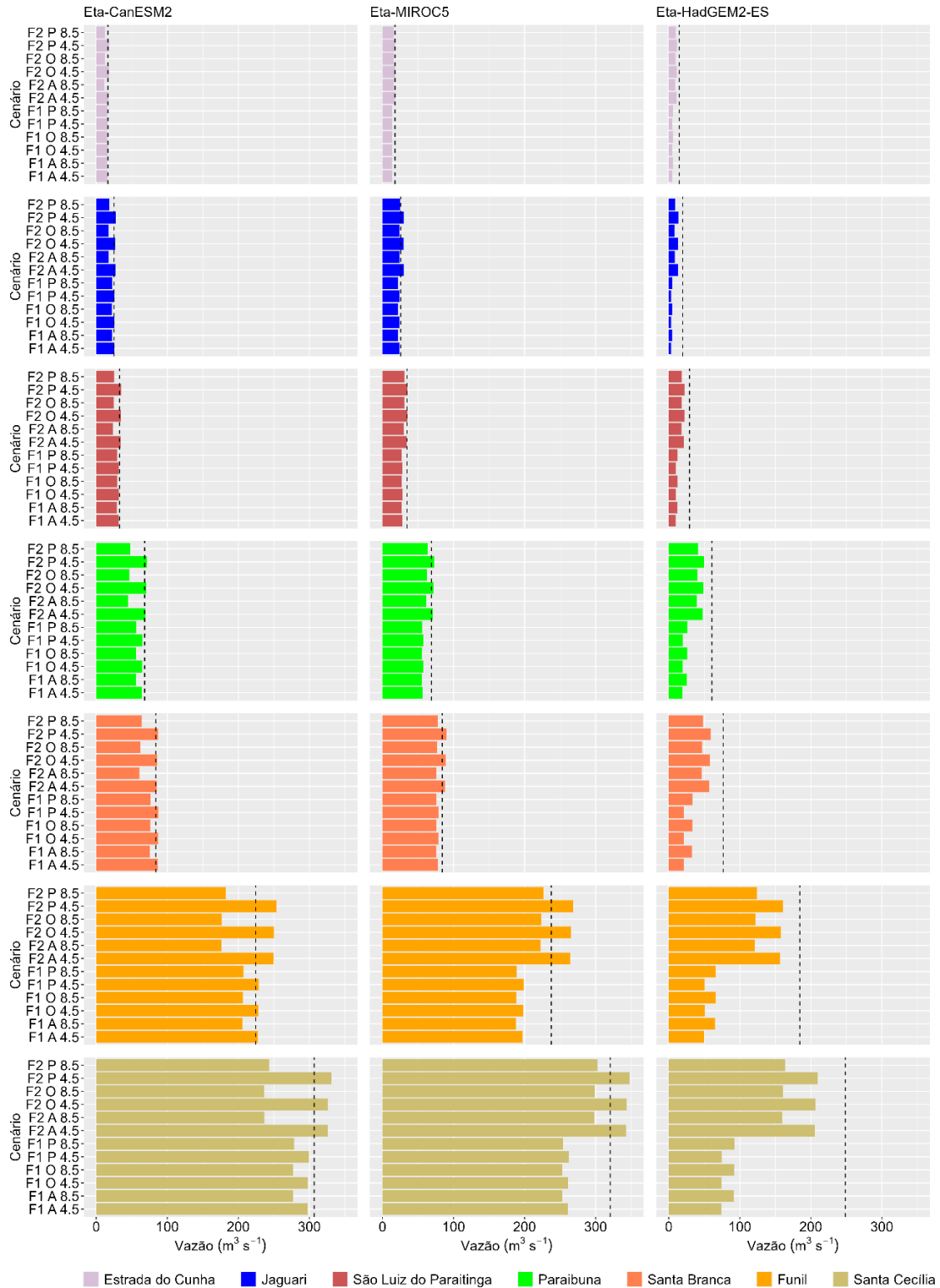


que refletem mudanças nas pressões exercidas pelas atividades humanas, nas formas de uso e ocupação do solo e na gestão dos recursos hídricos (cenários atual, otimista e pessimista), as alterações são quase imperceptíveis.

Ao comparar os cenários históricos com os futuros do modelo Eta-CamESM2, foi observada uma maior diferença entre as vazões do cenário RCP 8.5, de maiores emissões, em relação ao RCP 4.5 durante o segundo período (2036 a 2055). As vazões futuras são semelhantes ou inferiores às verificadas no período histórico, com exceção das bacias com maiores vazões, Funil e Santa Cecília, no segundo período, para o cenário RCP 4.5. Esse comportamento ocorre de forma semelhante no modelo Eta-MIROC5, sendo a principal diferença a menor discrepância entre as vazões futuras dos cenários de diferentes emissões, além da maior diferença entre as vazões futuras e históricas do primeiro período (2016 a 2035).

Para o modelo Eta-HadGEM2-ES é evidente a redução das vazões simuladas para todos os cenários quanto ao histórico, sendo maior essa diferença durante o primeiro período (2016 a 2035). Existe ainda um comportamento inverso aos demais modelos, com um acréscimo dos fluxos associados ao cenário RCP 8.5 em relação ao RCP 4.5 durante o primeiro período (2016 a 2035). Apesar desse comportamento discrepante em relação aos demais modelos, Paiva et al. (2024) destacam que, mesmo os três modelos representando satisfatoriamente as vazões médias, o Eta-HadGEM2-ES é o que melhor representa as vazões médias e mínimas.

Figura 6.6 - Vazões futuras afluentes às sub-bacias simuladas para múltiplos cenários de UOS (A - atual, O - otimista e P - pessimista); para cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5 e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). A linha pontilhada corresponde ao período histórico (1990 - 2015).



A tendência de menor disponibilidade hídrica verificada nas simulações do modelo Eta-HadGem2-ES também foi destacada por Avila-Diaz et al. (2020), cujo estudo indicou que apesar dos resultados das simulações apresentarem uma significativa tendência de redução da precipitação anual e sazonal em relação aos valores observados entre 1980 e 2005 no Brasil, esse modelo representa com mais qualidade as variações e as tendências dos eventos climáticos extremos no País, quando comparado ao Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2. Similarmente, para o mesmo intervalo de anos, Almagro et al. (2020) verificaram que, apesar da subestimação da precipitação média mensal do período chuvoso dos seis biomas brasileiros, esse modelo simula satisfatoriamente a estação seca.

Outras pesquisas também mostram mudanças no padrão de comportamento das vazões da BPS. Dados de precipitação observada, entre 1938 e 2011, mostram uma redução do total precipitado na área de estudo (SENNA et al., 2023). Decréscimos na magnitude da precipitação na BPS se intensificam em áreas com maiores aglomerações humanas, como mostra Oliveira et al. (2023) ao verificarem correspondência entre o posicionamento de centros urbanos, que ocorrem principalmente ao longo do rio Paraíba do Sul, e dos pontos com tendência de redução da vazão na BPS, segundo dados observados entre 1939 e 2020.

Em relação ao uso e ocupação do solo, a região estudada já passou por mudanças intensas ao longo da história. Carriello et al. (2016) relata que desde 1500, com a chegada dos Portugueses, o bioma natural da região foi modificado. Esse processo foi se consolidando ao longo dos anos, refletindo em menores variações das populações urbanas e rurais, além de reduzir o percentual de crescimento da população urbana na BPS de 49,4% entre os censos de 1970 e 1980, para 14,9% entre 2000 e 2010.

Outra característica da região cuja variação atualmente é limitada são os níveis de acesso aos serviços de abastecimento de água (98,3%), coleta de esgoto (95,5%) e energia elétrica (99,8%). As elevadas taxas atuais fazem com que a

universalização, proposta no cenário otimista, não represente um impacto significativo na demanda por água.

O presente estudo considerou os dados do censo de 2010, que estavam disponíveis durante a realização da pesquisa, entretanto o novo censo do IBGE (2023) revelou um declínio populacional nos grandes centros urbanos e uma migração gradual para municípios menos populosos. Esta tendência pode colocar desafios adicionais em termos de gestão da água para os municípios com menor capacidade financeira, mas também pode diminuir a pressão sobre os recursos hídricos ao reduzir a demanda em áreas densamente povoadas. Assim, a implementação de novas políticas urbanas pode certamente proporcionar oportunidades para mudanças na migração rural para urbana e no desenvolvimento econômico do país.

As variações na magnitude das vazões impactam a capacidade de produção de energia nas principais hidrelétricas da região estudada. A Figura 6.7 mostra uma redução da energia hidrelétrica gerada, em relação ao período histórico, quando se admite um futuro de emissões mais elevadas, RCP 8.5, em todos os modelos. Em relação ao RCP 4.5, para os modelos Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5 são verificadas similaridades ou acréscimos da energia, em relação ao passado, com exceção da simulação do segundo modelo, referente ao reservatório do Funil, no cenário F1 (2016 - 2035), onde a redução da energia gerada é mais acentuada.

A maior variação da energia gerada entre os cenários de emissões, RCP 4.5. e RCP 8.5, simulados para o segundo período está relacionada às maiores diferenças entre as vazões, como mostram as curvas de permanência das vazões afluentes (Figura 6.8 a 6.10). Esses gráficos também mostram um aumento significativo, principalmente para os reservatórios com os menores volumes úteis, das vazões mínimas, o que mostra a importância dos reservatórios para reduzir a variabilidade e garantir a disponibilidade de água ao longo do tempo.

Figura 6.7 - Energia média gerada nas usinas hidrelétricas para múltiplos cenários de UOS (A - atual, O - otimista e P - pessimista); para cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5 e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). A linha pontilhada corresponde ao período histórico (1990 - 2015).

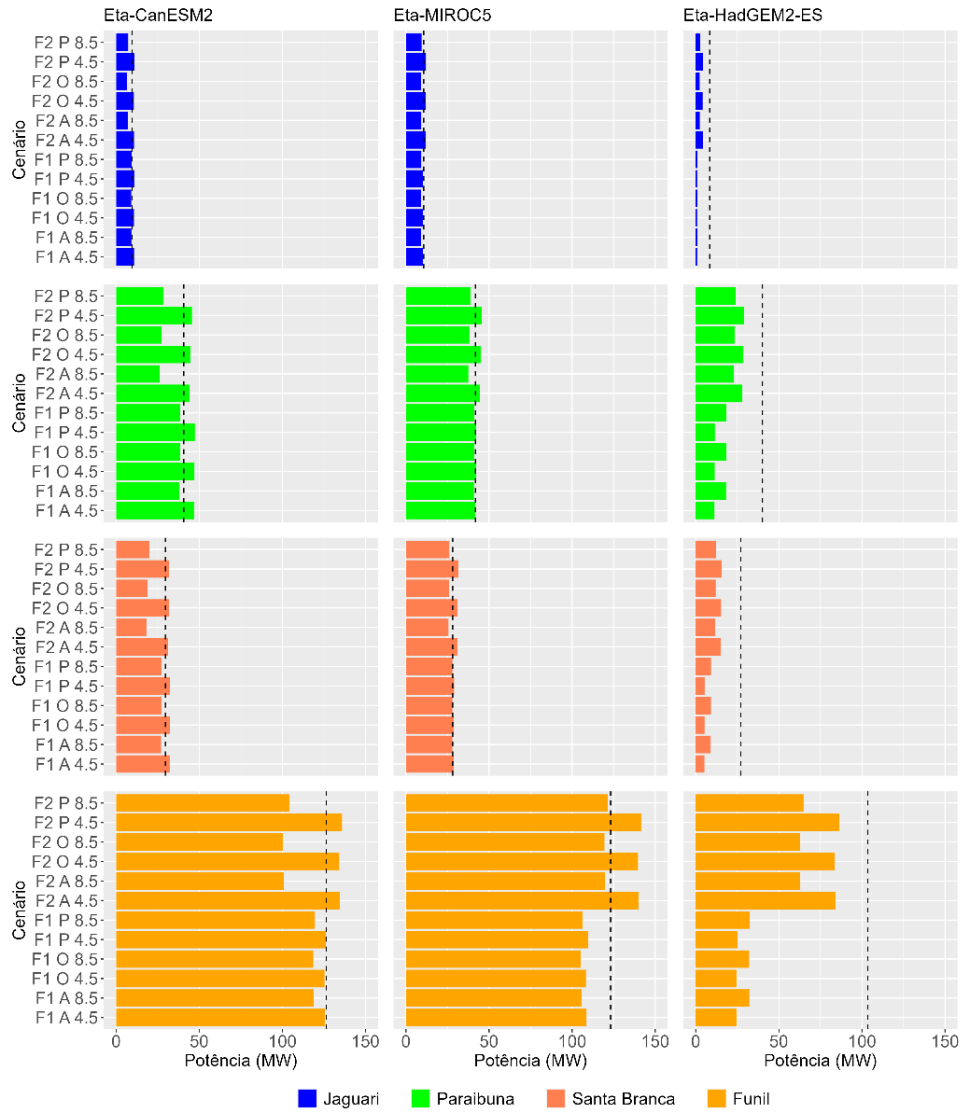


Figura 6.8 - Curva de permanência do reservatório do Jaguari, para os períodos histórico e futuros dos cenários de UOS (A - atual, O - otimista e P - pessimista); para cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5 e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). As linhas pontilhadas correspondem aos limites operacionais do reservatório.

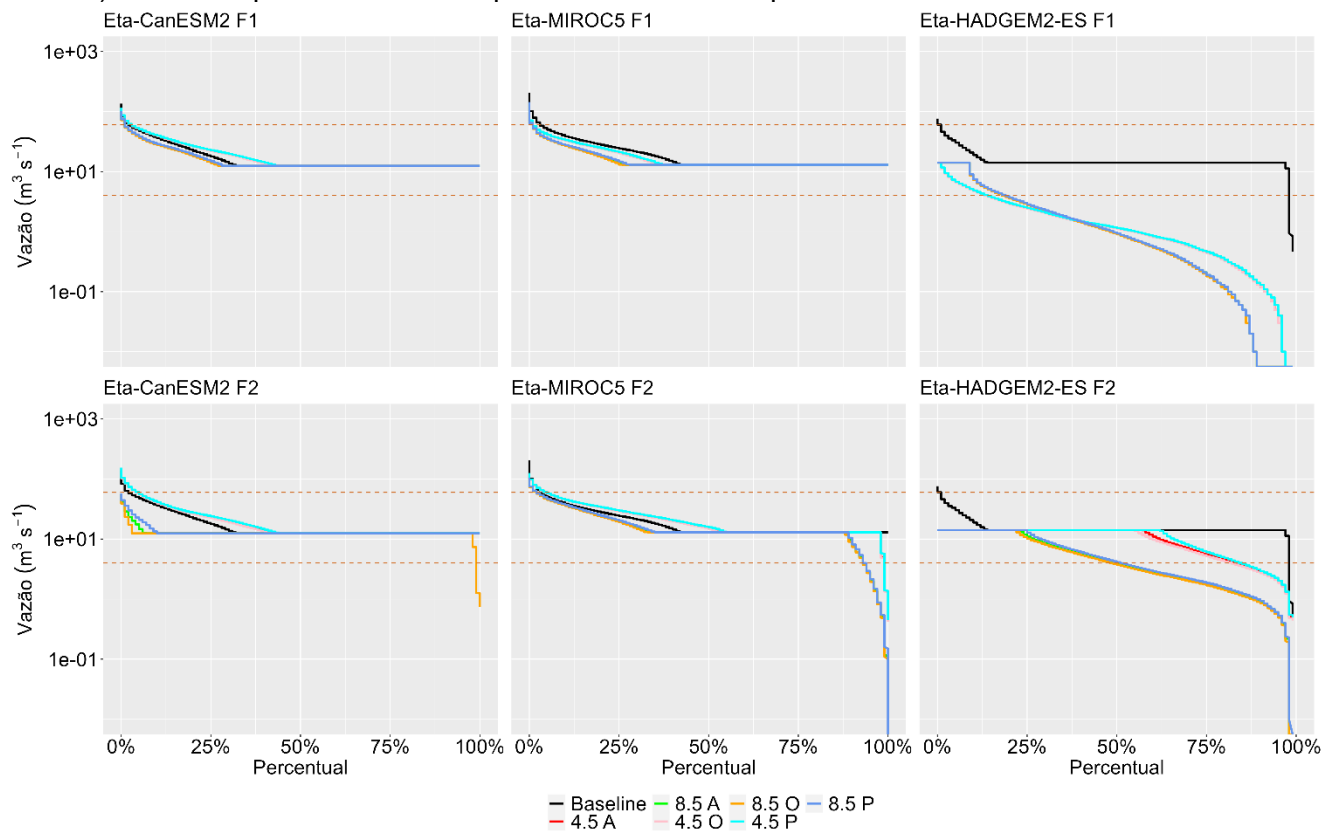


Figura 6.9 - Curva de permanência do reservatório do Paraibuna, para os períodos histórico e futuros dos cenários de UOS (A - atual, O - otimista e P - pessimista); para cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5 e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). As linhas pontilhadas correspondem aos limites operacionais do reservatório.

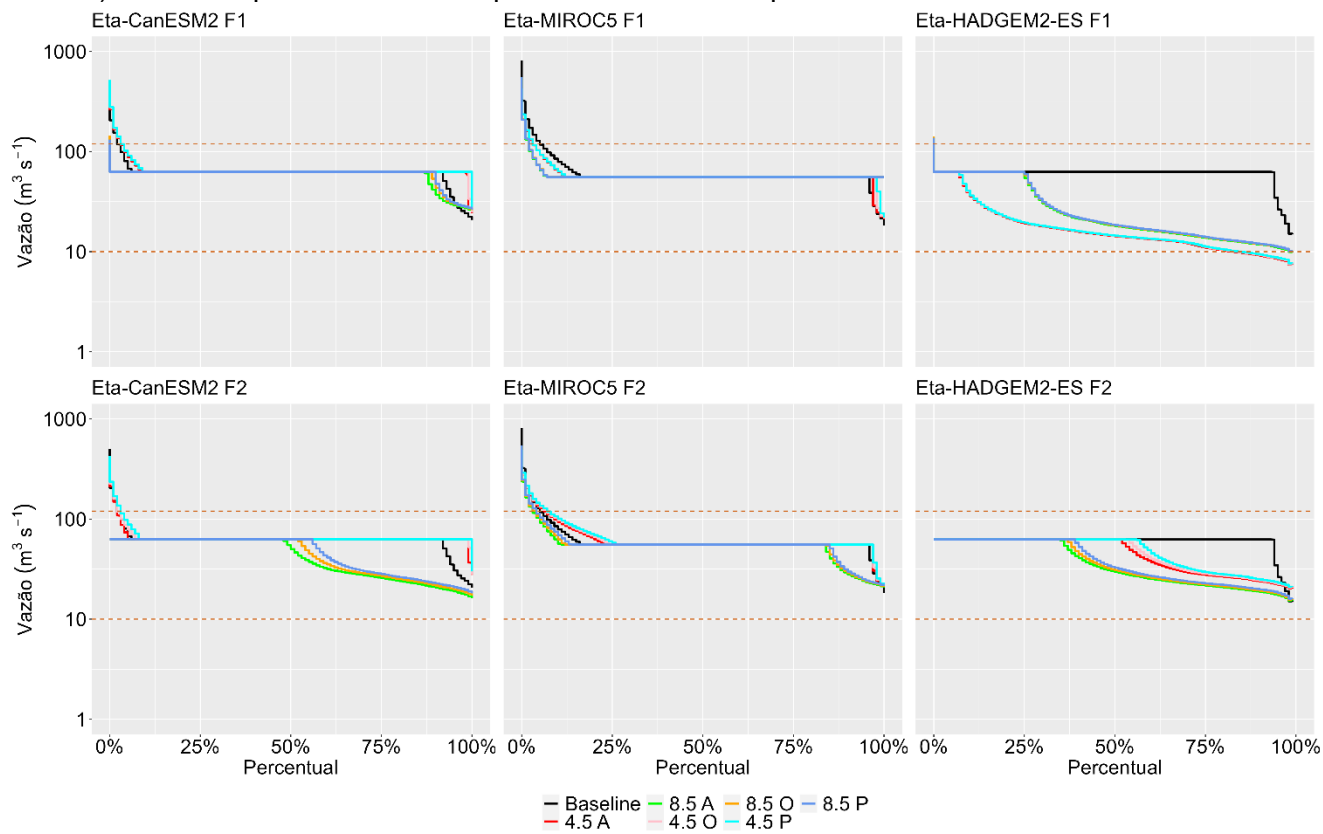


Figura 6.10 - Curva de permanência do reservatório de Santa Branca, para os períodos histórico e futuros dos cenários de UOS (A - atual, O - otimista e P - pessimista); para cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5 e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). As linhas pontilhadas correspondem aos limites operacionais do reservatório.

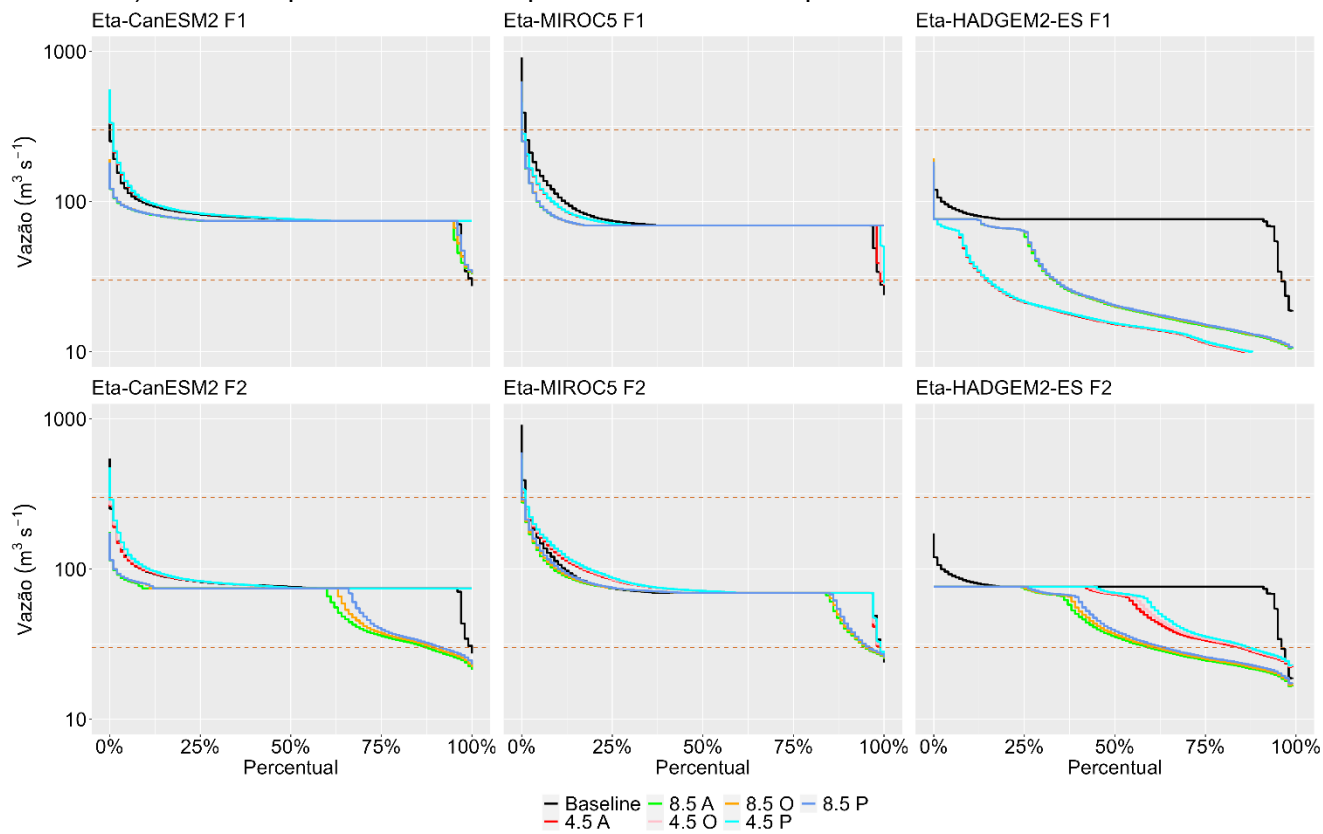
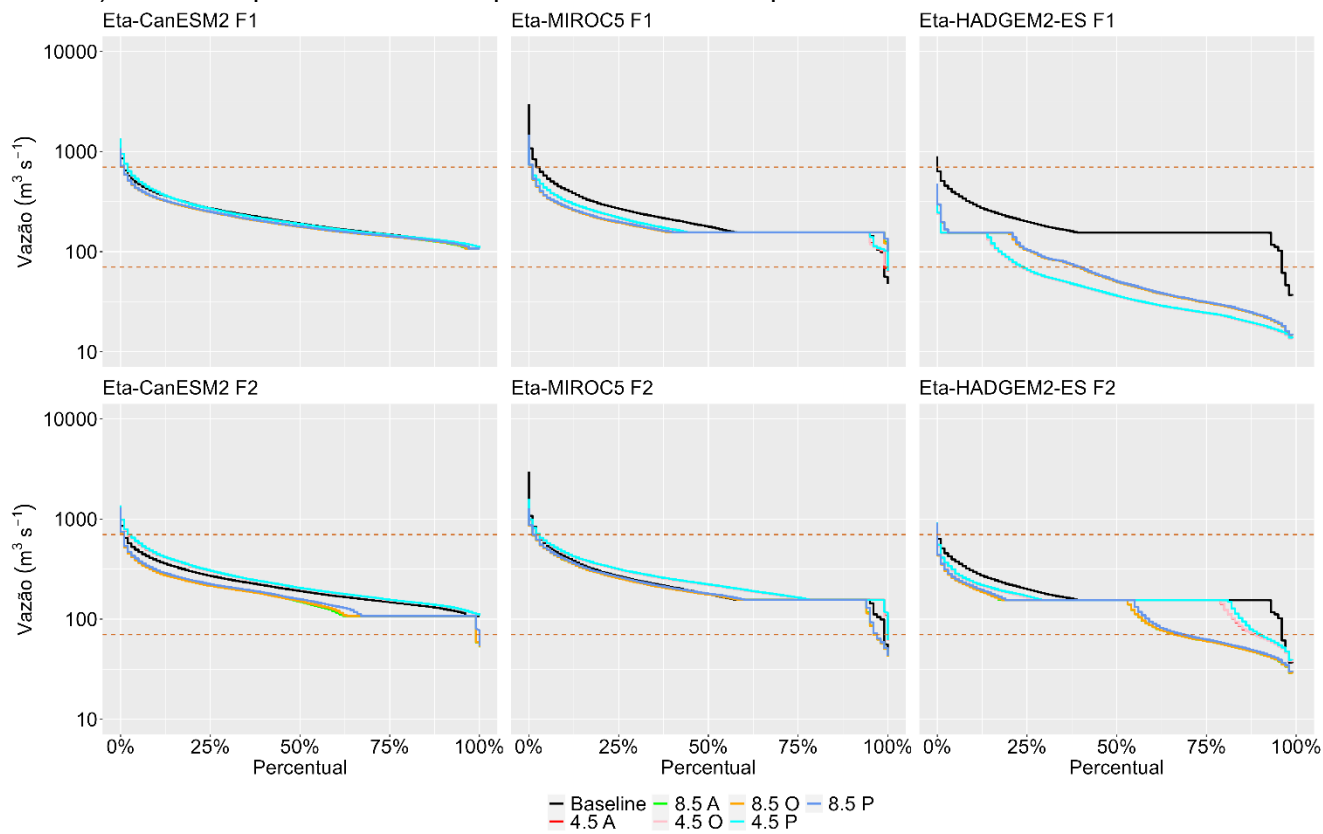


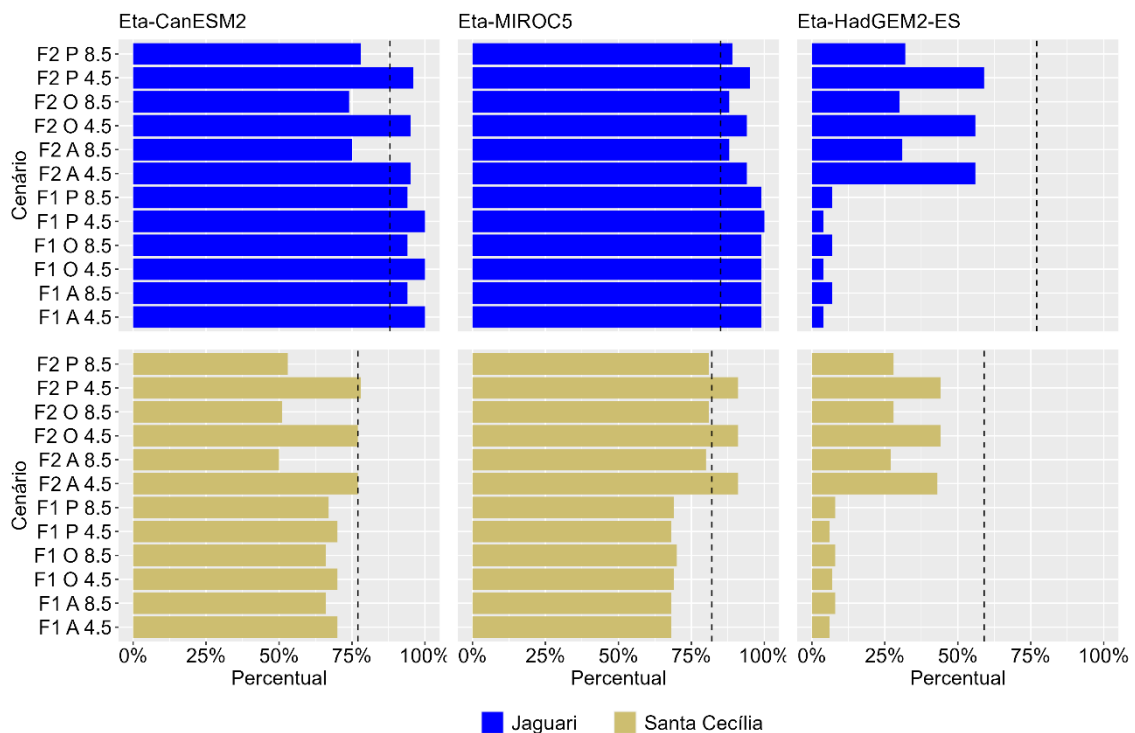


Figura 6.11 - Curva de permanência do reservatório do Funil, para os períodos histórico e futuros dos cenários de UOS (A - atual, O - otimista e P - pessimista); para cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5 e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). As linhas pontilhadas correspondem aos limites operacionais do reservatório.



As variações na disponibilidade hídrica podem gerar problemas para a garantia do abastecimento de regiões situadas tanto internamente quanto externamente à bacia, pois parte da água da área de estudo é desviada para outras regiões. Nesta tese foi priorizado o atendimento da demanda dos municípios localizados dentro das fronteiras da bacia. Portanto, para verificar a capacidade da infraestrutura hídrica da região de satisfazer a demanda das transposições, foram quantificados os percentuais de tempo em que as vazões mínimas afluentes aos reservatórios de Jaguari e Santa Cecília são atendidas (Figura 6.12). Esses valores correspondem aos fluxos de 190 m<sup>3</sup>/s e 9,13 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, e foram obtidos somando as vazões das transposições fixadas na legislação vigente e os mínimos defluentes dos reservatórios.

Figura 6.12 - Percentual de atendimento à vazão mínima afluente ao reservatório de Jaguari, 9,13 m<sup>3</sup>/s, e Santa Cecília, 190 m<sup>3</sup>/s, para diferentes cenários de uso e ocupação do solo (Otimista - O, Pessimista - P e Atual - A); para os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5; e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). A linha vertical tracejada corresponde aos valores de referência (1990 - 2015).



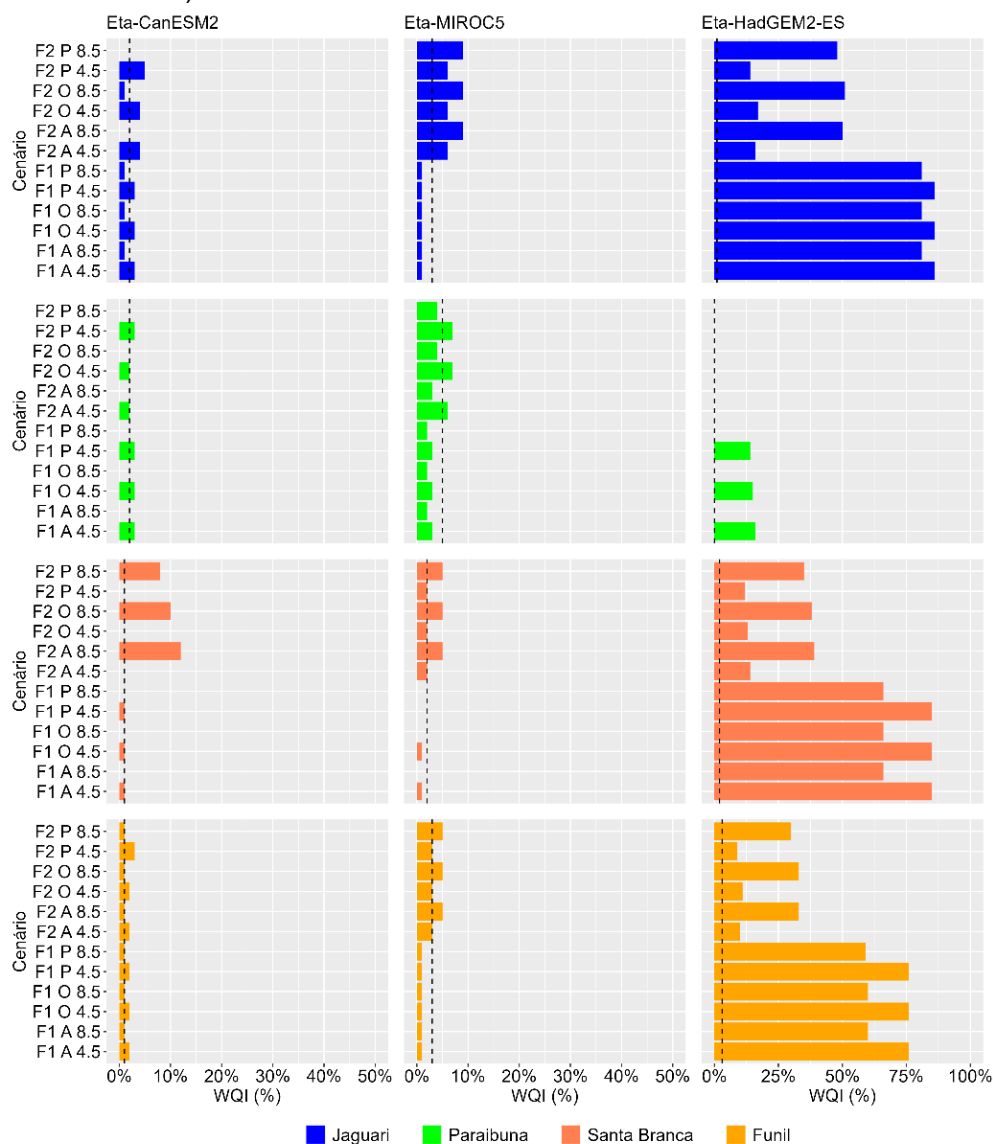
Para o reservatório de Santa Cecília prevalece a redução ou estabilização da capacidade de atendimento da vazão afluyente mínima, com exceção das simulações para o cenário RCP 4.5 do modelo Eta-MIROC5, no segundo período (2036 - 2055). No Jaguari, essa redução dos percentuais de alcance dos valores operacionais é observada apenas no RCP 8.5 para o segundo período do modelo Eta-CamESM2 e em todas as situações analisadas no modelo Eta-HadGEM2-ES. Nos dois reservatórios, as maiores variações entre os cenários ocorrem no segundo período, sendo as principais diferenças para o período histórico associadas às maiores concentrações de gases do efeito estufa, RCP 8.5. Essas variações da capacidade de atendimento das transposições mostram a sensibilidade do sistema de abastecimento da área estudada em relação às mudanças climáticas. Para o modelo Eta-HadGEM2-ES, os percentuais de tempo em que será possível atender, no primeiro período (2016 - 2035), por exemplo, as vazões mínimas afluentes necessárias para realização das transposições são inferiores a 12%.

## **6.4 Indicadores nexos**

### **6.4.1 Segurança hídrica**

Para garantir a segurança hídrica da BPS é fundamental a realização do controle dos reservatórios em observância às regras de operação, minimizando os impactos em situações de escassez e de cheias, além da manutenção do ecossistema aquático e da capacidade de diluição dos poluentes lançados nos rios. Nesse sentido, a análise do percentual de tempo em que a vazão defluente dos reservatórios está acima ou abaixo dos limites (Tabela 5.2) máximos e mínimos, respectivamente, estabelecidos pela legislação vigente (Figura 6.13) mostra que, para o modelo climático Eta-CamESM2, ocorre um leve crescimento ou estabilidade em relação aos níveis históricos nos cenários de menores emissões (RCP 4.5). Para os cenários do RCP 8.5, esses percentuais são semelhantes ou inferiores aos observados no passado, com exceção do reservatório de Santa Branca, onde ocorreu um crescimento significativo das falhas nas simulações do RCP 8.5 no segundo período (2036 - 2055).

Figura 6.13 - Percentual do tempo em que as vazões defluentes dos reservatórios estão fora dos limites de operação nas sub-bacias da bacia do Paraíba do Sul (WQI), para diferentes cenários de uso e ocupação do solo (Otimista - O, Pessimista - P e Atual - A); para os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5; e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). A linha vertical tracejada corresponde aos valores de referência (1990 - 2015).



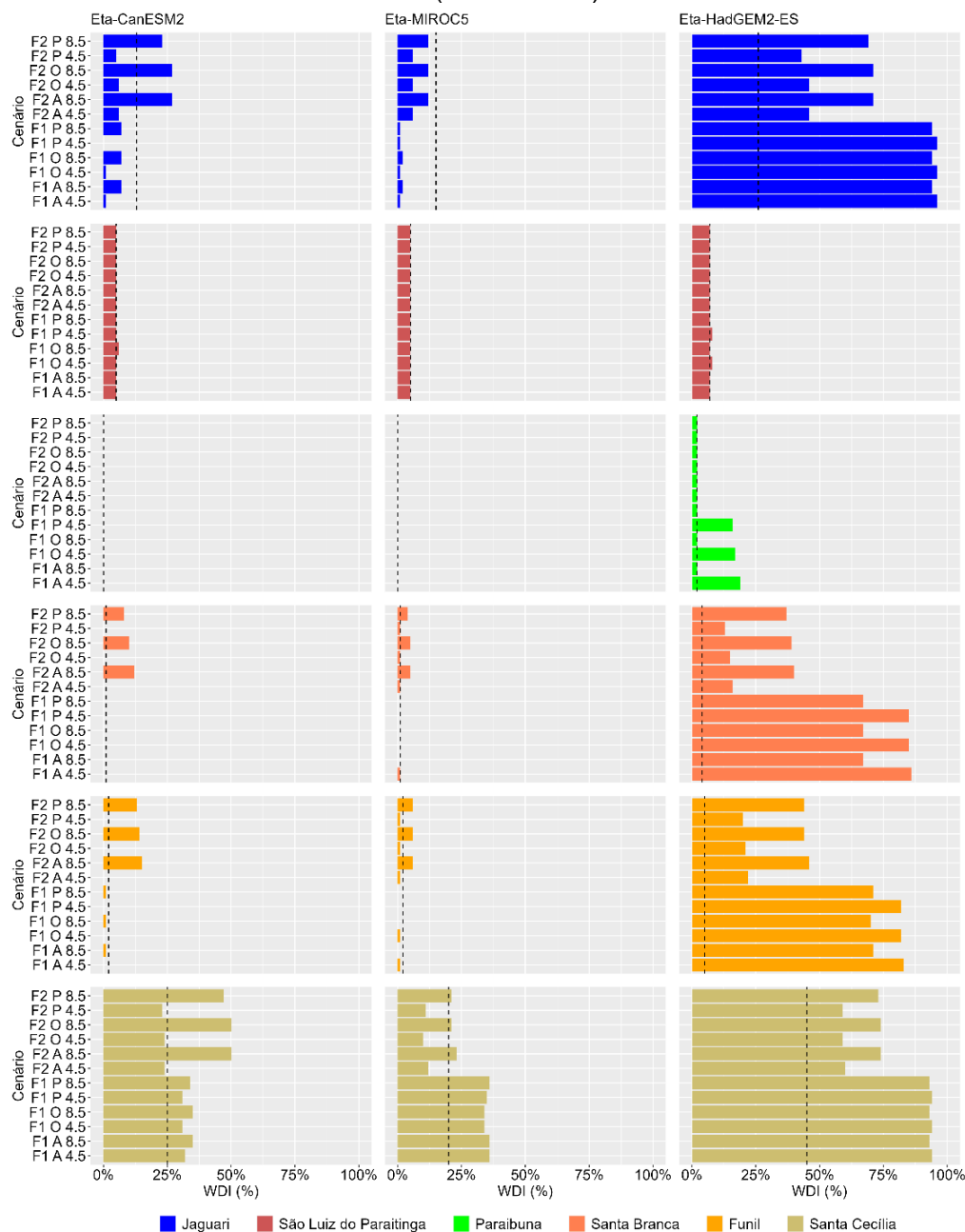
As curvas de permanência das vazões afluentes aos reservatórios (Figura 6.8 a Figura 6.11) mostram um ligeiro aumento das vazões máximas das simulações desse modelo no RCP 4.5. Entretanto, no RCP 8.5, as magnitudes das vazões reduzem principalmente no segundo período, sendo esse comportamento principalmente perceptível no reservatório de Santa Branca.

Para o modelo climático Eta-MIROC5, a proximidade ou excedência dos valores futuros do percentual de tempo em que as vazões defluentes dos reservatórios não são alcançadas, frente aos históricos, é visualizada apenas durante o segundo período (2036 - 2055). Nesse momento os percentuais relativos ao cenário RCP 8.5 também ultrapassam os valores históricos, com exceção do reservatório de Paraibuna.

Por fim, no modelo Eta-HadGEM2-ES, apenas no reservatório de Paraibuna, os percentuais não ultrapassam os valores do período histórico em alguns cenários, o que pode ser justificado pelo maior volume disponível para realizar a regularização das vazões.

A comparação entre a demanda e a disponibilidade de água (Figura 6.14) mostra que para os modelos climáticos Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5, nos cenários do RCP 8.5, é verificado um aumento das falhas no abastecimento da população e do ecossistema, apenas durante o segundo período (2036 - 2055), com exceção do reservatório de Santa Cecília, onde uma significativa parcela da vazão é destinada a bacia do Guandu.

Figura 6.14 - Percentual do tempo em que a demanda é superior à oferta de água nas sub-bacias da bacia do Paraíba do Sul (WDI), para diferentes cenários de uso e ocupação do solo (Otimista - O, Pessimista - P e Atual - A); para os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5; e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). A linha vertical tracejada corresponde aos valores de referência (1990 - 2015).



Para o segundo período, comparando esses dois modelos, os percentuais de vazão defluente dos reservatórios fora dos limites de operação (Figura 6.13) no Eta-MIROC5 são ligeiramente superiores aos do Eta-CanESM2, com exceção do reservatório de Santa Branca. Entretanto, as situações de falha no

atendimento das demandas (Figura 6.14) ocorrem com maior frequência no modelo Eta-CanESM2. Essa divergência pode ser justificada pela ocorrência, dentro dos limites de operação, de uma maior redução da magnitude das vazões projetadas pelo modelo Eta-CanESM2, em relação ao período histórico. Existe, portanto, a necessidade de adequação das vazões defluentes à disponibilidade hídrica futura. Considerando a maior frequência e duração dos períodos secos, uma proposta para aumentar a eficiência da operação seria a elaboração de curvas-guia, em que o volume útil do reservatório é dividido em zonas, com políticas específicas (BRAVO et al., 2006). Esse maior detalhamento reduz a liberação de água dos reservatórios antes de atingir um volume abaixo do necessário para suprir os usos.

Para o modelo Eta-HadGEM2-ES é verificado um acréscimo do período de déficit no sistema hídrico na maior parte dos cenários, acompanhando o comportamento das vazões.

Como destacado anteriormente, mesmo com a redução da magnitude da demanda para abastecimento da população e da indústria, e a adoção de técnicas de irrigação mais eficientes, as mudanças significativas nos valores dos indicadores Nexo de segurança hídrica estão associadas às mudanças nas variáveis climáticas. Portanto, os efeitos do clima se sobrepõem às ações de gestão consideradas. A dominância das mudanças climáticas globais sobre a disponibilidade hídrica também foi verificada por Marques, Veras e Rodriguez (2022), que identificaram que a redução das demandas propostas, com base nas diretrizes estabelecidas em planos de recursos hídricos, não foi suficiente para garantir a sustentabilidade do abastecimento do baixo paraíba do sul, frente à variabilidade imposta pelas mudanças climáticas. De forma mais abrangente, além de considerar a influência de políticas públicas, esta tese também incorporou as projeções de mudanças de uso e ocupação do solo e de demandas para irrigação na composição dos cenários. Mesmo com essas inovações, a influência das mudanças globais continua sendo o fator dominante. A cultura do arroz, por exemplo, tem uma demanda elevada em relação aos demais usos da água. Entretanto, estudos realizados na área de estudo mostram uma tendência a retração das áreas ocupadas por essa atividade e a adaptação

da cultura às condições climáticas futuras, com o aumento do rendimento, redução da duração do ciclo da cultura e da demanda hídrica (MARTINS et al., 2023).

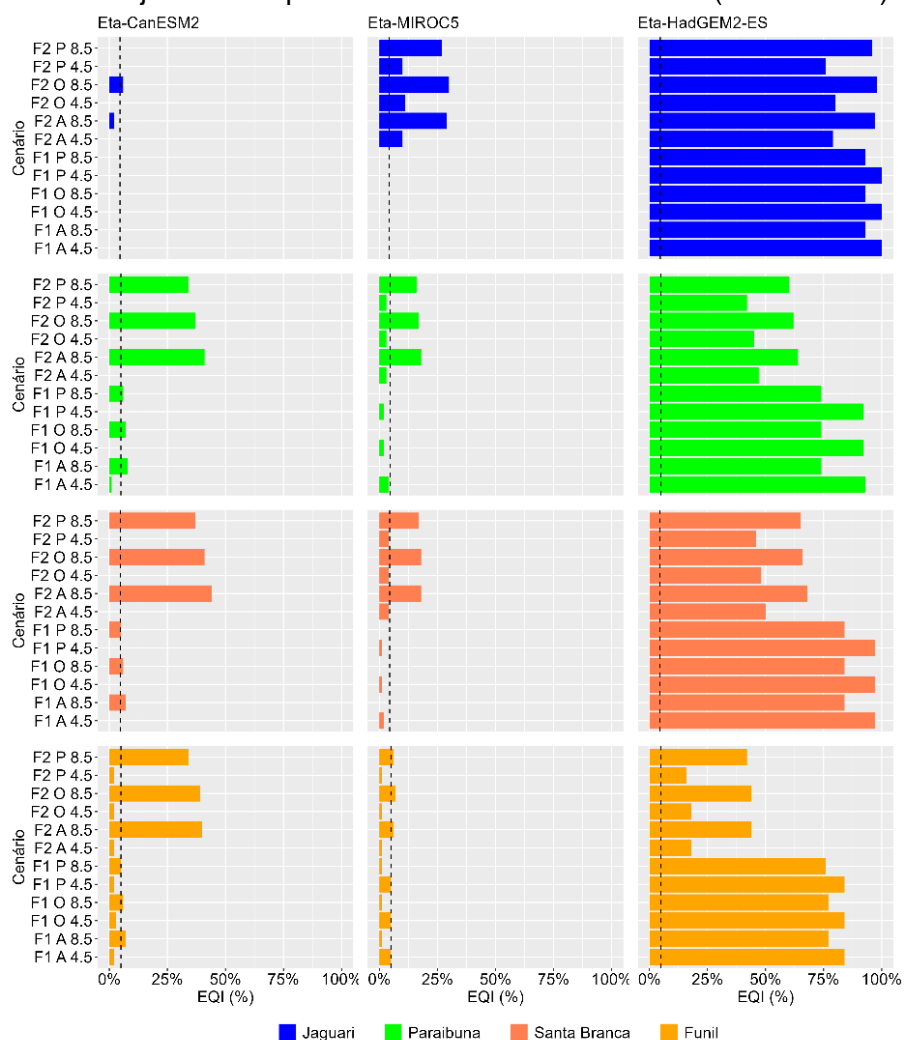
O aumento da incidência e da severidade de eventos de escassez hídrica tem desencadeado a demanda por novas fontes de abastecimento. Entre os anos de 2011 e 2019 foram observadas secas severas na maior parte das regiões do país, com recorrência de 60 anos (CUNHA et al., 2019). Entretanto, as principais respostas são ações emergenciais de assistência financeira, fornecimento emergencial de água e infraestrutura (BASTOS, 2016). Para ampliar a oferta, o PNSH propõe uma série de obras, principalmente de sistemas adutores e barragens para regularização das vazões, que muitas vezes promovem o compartilhamento entre fontes de abastecimento de diferentes bacias (ANA, 2019). Entretanto, a maior frequência e duração dos eventos de seca pode dificultar ou inviabilizar a operacionalização dessas obras.

#### **6.4.2 Segurança energética**

Nos modelos Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5, a maior ocorrência de valores mínimos de vazão, no cenário RCP 8.5 do segundo período, tem como consequência o aumento da variabilidade na geração de energia, com uma maior dificuldade de fornecimento da energia firme fixada para o período histórico (Figura 6.15). Para o modelo climático Eta-HadGEM2-ES, o aumento do percentual de tempo em que a energia firme não é maior que a observada no período histórico é verificado em todos os cenários simulados.



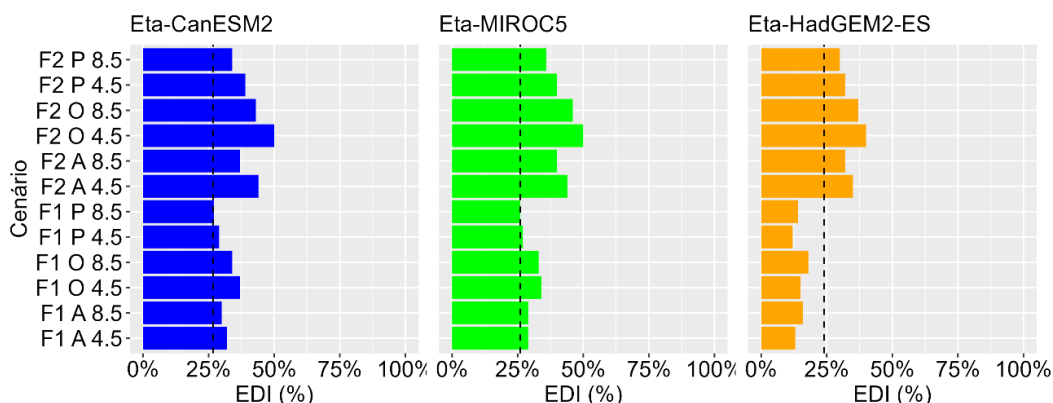
Figura 6.15 - Percentual do tempo em que a energia firme não é alcançada ou excedida nas sub-bacias da bacia do Paraíba do Sul (EQI), para diferentes cenários de uso e ocupação do solo (Otimista - O, Pessimista - P e Atual - A); para os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5; e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). A linha vertical tracejada corresponde aos valores de referência (1990 - 2015).



A comparação entre as Figura 6.13 e Figura 6.15 mostra a impossibilidade de garantir o fornecimento contínuo de energia, mesmo quando os reservatórios estão operando dentro dos limites recomendados. Essa contradição mostra que as reduções dos limites mínimos operacionais, em resposta aos impactos desencadeados por períodos de escassez hídrica, reduziram a capacidade de geração dos níveis de energia alcançados no passado, apesar da tendência de crescimento da demanda por energia.

A comparação da oferta de energia proveniente de fontes renováveis, hídrica e solar distribuída, e a demanda total das sub-bacias, permite constatar a dependência da região em relação à importação desse recurso (Figura 6.16). Mesmo com o aumento do percentual de tempo em que a energia demandada é satisfeita no segundo período (2036 - 2055), em função do crescimento da geração distribuída de energia fotovoltaica, o máximo percentual alcançado foi de 50%. Outro detalhe salientado por esse indicador é que a redução do consumo de energia, alcançada principalmente no cenário otimista, reduz a diferença entre a oferta e a demanda futuras.

Figura 6.16 - Média da razão entre o somatório da energia renovável (hidráulica e solar) e a demanda das sub-bacias da bacia do Paraíba do Sul (EDI), para diferentes cenários de uso e ocupação do solo (Otimista - O, Pessimista - P e Atual - A) para os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5; e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). A linha vertical tracejada corresponde aos valores de referência (1990 - 2015).



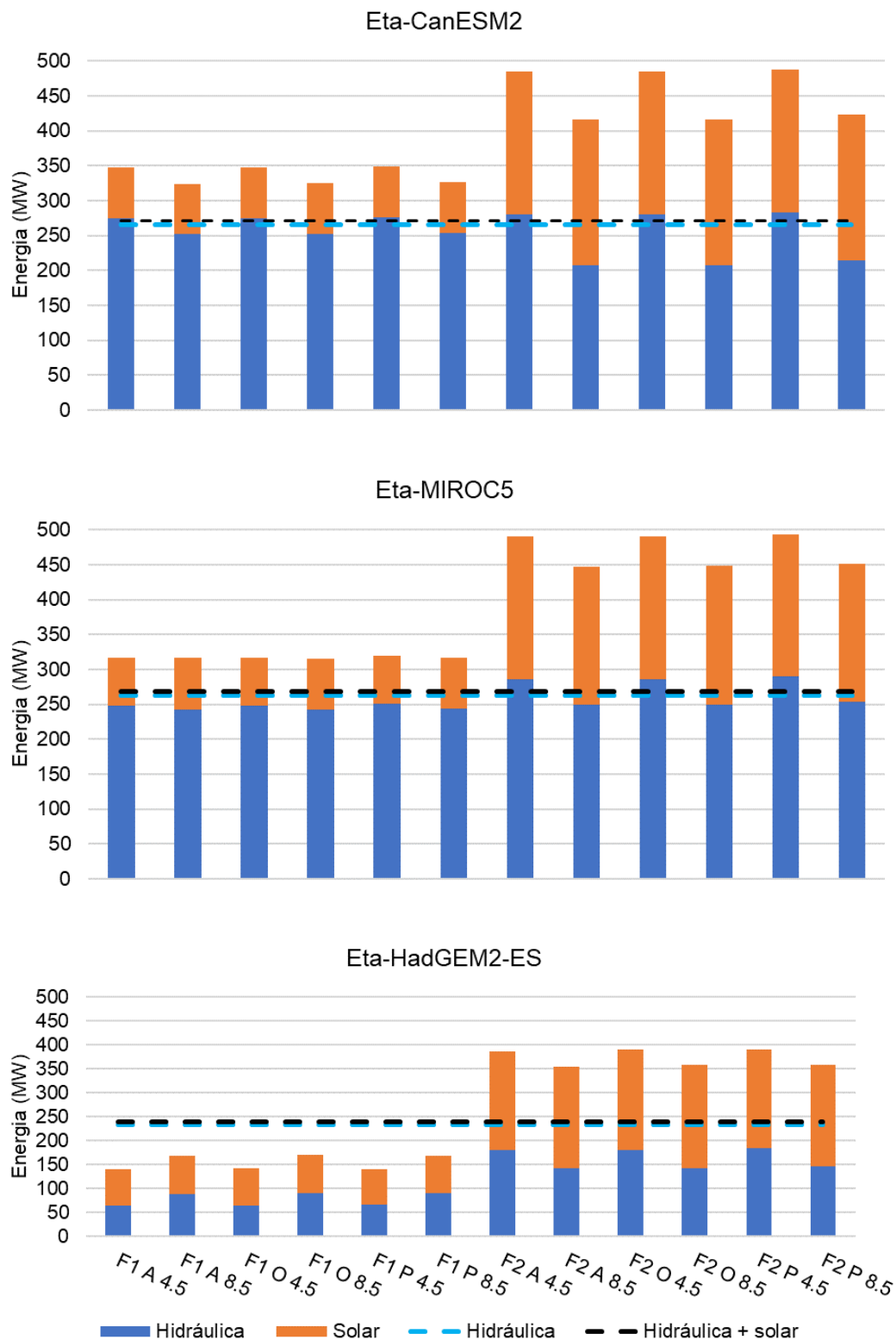
Mesmo com a existência do SIN, que torna possível a transferência de energia entre diferentes regiões do país, as sucessivas crises hídricas e o aumento da demanda têm dificultado a expansão das fontes renováveis frente aos combustíveis fósseis (PEYERL et al., 2022). Nesse contexto, a geração distribuída torna-se uma importante aliada para garantir a manutenção da segurança energética, tendo em vista a possibilidade de redução da carga demandada do sistema, além da sua expansão no país, sendo projetado que, até 2031, a soma da geração solar distribuída com a autoprodução não-injetada na rede vai atingir uma capacidade instalada mais de três vezes superior à sua geração centralizada (EPE, 2022a).

Em alguns cenários, a contabilização da geração de energia fotovoltaica permite a extrapolação da energia média gerada no período histórico (Figura 6.17). Quando se soma, a cada instante, o total de energia produzida nos empreendimentos hidráulicos (descritos na Tabela 5.1) e a geração fotovoltaica das unidades de consumo, para os modelos Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5, é verificada uma compensação da redução da capacidade de geração hidrelétrica média, em comparação ao período histórico, em todos os cenários que essa situação é verificada. Apenas no modelo Eta-HadGEM2-ES essa compensação é observada apenas no segundo período, quando as vazões e, conseqüentemente, a energia hidrelétrica produzida são maiores.

É importante destacar que devido à impossibilidade de controle da quantidade de energia gerada e para garantir o fornecimento contínuo de energia, as fontes de energia não despacháveis (como eólica e fotovoltaica) precisam ser combinadas com fontes despacháveis (como a hidráulica). Outra questão a ser considerada, atualmente, é que as projeções da EPE consideraram principalmente critérios econômicos. Entretanto, existem muitas incertezas associadas à essa expansão, como a possibilidade de redução dos custos dos equipamentos e de sobrecarga da rede de distribuição devido a inversão do fluxo.

O aumento significativo da quantidade de energia fotovoltaica produzida, comparando os períodos futuros com o histórico, deve-se à expansão da quantidade de unidades consumidoras que instalaram os painéis fotovoltaicos. Com base nas projeções da EPE haverá um crescimento de 2.927 unidades (em 2020) para 70.295 (em 2030) e 204.747 (em 2050).

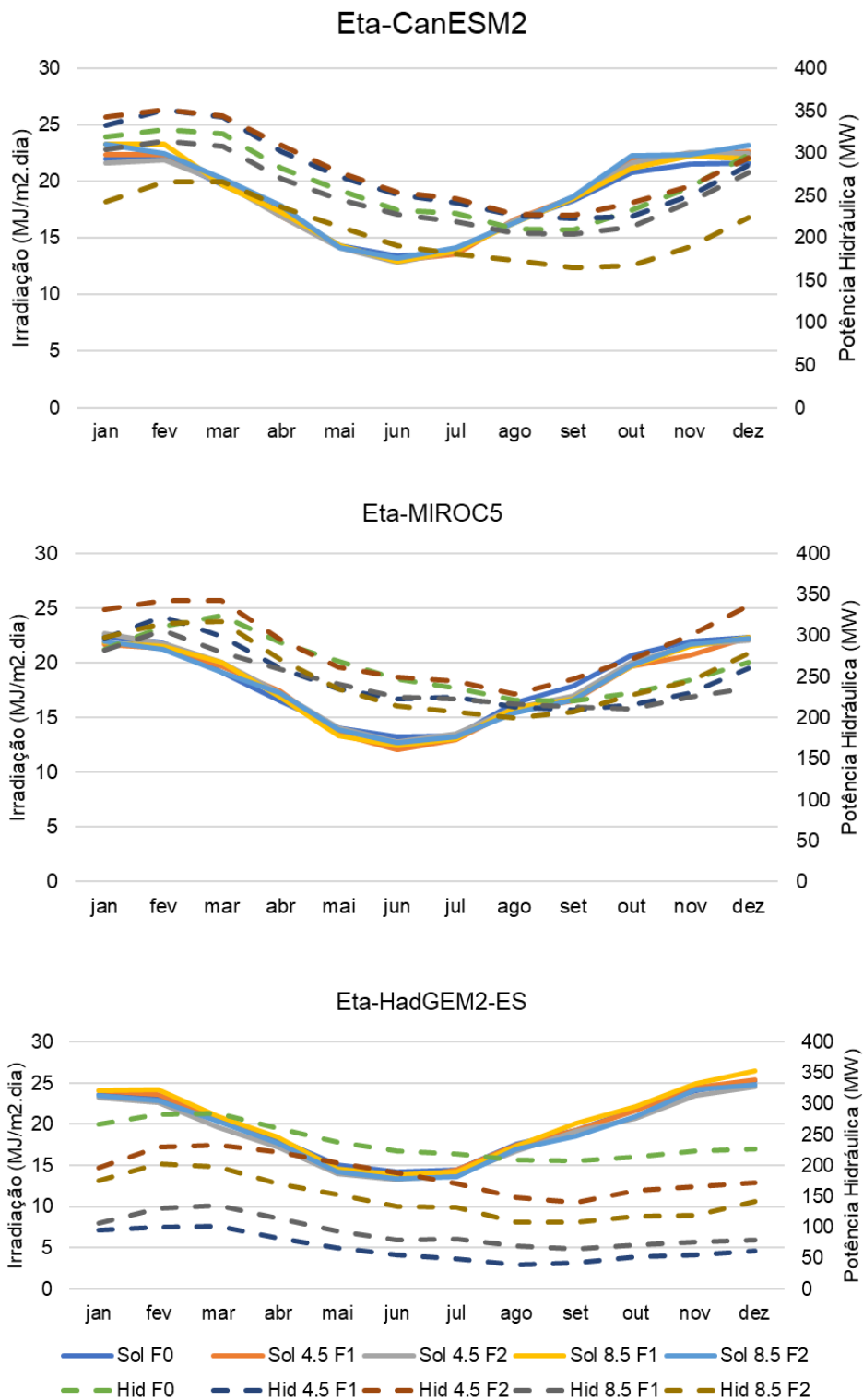
Figura 6.17 - Energia média gerada nas usinas hidrelétricas e solares para múltiplos cenários de UOS (A - atual, O - otimista e P - pessimista); para cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5 e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). As linhas tracejadas correspondem aos valores de referência (1990 - 2015).



A geração de energia solar é cíclica, com coincidência dos períodos de máxima e mínima com as estações do ano. Para comparar a capacidade média de geração de energia mensal hídrica e solar, tendo em vista a variação da quantidade de unidades de consumo com painéis fotovoltaicos instalados ao longo dos períodos analisados, optou-se por comparar o valor médio da irradiação solar de onda curta incidente na superfície terrestre fornecida pelos modelos climáticos com o somatório das potências produzidas pelas usinas hidrelétricas (Tabela 5.1). A Figura 6.18 mostra que, em todos os modelos, os períodos com maior e menor geração de energia se aproximam das estações caracterizadas como verão e inverno na região, meses de dezembro a fevereiro; e entre maio e agosto, respectivamente (MARENGO; ALVES, 2017).

Mesmo existindo uma baixa correlação entre a geração hídrica e fotovoltaica, com um valor de correlação linear médio absoluto de 0,09, durante o verão (dezembro a fevereiro), quando se observa a máxima geração de energia solar, também é quando se atingem maiores valores de geração de energia hidráulica, apesar dos valores máximos desta ocorrerem entre fevereiro e março. Além disso, a existência de uma alternativa à energia hidráulica possibilita uma redução da carga demanda ao SIN, o que poderia permitir a retenção de um volume maior de água nos reservatórios e retardar a necessidade de acionamento de termelétricas em situações de escassez hídrica. Assim, a maior diversificação das fontes de energia renováveis contribuiria para a diminuição das emissões, pois grande parte das termelétricas da área de estudo dependem de combustíveis fósseis.

Figura 6.18 - Comparação entre a capacidade de geração média mensal de energia fotovoltaica e hidráulica por modelo climático, para os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5; e para os períodos de tempo histórico (1990 - 2015), F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). A linha vertical tracejada corresponde aos valores de referência (1990 - 2015).



A expansão de usinas menores também pode reduzir a necessidade de desmatamento de grandes áreas para instalação de usinas. Atualmente esse impacto é destacado principalmente na Região Nordeste, onde se observa uma elevada concentração desses empreendimentos em biomas pouco protegidos da caatinga e do cerrado, seguindo as áreas com os níveis de irradiação solar mais elevados. Segundo a análise socioambiental do Plano Decenal de 2031 (EPE, 2022c), as usinas fotovoltaicas atuais e previstas estão principalmente situadas na Região Nordeste, em regiões onde frequentemente estão localizados fragmentos do bioma da caatinga, cuja preservação é dificultada por possuir apenas uma pequena parcela delimitada como área de proteção, seja parcial ou total.

Apesar da possibilidade das usinas solares auxiliarem na diminuição da carga sobre o sistema hidráulico, existe uma maior dificuldade de previsão da variabilidade dessa fonte, influenciada por fatores climáticos e meteorológicos de múltiplas escalas, como o ciclo solar, a cobertura de nuvens e a presença de partículas em suspensão no ar. Essa característica torna essencial a realização de pesquisas que auxiliem na antecipação do comportamento desses condicionantes.

A geração fotovoltaica é classificada como uma fonte não despachável, a qual não se pode garantir o controle e a geração contínua, atendendo a determinados padrões. A impossibilidade de regulação da quantidade gerada, somada à baixa utilização de baterias nas unidades de consumo devido ao custo elevado (EPE, 2022a), podem ocasionar prejuízos à rede de distribuição. A dispersão das fontes de geração distribuída faz com que o conhecimento do fluxo seja mais complexo, pois parte da energia não consumida pode ser injetada no sistema, invertendo o fluxo e aumentando a possibilidade de ocorrência de sobretensões (FREITAS; HOLLANDA, 2015).

Os resultados das simulações do MHD-INPE associados às projeções de energia solar na BPS mostram, portanto, que essa modalidade de geração tem um papel fundamental na ampliação das fontes de geração de energia. Entretanto, mesmo com a grande expansão e a aquisição de painéis

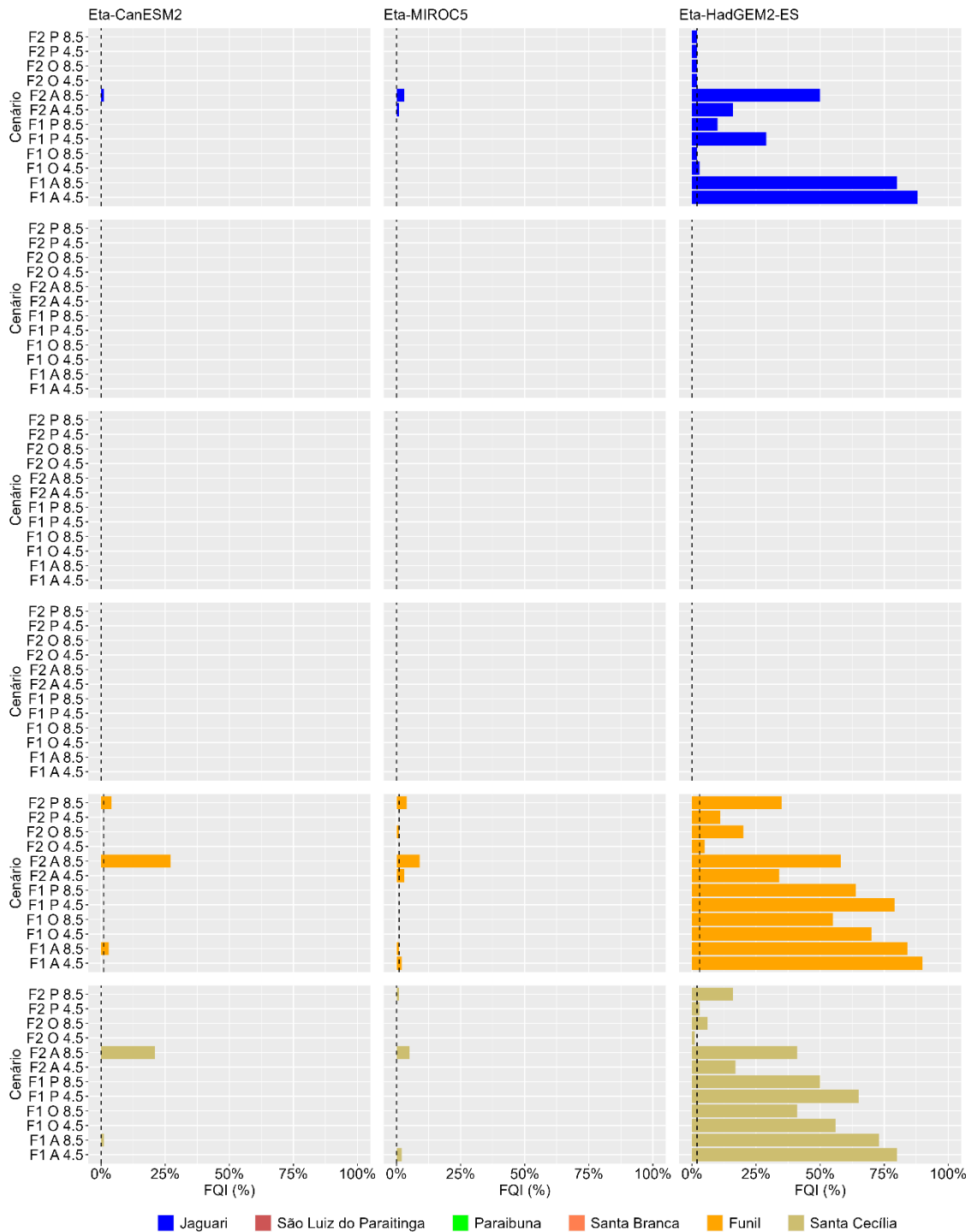
fotovoltaicos, essa fonte de energia ainda não é acessível para grande parcela da população. Em estudo realizado em bairros com diferentes rendas médias do município Sinop, localizado em Mato Grosso, por exemplo, Dalfovo et al. (2019) verificaram que a instalação de um sistema fotovoltaico seria economicamente atrativa apenas para aqueles com renda igual ou superior a 10 salários mínimos.

#### **6.4.3 Segurança alimentar**

A segurança na produção de alimentos depende da disponibilidade de água que atenda aos padrões de qualidade para realização dessa atividade. Na região estudada existem diversas aglomerações urbanas situadas ao longo dos recursos hídricos, cujo esgoto é manejado de forma inadequada, desencadeando uma série de impactos econômicos e ambientais. Essa situação tende a se agravar ao longo dos anos, o que pode ser observado ao se comparar a DBO dos rios da área de estudo após o processo de diluição dos esgotos das áreas urbanas e o limite da classe II de enquadramento (Figura 6.19).



Figura 6.19 - Percentual de tempo em que a DBO ultrapassa esse limite da classe II, nas sub-bacias da bacia do Paraíba do Sul (FQI), para diferentes cenários de uso e ocupação do solo (Otimista - O, Pessimista - P e Atual - A); para os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5; e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). A linha vertical tracejada corresponde aos valores de referência (1990 - 2015).



Todos os modelos climáticos indicam que a água disponível nos cenários futuros poderá não ser suficiente para diluir os esgotos lançados pela população. No caso dos modelos Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5, essa situação é mais provável de ocorrer quando se consideram os níveis atuais de acesso aos serviços de saneamento e os cenários de maiores emissões, RCP 8.5. Para o modelo Eta-HadGEM2-ES, a ocorrência de níveis de DBO superiores ao limite da classe II é observada em todos os cenários. Nessa análise é perceptível a necessidade de se elevar os níveis de acesso aos serviços de coleta e tratamento de esgoto da região, para garantir a adequação dos padrões de qualidade da água às atividades realizadas na bacia e, conseqüentemente, a manutenção do ecossistema aquático e a redução de despesas com o processo de tratamento dessa água. Mesmo a população da área de estudo possuindo um elevado acesso à coleta de esgoto, 95,5% têm o esgoto coletado pela rede pública ou faz uso de fossa séptica (solução individual), parcela do esgoto coletado não é tratado, sendo de 69,2% o acesso ao serviço de tratamento de esgoto. Outra melhoria proposta nos cenários foi a elevação da eficiência de remoção de DBO das estações de tratamento de esgoto. Apesar da legislação brasileira determinar que a eficiência de remoção de DBO para lançamento de efluente deve ser de 60% (BRASIL, 2011), 26% dos municípios estudados não respeitam esse parâmetro. Esse limiar de remoção é considerado na avaliação da eficiência de sistemas de tratamento provenientes de qualquer fonte poluidora. Um exemplo é o estudo realizado por Lourenço et al. (2018) que verificou a qualidade de uma estação para tratamento de efluentes de pequenas comunidades, a partir da quantificação da remoção de diversos compostos, como fósforo, DBO, coliformes totais.

Dentre os municípios que possuem baixo índice de tratamento de esgoto estão Cunha e Paraibuna, onde apenas 16% e 2% da população, respectivamente, possuem algum tipo de tratamento de esgoto. Esses municípios estão localizados a montante do reservatório de Santa Branca, abrangendo os rios Paraitinga e Paraibuna, que correspondem ao trecho inicial do Rio Paraíba do Sul. A necessidade de preservação dos recursos hídricos dessa região para manutenção da qualidade, faz com que a maior parte dos rios sejam

classificados como de ordem 1. Entretanto, mesmo sendo municípios de pequeno porte, o baixo percentual de tratamento de esgotos pode elevar a concentração de matéria orgânica, prejudicando o abastecimento de municípios a jusante.

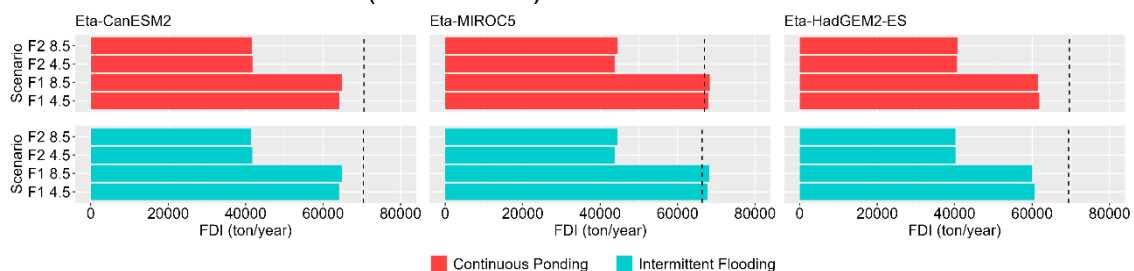
A piora nos níveis de DBO é observada na sub-bacia do Funil, onde existe uma maior densidade de população, e nas sub-bacias do Jaguari e Santa Cecília, onde estão sendo realizadas as transposições. Esse efeito da combinação da variabilidade dos recursos hídricos e das pressões dos centros urbanos na qualidade da água também foi observado por Pacheco et al. (2017). A avaliação de padrões de qualidade, desde a nascente até a foz do rio Paraíba do Sul, durante os anos de 2014 e 2015, quando foi observada a seca severa na Região Sudeste, mostra que principalmente as regiões próximas aos centros urbanos estão sujeitas a um aumento da quantidade de nutrientes, nitrogênio e fósforo, elevação da turbidez da água, dentre outros impactos que podem resultar em um aumento dos custos para tratamento da água e na redução de espécies aquáticas.

Segundo os valores do índice de qualidade da água (IQA) apresentados no último relatório da (CETESB, 2023), a porção paulista do rio Paraíba do Sul possui uma condição boa a ótima entre Jambuí (SP) e São José dos Campos (SP), onde se observa uma degradação dos parâmetros considerados no índice, em relação à média histórica nos últimos cinco anos, principalmente coliformes fecais, oxigênio dissolvido e fósforo total. Tendo em vista a redução da disponibilidade hídrica futura em função da maior incidência de períodos secos, além da tendência de aumento da demanda, a inadequação dos padrões de qualidade pode ocorrer com mais frequência no futuro.

Ao longo dos anos é observada uma redução na quantidade produzida de arroz (Figura 6.20). Apesar das variações na disponibilidade de água observadas (Figura 6.6), este comportamento é principalmente influenciado pela redução das áreas de cultivo de arroz na região destacada por Martins et al. (2023). Essa quantificação também mostra que a adoção de uma técnica de irrigação de arroz

intermitente garante a obtenção da mesma produção associada a irrigação por inundação, largamente adotada na região.

Figura 6.20 - Produção total de arroz da área de estudo para diferentes técnicas de irrigação, na bacia do Paraíba do Sul (FDI), para os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5; e para os períodos de tempo F1 (2016 - 2035) e F2 (2036 - 2055). A linha pontilhada vertical corresponde aos valores do cenário base (1990 - 2015).



Apesar de não terem sido observados ganhos significativos de produtividade e, principalmente, de redução do uso de água nos cenários avaliados, a utilização de técnicas de irrigação que demandam menos água representam ganhos de desempenho. Um estudo comparativo de culturas de arroz, localizadas em Formoso do Araguaia (TO) e em Goianira (GO), verificou ganhos de produtividade e de eficiência do uso da água nos experimentos realizados com a adoção da irrigação intermitente e com solo saturado, em relação à técnica contínua (SANTOS et al., 2021). Os ganhos associados à substituição da irrigação intermitente provavelmente não foram suficientes para se sobrepor aos efeitos da redução das áreas de plantação de arroz e de duração do ciclo da cultura destacadas por Martins et al. (2023).

## 7 CONCLUSÕES

É interessante destacar que, ao longo dos anos, a gestão dos recursos hídricos tem, em grande parte, fundamentando-se na realização de obras para garantir a disponibilidade de recursos a fim de atender as demandas da população, principalmente de grandes centros urbanos, e viabilizar o crescimento econômico. Todavia, sucessivas crises provocadas pela soma dos efeitos da ação humana, das mudanças climáticas, dentre outros processos têm mostrado ser essenciais a elaboração de políticas públicas que estimulem a utilização eficaz e a diversificação das fontes dos recursos. Nesse contexto de maior incidência de eventos extremos, é importante destacar que essas novas políticas devem possuir ferramentas que contribuam para uma atuação proativa dos gestores, a partir da implantação de medidas preventivas, antes que o recurso caia para níveis inferiores à demanda, atuando sob as vulnerabilidades da população e não de uma maneira reativas uma vez instalada a situação de emergência associada ao evento, como é prática comum entre gestores públicos.

Os indicadores propostos nesta tese se mostraram capazes de identificar as principais fragilidades para garantia da segurança hídrica, energética e alimentar ao longo dos anos. Além da análise do balanço entre oferta e demanda, os indicadores também destacaram os impactos da expansão desordenada dos centros urbanos na qualidade dos recursos hídricos e mostraram os benefícios associados à combinação de diferentes fontes. Essa possibilidade de avaliação de diversas áreas, fundamental para a conciliação dos múltiplos interesses associados aos ODSs, mostra que a visão integrativa do Nexo está inserida nos indicadores propostos. As respostas dos indicadores evidenciaram, portanto, a necessidade de colaboração entre múltiplos setores para propor estratégias que minimizem os impactos desencadeados pela ação humana e pelas mudanças climáticas.

De maneira geral, os indicadores revelam a dificuldade de garantir a disponibilidade contínua dos recursos, em decorrência da tendência de intensificação da variabilidade hídrica futura, com uma influência relevante das

mudanças climáticas sobre a oferta de água na BPS. A comparação entre os cenários futuros e o período histórico indica um crescimento da frequência de eventos de baixas vazões, com prolongamento dos períodos de seca, principalmente nos cenários de maiores emissões, RCP 8.5. Em contrapartida, as políticas de gestão dos recursos hídricos e de uso da terra, propostas nos cenários atual, otimista e pessimista tiveram, em geral, pouca ou nenhuma influência em relação à disponibilidade hídrica.

A permanência das vazões em níveis mais baixos impactará não apenas o abastecimento dos municípios localizados nos seus domínios, mas também das regiões metropolitanas de São Paulo e Rio de Janeiro. As projeções mostram uma elevação da incidência de falhas na transferência da água da bacia para o Sistema Cantareira e, principalmente, para a bacia do Guandu. A possibilidade de falha no abastecimento desses importantes centros urbanos torna inevitável a revisão da gestão dos recursos hídricos da BPS. Assim, é importante que práticas como reuso da água, cuja tecnologia e vantagens são universalmente reconhecidas, sejam implementadas nas metrópoles visando garantir a oferta segura de água tratada tanto para uso humano como atendimento industrial.

Em relação ao setor agrícola, apesar da cultura de arroz demandar uma significativa quantidade de água, a variação da técnica de irrigação não foi suficiente para reduzir a pressão sobre os recursos hídricos. Essa influência limitada está associada à tendência de redução das áreas ocupadas por essa cultura e à capacidade de adaptação às novas condições climáticas. De forma semelhante, a universalização do acesso ao serviço de abastecimento também não teve impacto na segurança hídrica, devido aos elevados níveis de acesso a esse serviço.

Além de reduzir a quantidade de recurso hídrico ofertado, a maior incidência de vazões baixas combinada à manutenção dos níveis atuais de coleta e tratamento de esgotos, e ao crescimento do volume de esgoto produzido, em função do aumento populacional, eleva a concentração de poluentes nos rios, o que pode restringir o uso da água para algumas atividades e aumentar os custos de captação.

A redução da vazão também impacta na confiabilidade do setor elétrico, pois diminui a capacidade de geração de energia nas usinas hidrelétricas. Em contrapartida, a expansão da geração fotovoltaica distribuída contribui para o retardo na necessidade de importação da energia de outros subsistemas e a ampliação da variabilidade de fontes renováveis. Na BPS, essa fonte mostrou-se uma alternativa eficaz para compensar a tendência de menor capacidade de geração de energia pelas hidrelétricas localizadas na área de estudo. A geração fotovoltaica pode retardar a necessidade de acionamento de termelétricas a combustíveis fósseis, principal alternativa em situações de crise hídrica, por reduzir a carga demandada ao sistema elétrico. Entretanto, a expansão da geração distribuída de fonte não despacháveis, depende da adequação do sistema elétrico. Alguns exemplos dessas fragilidades são a possibilidade de sobrecarga do sistema devido ao grande volume de cargas não previstas provenientes dos consumidores, custos ainda elevados associados à instalação de painéis fotovoltaicos, dificuldade de previsão das cargas geradas para adequação do planejamento e da operação do setor, dentre outros fatores.

Apesar da possibilidade de compensação entre diferentes fontes de energia não renováveis, as usinas hidrelétricas, com os seus grandes reservatórios, continuam sendo fundamentais para a manutenção da segurança energética. A possibilidade de controle da vazão liberada dos reservatórios garante a disponibilidade de energia durante períodos em que não é possível a geração de outras fontes renováveis, como eólica e solar.

Os resultados dos indicadores mostram que é necessária a diversificação de políticas de gestão capazes de reduzir as pressões sobre os recursos disponíveis, e contribuir para um uso racional e eficiente. Alguns exemplos são a expansão de tecnologias de reuso da água, de aproveitamento de água da chuva, redução das perdas de água, a implantação de políticas de estímulo a redução do consumo de água e energia, a ampliação da aplicação de mecanismos de cobrança pelo uso da água, dentre outras alternativas que poderiam reduzir a quantidade de água extraída dos rios pelos municípios da BPS e a destinada às transposições. Outro investimento mandatório é na ampliação da cobertura da rede de tratamento de esgoto, principalmente nas

idades onde estão concentradas a maior parcela da população. Uma alternativa para auxiliar na conservação dos recursos hídricos, principalmente aqueles localizados na região de nascente do rio Paraíba do Sul, seria instituir novas áreas de proteção e recuperação de mananciais (APRM). Essa unidade territorial possui restrições que tentam garantir a qualidade e a quantidade da água para o abastecimento atual e futuro.

É importante destacar que na pesquisa foram considerados as variações nos dados de consumo histórico e as projeções de crescimento da população para projetar a demanda futura. Entretanto, os padrões de consumo da população dependem de múltiplos fatores, como cultura, economia, tecnologia, políticas públicas, dentre outros. Ainda em relação a projeções, foram utilizados dados de população e acesso aos serviços de saneamento referentes ao censo de 2010, que estava disponível durante a realização da pesquisa. Porém, recentemente foram disponibilizados os dados de população do censo de 2021, que revelou uma nova dinâmica de ocupação dos centros urbanos.

Como limitação desta tese também deve ser destacada as diferenças de escala em que ocorrem as variações dos recursos. Apesar da bacia hidrográfica ser a unidade principal de gestão dos recursos hídricos, os fluxos de alimentos e energia transpõem essa fronteira, sendo necessária a realização de estudos capazes de considerar múltiplas escalas.

Em relação à análise da segurança alimentar, os indicadores focaram na produção de arroz em função da significativa área irrigada na área de estudo. Entretanto existem outros cultivos, com características e demandas diferentes, explorados na região estudada, como é o caso da cana de açúcar, milho, soja e banana. Estudos futuros podem considerar essas outras culturas.

Outra sugestão para pesquisas futuras é a ampliação do detalhamento do modelo hidrológico. Apesar da representação espacial em uma grade regular, os resultados das simulações foram agregados para o nível das sub-bacias, o que pode desencadear simplificações na representação dos fluxos. A maior discretização espacial auxilia na identificação mais precisa das áreas mais sujeitas a impactos qualitativos e quantitativos na disponibilidade hídrica. Nesse



contexto, uma melhoria importante para a metodologia proposta na tese é a aplicação de um modelo de simulação de qualidade de água capaz de incorporar diferentes variáveis tanto no rio principal como nos seus tributários, considerando os pontos de lançamento das cargas poluidoras, como também as vazões calculadas pelo MHD-INPE.

Outra questão a ser estudada é a ampliação do estudo para toda a Bacia do Paraíba do Sul. A menor disponibilidade hídrica na porção paulista da bacia, que ocupa a maior parcela na área de estudo e onde está localizada a nascente do rio Paraíba, irá influenciar na oferta de recursos a jusante. Um estudo interessante seria o uso da análise da variação dos indicadores para auxiliar na proposição de diferentes políticas associadas a parcelas do volume útil dos reservatórios. Ao invés de uma regra padrão, associada a um valor de vazão máxima e um de vazão mínima, seriam propostas metas de armazenamento e/ou políticas de operação por baixas como acontece em Sobradinho e no sistema Cantareira.

No cálculo dos indicadores também é necessário realizar um estudo mais detalhado para determinação da vazão de manutenção dos ambientes aquáticos. Apesar de ser utilizada em estudos, a  $Q_{95}$  considera apenas processos hidrológicos, o que pode não ser suficiente para atender as especificidades do meio.

Por fim, a aplicação da metodologia proposta na tese precisa ser ampliada para ser capaz de considerar outras dimensões inseridas no conceito de segurança, e principalmente incorporar indicadores que caracterizem as vulnerabilidades da população e meio ambiente local. O conhecimento detalhado dessas fragilidades pode ajudar a entender como lidar com os impactos das mudanças projetadas para o futuro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOELNGA, H. T.; KHALIFA, M.; MCNAMARA, I.; SYCZ, J. **The water-energy-food security nexus: a review of nexus literature and ongoing nexus initiatives for policymakers**. Bonn: NRD, 2018. 58 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Resolução conjunta ANA/DAEE/IGAM/INEA nº 1.382/2015**. 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/sala-de-situacao/paraiba-do-sul/documentos-relacionados/resolucao-no-1382-2015.pdf/view>. Acesso em: 18 jul. 2021.

\_\_\_\_\_. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2017**. Brasília: ANA, 2017a. 169 p. Disponível em: [http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2017\\_rel-1.pdf](http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2017_rel-1.pdf). Acesso em: 9 jan. 2023.

\_\_\_\_\_. **Resolução nº 1.931, de 30 de outubro de 2017**. 2017b. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/resolucoes/ana/2017/1931-2017.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2021.

\_\_\_\_\_. **Atlas esgotos: despolição de bacias hidrográficas**. Brasília: ANA, 2017c. 88 p. Disponível em: <http://atlasesgotos.ana.gov.br/>. Acesso em: 29 maio 2021.

\_\_\_\_\_. **Resolução nº 1.938, de 30 de outubro de 2017**. 2017d. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/regulacao-e-fiscalizacao/otorga/solicite-sua-otorga/normativos-otorga>. Acesso em: 18 mar. 2023.

\_\_\_\_\_. **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Brasília: ANA, 2019. 112 p. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/pnsh/pnsh.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2022.

\_\_\_\_\_. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2020**. Brasília: ANA, 2020. 118 p. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/conjuntura-completo.23309814.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2021.

\_\_\_\_\_. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília: ANA, 2021. 130 p. Disponível em: <https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/storymaps/stories/a874e62f27544c6a986da1702a911c6b>. Acesso em: 2 jul. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Resolução conjunta ANA/DAEE Nº 925, de 29 de maio de 2017**. 2017. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/arquivos/resolucoes/2017/925-2017.pdf?174417>. Acesso em: 13 out. 2021.

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Cadernos temáticos ANEEL: energia assegurada**. Brasília: ANEEL, 2005. 18 p. Disponível em: [https://www.aneel.gov.br/documents/656835/16505063/2005\\_CadernosTematicosANEEL3.pdf/c09636a7-c356-c427-ac3b-3eea464ca906](https://www.aneel.gov.br/documents/656835/16505063/2005_CadernosTematicosANEEL3.pdf/c09636a7-c356-c427-ac3b-3eea464ca906). Acesso em: 5 ago. 2022
- ANDRADE, M. H.; SOUZA, C. F.; VARALLO, A. C. T.; PERES, J. G. Impactos da produção do arroz inundado na qualidade da água do rio Paraíba do Sul - trecho Taubaté, SP, Brasil. **Revista Ambiente e Água**, v. 5, n. 1, p. 114-133, 2010.
- ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T. S.; ROSOLEM, R.; HAGEMANN, S.; NOBRE, C.A. Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. **Atmospheric Research**, v. 244, p. 105053, 2020.
- ALMAZROUI, M.; ASHFAQ, M.; ISLAM, M. N.; RASHID, I. U.; KAMIL, S.; ABID, M. A.; O'BRIEN, E.; ISMAIL, M.; REBOITA, M. S.; SÖRENSON, A. A.; ARIAS, P. A.; ALVES, L. M.; TIPPETT, M. K.; SAEED, S.; HAARSMA, R.; DOBLAS-REYES, F. J.; SAEED, F.; KUCHARSKI, F.; NADEEM, I.; SILVA-VIDAL, Y.; RIVERA, J. A.; EHSAN, M. A.; MARTÍNEZ-CASTRO, D.; MUÑOZ, Á. G.; ALI, M. A.; COPPOLA, E.; SYLLA, M. B. Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. **Earth Systems and Environment**, v. 5, n. 2, p. 155-183, 2021.
- AL-SAIDI, M.; ELAGIB, N. A. Towards understanding the integrative approach of the water, energy and food nexus. **Science of the Total Environment**, v. 574, p. 1131-1139, 2017.
- AMARAL, M. H.; BENITES-LAZARO, L. L.; SINISGALLI, P. A. A.; ALVES, H. F. A.; GIATTI, L. L. Environmental injustices on green and blue infrastructure: urban nexus in a macrometropolitan territory. **Journal of Cleaner Production**, v. 289, p. 1-13, 2021.
- ANDERSON, R.; BAYER, P. E.; EDWARDS, D. Climate change and the need for agricultural adaptation. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 56, p. 197-202, 2020.
- ARCOVERDE, G. F. B.; MENEZES, J. A.; PAZ, M. G. A.; BARROS, J. D.; GUIDOLINI, J. F.; BRANCO, E. A.; ANDRADE, P. R.; PULICE, S. M. P.; OMETTO, J. P. H. B. Sustainability assessment of Cerrado and Caatinga biomes in Brazil: a proposal for collaborative index construction in the context of the 2030 Agenda and the Water-Energy-Food Nexus. **Frontiers in Physics**, v. 10, p. 1-25, 2023.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: an R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017.

ARORA, V. K.; SCINOCCA, J. F.; BOER, G. J.; CHRISTIAN, J. R.; DENMAN, K. L.; FLATO, G. M.; KHARIN, V. V.; LEE, W. G.; MERRYFIELD, W. J. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 5, p. 1-6, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9.649**: projeto de redes coletoras de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986. 7 p.

AVILA-DIAZ, A.; ABRAHÃO, G.; JUSTINO, F.; TORRES, R.; WILSON, A. Extreme climate indices in Brazil: evaluation of downscaled earth system models at high horizontal resolution. **Climate Dynamics**, v. 54, n. 11, p.5065-5088, 2020.

BASTOS, P. Impactos da seca e análise de custos para o Nordeste do Brasil. In: DE NYS, E.; ENGLE, N. L.; MAGALHÃES, A. R. (Ed.). **Secas no Brasil política e gestão proativas**. Brasília: CGEE; Banco Mundial, 2016. p. 1-292.

BAZILIAN, M.; ROGNER, H.; HOWELLS, M.; HERMANN, S.; ARENT, D.; GIELEN, D.; STEDUTO, P.; MULLER, A.; KOMOR, P.; TOL, R. S. J.; YUMKELLA, K. K. Considering the energy, water and food nexus Towards an integrated modelling approach. **Energy Policy**, v. 39, p. 7896-7906, 2011.

BOF, P. H.; MARQUES, G. F.; TILMANT, A.; DALCIN, A. P.; OLIVARES, M. Water-food-energy nexus tradeoffs in the São Marcos river basin. **Water (Switzerland)**, v. 13, n. 6, 2021.

BORGES, M. C. P.; ABREU, S. B.; LIMA, C. H. R.; CARDOSO, T.; YONAMINE, S. M.; ARAUJO, W. D. V.; SILVA, P. R. S.; MACHADO, V. B.; MORAES, V.; SILVA, T. J. B.; REIS, V. A.; SANTOS, J. V. R.; REIS, M. L.; CANAMARY, É. A.; VIEIRA, G. C.; MEIRELES, S. The Brazilian National System for Water and Sanitation Data (SNIS): providing information on a municipal level on water and sanitation services. **Journal of Urban Management**, v. 11, p. 530-542, 2022.

BORTOLETO, A. P.; FRANCO BARBOSA, P. S.; MANIERO, M. G.; GUIMARÃES, J. R.; VIEIRA JUNIOR, L. C. M. A Water-energy nexus analysis to a sustainable transition path for Sao Paulo State, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 319, 2021.

BRASIL. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. 1987. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9433.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm). Acesso em: 11 ago. 2023.

\_\_\_\_\_. **Resolução CONAMA nº357, de 17 de março de 2005**. 2005. Disponível em: [https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res\\_conama\\_357\\_2005\\_classificacao\\_corpos\\_agua\\_rifcda\\_altrd\\_res\\_393\\_2007\\_3\\_97\\_2008\\_410\\_2009\\_430\\_2011.pdf](https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rifcda_altrd_res_393_2007_3_97_2008_410_2009_430_2011.pdf). Acesso em: 14 abr. 2021.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009**. 2009. Disponível em: [www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm). Acesso em: 12 jan. 2020.

\_\_\_\_\_. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. 2011. Disponível em: [https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res\\_conama\\_357\\_2005\\_classificacao\\_corpos\\_agua\\_rifcda\\_altrd\\_res\\_393\\_2007\\_397\\_2008\\_410\\_2009\\_430\\_2011.pdf](https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rifcda_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf). Acesso em: 11 abr. 2021.

\_\_\_\_\_. **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: estratégia geral**. Brasília: MMA. 2016, 44 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/climaozoniodesertificacao/plano-nacional-de-adaptacao>. Acesso em: 17 set. 2023.

\_\_\_\_\_. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. 2020. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm). Acesso em: 13 out. 2021.

\_\_\_\_\_. **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: relatório final de monitoramento e avaliação, ciclo 2016-2020**. Brasília: MMA, 2021. 91 p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/publicacoes-mma>. Acesso em: 17 set. 2023.

\_\_\_\_\_. **Plano Nacional de Recursos Hídricos: Plano de Ação**. 2022a. 213 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/plano-nacional-de-recursos-hidricos-1>. Acesso em: 7 nov. 2022.

\_\_\_\_\_. **Lei nº14.300, de 6 de janeiro de 2022**. 2022b. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>. Acesso em: 30 maio 2023.

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). **Quarta comunicação nacional à UNFCCC**. Brasília: MCTI, 2021. 508 p. Disponível em: [https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/Comunicacao\\_Nacional/Comunicacao\\_Nacional.html](https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/Comunicacao_Nacional/Comunicacao_Nacional.html). Acesso em: 27 set. 2021.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (MDR). **Plano Nacional de saneamento básico: documento em revisão submetido à apreciação dos conselhos nacionais de saúde, recursos hídricos e meio ambiente**. Brasília: MDR, 2019. 239 p. Disponível em: [https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSDRU/ArquivosPDF/Versao\\_Conselhos\\_Resolucao\\_Alta\\_-\\_Capa\\_Atualizada.pdf](https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSDRU/ArquivosPDF/Versao_Conselhos_Resolucao_Alta_-_Capa_Atualizada.pdf). Acesso em: 23 ago. 2021.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **PNE 2050 Plano Nacional de Energia**. Brasília: MME/EPE, 2020. 230 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2021.

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; PILAR, J. V.; TUCCI, C. E. M. Otimização de regras de operação de reservatórios utilizando um algoritmo evolutivo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL-SUDESTE, 1., 2006, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2006. p. 1-20.

CARRIELLO, F.; REZENDE, F. S.; NEVES, O. M. S.; RODRIGUEZ, D. A. Forestry expansion during the last decades in the Paraíba do Sul basin - Brazil. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, v. 41, p. 857-861, 2016.

CAVALCANTI, B. S.; MARQUES, G. R. G. Recursos hídricos e gestão de conflitos: a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul a partir da crise hídrica de 2014-2015. **Revista de Gestão dos Países de Língua Portuguesa**, v. 15, n. 1, p. 1-16, 2016.

CELIDÓRIO, A. L.; MACHADO, J. V. S.; SANTOS, É. J.; PEREIRA, M. F. F. Turismo de eventos: estudos de caso sobre a cidade de Cunha (SP). **Revista H-Tec Humanidades e Tecnologia**, v. 4, n. 1, p. 99-122, 2020.

CHANG, M.; DEREZYNSKI, C.; FREITAS, M. A. V.; CHOU, S. C. Climate change index: a proposed methodology for assessing susceptibility to future climatic extremes. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 326-337, 2014.

CHARLES, H.; GODFRAY, H.; GARNETT, T. Food security and sustainable intensification. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 369, n. 1639, 2014.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 512-527, 2014.

COLLINS, W. J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N.; HALLORAN, P.; HINTON, T.; HUGHES, J.; JONES, C. D.; JOSHI, M.; LIDDICOAT, S.; MARTIN, G.; O'CONNOR, F.; RAE, J.; SENIOR, C.; SITCH, S.; TOTTERDELL, I.; WILTSHIRE, A.; WOODWARD, S. Development and evaluation of an Earth-System model - HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 4, p. 1051-1075, 2011.

COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (CEIVAP). **Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e planos de ação de recursos hídricos das bacias afluentes: relatório de diagnóstico - tomo III**. 2014. Disponível em: <http://ceivap.org.br/conteudo/relatorio-diagnostico-rp6-tomo3.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2021.

\_\_\_\_\_. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul**. 2021. Disponível em: [http://18.229.168.129:8080/publicacoesArquivos/ceivap/arg\\_pubMidia\\_Processo\\_030-2018-RF01.pdf](http://18.229.168.129:8080/publicacoesArquivos/ceivap/arg_pubMidia_Processo_030-2018-RF01.pdf). Acesso em: 15 jun. 2021.

- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo 2020**. São Paulo: CETESB, 2020. 243 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>. Acesso em: 26 abr. 2022.
- \_\_\_\_\_. **Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo 2022**. São Paulo: CETESB, 2023. 250 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>. Acesso em: 5 dez. 2023.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CANAB). **A cultura de arroz**. Brasília: CONAB, 2015. 180 p.
- COOK, C.; BAKKER, K. Water security: debating an emerging paradigm. **Global Environmental Change**, v. 22, n. 1, p. 94-102, 2012.
- COUTINHO, S. M. V.; SANTOS, D. V.; BURSZTYN, M.; MARENGO, J. A.; RODRIGUES-FILHO, S.; LUCENA, A. F.; RODRIGUEZ, D. A.; MAIA, S. M. F. The Nexus+ approach applied to studies of Impacts, vulnerability and adaptation to climate change in Brazil. **Sustainability in Debate**, v. 11, n. 3, p. 24-56, 2020.
- CUNHA, A. P. M. A.; ZERI, M.; LEAL, K. D.; COSTA, L.; CUARTAS, L. A.; MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M.; BARBOSA, A. A.; CUNNINGHAM, C.; CAL GARCIA, J. V.; BROEDEL, E.; ALVALÁ, R.; RIBEIRO-NETO, G. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, v. 10, n. 11, 2019.
- DALFOVO, W. C. T.; ZILIO, P. C.; SORNBERGER, G. P.; REDIVO, A. A. Viabilidade econômica da implantação de energia solar fotovoltaica para a redução dos custos com energia elétrica das famílias com diferentes níveis de renda: uma análise para a região norte de Mato Grosso. **Sociedade, Contabilidade e Gestão**, v. 14, n. 3, p. 118-143, 2019.
- DALLA FONTANA, M.; MOREIRA, F. A.; DI GIULIO, G. M.; MALHEIROS, T. F. The water-energy-food nexus research in the Brazilian context: what are we missing? **Environmental Science and Policy**, v. 112, p. 172-180, 2020.
- DANTAS, L. G.; SANTOS, C. A. C.; SANTOS, C. A. G.; MARTINS, E. S. P. R.; ALVES, L. M. Future changes in temperature and precipitation over northeastern Brazil by CMIP6 model. **Water (Switzerland)**, v. 14, n. 24, 2022.
- DERECZYNSKI, C.; CHAN CHOU, S.; LYRA, A.; SONDERMANN, M.; REGOTO, P.; TAVARES, P.; CHAGAS, D.; GOMES, J. L.; RODRIGUES, D. C.; SKANSI, M. DE LOS M. Downscaling of climate extremes over South America - Part I: model evaluation in the reference climate. **Weather and Climate Extremes**, v. 29, 2020.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano decenal de expansão de energia 2031**. Brasília: MME, 2022a. 411 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>. Acesso em: 5 maio 2023.



\_\_\_\_\_. **Balço energético nacional: ano base 2021**. Rio de Janeiro: EPE, 2022b. 292 p. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: 9 maio 2022.

\_\_\_\_\_. **Análise socioambiental das fontes energéticas do PDE 2031: nota técnica EPE/DEA/SMA/004/2022**. 2022c. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>. Acesso em: 5 maio 2023.

ENDO, A.; TSURITA, I.; BURNETT, K.; ORENCIO, P. M. A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 11, p. 20-30, 2017.

ESKINAZI, B. G.; SOUZA, J. G. Especialização produtiva e homogeneização territorial: A monocultura de eucalipto no Vale do Paraíba Paulista e as transformações nas dinâmicas de produção. **PEGADA-A Revista da Geografia do Trabalho**, n. 14, v. 2, 2013.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **Food security: policy brief**. 2006. Disponível em: [http://www.fao.org/fileadmin/templates/faotaly/documents/pdf/pdf\\_Food\\_Security\\_Concept\\_Note.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/faotaly/documents/pdf/pdf_Food_Security_Concept_Note.pdf). Acesso em: 2 mar. 2021.

FREITAS, B. M. R.; HOLLANDA, L. **White paper nº1: micro e minigeração no Brasil: viabilidade econômica e entraves do setor**. [S.l: s.n.], 2015.

GASPARIN, F. P.; KRENZINGER, A. Desempenho de um sistema fotovoltaico em dez cidades brasileiras com diferentes orientações do painel. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 8, n. 1, p. 10-17, 2017.

FUNDAÇÃO COORDENAÇÃO DE PROJETOS, PESQUISAS E ESTUDOS TECNOLÓGICOS (COPPETEC). **Relatório síntese do plano estadual de recursos hídricos do estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: INEA, 2014. 125 p. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/ar-agua-e-solo/plano-estadual-de-recursos-hidricos/page/2/>. Acesso em: 16 maio 2022.

GREY, D.; SADOFF, C. W. Sink or swim? water security for growth and development. **Water Policy**, v. 9, p. 545-571, 2007.

GUNDERSEN, C.; ZILIAK, J. P. Food insecurity and health outcomes. **Health Affairs**, v. 34, n. 11, p. 1830-1839, 2015.

HAIMES, Y. Y. Sustainable development: a holistic approach to natural resource management. **Water International**, v. 17, n. 4, p. 187-192, 1992.

HIREMATH, R. B.; BALACHANDRA, P.; KUMAR, B.; BANSODE, S. S.; MURALI, J. Indicator-based urban sustainability: a review. **Energy for Sustainable Development**, v. 17, n. 6, p. 555-563, 2013.

HOEKSTRA, A. Y.; BUURMAN, J.; VAN GINKEL, K. C. H. Urban water security: a review. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 5, p. 1-14, 2018.

HOFF, H. **Understanding the nexus**. Stockholm: SEI, 2011. 52 p.



HUNT., J. D.; STILPEN, D.; FREITAS, M. A. V. A review of the causes, impacts and solutions for electricity supply crises in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 88, p. 208-222, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Brasileiro**. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **Censo demográfico 2022: população e domicílios**. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/downloads.html?localidade=BR>. Acesso em: 30 jul. 2023.

\_\_\_\_\_. **Produto Interno Bruto dos municípios de 2019**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html?=&t=downloads> . Acesso em: 29 maio 2021.

INSTITUTO DE PESQUISA, ADMINISTRAÇÃO E PLANEJAMENTO DE TREMEMBÉ (IPPLAN). **Relatório final da mobilidade urbana: diagnóstico e prognóstico**. São José dos Campos, 2016. Disponível em: [www.ipplan.org.br](http://www.ipplan.org.br).

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Informativo meteorológico nº 46/2023**. Brasília, 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2014: synthesis report. contribution of working groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Switzerland: IPCC, 2014. 151 p. Disponível em: [https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_wcover.pdf](https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf). Acesso em: 8 maio 2022.

\_\_\_\_\_. **Technical summary: the physical science basis. contribution of working group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Switzerland: IPCC, 2021. 32 p. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> ; Acesso em: 8 maio. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World energy outlook: 2009**. Paris, 2009. Disponível em: <http://large.stanford.edu/courses/2013/ph241/roberts2/docs/WEO2009.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2021.

IORIS, A. The limits of integrated water resources management: a case study of Brazil's Paraíba do Sul River Basin. **Sustainability: Science, Practice and Policy**, v. 4, n. 2, p. 4-11, 2008.

KARLBERG, L.; HOFF, H.; AMSALU, T.; ANDERSSON, K.; BINNINGTON, T.; FLORES-LÓPEZ, F.; BRUIN, A.; GEBREHIWOT, S. G.; GEDIF, B.; ZUR HEIDE, F.; JOHNSON, O.; OSBECK, M.; YOUNG, C. Tackling complexity: understanding the food-energy-environment nexus in Ethiopia's lake TANA sub-basin. **Water Alternatives**, v. 8, n. 1, p. 710-734, 2015.

KELMAN, J.; KELMAN, R.; VEIGA, M.; PEREIRA, F. Energia firme de sistemas hidrelétricos e usos múltiplos dos recursos hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 9, n. 1, p. 189-198, 2004.

KIM, Y. H.; MIN, S. K.; ZHANG, X.; SILLMANN, J.; SANDSTAD, M. Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices. **Weather and Climate Extremes**, v. 29, 2020.

KOK, M.; ALKEMADE, R.; BAKKENES, M.; BOELEE, E.; CHRISTENSEN, V.; EERDT, M. VAN; ESCH, S. VAN DER; JANSE, J.; KARLSSON-VINKHUYZEN, S.; KRAM, T.; LAZAROVA, T.; LINDERHOF, V.; LUCAS, P.; MANDRYK, M.; MEIJER, J.; OORSCHOT, M. VAN; TEH, L.; HOOFF, L. VAN; WESTHOEK, H.; ZAGT, R. **How Sectors can contribute to sustainable use and conservation of biodiversity**. Hague: PBL, 2014. 230 p.

KRISHNAN, R.; AGARWAL, R.; BAJADA, C.; ARSHINDER, K. Redesigning a food supply chain for environmental sustainability: an analysis of resource use and recovery. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, 2020.

KRUYT, B.; VAN VUUREN, D. P.; DE VRIES, H. J. M.; GROENENBERG, H. Indicators for energy security. **Energy Policy**, v. 37, n. 6, p. 2166-2181, 2009.

LAMPIS, A.; LAZARO, L. L. B.; SOARES, R. S.; NEIVA, S. A.; BERMANN, C. Justiça energética e geração distribuída fotovoltaica em São Paulo. In: JACOBI, P. R. (Ed.). **Governança ambiental na macrometrópole paulista face à variabilidade climática**. São Carlos: RIMA, 2022. p. 353-377.

LAZARO, L. L. B.; BELLEZONI, R. A.; PUPPIM DE OLIVEIRA, J. A.; JACOBI, P. R.; GIATTI, L. L. Ten years of research on the water-energy-food nexus: an analysis of topics evolution. **Frontiers in Water**, v. 4, 2022.

LECK, H.; CONWAY, D.; BRADSHAW, M.; REES, J. Tracing the water-energy-food nexus: description, theory and practice. **Geography Compass**, v. 9, n. 8, p. 445-460, 2015.

LEESE, M.; MEISCH, S. Securitising sustainability? questioning the "water, energy and food-security Nexus". **Water Alternatives**, v. 8, n. 1, p. 695-709, 2015.

LI, J.; HUO, R.; CHEN, H.; ZHAO, Y.; ZHAO, T. Comparative assessment and future prediction using CMIP6 and CMIP5 for annual precipitation and extreme precipitation simulation. **Frontiers in Earth Science**, v. 9, 2021.

LIU, J.; HULL, V.; GODFRAY, H. C. J.; TILMAN, D.; GLEICK, P.; HOFF, H.; PAHL-WOSTL, C.; XU, Z.; CHUNG, M. G.; SUN, J.; LI, S. Nexus approaches to global sustainable development. **Nature Sustainability**, v. 1, n. 9, p. 466-476, 2018.

LIU, P. R.; RAFTERY, A. E. Country-based rate of emissions reductions should increase by 80% beyond nationally determined contributions to meet the 2 °C target. **Communications Earth and Environment**, v. 2, n. 1, 2021.

LOURENÇO, L. S.; RODRIGUES, E. B.; MOREIRA, M. A.; SKORONSKI, E. Remoção de matéria orgânica e nutrientes de esgoto doméstico por wetland horizontal de fluxo subsuperficial na estação de tratamento de Aparecida-Campos Novos, SC. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 8, n. 1, p. 85-94, 2018.

LORENZO, E. La energía que producen los sistemas fotovoltaicos conectados a la red: El mito del 1300 y “el cascabel del gato”. **Era Solar**, v. 107, p. 22-28, 2002.

MARCHEZINI, V.; SARTORI, J.; GONÇALVES, J. C. Desenvolvimento, desastres e reconstrução: o caso de São Luiz do Paraitinga/SP, BRASIL. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 13, n. 2, p. 202-226, 2017.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 215-226, 2017.

MARQUES, A. C.; VERAS, C. E.; RODRIGUEZ, D. A. Assessment of water policies contributions for sustainable water resources management under climate change scenarios. **Journal of Hydrology**, v. 608, 2022.

MARTINS, M. A. **Avaliação das estimativas de produtividade de milho geradas pelo modelo aquacrop utilizando dados observados e previsão climática sazonal**. 2017. 109 p. Tese (Doutorado em Ciências do Sistema Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2017.

MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; BASSANELLI, H. R.; PAIVA, A. C. E.; VIEIRA, R. M. S. P.; CANAMARY, E. A.; ALVARENGA, L. A. On the sustainability of paddy rice cultivation in the Paraíba do Sul river basin (Brazil) under a changing climate. **Journal of Cleaner Production**, v. 386, 2023.

MEADOWS, D. H.; MEADOWS, D. L.; RGEN, J.; WILLIAM, R.; BEHRENS ILL, W. W. **The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind**. New York: University Books, 1970. 205 p.

MELO, E. G. **Geração solar fotovoltaica: estimativa do fator de sombreamento e irradiação em modelos tridimensionais de edificação**. 2012. 130 p. Dissertação. (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2012.

MELO, P. A.; ALVARENGA, L. A.; TOMASELLA, J.; SANTOS, A. C. N.; MELLO, C. R.; COLOMBO, A. On the performance of conceptual and physically based modelling approach to simulate a headwater catchment in Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 114, 2022.

MILHORANCE, C.; SABOURIN, E.; MENDES, P. **Implementação e coordenação das políticas de adaptação às mudanças climáticas no semiárido baiano e pernambucano**. Brasília: MMA, 2019.

MIRALLES-WILHELM, F. Development and application of integrative modeling tools in support of food-energy-water nexus planning-a research agenda. **Journal of Environmental Studies and Sciences**, v. 6, n. 1, p. 3-10, 2016.

NASCIMENTO, D. R.; VIEIRA, E. T. Industrialização e desenvolvimento no médio Vale do Paraíba Fluminense na década de 2000. **Revista Espacios**, v. 37, n. 21, 2016.

NEGRÃO, A. C.; CAMARGO, C. P.; RODRIGUEZ, D. A.; GIORNES, E. O.; PINTO, G. L. N.; TOMASELLA, J.; JOSÉ LÁZARO, S. J.; LOPES, L. G.; PRADO, M. C. R. **Modelo hidrológico distribuído MHD-INPE: manual de implementação**. 2016. 87p. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LD4EQ8>. Acesso em: 14 mar. 2022.

NEVES, O.; ANDRES RODRIGUEZ, D.; CARRIELLO, F. A expansão da cultura de eucalipto na região do Vale do Paraíba e sua relação com as características hidrológicas da bacia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013 Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 7608-7615.

NIKGHALB, S.; SHOKOOHI, A.; SINGH, V. P.; YU, R. Ecological regime versus minimum environmental flow: comparison of results for a river in a semi Mediterranean region. **Water resources management**, v. 30, p.4969-4984, 2016.

NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, L. A.; ALVES, L. M. Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, n. 2, p. 252-262, 2016.

OLIVEIRA, D. M.; CARVALHO, V. S. B.; SILVA, B. C.; REBOITA, M. S.; CAMPOS, B. Hydrological and precipitation extremes and trends over the Paraíba do Sul River Basin, Brazil. **Climate**, v. 11, n. 7, p. 1-16, 2023.

OLIVEIRA, K. D.; TOMASELLA, J.; CARAM, R. O.; FALCK, A. S.; SANCHES, D. A. Impacts of sugarcane expansion on water availability in a river basin in southeastern Brazil. **Catena**, v. 216, 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA (ONS). **Manual de procedimentos da operação. módulo 5. submódulo 5.11: cadastro de informações operacionais hidráulicas da Bacia do rio Paraíba do Sul**. Rio de Janeiro: NOS, 2018. 35 p.

\_\_\_\_\_. **PMO Novembro 2023: semana operativa de 18/11 a 24/11/2023**. Rio de Janeiro: NOS, 2023.

ORTEGA, G.; ARIAS, P. A.; VILLEGAS, J. C.; MARQUET, P. A.; NOBRE, P. Present-day and future climate over central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 15, p. 6713-6735, 2021.

PACHECO, F. S.; MIRANDA, M.; PEZZI, L. P.; ASSIREU, A.; MARINHO, M. M.; MALAFAIA, M.; REIS, A.; SALES, M.; CORREIA, G.; DOMINGOS, P.; IWAMA, A.; RUDORFF, C.; OLIVA, P.; OMETTO, J. P. Water quality longitudinal profile of the Paraíba do Sul River, Brazil during an extreme drought event. **Limnology and Oceanography**, v. 62, p. S131-S146, 2017.

PAIVA, A. C. E. **Segurança hídrica da Bacia do Rio Paraíba do Sul**. 2020. 106 p. Tese (Doutorado em Ciências do Sistema Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2020.

PAIVA, A. C. E.; MARTINS, M.; CANAMARY, E. A.; RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J. Inter-basin water transfers under changing climate and land use: Assessing water security and hydropower in the Paraíba do Sul River basin, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 133, p. 1-12, 2024.

PAIVA, A. C. E.; NASCIMENTO, N.; RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J.; CARRIELLO, F.; REZENDE, F. S. Urban expansion and its impact on water security: the case of the Paraíba do Sul River Basin, São Paulo, Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 720, p. 1-12, 2020.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RUTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE. 2017. 80 p. Disponível em: <http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34P/3PERDJE>. Acesso em: 25 set. 2021.

PEYERL, D.; BARBOSA, M. O.; CIOTTA, M.; PELISSARI, M. R.; MORETTO, E. M. Linkages between the promotion of renewable energy policies and low-carbon transition trends in South America's electricity sector. **Energies**, v. 15, n. 12, 2022.

PURWANTO, A.; SUŠNIK, J.; SURYADI, F. X.; FRAITURE, C. Using group model building to develop a causal loop mapping of the water-energy-food security nexus in Karawang Regency, Indonesia. **Journal of Cleaner Production**, v. 240, 2019.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 438-447, 2009.

RASUL, G.; SHARMA, B. The nexus approach to water-energy-food security: an option for adaptation to climate change. **Climate Policy**, v. 16, n. 6, p. 682-702, 2016.

REZENDE, F. S.; CARRIELLO, F.; RODRIGUEZ, D. A.; NEVES, O. M. S. Spatial and temporal changes in the land use and cover of the Paraíba Valley in São Paulo, Brazil: development of future scenarios. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 5, p. 1732-1747, 2018.

RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J. On the ability of large-scale hydrological models to simulate land use and land cover change impacts in Amazonian basins. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 10, p. 1831-1846, 2016.

SANTOS, A. B.; HEINEMANN, A. B.; SILVA, M. A. S.; STONE, L. F.; PIMENTA, L. B.; SANTOS, D. Manejo da irrigação na cultura do arroz irrigado e na eficiência do uso da água em várzeas tropicais. **Agri-Environmental Sciences**, v. 7, n. 2, 1-13, 2021.

SENNA, M. C. A.; FRANÇA, G. B.; PEREIRA, M. F.; SILVA, M. S.; SOUZA, E. P.; DRAGAUD, I. C. D. A. V.; SOUZA, L. S.; MORAES, N. O.; ALMEIDA, V. A.; ALMEIDA, M. V.; FROTA, M. N.; ARAUJO, A. A. M.; CARDOZO, K. N.; VIANA, L. Q. A teleconnection study between oceanic oscillations and trends in precipitation extremes in the Paraíba do Sul River Basin. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 152, n. 3-4, p. 1095-1113, 2023.

SILVA, R. F. B.; RODRIGUES, M. D. A.; VIEIRA, S. A.; BATISTELLA, M.; FARINACI, J. **Perspectives for environmental conservation and ecosystem services on coupled rural-urban systems. Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 15, n. 2, p. 74-81, 2017.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE (SIMA). **Anuário de energéticos por município no Estado de São Paulo - 2021: ano base 2020**. São Paulo: SIMA, 2021.

SIMPSON, G. B.; JEWITT, G. P. W. The development of the water-energy-food nexus as a framework for achieving resource security: a review. **Frontiers in Environmental Science**, v. 7, p. 1-9, 2019.

SIMPSON, G. B.; JEWITT, G. P. W.; BECKER, W.; BADENHORST, J.; MASIA, S.; NEVES, A. R.; ROVIRA, P.; PASCUAL, V. The water-energy-food nexus index: a tool to support integrated resource planning, management and security. **Frontiers in Water**, v. 4, 2022.

SIQUEIRA JÚNIOR, J. L.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A. Impacts of future climatic and land cover changes on the hydrological regime of the Madeira River basin. **Climatic Change**, v. 129, p. 117-129, 2015.

SOERGEL, B.; KRIEGLER, E.; WEINDL, I.; RAUNER, S.; DIRNAICHNER, A.; RUHE, C.; HOFMANN, M.; BAUER, N.; BERTRAM, C.; BODIRSKY, B. L.; LEIMBACH, M.; LEININGER, J.; LEVESQUE, A.; LUDERER, G.; PEHL, M.; WINGENS, C.; BAUMSTARK, L.; BEIER, F.; DIETRICH, J. P.; HUMPENÖDER, F.; VON JEETZE, P.; KLEIN, D.; KOCH, J.; PIETZCKER, R.; STREFLER, J.; LOTZE-CAMPEN, H.; POPP, A. A sustainable development pathway for climate action within the UN 2030 Agenda. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 8, p. 656-664, 2021.

SOMMERIA, G.; TOUZÉ-PEIFFER, L. Le programme mondial de recherche sur le climat fête ses 40 ans. **La Météorologie**, v. 107, p. 10-13, 2019.

SOUZA, C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L. G.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; DE OLIVEIRA, S. W.; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VÉLEZ-MARTIN, E.; WEBER, E. J.; LENTI, F. E. B.; PATERNOST, F. F.; PAREYN, F. G. C.; SIQUEIRA, J. V.; VIERA, J. L.; FERREIRA NETO, L. C.; SARAIVA, M. M.; SALES, M. H.; SALGADO, M. P. G.; VASCONCELOS, R.; GALANO, S.; MESQUITA, V. V.; AZEVEDO, T. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, 2020.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D.; FERERES, E. Aquacrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 426-437, 2009.

STERMAN, J. D. **Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world**. New Delhi: McGraw-Hill, 2000. 982 p.

TOMASELLA, J.; CUNHA, A. P. M. A.; SIMÕES, P. A.; ZERI, M. Assessment of trends, variability and impacts of droughts across Brazil over the period 1980-2019. **Natural Hazards**, v. 116, n. 2, p. 2173-2190, 2023.

TOMASELLA, J.; MARTINS, M. A.; SHRESTHA, N. An open-source tool for improving on-farm yield forecasting systems. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, 2023.

TOMASELLA, J.; SANTOS, A. C. N.; FALCK, A. S.; MELO, P. A.; CARAM, R. DE O. **Modelo hidrológico distribuído MHD-INPE manual de implementação versão 2.0**. Cachoeira Paulista: INPE, 2022.

TOMASELLA, J.; GONÇALVES, A. S.; FALCK, A. S.; CARAM, R. O.; DINIZ, F. L. R.; RODRIGUEZ, D. A.; PRADO, M. C. R.; NEGRÃO, A. C.; SUEIRO MEDEIROS, G.; SIQUEIRA, G. C. Probabilistic flood forecasting in the Doce Basin in Brazil: Effects of the basin scale and orientation and the spatial distribution of rainfall. **Journal of Flood Risk Management**, v. 12, n. 1, 1-15, 2019.

TORRES, C. J. F.; LIMA, C. H. P.; FONTES, A. S.; RIBEIRO, D. V.; MOREIRA, Í. T. A.; MEDEIROS, Y. D. P. A method for classifying interrelation between sectoral regulatory laws and the 'water-energy-agriculture nexus concept' in Brazil. **Water Supply**, v. 21, n. 5, p. 2158-2172, 2021.

UNITED NATIONS (UN). **Resolution A/RES/70/1**: transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. 2015. 35 p. Disponível em: [https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A\\_RES\\_70\\_1\\_E.pdf](https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf). Acesso em: 16 ago. 2021.

\_\_\_\_\_. **The sustainable development goals report: 2020**. Nova York: UN, 2020. 64 p. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2020.pdf>. Acesso em: 15 set. 2020.

\_\_\_\_\_. **The sustainable development goals report: 2021**. New York: UN, 2021. 64 p. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2021/> . Acesso em: 17 jun. 2023.

UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA (UNIVAP). **Proposta: observatório da região do Vale do Paraíba**. Disponível em: <https://www.observatoriodovale.net.br/municipios>. Acesso em: 5 nov. 2023.

WATANABE, M.; SUZUKI, T.; O'ISHI, R.; KOMURO, Y.; WATANABE, S.; EMORI, S.; TAKEMURA, T.; CHIKIRA, M.; OGURA, T.; SEKIGUCHI, M.; TAKATA, K.; YAMAZAKI, D.; YOKOHATA, T.; NOZAWA, T.; HASUMI, H.; TATEBE, H.; KIMOTO, M. Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312-6335, 2010.

WICHELNS, D. The water-energy-food nexus: is the increasing attention warranted, from either a research or policy perspective? **Environmental Science and Policy**, v. 69, p. 113-123, 2017.

ZAMBON, R. C. A operação dos reservatórios e o planejamento da operação hidrotérmica do Sistema Interligado Nacional. **Revista USP**, n. 104, p.133-144, 2015.

ZHONG, H.; FENG, K.; SUN, L.; TIAN, Z.; FISCHER, G.; CHENG, L.; MUNOZ CASTILLO, R. Water-land tradeoffs to meet future demands for sugar crops in Latin America and the Caribbean: a bio-physical and socio-economic nexus perspective. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 169, 2021.