



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

MARX VINICIUS MACIEL DA SILVA

**NEXO: CLIMA, ÁGUA, ENERGIA E ALIMENTO NA BACIA DO RIO SÃO
FRANCISCO, BRASIL**

FORTALEZA – CEARÁ

2024

MARX VINICIUS MACIEL DA SILVA

NEXO: CLIMA, ÁGUA, ENERGIA E ALIMENTO NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO,
BRASIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira.

FORTALEZA – CEARÁ

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S581n Silva, Marx Vinicius Maciel.
Nexo: Clima, Água, Energia e Alimento na Bacia do rio São Francisco, Brasil/
Marx Vinicius Maciel Silva. – 2024.
171 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira.

1. Mudanças Climáticas. 2. Demandas conflitantes. 3. Geração de Energia Hidrelétrica. 4. Reservatórios do rio São Francisco. I. Título.

CDD 627

MARX VINICIUS MACIEL DA SILVA

NEXO: CLIMA, ÁGUA, ENERGIA E ALIMENTO NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO,
BRASIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará-UFC

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto
Universidade Federal do Ceará-UFC

Prof. Dr. Alexandre Cunha Costa
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira-UNILAB

Prof. Dr. Rubens Sonsol Gondim
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA

Prof. Dr. Samuelson Lopes Cabral
Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais-CEMADEN

À minha avó Ana Bernardo Maciel (*in
memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde, força e perseverança que me concedeu, pois sem ele nada do que foi feito se faria;

Aos meus pais, Marcos Vinicius Sousa da Silva e Maria do Socorro Bernardo Maciel, pela formação e força que me deram para ir de encontro aos meus sonhos;

À minha esposa Fiana Ferreira Fernandes, por estar sempre ao meu lado, me ajudando a seguir em frente;

Ao meu irmão Maikon Maciel da Silva, por acreditar no meu êxito, me dando forças para continuar;

Ao meu orientador Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira, pela grande orientação acadêmica, credibilidade, confiança e paciência. Tendo sido, por várias vezes, um grande amigo e conselheiro. Por isso, e por muito mais, se tornou para mim um exemplo de profissional e pessoa íntegra;

Aos amigos e companheiros de laboratório que me ajudaram neste percurso, incentivando, colaborando e participando. A estes com muito carinho agradeço: Greicy Kelly da Silva, Carlos Eduardo Sousa Lima e Mauro Ricardo Roxo Nóbrega;

Aos excelentes professores que contribuíram para a minha formação acadêmica durante o Doutorado: Prof. Dr. Francisco de Assis Sousa Filho, Prof^ª. Dra. Ticiane Marinho de Carvalho Studart, Prof^ª. Dra. Marisete Dantas de Aquino, Prof^ª. Dra. Samiria Maria Oliveira da Silva e Prof. Dr. John Kenedy de Araújo dentre outros;

Às Secretarias Shirley Gomes e Edineuza Firmino pela grande ajuda nesses anos;

A Universidade Federal do Ceará, por intermédio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela oportunidade de realizar este curso;

A Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pelo apoio financeiro para a consecução do projeto de Doutorado.

“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina.”

(Cora Coralina)

RESUMO

As mudanças climáticas e as mudanças antrópicas do uso e cobertura do solo (UCS) nas próximas décadas podem intensificar eventos extremos climáticos e hidrológicos. Somados ao possível aumento das demandas por água, essas mudanças podem exercer grande pressão sobre hidrossistemas, influenciando, assim, a geração de energia hidrelétrica. Para avaliar essa suposição, foi proposto neste estudo investigar os efeitos de um conjunto de cenários de mudanças climáticas, do UCS e do consumo de água na geração de energia hidrelétrica nos principais reservatórios da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF), Brasil. A metodologia incorporou: i) a análise da influência dos padrões de variabilidade de baixa frequência; ii) a análise do aumento das demandas consuntivas na geração de energia hidrelétrica dos reservatórios da BHSF; iii) a modelagem hidrológica concentrada para a geração de vazões e energia hidrelétrica futura com conjunto de cenários propostos; e iv) a modelagem hidrológica distribuída, com a calibração e validação do modelo em diferentes períodos com mudanças antrópicas do uso e cobertura do solo. Os resultados mostraram que a variabilidade de baixa frequência associado com os padrões de secas e cheias a longo prazo possuem um padrão associados com fenômenos da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e da Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA) e somadas com o aumento das demandas consuntivas causam impacto significativo na geração de energia hidrelétrica. A conjunção de cenários de mudanças climáticas e demandas consuntivas indicou redução significativa na disponibilidade de água, aumento das falhas de atendimento, e redução na geração de energia hidrelétrica. Especialmente na hidrelétrica de Sobradinho, a redução variou de -30% a -50% no período de 2021 a 2050 em comparação com o período histórico (1971 a 2000). Os cenários de alteração do UCS (2000 e 2018) indicaram redução da vazão, pois caso o UCS (2000) tivesse permanecido inalterado e a vegetação natural tivesse sido mantida, a magnitude da vazão seria maior do que no cenário atual.

Palavras-chaves: mudanças climáticas; demandas conflitantes; geração de energia hidrelétrica; reservatórios do rio São Francisco.

ABSTRACT

Climate change and anthropogenic changes in land use and land cover (UCS) in the coming decades may intensify extreme climatic and hydrological events. Added to the possible increase in demands for water, these changes can put great pressure on hydrosystems, thus influencing the generation of hydroelectric energy. To evaluate this assumption, this study proposed to investigate the effects of a set of climate change scenarios, UCS and water consumption on hydroelectric power generation in the main reservoirs of the São Francisco River Basin (BHSF), Brazil. The methodology incorporated: i) analysis of the influence of low-frequency variability patterns; ii) analysis of the increase in consumptive demands in the generation of hydroelectric energy from BHSF reservoirs; iii) concentrated hydrological modeling for the generation of flows and future hydroelectric energy with a set of proposed scenarios; and iv) distributed hydrological modeling, with calibration and validation of the model in different periods with anthropogenic changes in land use and cover. The results showed that the low-frequency variability associated with long-term drought and flood patterns have a pattern associated with the Pacific Decadal Oscillation (PDO) and Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) phenomena and added to increased demands consumptive energy causes a significant impact on hydroelectric power generation. The combination of climate change scenarios and consumptive demands indicated a significant reduction in water availability, an increase in service failures, and a reduction in hydroelectric energy generation. Especially at the Sobradinho hydroelectric plant, the reduction varied from -30% to -50% in the period from 2021 to 2050 compared to the historical period (1971 to 2000). The UCS change scenarios (2000 and 2018) indicated a reduction in flow, because if the UCS (2000) had remained unchanged and natural vegetation had been maintained, the magnitude of the flow would have been greater than in the current scenario.

Key-words: climate change; conflicting demands; hydroelectric generation; São Francisco river reservoirs.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação simplificada da Circulação da Célula de Walker durante o El Niño para o verão austral.....	29
Figura 2 – Representação simplificada da Circulação da Célula de Walker durante o La Niña para o verão austral.....	29
Figura 3 – Fases da ODP no Oceano Pacífico: a) Fase positiva e b) Fase negativa.....	30
Figura 4 - Oscilações da Temperatura da Superfície do Mar para as regiões dos índices climáticos do ENOS, ODP e OMA.	31
Figura 5 - Correlação de Pearson entre os índices climáticos da ODP e OMA e a TSM global, destaque em verde para as regiões de cada índice. Período de 1931 a 2020.....	32
Figura 6 - Mudança efetiva na forçante radiativa no período de 1750 a 2019.....	34
Figura 7 - Mudança média global antropogênica da temperatura e mudanças futuras nos seis cenários ilustrativos do SRES, usando um modelo climático simples ajustado para sete AOGCM.	36
Figura 8 - os avanços alcançados na resolução espacial dos modelos climáticos das primeiras quatro Avaliações do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.....	36
Figura 9 - Ciclo de vida dos eventos El Niño (esquerda) e La Niña (direita) em observações (preto) e simulações históricas do CMIP5 (azul; estendido com RCP4.5) e CMIP6 (vermelho).	39
Figura 10 - Avaliação da ODP através das anomalias da TSM (°C) para o período de 1900–2014 com os dados: (a) ERSST versão 5 (Observado) e (b) CMIP6 (média dos modelos), (c) Diagrama de Tayler; (d) Autocorrelação e (e) Desvio Padrão.	40
Figura 11 - Avaliação da OMA através das anomalias da TSM (°C) para o período de 1900–2014 com os dados: (a) ERSST versão 5 (Observado) e (b) CMIP6 (média dos modelos), (c) Diagrama de Tayler; (d) Autocorrelação e (e) Desvio Padrão.	41
Figura 12 - Total de artigos publicado utilizando o modelo SWAT no período de 01 de janeiro de 1993 a 6 de outubro de 2023.....	44
Figura 13 - Fluxograma das etapas metodológicas.	47
Figura 14 - Localização da área de estudo com a rede utilizada na operação do hidrossistema.	49
Figura 15 - Precipitação média anual (a), ETP média anual (b) e Índice de Aridez (IA) no período de 1931 a 2020 espacializada sobre a BHSF.....	50

Figura 16 - Energia elétrica gerada pela região Nordeste do Brasil no período de 1999 a 2018.	51
Figura 17 - Localização da Bacia Hidrográfica do rio Grande (BHG).	52
Figura 18 - Mapa com os postos pluviométricos da ANA e os pontos de grade do CFSR.....	54
Figura 19 - Mapas com a classificação dos Usos e Cobertura do solo para a área de estudo para os anos: a) 2000, b) 2010 e c) 2018.....	57
Figura 20 - Mapa com a classificação dos tipos de solo para a área de estudo.....	59
Figura 21 - Diferença de fase e sua interpretação.	68
Figura 22 - Ilustração da rede utilizada no SIGA® para operação do hidrossistema da BHSF.	72
Figura 23 - Esquema de funcionamento do modelo SMAP mensal.....	76
Figura 24 - Teste de changepoints aplicado nos índices climáticos da OMA e ODP anuais no período de 1931 a 2020.	86
Figura 25 - Tendência de acordo com o teste de Mann-Kendall Sen das séries temporais padronizadas das variáveis de ETP: (a) média, (b) mínima e (c) máxima anual; da vazão: (d) média, (e) mínima e (f) máxima anual; e Precipitação: (g) média e (h) máxima anual.	88
Figura 26 - Tendência das séries temporais de acordo com o teste de Mann-Kendall Sen. As linhas tracejadas em preto representam a tendência.....	90
Figura 27 - SPEI12, SPI12 e SRI12 dos reservatórios de: (a) Sobradinho; (b) Itaparica; (c) Três Marias; e (d) Retiro Baixo para o período de 1931 a 2020.	92
Figura 28 - Frequência percentual do período de seca, segundo o SPI12 para as fases conjuntas e individuais da OMA e ODP.....	93
Figura 29 - Frequência percentual do período de seca, segundo o SPEI12 para as fases conjuntas e individuais da OMA e ODP.....	94
Figura 30 - Intensidade do período de seca, segundo o SPI12 para as fases conjuntas e individuais da OMA e ODP.	95
Figura 31 - Intensidade do período de seca, segundo o SPEI12 para as fases conjuntas e individuais da OMA e ODP.	96
Figura 32 - Potência média das TO das séries temporais de precipitações, vazões e dos índices OMA, ODP e Niño 3.4.	97
Figura 33 - Variância explicada pela banda de alta frequência (1 a 8 anos), média frequência (9 a 39 anos) e baixa frequência (mais de 40 anos).	98
Figura 34 – TC entre os índices climáticos (Niño 3.4, OMA e ODP) e a precipitação. Período de 1931 a 2020.....	99

Figura 35 - TC entre os índices climáticos (Niño 3.4, OMA e ODP) e a vazão. Período de 1931 a 2020.	100
Figura 36 - TR Gumbel com janela de 20 anos para o TR1000 e para o TR10.000 da precipitação das bacias: a) Sobradinho, b) Itaparica, c) Três Marias e d) Retiro Baixo. Período de 1931 a 2020.	101
Figura 37 - TR Gumbel com janela de 20 anos para o TR1000 e para o TR10.000 das vazões dos reservatórios: a) Sobradinho, b) Itaparica, c) Três Marias e d) Retiro Baixo. Período de 1931 a 2020.	102
Figura 38 - Resultado da CP para as vazões naturalizadas de (a) Sobradinho, (b) Itaparica, (c) Três Marias e d) Retiro Baixo para o período da OMA+ (1964 a 1994), OMA- (1995 a 2019) e para a série total (1931-2019).	103
Figura 39 - Resultado da CP para as vazões naturalizadas de (a) Sobradinho, (b) Itaparica, (c) Três Marias e d) Retiro Baixo para o período da OMA+/ODP+ (1931 a 1943); OMA-/ODP- (1964 a 1975); OMA-/ODP+ (1976 a 1994); e OMA+/ODP- (1999 a 2013).	104
Figura 40 - Anomalia percentual da Q90 para o período da OMA- (1964 a 1994), OMA+ (1995 a 2019); OMA+/ODP+ (1931 a 1943); OMA-/ODP- (1964 a 1975); OMA-/ODP+(1976 a 1994); e OMA+/ODP- (1999 a 2013) em relação ao período total da série 1931 a 2020.	105
Figura 41 - Demandas consuntivas de irrigação, consumo humano e indústria para os reservatórios de (a) Sobradinho; (b) Itaparica; (c) Três Marias; e (d) Retiro Baixo.	107
Figura 42 - Validação das estimativas das Energias dos reservatórios das usinas hidrelétricas de (a) Itaparica, (b) Sobradinho e (c) Três Marias para o período de 1999 a 2016 com o software SIGA®.	108
Figura 43 - Anomalia percentual da geração de energia para o período da OMA+ (1964 a 1994), OMA- (1995 a 2019); OMA-/ODP- (1964 a 1975); OMA-/ODP+(1976 a 1994); e OMA+/ODP- (1995 a 2013) em relação ao período total da série 1964 a 2020.	109
Figura 44 - Resultados da etapa de calibração (1996 a 2005) e validação (2006 a 2017) das vazões simuladas.	111
Figura 45 - Resultados da etapa de calibração (1996 a 2001) e validação (2002 a 2005) das vazões simuladas com o modelo de Regressão Linear para (a) Queimado, (b) Moxotó, (c) Paulo Afonso e (d) Xingó.	112
Figura 46 - Resultados dos processos de calibração e validação do modelo SWAT para os diferentes períodos e sub-bacias.	114
Figura 47 - Sazonalidade dos modelos do CMIP6 (linhas coloridas) e sazonalidade observada (linha na cor preto).	116

Figura 48 - Diagrama de Taylor da média sazonal de precipitação dos modelos do CMIP6 no cenário historical tendo por referência os dados observados da ANA, ambos no período de 1901 a 2000.	117
Figura 49 - Demandas consuntivas históricas e cenários futuros (D1, D2, D3 e D4).....	118
Figura 50 - Anomalia percentual das variáveis de ETP, precipitação e vazão média anual dos modelos do CMIP6.....	120
Figura 51 - Anomalias percentual de precipitação dos modelos do CMIP6 sobre a BESF para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 no período de 2021 a 2050.....	121
Figura 52 - Anomalias percentual da TAS dos modelos do CMIP6 sobre a BESF para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 no período de 2021 a 2050.	122
Figura 53 - Razão entre a vazão: (a) Q90 do cenário futuro SSP2-4.5 (2021-2050 e 2051-2080) e a Q90 do período Historical (1901-2000) e (b) Q90 dos modelos do cenário futuro SSP5-8.5 (2021-2050 e 2051-2080) e a Q90 do período Historical (1971-2000).....	123
Figura 54 - Anomalia percentual anual das Energias das UH's de Itaparica, Sobradinho e Três Marias obtidas com o Software SIGA com as projeções das demandas consuntivas D1, D2, D3 e D4 com o cenário: a) SSP2-4.5 e b) SSP5-8.5 no período de 2021 a 2050.....	123
Figura 55 - Tendência, de acordo com o teste de Mann-Kendall Sen, da precipitação nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 dos modelos do CMIP6 para o período de 2006 a 2100.	125
Figura 56 - Tendência, de acordo com o teste de Mann-Kendall Sen, da TAS nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 dos modelos do CMIP6 para o período de 2006 a 2100.....	126
Figura 57 - Tendência, de acordo com o teste de Mann-Kendall para as precipitações padronizadas anual, referente aos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 do CMIP6 no período de 2017 a 2100.	127
Figura 58 - Tendência de acordo com o teste de Mann-Kendal Sen da Energia hidrelétrica anual padronizada, referente aos cenários: a) SSP2-4.5 e b) SSP5-8.5 para o período de 2021-2050. D1, D2, D3 e D4 são as projeções das demandas consuntivas.....	128
Figura 59 - IS percentual dos modelos do CMIP6 no período historical (1971 a 2000) e cenários de mudanças climáticas SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e cenários das projeções de demandas consuntivas D1, D2, D3 e D4 (2021 a 2050) para os reservatórios da BHSF.....	129
Figura 60 - Evolução do Uso e Cobertura do Solo da BHG espacialmente para os anos de 2000 (a) e para o ano de 2018 (b); e o diagrama de Sankey com a evolução percentual entre esses anos (c).	131
Figura 61 - Espectro de Potência da TO das séries temporais de precipitações e vazões.	152
Figura 62 - Espectro de Potência das ondeletas dos índices OMA, ODP e Niño 3.4.	152

Figura 63 - vazão: (a) Histograma de Itaparica; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.	153
Figura 64 - vazão: (a) Histograma de Sobradinho; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.	153
Figura 65 - vazão: (a) Histograma de Três Marias; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.	154
Figura 66 - vazão: (a) Histograma de Retiro Baixo; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.	154
Figura 67 - ETP: (a) Histograma de Itaparica; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.	155
Figura 68 - ETP: (a) Histograma de Sobradinho; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.	155
Figura 69 - ETP: (a) Histograma de Três Marias; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.	156
Figura 70 - ETP: (a) Histograma de Retiro Baixo; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.	156
Figura 71 - precipitação: (a) Histograma de Itaparica; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.	157
Figura 72 - precipitação: (a) Histograma de Sobradinho; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.	157
Figura 73 - precipitação: (a) Histograma de Três Marias; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.	158
Figura 74 - precipitação: (a) Histograma de Retiro Baixo; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.	158
Figura 75 - Índice de confiabilidade dos modelos do CMIP6 no período historical (1971 a 2000) e cenários de mudanças climáticas SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e nos cenários D1, D2, D3 e D4 das projeções de demandas consuntivas para os reservatórios da BHSF.	159
Figura 76 - Índice de Resiliência dos modelos do CMIP6 no período historical (1971 a 2000) e cenários de mudanças climáticas SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e nos cenários D1, D2, D3 e D4 das projeções de demandas consuntivas para os reservatórios da BHSF.	159
Figura 77 - Índice de Vulnerabilidade dos modelos do CMIP6 no período historical (1971 a 2000) e cenários de mudanças climáticas SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e nos cenários D1, D2, D3 e D4 das projeções de demandas consuntivas para os reservatórios da BHSF.	160
Figura 78 - CP das vazões para o período 1 (1985-2000) e Período 2 (2001-2014) nos cenários 1 e 2.	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Participação do estudo e diferenças para os demais trabalhos que tiveram como tema o Nexo água e energia.	45
Tabela 2 - Informações sobre os dados de entrada do modelo SWAT.....	53
Tabela 3 - Código, Classes e Descrição do Uso e Cobertura do Solo do IBGE.....	56
Tabela 4 - Associação entre os valores de SPI, SPEI e SRI e as categorias de umidade/seca.	64
Tabela 5 - Restrições Operativas à jusante dos reservatórios da BHSFE.	72
Tabela 6 - Classificação de prioridades para simulação do sistema de reservatórios.	73
Tabela 7 - Critérios utilizados como indicadores de performance da calibração e validação dos modelos hidrológicos.....	78
Tabela 8 - Inicializações e Parâmetros de calibração do modelo SMAP.	78
Tabela 9 - Modelos do CMIP6 com Instituições, países e citações.	85
Tabela 10 - Períodos das fases individuais dos índices climáticos da OMA e ODP obtidos através da análise de changepoint.....	86
Tabela 11 - Períodos analisados de acordo com as fases conjuntas dos índices climáticos da OMA e ODP obtidos através da análise de changepoint.....	87
Tabela 12 - Índices de Confiabilidade, Resiliência e Vulnerabilidade dos reservatórios de Retiro Baixo, Três Marias, Sobradinho e Itaparica, e para os EN e EL da transposição do rio São Francisco. Período de 1961 a 2016.....	108
Tabela 13 - Divisão das séries temporais para calibração e validação do modelo SWAT.....	113
Tabela 14 - Resultados dos processos de calibração e validação do modelo SWAT para os diferentes períodos e sub-bacias.	113
Tabela 15 - Taxa média de crescimento anual das demandas consuntivas.	118
Tabela 16 - Comparação da Q90 observada e simulada para os cenários 1 e 2.	132
Tabela 17 - Parâmetros do modelo SWAT que foram utilizados na calibração.....	138
Tabela 18 - Catálogo de métodos utilizados nos impactos das mudanças climáticas no conjunto de amostras de estudos Água-Energia, categorizados por Modelagem baseada em Física ...	164

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AS	América do Sul
BHSF	Bacia Hidrográfica do rio São Francisco
BHG	Bacia Hidrográfica do rio Grande
CP	Curva de Permanência
DP	Desvio Padrão
ENOS	<i>El Niño Oscilação Sul</i>
ENSO	<i>El Niño South Oscillation</i>
ETP	Evapotranspiração Potencial
ETS	<i>Exponential Smoothing</i>
ERSL	<i>Earth System Research Laboratory</i>
FO	Função Ondaleta Mãe
GL	Grau de Liberdade
GWS	<i>Global Wavelets Spectrum</i>
H _a	Hipótese alternativa
H ₀	Hipótese nula
HS	Hemisfério Sul
HN	Hemisfério Norte
IOS	Índice de Oscilação Sul
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
NCAR/DSS	<i>National Center for Atmospheric Research/Data Support Section</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NEB	Nordeste do Brasil e Região de Controle sobre o Nordeste do Brasil
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NINO3.4	Região de controle Niño 3.4
OAR	<i>Oceanic and Atmospheric Research</i>
ODP	Oscilação Decadal do Pacífico
OMA	Oscilação Multidecal do Atlântico
Q90	vazão que é superada em 90% do tempo
SMAP	<i>Soil Moisture Accounting Procedure</i>
SPI	<i>Standardized Precipitation Index</i>
SPEI	<i>Standardized Precipitation Evapotranspiration Index</i>
SRI	<i>Standardized Runoff Index</i>

ST	Série Temporal
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
TJF	Transformada Janelada de Fourier
TO	Transformada em Ondaletas na forma contínua
TSO	Transformada Simples em Ondaletas
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Objetivos.....	25
1.1.1	Objetivo Geral.....	25
1.1.2	Objetivo Específicos.....	26
1.2	Contribuição técnica-científica.....	26
2	REVISÃO DA LITERATURA	28
2.1	Variabilidade de baixa frequência	28
2.2	Mudanças climáticas.....	33
2.2.1	Mudanças climáticas e a interação oceano-atmosfera.....	38
2.3	Modelos hidrológicos	42
2.4	O nexso clima, água, energia e alimento.....	44
3	MATERIAL E MÉTODOS	47
3.1	Estratégia metodológica	47
3.2	Descrição da Área de Estudo.....	49
3.2.1	Sub-bacias.....	52
3.3	Dados utilizados	53
3.3.1	Dados de Precipitação	54
3.3.2	Dados de Vazão	55
3.3.3	Dados Meteorológicos.....	55
3.3.4	Uso e Cobertura do Solo.....	56
3.3.5	Modelo Digital de Elevação.....	58
3.3.6	Tipos de solo	58
3.3.7	Demandas Consuntivas	59
3.3.8	Índices Climáticos	60
3.4	Análise estatística	60
3.4.1	Teste de Tendência de Mann-Kendall Sen	61

3.4.2	SPI, SPEI e SRI	62
3.4.3	Período de Retorno Milenar e Deca Milenar	64
3.4.4	Análise de Change-point	65
3.4.5	Transformada de Ondeletas	66
3.4.6	Transformada de Coerência	67
3.4.7	Curva de Permanência e Q90	68
3.4.8	Cálculo das Anomalias Percentuais	68
3.4.9	Índices de Confiabilidade, Resiliência, Vulnerabilidade e Sustentabilidade	69
3.5	Modelo ETS e cenários de demandas consuntivas.....	70
3.6	O Sistema de Suporte à Decisão.....	71
3.7	Determinação da Produção de Energia nas Usinas Hidrelétricas.....	73
3.8	Modelagem hidrológica.....	76
3.8.1	SMAP	76
3.8.2	Modelo de Regressão Linear	78
3.8.3	Modelo SWAT	79
3.9	Mudanças Climáticas.....	84
3.9.1	Remoção de Viés	84
3.9.2	Coupled Model Intercomparison Project Phase 6	85
4	RESULTADOS	86
4.1	Análise histórica das variáveis climáticas, hidrológicos e energética	86
4.1.1	Índices Climáticos	86
4.1.2	Teste de Tendência	88
4.1.3	SPI, SPEI e SRI	91
4.1.4	Análise de TO, variância explicada e TC	96
4.1.5	Tempo de Retorno Milenar e Deca Milenar	101
4.1.6	Curva de Permanência e Q90	103
4.1.7	Demandas Consuntivas	106

4.1.8	Análise do índice de Desempenho.....	107
4.1.9	Análise Energética	108
4.2	Modelagem Hidrológica	110
4.2.1	Calibração e Validação do modelo SMAP.....	110
4.2.2	Calibração e Validação do modelo de Regressão Linear	111
4.2.3	Calibração e Validação do Modelo SWAT.....	112
4.3	Cenários de mudanças climáticas, hidrológicas e energéticas	115
4.3.1	Performance dos modelos do CMIP6.....	115
4.3.2	Projeções das Demandas Consuntivas	117
4.3.3	Anomalia Padronizada	119
4.3.4	Teste de Tendência.....	124
4.3.5	Análise do desempenho do Sistema Hídrico.....	129
4.4	Monitoramento do Uso e Cobertura do Solo.....	131
4.4.1	Análise da Q90	132
5	DISCUSSÃO	133
5.1	Análise histórica das variáveis climáticas, hidrológicas e energéticas.....	133
5.2	Modelagem hidrológica.....	133
5.3	Cenários de mudanças climáticas, hidrológicas e energética.....	135
5.4	Mudanças antrópicas do UCS	137
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	139
	REFERÊNCIAS	142
	APÊNDICE A	152
	APÊNDICE B.....	153
	APÊNDICE C	159
	APÊNDICE D	161
	ANEXO A – CATÁLOGO DO NEXO ÁGUA-ENERGIA	164

1 INTRODUÇÃO

Os eventos extremos, como secas severas, aumentaram globalmente nos últimos anos (IPCC, 2021). Esses eventos influenciam significativamente diversos setores, como produção de energia, agricultura, economia e sociedade. A geração de energia hidrelétrica é o recurso de energia renovável mais amplamente utilizado no mundo (Schaepli, 2015). Sua produção está conectada com as demandas de consumo para a produção de alimentos e abastecimento de água de cidades. Com a demanda crescente por água e as mudanças climáticas, pode-se aumentar a pressão na geração de energia hidrelétrica. Essa pressão, por sua vez, pode causar mudanças importantes na gestão da água, principalmente durante a ocorrência de secas prolongadas.

A Região Nordeste do Brasil (NEB) sofre com secas recorrentes e prolongadas, afetando diretamente a segurança hídrica, alimentar e energética da região. Desde o século XVIII houve oito eventos de seca que persistiram por mais de três anos (MARENGO *et al.*, 2020). No entanto, a recente seca plurianual de 2012–2018 (sete anos) foi a mais prolongada e severa (Marengo *et al.*, 2020; Pontes Filho *et al.*, 2020). Devido a essa convivência histórica com as secas, tanto o Governo Federal, quanto o Estadual, têm tomado medidas para mitigar o impacto desses eventos com a construção de reservatórios plurianuais e, posteriormente, cisternas, canais e programas sociais de atendimento às populações mais vulneráveis (Campos, 2015). O mais recente projeto concluído foi a de transferência de água do rio São Francisco para o semiárido nordestino, em uma área de cerca de 12 milhões de habitantes, que proporcionará água para diversos fins, como humano, animal, irrigação, piscicultura e camarão (Brasil, 2004).

O Rio São Francisco é um dos principais cursos d'água do Brasil, tendo grande importância social e econômica na região do NEB. Ele é responsável pelo abastecimento de água para o uso consuntivo, como consumo humano, irrigação, dessedentação de animais e indústria, além de usos não consuntivos, como navegação, pesca e, principalmente para a geração de energia elétrica através de hidrelétricas. O sistema hidrelétrico do rio São Francisco produz a maior parte da energia elétrica consumida pelo NEB, com capacidade instalada de 16.551 GWh por ano, o que equivale a 12% da produção total de eletricidade do país (ONS, 2019).

A transposição das águas do rio São Francisco poderá, por um outro lado, aumentar os conflitos existentes por água, especialmente durante eventos extremos de seca. Por exemplo, durante a seca de 2012-2018, o abastecimento de água para áreas urbanas foi priorizado,

seguindo a Lei federal nº. 9.433/1997 de recursos hídricos, bem como a produção de alimentos, em detrimento a geração de eletricidade (Jong *et al.*, 2018). Assim, durante esse período de seca, o NEB experimentou uma redução drástica na geração de energia hidrelétrica. Em novembro dos anos de 2015 e 2017, o volume de água nos reservatórios do Rio São Francisco caiu para apenas 5% da capacidade total em termos de energia armazenada, tendo sido o mais baixo desde que todas as barragens foram concluídas em 1994 (ONS, 2019).

Com a queda na geração de hidroeletricidade, optou-se por outras fontes de energia, as principais foram: a fóssil, que no ano de 2014 teve participação de 47% no total de eletricidade gerada na região; e a eólica, que passou de 2,2% no ano de 2011, para 45,3% no ano de 2017 (ONS, 2019). No que diz respeito a energia fóssil, este tipo de geração de eletricidade emite dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, atuando no favorecimento das mudanças climáticas, uma vez que intensificam o efeito estufa.

Além disso, a produção de energia hidrelétrica, muitas vezes considerada uma fonte de energia limpa e renovável e ambientalmente melhor em comparação com os combustíveis fósseis, também pode trazer danos ambientais aos ecossistemas. Pois neste tipo de geração as vazões dos rios são alteradas por meio de barragens, o que pode alterar ou diminuir os ecossistemas e a biodiversidade de uma região (Kuriqi *et al.*, 2020).

Outro problema enfrentado na Geração Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco (BHSF) diz respeito as mudanças antrópicas no Uso e Cobertura do Solo (UCS), pois tais mudanças tem impactado significativamente o processo hidrológico, como escoamento superficial, recarga de aquífero, infiltração e evapotranspiração (Lima *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2023).

O Brasil e os países em desenvolvimento econômico, possuem rápido crescimento populacional com grande dependência econômica associada a produção agrícola. Essa dependência, em muitos casos, traz consigo grandes perdas de florestas nativas para terras agrícolas, o que tem causado conflitos de oferta e demanda de água.

Segundo o IBGE (2022), através do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA), o Estado da Bahia é o maior produtor de grãos do NEB e o segundo maior do Brasil com área cultivada de 3,3 milhões de hectares (ha), principalmente soja, milho e algodão. Outro aspecto importante em discussão nesta região é o alto crescimento das áreas irrigáveis, passando de 9 pivôs centrais em 1985 para 1550 pivôs centrais em 2016 (ANA, 2017a).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), estabelecido pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e pela Organização

Meteorológica Mundial (OMM) em 1988, avalia os impactos associados às mudanças climáticas (IPCC, 2021). Desde a sua criação, o IPCC vem divulgando Relatórios de Avaliação (AR) sobre mudanças climáticas, divulgando diversos cenários de projeção utilizando diferentes Modelos Climáticos Globais (MCG - Modelo de Circulação Geral) baseados na emissão de Gases do Efeito Estufa (IPCC, 2021). Esses modelos seguem uma padronização entre os diversos Institutos que cooperam com o projeto, denominados de *Intercomparison Model Projects* (CMIP) vinculado ao *World Climate Research Programme* (WCRP), estando em sua sexta fase (CMIP6).

A sexta fase do projeto CMIP (CMIP6) começou recentemente a divulgar os primeiros resultados dos modelos. Essa fase traz avanços na modelagem de MCG e alterações consideradas nos cenários futuros (IPCC, 2021). Pois combina o desenvolvimento socioeconômico e tecnológico com cenários das forçantes radiativas associada baseados em dados atualizados sobre tendências de emissões (Eyring *et al.*, 2016; O’neill *et al.*, 2016).

Embora vários impactos das mudanças climáticas na Bacia do Rio São Francisco tenham sido relatados, os impactos na geração de hidroeletricidade devido ao clima futuro associado ao uso crescente do consumo raramente são abordados, especialmente usando os modelos CMIP6 mais recentes. O aumento da demanda de água nas próximas décadas, causado pelo crescimento populacional e de riqueza, aumento da demanda agrícola devido às altas temperaturas e a adição de novas demandas da transposição do São Francisco podem exercer pressão significativa sobre a geração de energia hidrelétrica do NEB.

Para confirmar avaliar essa suposição, foi proposto um conjunto de cenários para considerar as mudanças climáticas, do UCS e do crescimento da demanda de consumo de água. Foi avaliado como cada demanda pode aumentar e seu impacto na produção de hidroeletricidade usando vazões naturais afluentes futuras. Os resultados deste trabalho devem ajudar os tomadores de decisão a se prepararem melhor para cenários futuros e a reduzir os impactos das mudanças climáticas nonexo clima-água-alimento-energia.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o nexo existente entre clima, água e energia, com enfoque na Bacia Hidrográfica do rio São Francisco (BHSF), visando identificar os possíveis impactos

ocasionados do aumento da demanda por água, das modificações no UCS, e das mudanças climáticas na oferta hídrica e energética.

1.1.2 *Objetivo Específicos*

Para isso, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) analisar a variabilidade de baixa frequência, tendência e/ou mudanças abruptas das variáveis de precipitação, evapotranspiração potencial, vazões de rios, demandas consuntivas e energia hidrelétrica;
- b) desenvolver e aplicar modelagem hidrológica concentrada e distribuída que represente o ciclo hidrológico através do processo chuva-vazão;
- c) avaliar os impactos dos cenários das mudanças climáticas, das mudanças no UCS, e do aumento das demandas consuntivas nas vazões no desempenho dos reservatórios para atender aos usos múltiplos, incluindo a geração de energia hidrelétrica.

1.2 *Contribuição técnica-científica*

A GIRH, especialmente em períodos de escassez hídrica, é uma tarefa de extrema complexidade, pois cabe ao gestor tomar decisões sobre o uso da água, entre vários usuários, enquanto não há tanta disponibilidade hídrica. Tais decisões precisam atender múltiplos objetivos, e frequentemente seus impactos não podem ser previamente identificados (ANA, 2022). Para tomar essas decisões se faz necessário entender os problemas decisórios que, segundo a ANA (2022), podem ser classificados em três grandes níveis hierárquicos de planejamento, são eles: planejamento estratégico, planejamento e controle gerencial e controle operacional.

A GIRH, a nível de bacia hidrográfica, busca a implementação de projetos na gestão da irrigação e drenagem, na eficiência do uso da água e nas operações de cheias. Todavia, existe uma maior complexidade da gestão quando se trata de grandes bacias hidrográficas de usos múltiplos, como é o caso da BHSF, exigindo um maior planejamento estratégico em todos os setores.

O planejamento estratégico trata da política de longo prazo com horizonte temporal típico de até algumas décadas. Até hoje, a GIRH adota a hipótese da estacionariedade do clima, que considera que o futuro pode ser representado pelas estatísticas observadas no passado. Mas

com as mudanças climáticas, existe as alterações na intensidade, duração e frequência das chuvas, fazendo com que os dados do passado não possam ser suficientes para se trazer uma perspectiva do futuro. Além dos possíveis cenários das mudanças climáticas, as modificações do UCS e o aumento das demandas dos usos consuntivos e não consuntivos (em especial a geração hidrelétrica) da água nas próximas décadas devem ser considerados.

É nesse contexto que o presente estudo busca contribuir para o GIRH, pois através dos objetivos citados, responderá algumas questões a respeito do nexo água-clima-energia a nível de planejamento estratégico, são eles: (i) Qual a relação do nexo água-energia nas últimas décadas e como está sendo as medidas de resiliência e adaptação a variabilidade de baixa frequência? (ii) Quais os possíveis impactos dos cenários futuros das demandas crescentes e mudanças climáticas no regime de vazão dos principais reservatórios da BHSF? (iii) Quais os possíveis cenários futuros da geração de energia hidrelétrica com as demandas crescentes e mudanças climáticas? (iv) Qual o impacto das mudanças antrópicas do UCS no regime hidrológico das sub-bacias do rio São Francisco? (v) Será que as medidas de mitigação e adaptação associadas as mudanças no UCS serão suficientes?

Os resultados trazem um diagnóstico estratégico do nexo clima-água-alimento-energia na bacia hidrográfica nas últimas décadas e serve para entender o comportamento a longo prazo das variáveis hidrológicas e da geração de energia hidroelétrica relacionado com a variabilidade climática de baixa frequência e possíveis cenários nas próximas décadas. Esses resultados são inéditos, pois os estudos anteriores não consideram as demandas consuntivas crescentes e mudanças no UCS, juntamente com as mudanças climáticas, em bacias hidrográficas de alta complexidade de gestão.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O presente tópico traz o levantamento da literatura recente sobre a variabilidade de baixa frequência associado aos fenômenos atmosféricos que possuem influência sobre a região de estudo, os cenários de mudanças climáticas dos modelos climáticos utilizados nos relatórios do IPCC, a modelagem hidrológica aplicada em grandes bacias hidrográficas, o nexo água, clima e energia em grandes bacias aplicadas no mundo, em especial em bacias hidrográficas com usos múltiplos e conflitos associados.

2.1 Variabilidade de baixa frequência

Os eventos climáticos extremos de secas e cheias são originados pelo déficit e superabundância, respectivamente, de precipitação e é uma característica normal e periódica do clima (Brito *et al.*, 2018). A seca resulta em escassez hídrica com impactos negativos significativos nos ecossistemas, geração de energia, alimento e nas atividades socioeconômicas em diversas regiões do mundo (EINI *et al.*, 2019; GAO; CHEN; MEMON, 2023; JONG *et al.*, 2018; PONTES FILHO *et al.*, 2020; QIN *et al.*, 2020; SIDERIUS *et al.*, 2021; TEUTSCHBEIN *et al.*, 2023).

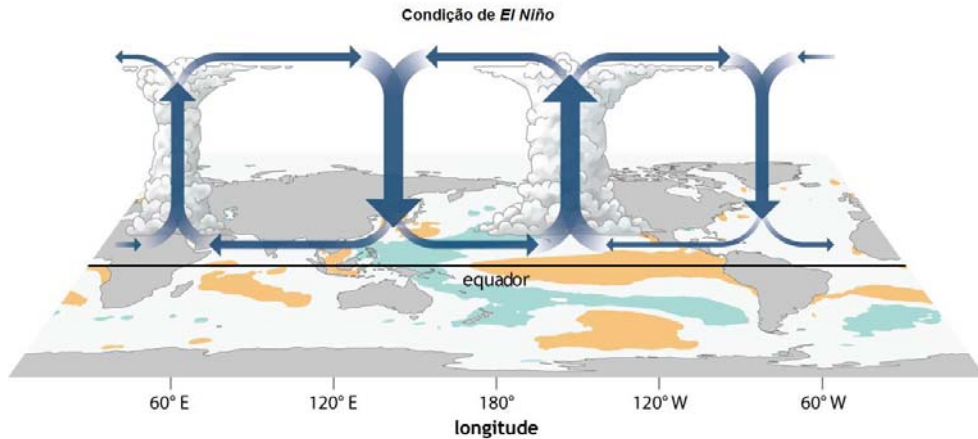
O semiárido do NEB é conhecido por sofrer com longos períodos de estiagem, como a que ocorreu no período de 2012 a 2018, além de possuir uma grande variabilidade temporal e espacial das chuvas (CUNHA *et al.*, 2019; MARENGO *et al.*, 2020; PONTES FILHO *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2021a).

Dentre os padrões de baixa frequência (decadal e multidecadal) que influenciam as chuvas sobre a América do Sul (AS), se destacam os fenômenos associadas as flutuações da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Oceano Pacífico: o *El Niño* Oscilação Sul (ENOS) e a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP); bem como as flutuações do TSM do Oceano Atlântico, no caso da Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA) (reboita *et al.*, 2021; rocha; souza filho; silva, 2019; rocha; souza filho, 2020; rolim; souza filho, 2020; souza; reboita, 2021).

O ENOS é um padrão climático recorrente caracterizado pela mudança da TSM do Oceano Pacífico Tropical que aquecem ou resfriam de 1°C a 3°C em comparação com a normal climatológica, durante períodos que variam de cerca de dois a sete anos (REBOITA *et al.*, 2021). Ele possui duas fases, denominadas de *El Niño* (EN) e *La Niña* (LN), onde o período de EN é caracterizado pela anomalia positiva da TSM sobre o Oceano Pacífico tropical,

enfraquecimento dos ventos alísios de Oeste e deslocamento da célula de Walker que força um ramo de ar descendente a posicionar-se sobre o Norte da América do Sul e especialmente sobre o NEB, suprimindo as chuvas nessa região (ver Figura 1).

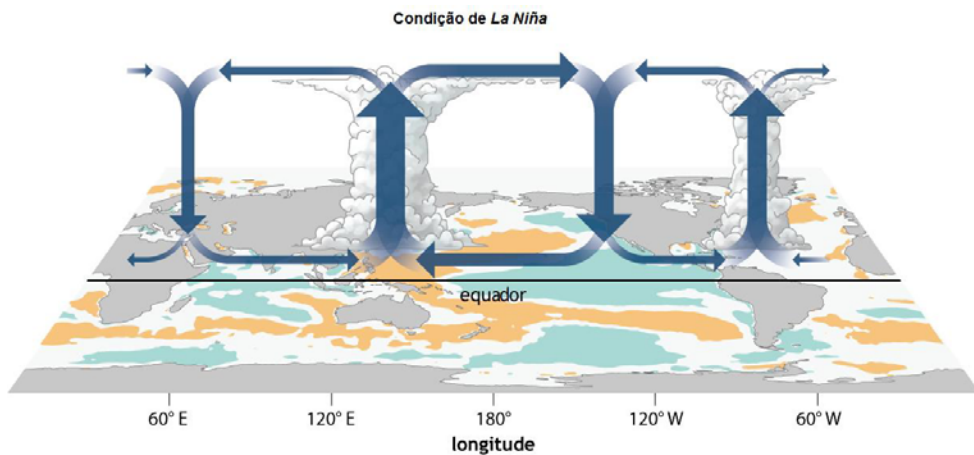
Figura 1 – Representação simplificada da Circulação da Célula de Walker durante o *El Niño* para o verão austral.



Fonte: Adaptado de NOAA (2016).

Na LN tem-se características opostas ao do EN, ou seja, com anomalias negativas da TSM no Oceano Pacífico tropical, intensificação dos ventos alísios de Oeste e intensificação do ramo ascendente da célula de circulação de Walker especialmente sobre o NEB (ver Figura 2), favorecendo as chuvas na região (Reboita *et al.*, 2021).

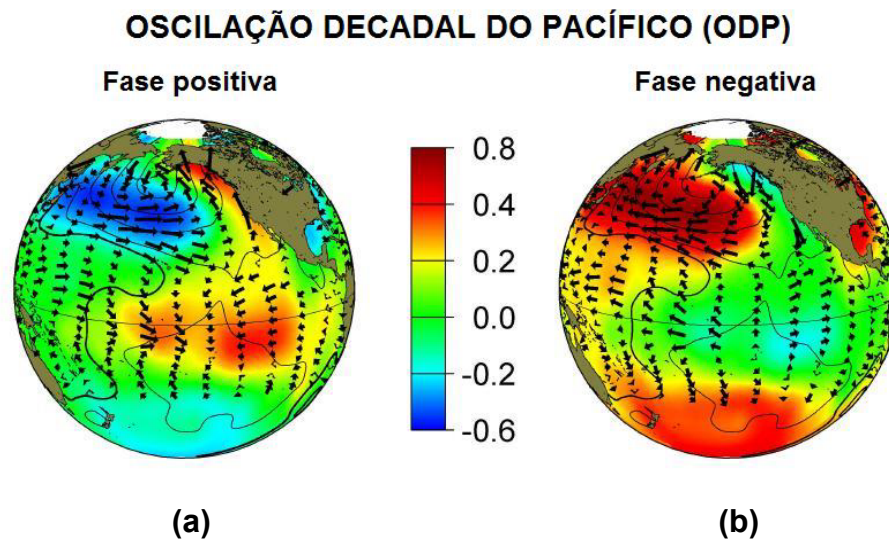
Figura 2 – Representação simplificada da Circulação da Célula de Walker durante o *La Niña* para o verão austral.



Fonte: Adaptado de NOAA (2016).

A ODP, por sua vez, é um fenômeno cíclico que se caracteriza por uma variabilidade da TSM sobre o Oceano Pacífico de menor frequência em relação ao ENOS, com período que varia de 20 a 30 anos em cada ciclo (Mantua *et al.*, 1997). Assim como no ENOS, ele possui duas fases: a fase positiva ou quente (ODP+, Figura 3a) e negativa ou fria (ODP-, Figura 3b) com as anomalias da TSM positivas e negativas, respectivamente, sobre o Oceano Pacífico (Mantua *et al.*, 1997).

Figura 3 – Fases da ODP no Oceano Pacífico: a) Fase positiva e b) Fase negativa



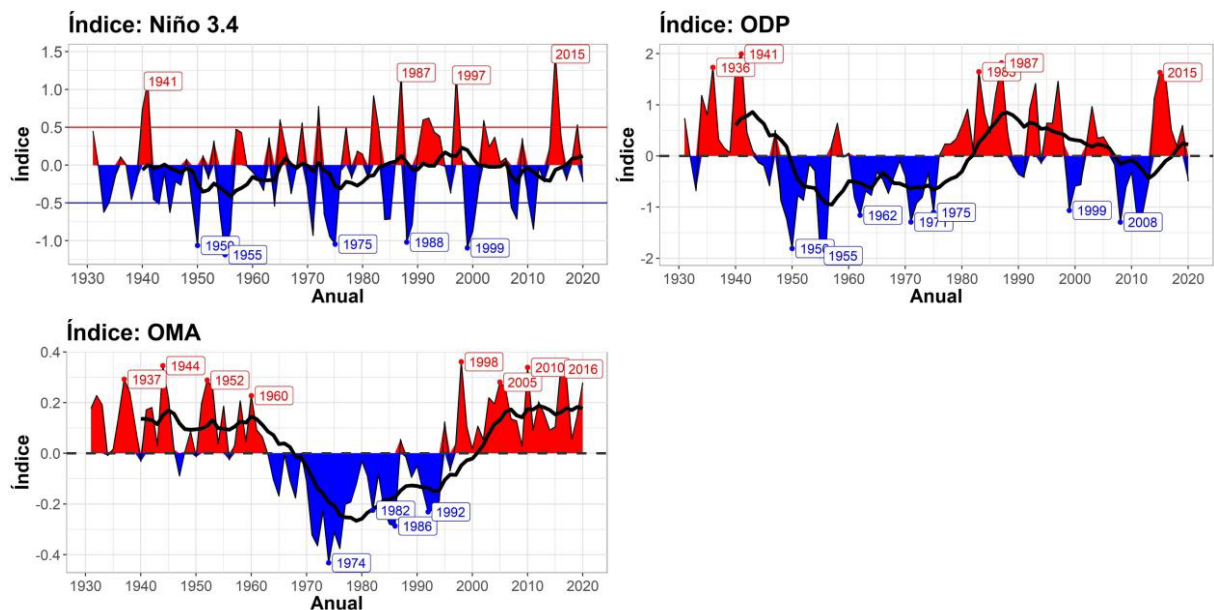
Fonte: Adaptado de Mantua (2015).

Durante a ODP+ existe a tendência de um maior número de episódios de EN, que são mais longos e intensos; e menor frequência de episódios de LN, que são mais fracos e curtos. Por outro lado, na ODP- tem-se o oposto, com a tendência de um maior número de episódios de LN longos e intensos; e menor frequência de episódios de EN, sendo estes mais fracos e curtos (CHAMPAGNE *et al.*, 2021).

A OMA é uma oscilação da TSM do Atlântico Norte com uma escala multidecadal em torno de 65 a 70 anos. A mesma, assim como os demais fenômenos atmosféricos supracitados, possui uma fase negativa ou fria (OMA-) e outra positiva ou quente (OMA+). A OMA+ é caracterizado pela TSM anômala positiva no Atlântico Norte e negativa no Atlântico Extratropical Sul, enquanto na fase OMA- tem-se o padrão similar de TSM, mas com os sinais invertidos, ou seja, com TSM anômala negativa no Atlântico Norte e positivo no Atlântico Extratropical Sul (Kucharski *et al.*, 2016).

Para o estudo da variabilidade climática, associado a fenômenos de baixa frequência, e a sua influência sobre a hidrologia da BHSF, são utilizados normalmente índices climáticos que medem a intensidade do ENOS, ODP e OMA (Figura 4).

Figura 4 - Oscilações da Temperatura da Superfície do Mar para as regiões dos índices climáticos do ENOS, ODP e OMA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O ENOS possui diversos índices que envolvem a TSM mediada em regiões do Oceano Pacífico Tropical: o Niño1+2, o Niño 3, o Niño 4 e o Niño 3.4 (REBOITA et al., 2021). Todavia, a maioria dos trabalhos, quando se referem aos eventos de ENOS canônicos – os que serão abordados neste estudo –, utilizam o índice Niño 3.4 (latitudes 5°N–5°S e longitudes 170°–120°W) para analisar a influência na precipitação e vazão na América do Sul, incluído o NEB (Reboita et al., 2021; Rocha; Souza Filho; Silva, 2019; Rocha; Souza Filho, 2020). A mesma é calculada mensalmente desde do período de 1870 a 2020 usando o conjunto de dados do *Hadley Centre Global Sea Ice and Sea Surface Temperature version 1* (HadISST1) e, neste estudo, utilizou a versão com a anomalia relacionado ao valor médio no período de 1981 a 2000 (Rayner et al., 2003).

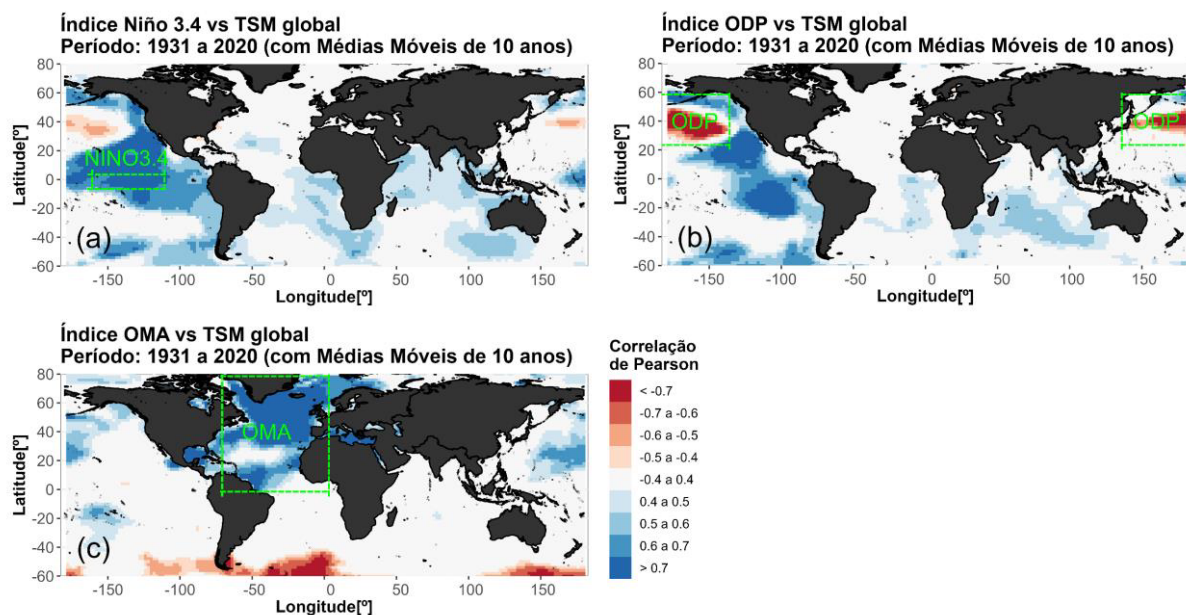
O índice da ODP é definido através da componente principal da variabilidade mensal da TSM no Oceano Pacífico Norte (na direção 20°N) (Mantua et al., 1997; Yuan Zhang; Wallace; Battisti, 1997). A ODP+ configura-se pela TSM mais fria do que o normal no oceano Pacífico Norte Central e Oeste, e mais quente do que o normal na Costa Oeste das Américas e

no Pacífico Tropical Central e Leste. A fase oposta, ou seja, a ODP– tem padrões com sinais invertidos de TSM (Mantua et al., 1997; Yuan Zhang; Wallace; Battisti, 1997).

O índice da OMA se baseia nas anomalias médias das TSM do Atlântico Norte de 0° a 80°N, com remoção do sinal de mudanças climáticas. A mesma é calculada utilizando os dados de TSM obtidos do *Kaplan Extended SST V2* (Enfield; Mestas-Nuñez; Trimble, 2001; Rayner et al., 2003).

A Figura 5 traz a correlação de Pearson entre os índices climáticos do Niño 3.4, ODP e OMA e a TSM obtidos do *Kaplan Extended SST V2*, com destaque em verde para as regiões de cada índice. Nessas regiões percebe-se valores mais acentuados da correlação de Pearson entre 20° e 60°N no Oceano Pacífico Norte com correlação negativa (Figura 5b) e correlação positiva no Oceano Atlântico Norte de 0° a 80°N e na região do Oceano Pacífico Equatorial entre 5°N e 5°S, conforme Figura 5c e 5a, respectivamente.

Figura 5 - Correlação de Pearson entre os índices climáticos da ODP e OMA e a TSM global, destaque em verde para as regiões de cada índice. Período de 1931 a 2020.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Estudos recentes analisaram a variabilidade das variáveis hidrológicas do sistema hídrico e associaram a padrões de variabilidade climáticas de média e baixa frequência dos fenômenos atmosféricos supracitados (Rocha; Souza Filho; Silva, 2019; Rocha; Souza Filho, 2020; Rolim; Souza Filho, 2020; Santos; Siqueira; Melo, 2016; Costa et al., 2021).

Rocha, Souza Filho e Silva (2019) analisaram a relação entre a precipitação média do reservatório Orós e os índices ODP e OMA utilizando, para tanto, a análise de *change points*

e a transformada de ondeletas. Os autores observaram que os fenômenos de ODP e OMA, quando ocorrem simultaneamente em fases positivas (negativas), resultam em valores abaixo (acima) de precipitação em relação com a média esperada. Rocha e Souza Filho (2020) mostraram que mudanças no valor médio da vazão também coincidiram com o deslocamento de fase dos índices de baixa frequência da OMA e da ODP.

Dentre os objetivos deste, assim como nos trabalhos supracitados, buscou analisar a influência dos padrões de variabilidade de baixa frequência associado as fases dos fenômenos da ODP e OMA em episódios de secas e cheias sobre os reservatórios de Sobradinho, Itaparica, Três Marias e Retiro Baixo, que são os principais reservatórios da BHSF. Com isso, busca prosseguir nos estudos anteriores, analisando fenômenos de maior frequência, como é o caso do ENOS, e os índices de seca e cheia extremas.

2.2 Mudanças climáticas

As mudanças climáticas são consideradas como uma variação significativa no estado médio do clima ou em sua variabilidade, que persiste ao longo do tempo na ordem de décadas (IPCC, 2022). Estas podem ocorrer através de forçantes associadas as mudanças antropogênicas ou processos naturais.

São exemplos de forçantes oriundas de processos naturais na escala de décadas as erupções vulcânicas (induzem resfriamento) e a variabilidade solar (ciclo de 11 anos associada as manchas solares e de 22 anos associado ao campo magnético) (IPCC, 2022). As forçantes associadas as mudanças induzidas pelo ser humano na composição da terra está relacionado principalmente pelo aumento da emissão de gases que intensificam o efeito estufa e mudanças no UCS substituindo a vegetação nativa que estocam carbono para pastagem, agricultura e entre outros que alteram o albedo absorvendo maior radiação solar.

Devido a seus efeitos imediatos em nível global e anual sobre o balanço radiativo, os impactos das manchas solares, das erupções vulcânicas e das mudanças antropogênicas são chamados de forçante radiativa (IPCC, 2022).

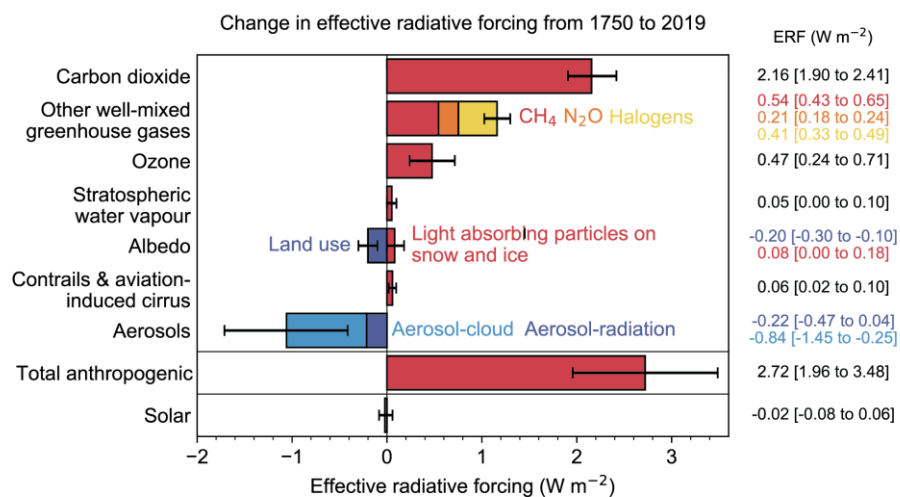
A magnitude da resposta da temperatura global a forçante depende dos feedbacks. Os feedbacks positivos amplificam a mudança da temperatura, enquanto os negativos reduzem. Um exemplo de feedback positivo é o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera (IPCC, 2023). Tal processo resulta em maior quantidade de radiação de ondas longas sendo remetida pela atmosfera para a superfície, causando mais evaporação e uma atmosfera mais quente, que pode conter mais vapor d'água. Sendo o vapor d'água um gás do efeito estufa,

causa ainda mais aquecimento. Uma parte da cobertura de neve da terra e parte do gelo marinho derreterá, reduzindo o albedo superficial planetário, causando mais aquecimento (IPCC, 2023).

Por outro lado, um exemplo de feedback negativo prevista para a mudança climática é o aumento de chuvas no Sahara e na zona de transição do Sahel, ao sul do deserto. Se isso pode provocar um aumento da vegetação natural, capturando CO₂ do ar e atuando, assim, como redutor do efeito estufa. O problema é que esse tipo de feedback negativo será provavelmente muito menor que os feedbacks positivos.

A Figura 6 traz a mudança na forçante radiativa efetivo (ERF) de 1750 a 2019, com contribuição de diferentes agentes forçantes: CO₂, outros gases de efeito estufa bem misturados, ozônio, vapor d'água estratosférico, albedo de superfície, rastros e cirros induzidos pela aviação, aerossóis, antropogênico total e solar.

Figura 6 - Mudança efetiva na forçante radiativa no período de 1750 a 2019.



Fonte: Adaptado de IPCC (2022).

As barras sólidas representam as melhores estimativas e os intervalos prováveis (5–95%) são dados por barras de erro. Os gases de efeito estufa (com exceção do CO₂) são ainda subdivididos em contribuições de metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e compostos halogenados. O albedo da superfície é dividido em mudanças no uso da terra e partículas que absorvem luz na neve e no gelo. Os aerossóis são divididos em contribuições de interações aerossol-nuvem e interações aerossol-irradiação.

Na Figura 6 é possível perceber que a mudança na forçante radiativa efetiva no período de 1750 a 2019 se deu principalmente por mudanças antrópicas, com a emissão de CO₂

sozinho sendo responsável por $2,16 \text{ W/m}^2$ e o total antrópico sendo responsável por $2,72 \text{ W/m}^2$, enquanto a solar foi responsável por somente $-0,02 \text{ W/m}^2$.

Segundo o IPCC (2021), a faixa provável de aquecimento induzido pelo homem na temperatura global do ar na superfície em 2010–2019 em relação a 1850–1900 é de $0,8^\circ\text{C}$ – $1,3^\circ\text{C}$, abrangendo o aquecimento observado de $0,9^\circ\text{C}$ – $1,2^\circ\text{C}$, enquanto a mudança atribuível a forçantes naturais é de apenas $-0,1^\circ\text{C}$ a $+0,1^\circ\text{C}$. A melhor estimativa do aquecimento induzido pelo homem é de $1,07^\circ\text{C}$. O aquecimento pode agora ser atribuído desde 1850-1900, em vez de desde 1951, como feito no AR5, graças a uma melhor compreensão das incertezas e porque o aquecimento observado é maior (IPCC, 2021).

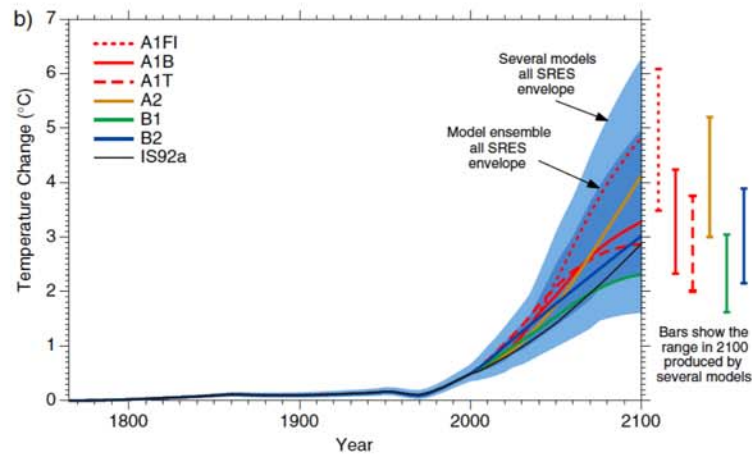
O IPCC é internacionalmente o principal órgão científico para as avaliações dos impactos associados com as mudanças do clima – tendo sido criado pelo Programa das Nações Unidas para o Ambiente (PNUA) e pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) em 1988 (IPCC, 2022). Desde a sua criação, o IPCC vem lançando Relatórios de Avaliação (AR - Assessment Report) sobre as mudanças climáticas, divulgando cenários de projeção (que inclui o cenário presente, cenários futuros, simulações de paleoclima e simulações idealizadas) – utilizando Modelos Climáticos Globais (GCM - *General Circulation Model*) – baseadas na GEE.

Nos primeiros relatórios do IPCC: FAR (1990), SAR (1995) e TAR (2001) as resoluções dos modelos eram grosseiras e apresentavam várias simplificações físicas. Os cenários futuros incluíam o aumento de 1% ao ano de CO_2 e experimentos para duplicação do CO_2 . No FAR (1990) os cenários de emissões incluíram *business-as-usual* (BAU) e três outros cenários (B, C e D) em que as emissões globais de gases de efeito estufa antrópico começaram a desacelerar no ano 2000. No ano de 2010, a concentração atmosférica de CO_2 na BAU projetada pelo FAR (1990) foi de aproximadamente 400 ppm e nos cenários B, C e D era de aproximadamente 380 ppm (IPCC, 2014). No ano de 1992, o IPCC publicou um relatório suplementar ao FAR (1990), que utilizava os cenários atualizados de emissões de gases de efeito estufa, denominados de IS92. O uso desses cenários também foi utilizado no SAR (1995/1996).

No TAR (2001) os cenários de emissões IS92 foram substituídos pelo *Special Report on Emission Scenarios* (SRES), embora o TAR (2001) também tenha usado os cenários IS92 para permitir comparações com as projeções na SRES, conforme Figura 7. Os cenários SRES simulavam rodadas com suposições sobre crescimento energético e populacionais para emissões do CO_2 , são eles: A1 (com três variantes: A1F1, A1T e A1B), A2, B1 e B2. Os três grupos de A1 se distinguem por sua ênfase tecnológica: intensivo em fósseis (A1FI), fonte de

energia não fóssil (A1T) ou um equilíbrio entre todas as fontes (A1B). O TAR (2001) do IPCC executou os vários cenários de emissões através de um modelo climático simples ajustado para sete *Atmosphere-Ocean General Circulation Models* (AOGCM).

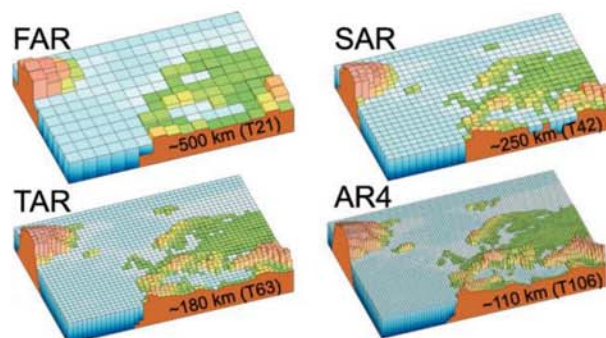
Figura 7 - Mudança média global antropogênica da temperatura e mudanças futuras nos seis cenários ilustrativos do SRES, usando um modelo climático simples ajustado para sete AOGCM.

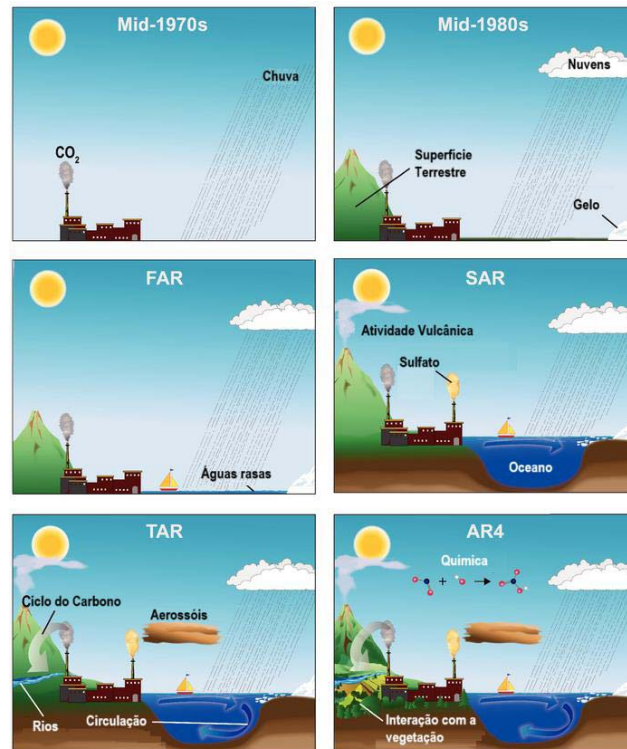


Fonte: Adaptado de TAR (2001).

No quarto relatório avaliação (AR4/2007) os cenários utilizados foram os mesmos do TAR (2001), mas os modelos melhoraram a resolução, incluíram a química da atmosfera e a interação com a vegetação. A Figura 8 ilustra os avanços alcançados na resolução espacial dos modelos climáticos das primeiras quatro Avaliações do IPCC. A resolução melhorou de cerca de 500 km em 1990 (FAR), para 110 km em 2007 (AR4).

Figura 8 - os avanços alcançados na resolução espacial dos modelos climáticos das primeiras quatro Avaliações do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.





Fonte: Adaptado de IPCC (2007).

No quinto relatório (AR5/2014) foi realizado projeções baseadas em cenários denominados *Representative Concentration Pathways* (RCP). Os RCP são conjuntos de projeções das componentes de forçantes radiativas de cunho antropogênico, utilizado como dados de entrada nos Modelos Climáticos Globais (GCM, do inglês *General Circulation Model*) para modelagem climática e química da atmosfera. Dito isso, os cenários para o final do século XXI são: RCP 3,0-PD (Peak and Decline), com pico na forçante radiativa em 3 W/m^2 em meados do século XXI que decai para 2.6 W/m^2 até 2100, sendo denominado também de RCP 2.6; RCP 4.5 com estabilização em 4.5 W/m^2 antes do final do século XXI; RCP 6,0 com estabilização em 6 W/m^2 após 2100; e RCP 8,5 com caminho crescente, atingindo $8,5 \text{ W/m}^2$ em 2100 e 12 W/m^2 após o século XXI.

No CMIP5 alguns modelos têm uma melhor resolução horizontal na atmosfera de cerca de 70 km, mas a média é de 200 km. Além disso, a resolução vertical também melhorou ao longo dos anos. Para o FAR havia uma única camada oceânica e de 10 a 15 camadas atmosféricas, enquanto os modelos do AR4 frequentemente incluíam 30 camadas nos oceanos e outras 30 na atmosfera. Os modelos CMIP5 no AR5 têm uma resolução vertical na atmosfera de 20 a 50 níveis.

Anomalias de precipitação entre -20% e 20% foram mostradas por Silveira *et al.* (2016) para a BHSF a cada 30 anos (2011 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2100), utilizando os

modelos do CMIP5. Essa incerteza em relação a precipitação, não é observado nas precipitações históricas, pois, de acordo com Jong *et al.* (2018), após analisar uma série temporal de chuvas de 57 anos, verificou que as chuvas já apresentam um declínio de mais de 25% em relação à média histórica de 1961 a 1990, ficando abaixo da média desde o ano de 1992.

Além da possível diminuição da precipitação média anual no NEB, esses trabalhos também mostraram aumento na temperatura de aproximadamente 4° a 5°C (Guimarães *et al.*, 2016; Jong *et al.*, 2018; Silveira *et al.*, 2013, 2016). Temperaturas mais altas e possível redução das chuvas, podem resultar em reduções nas vazões variando de 60% a 90% para o século 21 em comparação com o século 20 para várias bacias hidrográficas do NEB (Fernandes *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2020).

No ano de 2021 começou a ser publicado o sexto relatório de avaliação (AR6) do IPCC utilizando uma versão mais atualizada dos modelos do CMIP, o CMIP6 (IPCC, 2022). No AR6 foi utilizado o cenário *historical* (baseado nas observações históricas do clima presente) e cenários futuros que combinam desenvolvimento socioeconômico e tecnológico, denominados *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), com cenários futuros das forçantes radiativas, denominado de *Representative Concentration Pathways* (RCP) (Gidden *et al.*, 2019).

O SSP2 é denominado de cenário do “meio da estrada”, com crescimento populacional moderado, convergência mais lenta dos níveis de renda entre os países. No SSP5 espera-se um mundo com forte crescimento econômico com o uso de combustíveis fósseis e impactos potencialmente grandes das mudanças climáticas (Gidden *et al.*, 2019). Em relação ao RCP, o RCP 4.5 é o cenário de projeção que possui estabilização da forçante radiativa em 4,5 W/m² (antes do final do século XXI) e o RCP8,5 é o mais pessimista entre os cenários RCP, com caminho crescente atingindo 8,5 W/m² em 2100 (IPCC, 2022).

2.2.1 Mudanças climáticas e a interação oceano-atmosfera

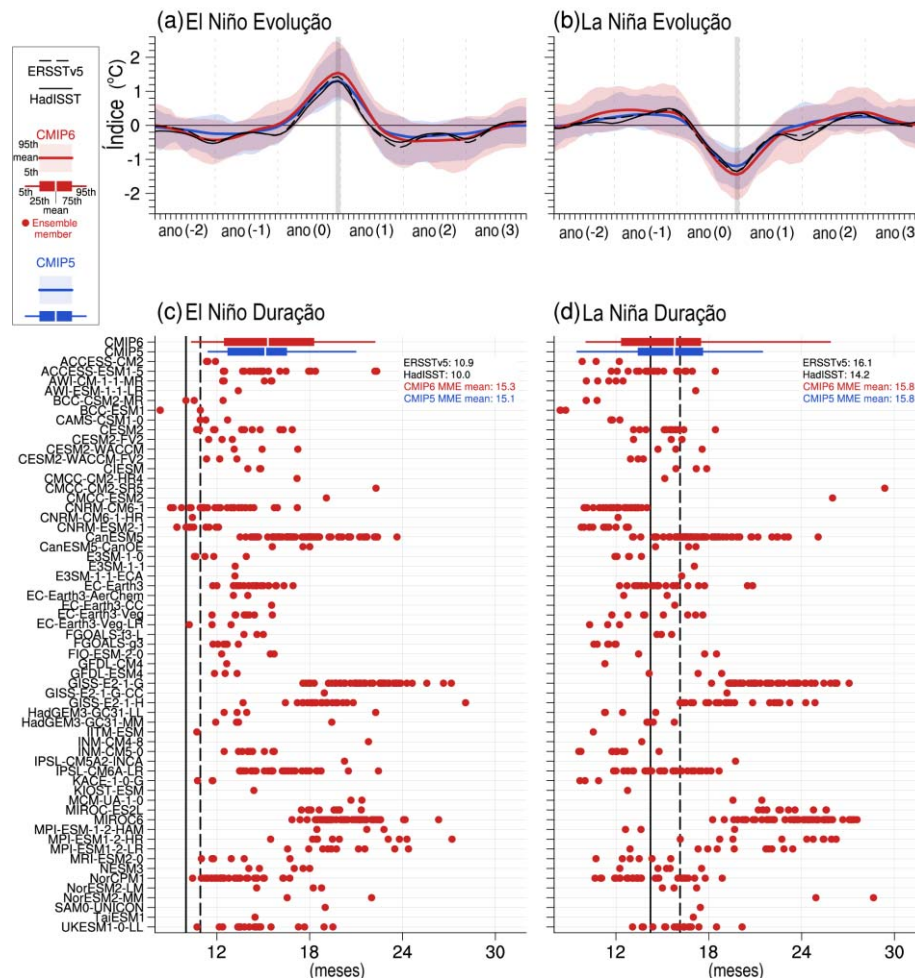
O desempenho dos modelos do CMIP6 em representar a circulação oceano-atmosfera é de grande importância para a representação realista da resposta climática ao aquecimento antropogênico, incluindo taxa de aquecimento global, aumento do nível do mar, absorção de carbono e a representação de modos acoplados de variabilidade climática (IPCC, 2023). Vale ressaltar que a região em que os modelos CMIP5 e CMIP6 estão sendo utilizados, respondem bem a representatividade do clima.

2.2.1.1 ENOS

Como mencionado no tópico anterior, a variabilidade climática de muitas regiões do mundo é determinada por fenômenos atmosféricos de escala global. O AR6 traz a análise do desempenho dos modelos do CMIP6 em representar esses fenômenos e compara esse desempenho com os modelos do CMIP5. Dentre os fenômenos atmosféricos globais, o ENOS, ODP e OMA são alguns dos fenômenos avaliados e que serão considerados nesta revisão da literatura por sua relevância no clima da região de estudo.

O fenômeno ENOS observado, que é medida pelo desvio padrão das anomalias de TSM na região Niño 3.4, juntamente com o ciclo de vida dos eventos, são ambos razoavelmente bem reproduzidos pela maioria dos modelos CMIP5 e CMIP6, conforme Figura 9.

Figura 9 - Ciclo de vida dos eventos El Niño (esquerda) e La Niña (direita) em observações (preto) e simulações históricas do CMIP5 (azul; estendido com RCP4.5) e CMIP6 (vermelho).



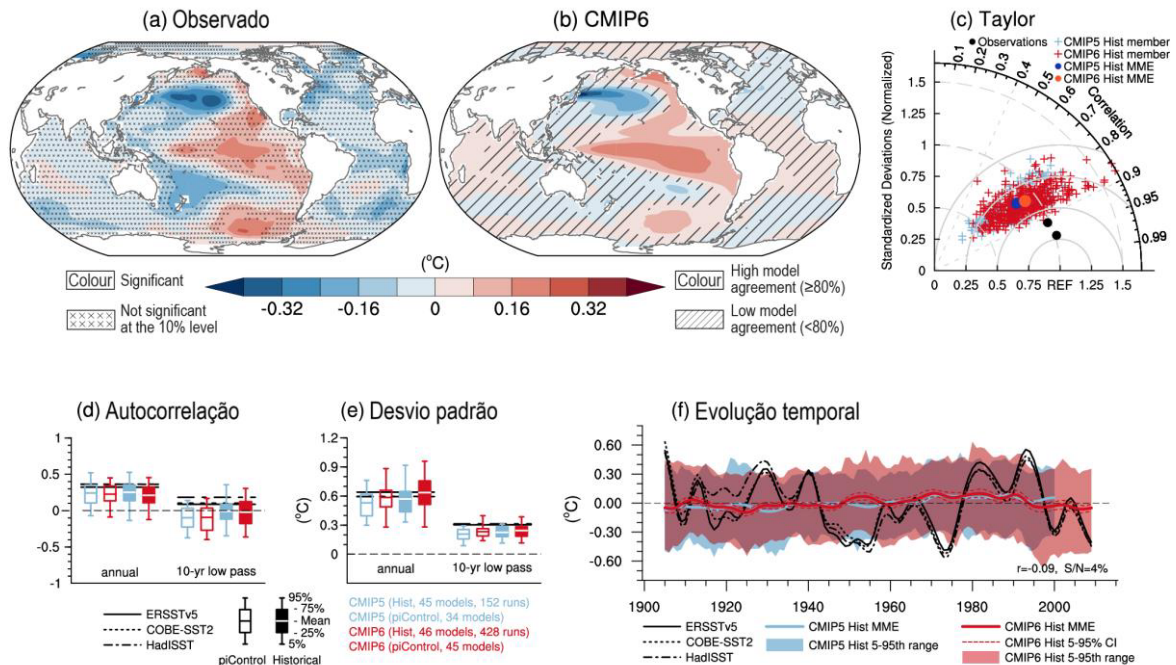
Fonte: Adaptado de IPCC (2023).

A amplitude média do ENOS dos modelos CMIP5 é ligeiramente inferior à observada, enquanto a amplitude média do ENOS dos modelos CMIP6 é ligeiramente superior à observada. A amplitude ENOS dos modelos individuais, no entanto, é altamente variável entre os modelos CMIP5 e CMIP6. Na Figura 9 também é possível perceber que os modelos CMIP5 e CMIP6 normalmente exibem eventos de *El Niño* com uma duração mais longa do que os observados. Por um outro lado, eventos de *La Niña* modelados possuem uma duração semelhante aos observados.

2.2.1.2 ODP

Estudos demonstraram que as características espaciais da ODP estão razoavelmente bem representadas em modelos climáticos não forçados (Henley, 2017; Newman; Shin; Alexander, 2011) e em simulações históricas no CMIP6 (ver Figura 10).

Figura 10 - Avaliação da ODP através das anomalias da TSM (°C) para o período de 1900–2014 com os dados: (a) ERSST versão 5 (Observado) e (b) CMIP6 (média dos modelos), (c) Diagrama de Taylor; (d) Autocorrelação e (e) Desvio Padrão.



Fonte: Adaptado de IPCC (2023).

Os modelos CMIP6 mostram, em média, uma reprodução ligeiramente melhorada da estrutura espacial da ODP do que os modelos CMIP5, conforme as Figuras 10a, 10b e 10c

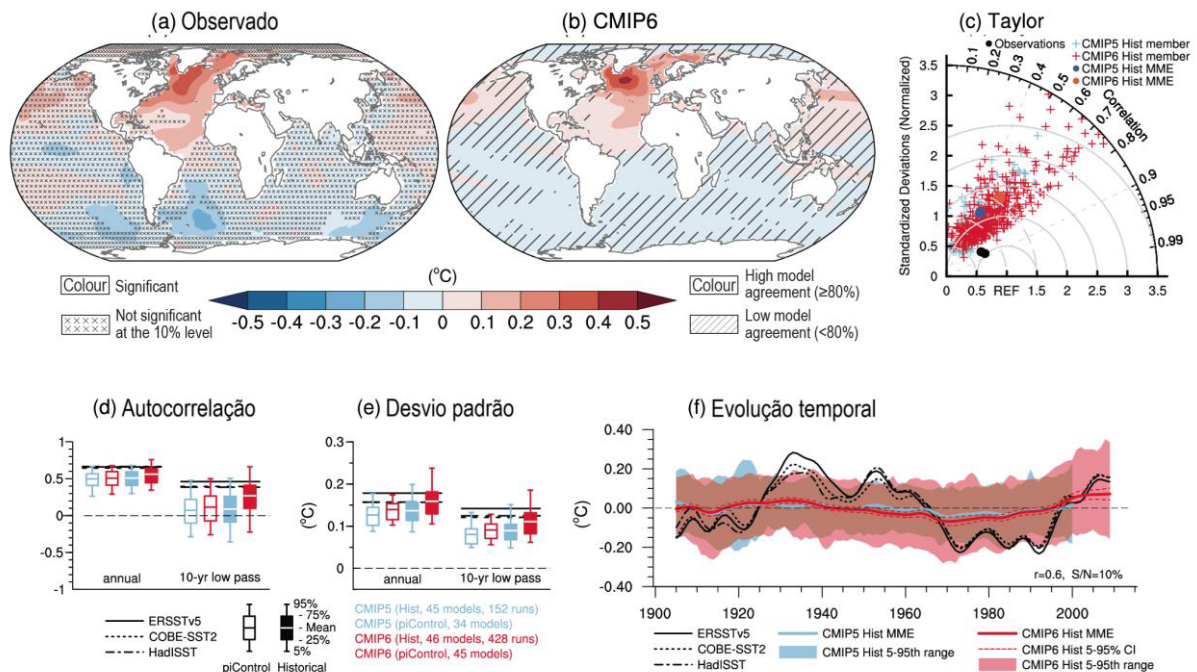
(ver também o estudo de Fasullo, Phillips e Deser, 2020). Por outro lado, as anomalias da TSM no subtropical do Pacífico Sul (próximo da Oceania) são, no entanto, muito fracas em relação a região equatorial e do Pacífico Norte (ver Figura 10a).

Segundo o IPCC (2023), em geral apesar das limitações das comparações modelo-observação, os modelos CMIP6, em média, simulam estruturas espaciais e magnitude amplamente realistas da ODP. A avaliação é dificultada por registros observacionais curtos, observações espaciais incompletas antes da era da observação por satélite e baixa concordância entre as reconstruções paleoclimáticas.

2.2.1.3 OMA

A Figura 11 traz a avaliação das anomalias da TSM espacial no período de 1900 a 2014 observada (Figura 11a) e representada pelos modelos do CMIP6 (Figura 11b) e o cálculo do índice (Figuras 11b, 11c, 11d e 11f) do fenômeno da OMA. Assim como na representação espacial do ODP (Figura 10a), os modelos do CMIP6 têm maior desempenho na porção mais a norte do Oceano Atlântico em detrimento a porção mais ao Sul.

Figura 11 - Avaliação da OMA através das anomalias da TSM (°C) para o período de 1900–2014 com os dados: (a) ERSST versão 5 (Observado) e (b) CMIP6 (média dos modelos), (c) Diagrama de Taylor; (d) Autocorrelação e (e) Desvio Padrão.



Fonte: Adaptado de IPCC (2023).

Segundo o IPCC (2023) os resultados dos modelos CMIP5 e CMIP6, juntamente com novas técnicas estatísticas para avaliar a componente forçada do OMA modelado e observado, fornecem evidências robustas de que as forçantes externas modularam a OMA ao longo do período histórico. Em particular, pensa-se que os aerossóis antropogênicos e vulcânicos tenham desempenhado um papel no momento e na intensidade da fase negativa (fria) do AMV registada de meados da década de 1960 a meados da década de 1990 e no aquecimento subsequente. No entanto, há baixa confiança na magnitude estimada da influência humana. O nível limitado de confiança é explicado principalmente pelas dificuldades em avaliar com precisão o desempenho do modelo na simulação da OMA, conforme Figura 11b, 11c, 11d e 11f. Além disso, a avaliação é severamente dificultada por registos instrumentais curtos, mas também, igualmente importante, pela falta de observações detalhadas e coerentes baseadas em processos de longo prazo que limitam a compreensão do processo (IPCC, 2023).

2.3 Modelos hidrológicos

Para a gestão dos recursos hídricos se faz necessário o entendimento do balanço hídrico e os impactos das mudanças climáticas e antrópicas sobre a quantidade e qualidade da água. Isso deve ser feito através do contínuo monitoramento no tempo e espaço das variáveis climáticas e hidrológicas. Todavia, esse monitoramento em muitos casos se torna inviável, pois demanda um alto custo e, na maioria dos casos, não abrange boa parte da bacia hidrográfica. Para suprir essa questão a modelagem hidrológica surgiu como uma ferramenta importante.

Para a simulação de vazões, segundo Brighenti, Bonumá e Chaffe (2016), os modelos hidrológicos que se destacam são o TOPMODEL (*Topography-based hydrological Model*), VIC (*Variable Infiltration Capacity*), HBV (*Power Brazil Hydro*), MIKE SHE (*Système Hydrologique Européen*), SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) e modelos criados no Brasil como o pacote MGB-IPH (Modelos de Grandes Bacias).

Além desses modelos, o modelo concentrado, determinístico e de base conceitual do tipo chuva-vazão SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) desenvolvido por Lopes, Braga e Conejo (1982) é amplamente utilizado, possuindo versões para intervalos horários, diários e mensais. Dentre os seus usuários, a maioria cita a sua escolha ao seu bom desempenho e, principalmente, devido ao pequeno número de parâmetros, a pequena quantidade de dados observados necessários e a baixa demanda computacional para sua simulação, além de

apresentar resultados satisfatórios (Andrade *et al.*, 2021; Fernandes *et al.*, 2017; Maciel *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2020, 2021b; Silveira; Souza Filho; Vasconcelos Júnior, 2017).

Dentre esses estudos, o trabalho de Silveira, Souza Filho e Vasconcelos Júnior (2017) utilizaram o modelo SMAP para projeção das vazões em 24 sub-bacias integrantes do Sistema Interligado Nacional (SIN) utilizando dados dos modelos climáticos do IPCC-AR5, considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

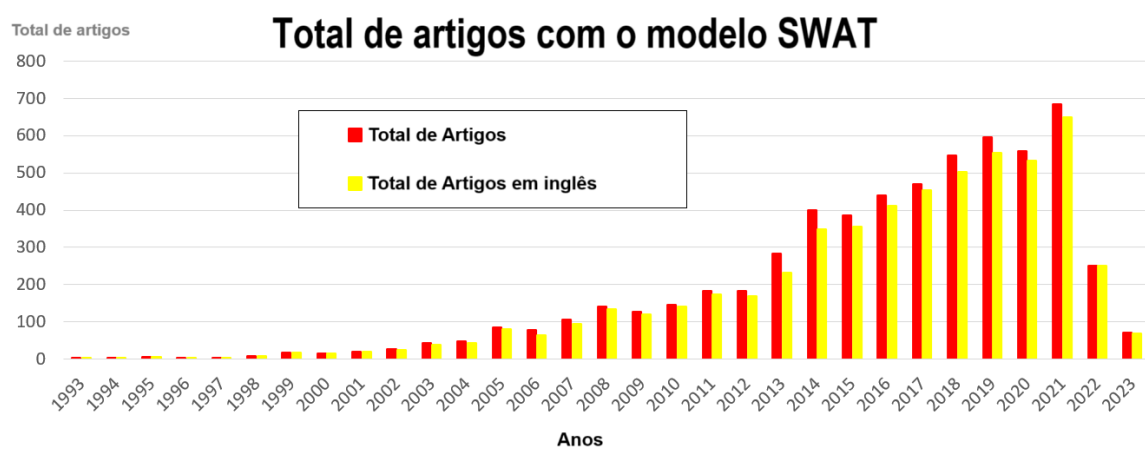
O trabalho de Silva *et al.* (2021b) analisou os possíveis impactos das mudanças climáticas nas projeções de vazões naturalizadas e Energia Natural Afluente (ENA) para o setor hidrelétrico brasileiro utilizando cinco modelos do CMIP6, baseado nos cenários SSP-4.5 e SSP-8.5 para o século XXI. Para isso, as vazões naturalizadas para as 24 estações SIN, assim como o trabalho de Silveira, Souza Filho e Vasconcelos Júnior (2017), foram estimadas através do modelo hidrológico concentrado SMAP. As vazões, bem como a produtividade dos reservatórios, foram utilizadas para calcular a ENA. Os resultados mostraram que a maioria dos modelos projetam possíveis reduções nas vazões naturalizadas anuais e na ENA para os três períodos analisados e para os setores Norte, Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste do Brasil. Entretanto, nos setores Norte e Sul, para o período 2070-2099, a maioria dos modelos indicou um aumento da precipitação, vazões naturalizadas e ENA. Os dois estudos, mesmo utilizando o modelo SMAP com períodos diferentes de calibração e validação conseguiram apresentar resultados satisfatórios para a mesma região de estudo, salvo pequenas mudanças nos parâmetros de calibração.

Além do modelo SMAP, optou-se pela escolha do modelo semi-distribuído orientado à processos SWAT, pois ele possibilita a modelagem de grandes e complexas bacias hidrográficas – como é o caso da região de estudo –, simulando os vários e distintos processos hidrológicos de forma distribuída e diferenciando os diferentes tipos e usos do solo espacialmente ao longo de grandes intervalos de tempo (Bressiani *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2023).

O modelo SWAT vem apresentando resultados satisfatórios em diversos trabalhos em várias regiões do globo nos últimos anos (Almeida; Pereira; Pinto, 2018; Bressiani *et al.*, 2015; Brighenti; Bonumá; Chaffe, 2016; Hasan; Wyseure, 2018; McGinn *et al.*, 2021; Qin *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2023). Brighenti, Bonumá e Chaffe (2016) identificou mais de 650 artigos publicados relatando o uso desse modelo. Particularmente para o Brasil, Bressiani *et al.* (2015), no período de 1999-2015, identificou mais de 100 trabalhos publicados. Desses estudos, 66% apresentaram resultados de calibração, mas somente 23% apresentaram resultados de validação para o modelo.

A Figura 12 traz o total de artigos publicados que utilizaram o modelo SWAT no período de 01 janeiro de 1993 até 6 de outubro de 2023. É possível observar que os artigos que utilizaram o modelo cresceram exponencialmente nos últimos anos, com uma queda no ano de 2020, crescendo novamente no ano seguinte, sendo o ano de 2021 com mais artigos publicados (próximo de 700 artigos no total) e voltando a decair nos próximos dois anos. Todavia, mesmo com a diminuição das publicações, no ano de 2023 foram publicados próximo de 100 artigos.

Figura 12 - Total de artigos publicado utilizando o modelo SWAT no período de 01 de janeiro de 1993 a 6 de outubro de 2023.



Fonte: Próprio autor. Fonte dos dados: https://www.card.iastate.edu/swat_articles/

Recentemente Silva *et al.* (2023) analisaram a calibração e validação do modelo SWAT em diferentes séries temporais de Uso e Cobertura do Solo (1990, 2000 e 2015), com a finalidade de avaliar os impactos dessas mudanças no regime de vazão da foz do Sítio Grande, um dos afluentes do rio São Francisco, localizado na região oeste da Bahia. Eles mostraram que o SWAT teve desempenho satisfatório em sua análise dos três períodos estudados em escala mensal. E que as áreas de todos os tipos de floresta do bioma Cerrado nesta sub-bacia foram reduzidas em 27,47% entre 1990 e 2015, enquanto as áreas agrícolas cresceram 192,48%. Além disso, houve redução considerável das vazões da bacia durante esse período.

2.4 O nexa clima, água, energia e alimento

Com o eminente impacto das mudanças climáticas nas próximas décadas, diversos estudos em diversas regiões no mundo têm se empenhado em explorar e avaliar o nexa Clima-Água-Energia-Alimentos através de várias abordagens. Esses diferentes métodos foram

investigados por Gao, Chen e Memon (2023) buscando responder os seguintes questionamentos: Quais são os métodos e ferramentas analíticas de última geração existentes para estudar Água-Energia-Alimentos sob as alterações climáticas? Quais são os mais amplamente utilizados? Quais são suas características e limitações? Qual é o foco da pesquisa relacionada em diferentes escalas e tópicos espaciais? Como os modelos devem ser selecionados de acordo com o tema de pesquisa e a escala espacial? Como é que a investigação relacionada considera os cenários das alterações climáticas? Quais são as perspectivas futuras?

Gao, Chen e Memon (2023) pesquisaram artigos de periódicos revisados por pares sobre o tema mudanças climáticas na base de dados *Web of Science* que foram publicados após 2017 com os seguintes títulos de procura: Mudanças climáticas, Água-Alimentos, Água-Energia e Água-Energia-Alimentos. Com isso, ao todo foram selecionados 10.974 artigos após a busca inicial. Como critério limitante foram selecionados artigos que atenderam as seguintes condições: (1) contêm Água-Alimento, Água-Energia ou Água-Energia-Alimento, mas não consideram água, energia ou alimentos separadamente; (2) considera os impactos das alterações climáticas; e (3) utilizam ferramentas ou modelos analíticos quantitativos para avaliação.

Com base nestes critérios, o trabalho obteve 45 artigos relacionados com Água-Alimentos e alterações climáticas, identificou 64 artigos que estudaram os impactos das alterações climáticas na Água-Energia e selecionaram 36 artigos sobre alterações climáticas e o nexo Água-Energia-Alimentos (Gao; Chen; Memon, 2023).

Dentre os estudos escolhidos como referência, estão resultados parciais desta tese (Silva *et al.*, 2021c). Na Tabela 1 é apresentado um resumo desse artigo sobre o tema Nexos Água e Energia.

Tabela 1 – Resumo da proposta, dados, tempo e metodologia dos resultados parciais desta tese.

Modelo	Proposta	Dados	Tempo	Metodologia
Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP)	Simulação de processos de chuva-escoamento	Dados meteorológicos e área de drenagem	mensal	Modelagem hidrológica (45/75%)
The Information System for Water Allocation Management (SIGA)	Simulação de planejamento e operação de sistemas de recursos hídricos	Demandas e prioridades, propriedades de roteamento fluvial	mensal	Operação do hidrossistema (11/18%)

Fonte: Adaptado de Gao, Chen e Memon (2023).

Esse estudo esteve entre os 45 trabalhos que utilizaram modelagem hidrológica, tendo sido o único que optou pela escolha do modelo hidrológico SMAP. Além disso, esteve

entre 11 trabalhos que fizeram a operação de sistemas hídricos para o cálculo da geração hidrelétrica, tendo sido o único que utilizou o *software* SIGA.

Os estudos que analisam os impactos das alterações climáticas na Água-Energia centraram-se principalmente na geração de energia hidrelétrica, chegando à conclusão de que a energia hidrelétrica é vulnerável aos impactos das alterações climáticas devido à sua dependência direta das vazões. A maioria dos estudos projetou a geração futura de energia hidrelétrica para avaliar como as alterações climáticas afetarão a produção de energia, ou otimizaram os esquemas de operação dos reservatórios para minimizar os impactos das alterações climáticas.

Os modelos hidrológicos ou de aprendizagem supervisionada foram adotados para simular e projetar vazões futuras para reservatórios hidrelétricos, em seguida, modelos ou equações de energia foram empregados para calcular a geração potencial de energia hidrelétrica, algoritmos de otimização ou modelos de gerenciamento de água foram empregados para resolver a operação ideal do reservatório.

Vários estudos utilizaram o modelo SWAT para a simulação da qualidade e quantidade de águas superficiais e subterrâneas e a geração de energia hidrelétrica (Abera *et al.*, 2018; Bahati; Ogenrwoth; Sempewo, 2021; Goodarzi; Vagheei; Mohtar, 2020; Guo *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2017; Qin *et al.*, 2022).

Dentre esses estudos, o trabalho de Bahati, Ogenrwoth e Sempewo (2021) analisou o impacto das mudanças climáticas e do UCS na confiabilidade da energia hidrelétrica para auxiliar no planejamento e gestão da energia hidrelétrica da bacia hidrográfica do Rio Muzizi, localizado na parte ocidental de Uganda. Os resultados sugerem que haverá um aumento significativo na capacidade anual de geração de energia hidrelétrica (de 386,27 e 488,1 GWh para 867,82 e 862,53 GWh sob RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente) para o efeito futuro combinado do clima e mudanças no UCS.

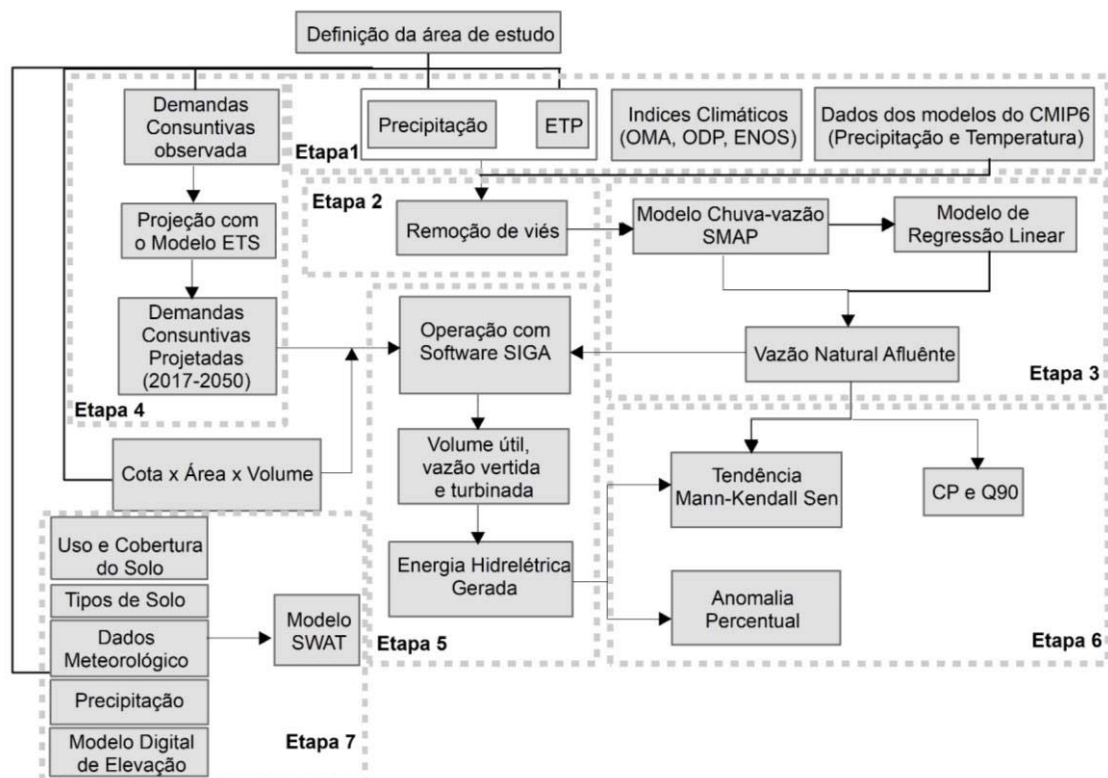
O trabalho de Abera *et al.* (2018) avaliou a operação hidrelétrica existente e futura nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 na hidrelétrica de Tekezé localizada entre as regiões de Amhara e Tigray, na Etiópia. Além do modelo SWAT, para operação do hidrossistema, utilizou o modelo HEC-ResPRM. Assim como no estudo de Bahati, Ogenrwoth e Sempewo (2021), os resultados indicaram um potencial aumento de armazenamento de energia do reservatório de Tekeze em até 25% e 30% nos cenários climáticos RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Estratégia metodológica

Para avaliar os possíveis impactos nas estações de aproveitamento hidroelétrico da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco Estendida (BHSFE), foram analisadas as respostas das vazões naturais afluentes baseada nos cenários do clima futuro SSP2-4.5 e SSP5-8.5 dos modelos do CMIP6 e dos possíveis cenários futuros das demandas consuntivas. Para tanto, a metodologia consistiu na escolha das sub-bacias dos reservatórios da BHSFE, obtenção dos dados de vazões naturais afluentes e da projeção das demandas consuntivas com geração de possíveis cenários (ver Figura 13).

Figura 13 - Fluxograma das etapas metodológicas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na etapa 1 foram extraídas as séries temporais das variáveis de precipitação e temperaturas do ar superior (TAS) máximos, mínimos e médias observadas e dos modelos do CMIP6 sobre as sub-bacias dos reservatórios das UH da BHSFE com o método clássico de Thiessen. Com os dados das TAS máximas, mínimas e médias, foi estimada a variável de

Evapotranspiração Potencial (ETP) com o método de Hargreaves-Sammani. E ainda na Etapa 1 foram utilizados os índices climáticos da OMA, ODP e ENOS e cálculo dos índices de seca e cheia para o estudo da variabilidade de baixa frequência e a sua influência nas variáveis espaciais e temporais nas chuvas, ETP, vazões e geração de energia hidrelétrica sobre as bacias que constituem a BHSF.

Na Etapa 2 foram realizadas as correções estatísticas para a remoção de viés das séries temporais de precipitação e PET dos modelos do CMIP6 com os dados observados. Para tanto, foi utilizado a função de distribuição gama ou CDF (do inglês, a *Cumulative Distribution Function* gamma).

Na Etapa 3 os dados de precipitação e ETP com o viés removidos do CMIP6 foram utilizados como entrada do modelo hidrológico chuva-vazão SMAP para gerar os dados de vazão naturais afluentes das sub-bacias de Sobradinho, Itaparica e Três Marias. Ainda na Etapa 3 foram estimadas as vazões naturais afluentes para os reservatórios restantes (Xingó, Moxotó, Complexo Paulo Afonso e Queimado). Para tanto, utilizou-se os dados de vazão naturais afluentes gerados com o modelo SMAP e as séries mensais de vazões naturalizadas disponibilizadas pelo ONS, dividindo-os em dois grupos com 4 reservatórios cada. Os 4 reservatórios com o modelo SMAP calibrado foram utilizados como preditoras das vazões naturais afluentes dos 4 reservatórios restantes.

Na Etapa 4 foram agregadas na BHSFE a jusante dos principais reservatórios as demandas consuntivas municipais. Para tanto, foram quantificados através de técnicas de geoprocessamento. Além disso, elas foram projetadas utilizando o modelo Exponential Smoothing para o período de 2017 a 2050.

Na Etapa 5 foi realizada a simulação da operação dos reservatórios da bacia com foco no atendimento às demandas de água por meio do *software* Sistema de Suporte à Decisão (SIGA). Para isso, foram utilizados os dados de vazões naturais afluentes obtidas com o modelo SMAP com os dados dos modelos do CMIP6 nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e os cenários das demandas consuntivas. Ainda na Etapa 5, com às respostas das simulações realizadas no SIGA, foi possível estimar a geração de Energia Hidrelétrica.

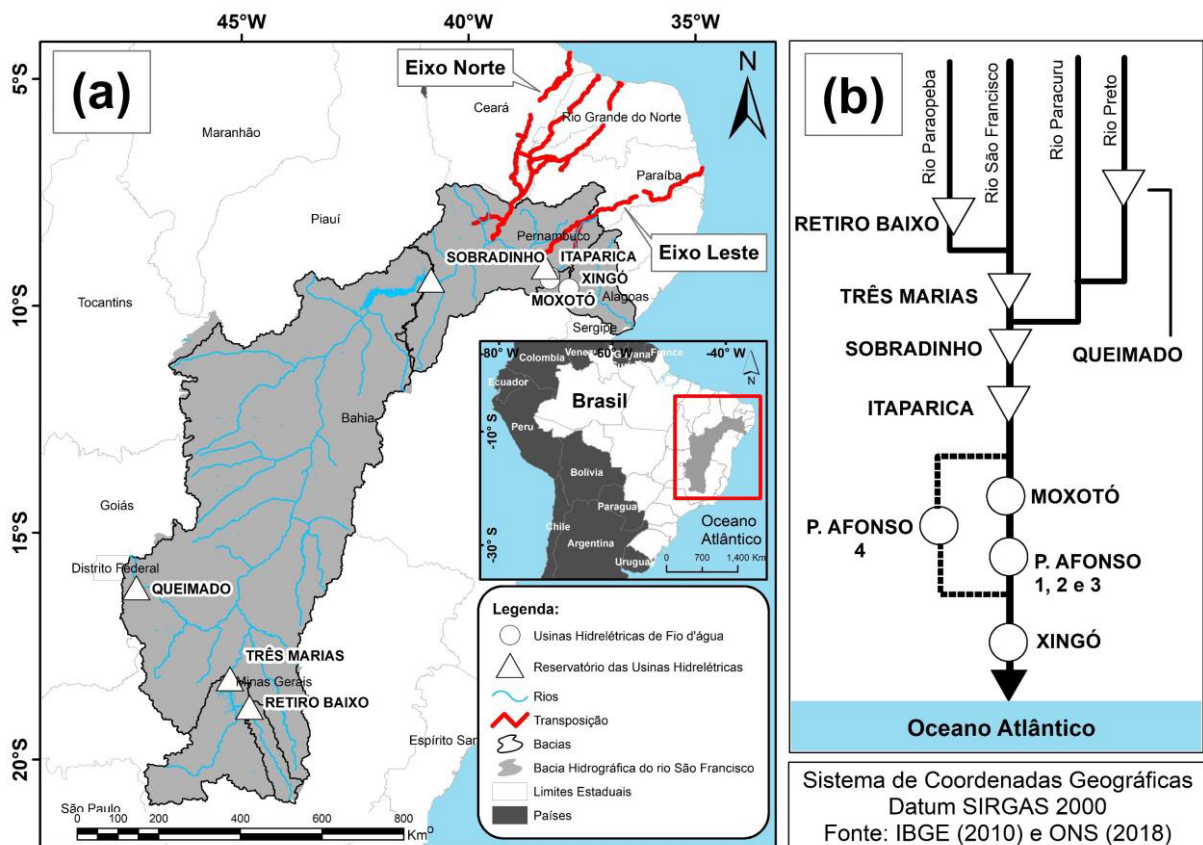
Na Etapa 6 foram realizadas as análises da Q90 e da Energia Hidrelétrica através do teste de Mann-Kendall Sen e anomalia percentual. Os próximos tópicos dissertam sobre a região de estudo, base de dados e metodologia aplicada.

Na Etapa 7 foi realizada a análise da mudança antrópica do UCS e nas vazões de uma bacia hidrográfica localizada na BHSF como estudo de caso, utilizando a modelagem semidistribuída do modelo SWAT.

3.2 Descrição da Área de Estudo

A BHSF drena uma área de 639.219 km², o que equivale a cerca de 8% do território brasileiro. Tendo início na Serra da Canastra em Minas Gerais, passando pelos estados de Goiás, Distrito Federal, Bahia e Pernambuco no sentido sul-norte, e alcançando o Oceano Atlântico pela divisa com Alagoas e Sergipe, o rio São Francisco abrange 507 municípios (quase 9% de todos os municípios do Brasil), com extensão de 2700 km e uma população residente de aproximadamente 20 milhões de pessoas (ver Figura 14).

Figura 14 - Localização da área de estudo com a rede utilizada na operação do hidrossistema.



Fonte: Elaborado pelo autor.

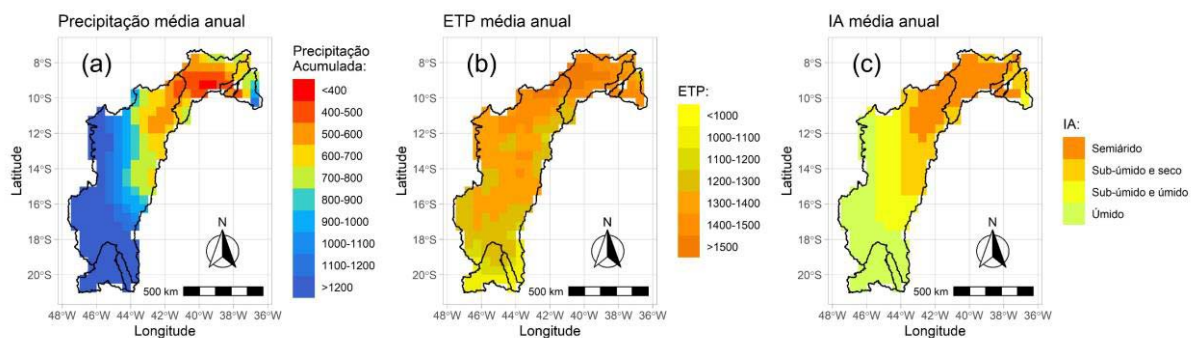
Os principais reservatórios são as das bacias hidrográficas das usinas hidrelétricas de Itaparica (também conhecido por Luiz Gonzaga), Sobradinho e Três Marias, que têm volumes úteis de 3.549 hm³, 28.669 hm³ e 15.278 hm³, áreas alagadas de 93.188 km², 467.000 km² e 50.732 km², e capacidade instalada de 1.479,6 MW, 1.050,3 MW, 396 MW, respectivamente (CHESF, 2017a). Além desses, o reservatório de Retiro Baixo também possui

importância significativa com volume útil de 2.215 hm³, área alagada de 12.187 km² e capacidade instalada de 82 MW (ver Figura 1b).

A área da transposição, que será atendida através dos canais em vermelho na Figura 1a, é conhecida por longos períodos de seca, especialmente a região semiárida ao norte do rio São Francisco. Essa área cobre parcialmente os estados de Pernambuco, Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte. Atualmente, antes da conclusão dos eixos de transposição, a BHSF é responsável por atender 77% da demanda de irrigação, 11% da demanda urbana e 7% da demanda industrial do NEB (ANA, 2017b).

As Figuras 15a, 15b e 15c trazem, respectivamente, a precipitação média anual, a ETP média anual e o Índice de Aridez (IA) no período de 1931 a 2020 espacializada sobre a BHSF. Esses resultados foram obtidos através dos dados de temperatura do ar superior (mínima, máxima e média) e precipitação do CRU.

Figura 15 - Precipitação média anual (a), ETP média anual (b) e Índice de Aridez (IA) no período de 1931 a 2020 espacializada sobre a BHSF.

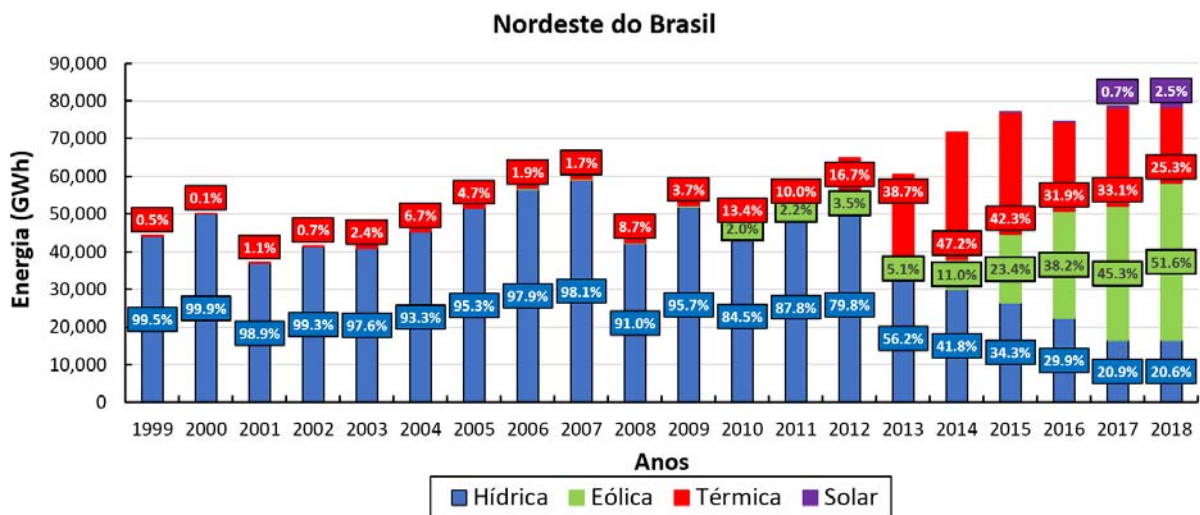


Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível observar que a precipitação média anual se concentra com maior intensidade, com valor entre 900 e >1200 mm, na região sul da bacia, que engloba parte da bacia hidrográfica de Sobradinho e toda a bacia de Três Marias e Retiro Baixo; enquanto as chuvas de menor intensidade ocorre na região norte da bacia, englobando parte norte da bacia hidrográfica de Sobradinho e as bacias de Itaparica, Paulo Afonso e Xingó, com valor entre <400 e 700 mm. A Figura 15b mostra que a região mais ao norte e parte do centro possuem maiores valores de ETP, enquanto a região mais ao sul possui os menores valores. Através dessa espacialização das chuvas e ETP, tem como consequência um maior índice de aridez com classificação de semiárido na região norte da bacia e menor índice de aridez com classificação de úmido na região localizado mais ao sul da bacia (ver Figura 15c).

Além de atender às demandas consuntivas, a BHSF desempenha um papel fundamental na geração de energia elétrica, com potencial instalado correspondendo a 12% do total nacional (CHESF, 2017b). No entanto, devido à estiagem nos últimos anos, a geração hidrelétrica abasteceu apenas 56%, 42%, 34%, 30%, 21% e 21% da demanda total de energia elétrica do NEB no período de 2013 a 2018, respectivamente. Essa produção foi muito inferior aos anos anteriores, que eram superiores a 70%. O declínio na produção de hidroeletricidade é ilustrado na Figura 16, que também mostra que a carência da geração hidrelétrica foi substituída principalmente pela energia fóssil (térmica) com 39%, 47%, 42%, 33% e 25%, e o crescimento da energia eólica com um aumento de 5% para 52% no período de 2013 a 2018.

Figura 16 - Energia elétrica gerada pela região Nordeste do Brasil no período de 1999 a 2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além das bacias analisadas e mencionadas anteriormente, também foram analisadas as mudanças antrópicas do UCS de 8 sub-bacias que fazem parte de um afluente do rio São Francisco, a Bacia Hidrográfica do rio Grande (BHG) localizada a oeste do estado da Bahia. Essas sub-bacias foram escolhidas após uma análise da literatura que identificou a BHG como uma região com grande aumento nas mudanças antrópicas do UCS, que podem causar impacto no escoamento superficial sobre a BHSF (Gonçalves; Chang, 2017; Lima et al., 2022; Silva et al., 2023).

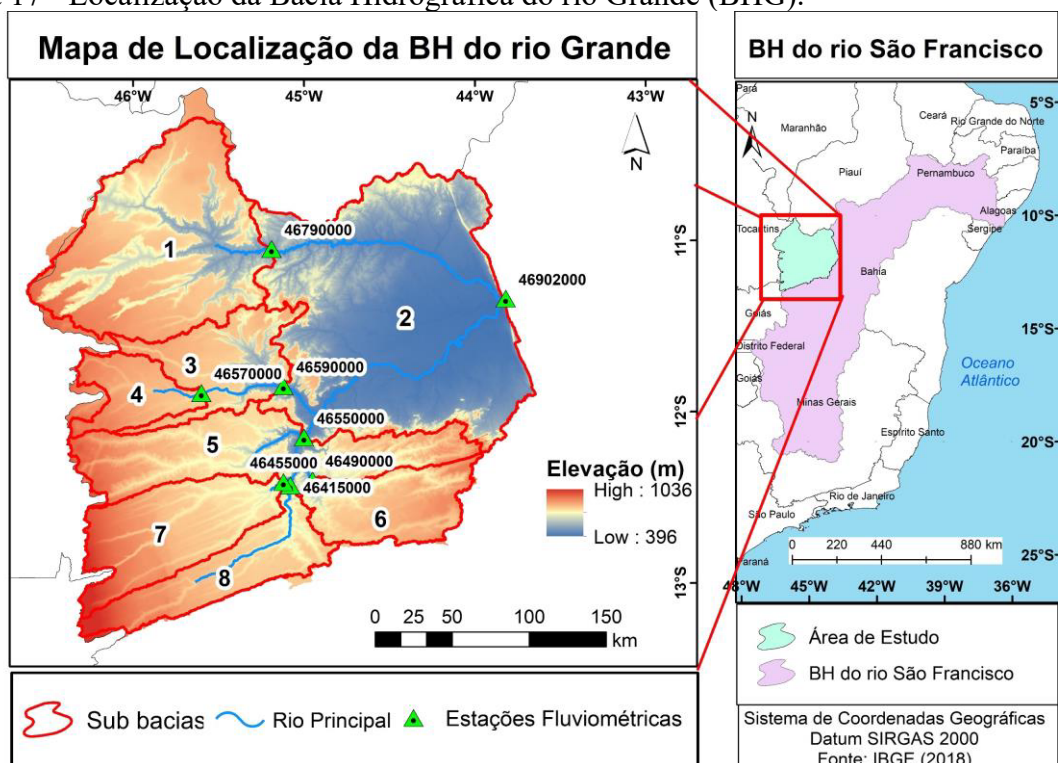
Além disso, a escolha de 8 sub-bacias para uma análise mais aprofundada dos impactos da alteração antrópica no BHSF se deu por três motivos: (i) em escala de sub-bacia a variabilidade climática e os fatores antrópicos podem ser considerados independentes; (ii) As sub-bacias escolhidas não possuem estruturas de regulação de vazão, pois, em bacias com essas

estruturas, principalmente através de reservatórios de acumulação, os sinais de alteração antrópica podem ser suavizados ou mesmo camuflados pela regularização de vazão e (iii) as sub-bacias são de cabeceira, evitando que alterações nas sub-bacias a montante possam interferir nas análises da área avaliada. Esses mesmos motivos foram citados no estudo de Lima et al., 2022. O próximo tópico disserta sobre as sub-bacias analisadas.

3.2.1 Sub-bacias

A área de estudo é a Bacia Hidrográfica do rio Grande (BHG), localizada no oeste do Estado da Bahia, entre as latitudes 10° 18' e 13° 50' Sul e as longitudes 46° 30' e 43° 10' Oeste (ver Figura 17).

Figura 17 - Localização da Bacia Hidrográfica do rio Grande (BHG).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa bacia é integrante da BHSF e tem seu rio (o rio Grande), como o principal afluente do rio São Francisco no estado. O rio Grande possui um regime hidrológico fortemente influenciado pela contribuição de água subterrânea, que chega a 70% da vazão total do rio, localizado na formação geológica do Chapadão Urucuia, constitui um dos mais significativos

aquíferos livres do Brasil, com reservas permanentes estimadas em $1,3 \times 10^3 \text{ km}^3$ e reservas regulatórias de mais de 20 km^3 por ano (Gonçalves; Chang, 2017).

A região do oeste da Bahia possui seu clima classificado como Aw (tropical com chuvas de verão) segundo a classificação de Köppen, com temperatura média anual de $22,3 \text{ }^\circ\text{C}$, evaporação média anual de aproximadamente 1.580 mm , precipitação média anual de 1.500 mm no extremo oeste da borda da Serra Geral de Goiás, e mínima entre 900 mm a 1000 mm na altura de Barreiras (BA) e umidade relativa variando entre 45 e 79% (Gonçalves; Chang, 2017; Silva et al., 2023).

3.3 Dados utilizados

Na Tabela 2, é apresentada a informação do conjunto de dados utilizados (Descrição, tipo de dado e Instituição/Agência).

Tabela 2 - Informações sobre os dados de entrada do modelo SWAT.

Descrição	Tipo de dado	Instituição/Agência
Mapas de uso e ocupação do solo	Espacial	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE)
Mapas de tipos de solo	Espacial	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)
Modelo Digital de Elevação	Espacial	Projeto Topodata
Dados de precipitação	Séries Temporais diárias ou mensais	Agência Nacional de Águas (ANA)/ <i>Climate Research Unit (CRU)/ Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)</i>
Dados Meteorológicos	Séries Temporais diárias ou mensais	<i>Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)/ Climate Research Unit (CRU)</i>
Dados de vazão	Séries Temporais diárias ou mensais	Agência Nacional de Águas (ANA)/ Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)

Fonte: Elaborado pelos autores.

A escolha deste conjunto de dados foi devido ao tamanho da série temporal disponível, uma vez que os dados de estações meteorológicas e pluviométricas apresentaram falhas em vários anos, sendo necessário descartá-los, o que encurtou as séries. Além disso, diversos estudos indicaram que os dados utilizados possuem alta consistência e confiabilidade quando comparada com dados medidos de estações meteorológicas e pluviométricas (Eini et

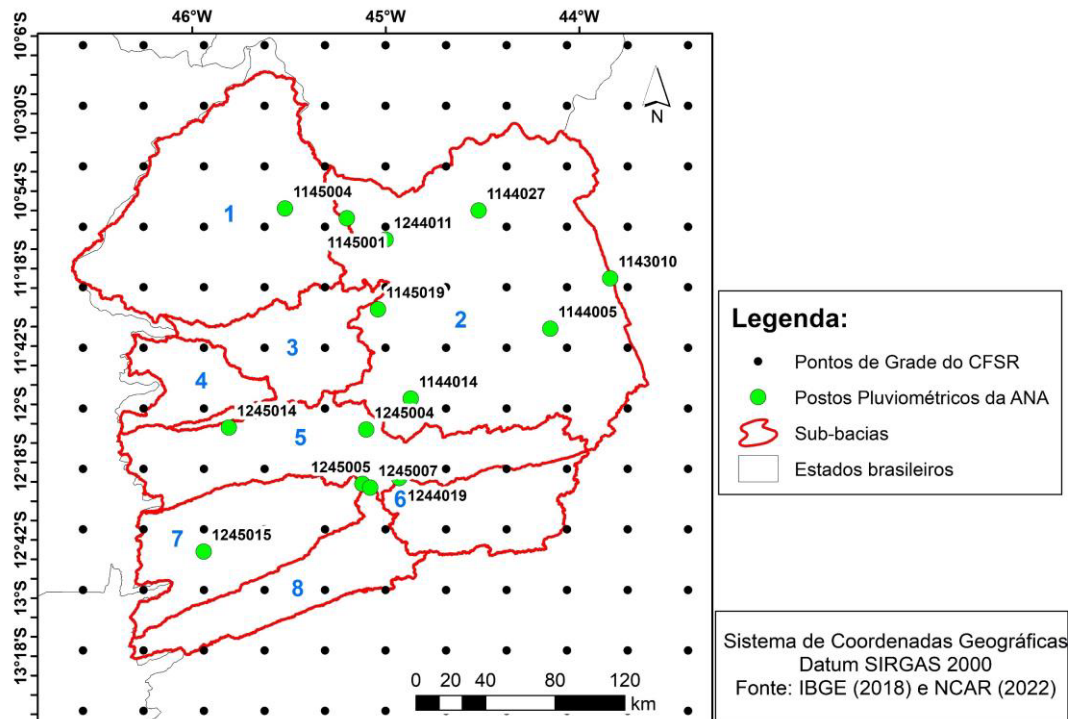
al., 2019; Limberger; Silva, 2018). Os próximos tópicos apresentam detalhes desse conjunto de dados e a sua finalidade nesse estudo.

3.3.1 Dados de Precipitação

Os dados de precipitação mensal foram obtidas do *Climate Research Unit* (CRU) (Harris et al., 2020) e do *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC) (SCHNEIDER et al., 2017), ambos com resoluções espaciais de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ e período de 1931 a 2020. Esses dados foram utilizados tanto para a análise de baixa frequência, como entrada do modelo SMAP.

Além dos dados de precipitação mensal, foram utilizados dados diários das estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) disponibilizados pelo Hidroweb no site <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>, e do modelo de reanálise *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) no período de 01/01/1979 a 31/07/2014, disponibilizados pelo *Global Weather Data for SWAT* no site <http://globalweather.tamu.edu/> (ver Figura 18). Esses dados foram utilizados tanto para o cálculo do período de retorno, como entrada do modelo SWAT.

Figura 18 - Mapa com os postos pluviométricos da ANA e os pontos de grade do CFSR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os critérios de escolha dos postos pluviométricos da ANA tiveram como base o menor número de falhas, períodos mais longos que coincidam com os dados fluviométricos e meteorológicos e a proximidade com as sub-bacias geradas no modelo SWAT.

3.3.2 *Dados de Vazão*

Os dados Fluviométricos, assim como os dados pluviométricos, foram obtidos do sítio de dados da ANA, através dos postos fluviométricos disponibilizados no Hidroweb. Esses dados foram utilizados para a calibração e validação do modelo hidrológico SWAT. Para a análise da variabilidade de baixa frequência e calibração e validação do modelo SWAT foram utilizados dados de vazões naturalizadas do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), através do *website* da Agência Nacional de Águas (ANA) (<https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin>) na escala de tempo diária, disponível no período de 1931 a 2020 (ONS, 2004, 2011).

3.3.3 *Dados Meteorológicos*

Um dos dados meteorológicos utilizado neste estudo foi o de temperaturas do ar superior (TAS) média, máxima e mínima obtidas do CRU para o período de 1931 a 2020 com resoluções espaciais de 0,5°x0,5° (Harris et al., 2020).

Além da TAS média, máxima e mínima, também foram utilizadas as séries temporais diárias dos dados meteorológicos das variáveis de temperatura (°C), precipitação (mm), vento (m/s), umidade relativa (fração) e radiação solar (MJ/m²). Elas foram obtidas do modelo de reanálise *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) no período de 01/01/1979 a 31/07/2014, disponibilizados pelo *Global Weather Data for SWAT* no site <http://globalweather.tamu.edu/>. Esses dados foram utilizados como dado de entrada do modelo SWAT.

3.3.3.1 *Evapotranspiração Potencial*

Os dados de TAS média, máxima e mínima foram utilizados para a estimativa da Evapotranspiração Potencial (ETP) utilizando o método Hargreaves Samani através da Equação 1:

$$ETP=0,0023(TAS_{\text{máx}} - TAS_{\text{mín}})^{0,5}(TAS_{\text{med}}+17,8)Ra \quad (1)$$

onde a ETP é dada em mm/mês, e a Ra é a Radiação Externa Média, que foi estimada a partir da latitude e do mês do ano (HARGREAVES; SAMANI, 1985). Esse dado de ETP foi utilizado tanto para a análise de baixa frequência, como dado de entrada no modelo SMAP.

3.3.4 Uso e Cobertura do Solo

Na Tabela 3, são apresentados os códigos, nomes das classes e uma descrição detalhada de cada classe do dado de UCS utilizado nesse estudo.

Tabela 3 - Código, Classes e Descrição do Uso e Cobertura do Solo do IBGE.

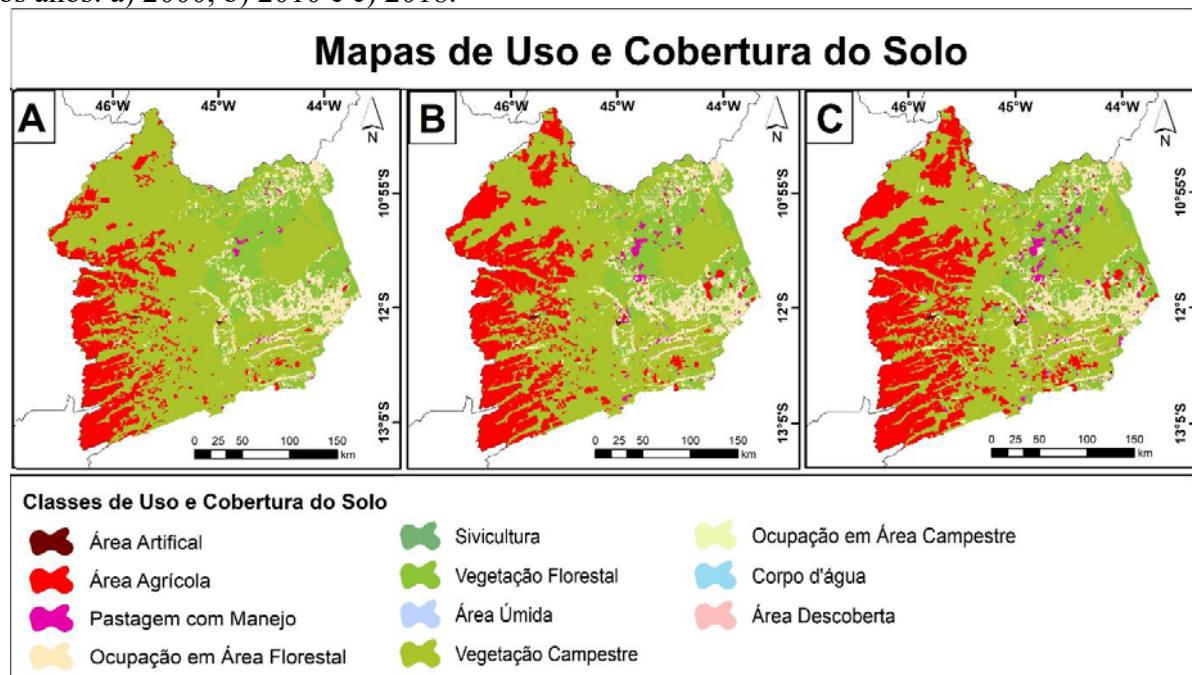
Código	Nome da Classe	Descrição
1	Área Artificial	Áreas urbanizadas (metrópoles, cidades e vilas), áreas industriais, aldeias indígenas e comunidades quilombolas. Também inclui as áreas de mineração.
2	Área Agrícola	Inclui todas as áreas cultivadas com plantios temporários e permanentes, utilizadas para a produção de alimentos, fibras, combustíveis e outras matérias-primas. Inclui também os tanques de aquicultura.
3	Pastagem com Manejo	Áreas destinadas ao pastoreio, apresentando interferências antrópicas de alta intensidade. Interferências podem incluir o plantio, limpeza da terra, aplicação de herbicidas, adubação, entre outras que descaracterizem a cobertura natural.
4	Mosaico de Ocupações em Área Florestal	Área caracterizada por ocupação mista de área agrícola, pastagem e/ ou silvicultura associada ou não a remanescentes florestais, na qual não é possível uma individualização de seus componentes na escala adotada.
5	Silvicultura	Área caracterizada por plantios florestais de espécies exóticas ou nativas como monoculturas.
6	Vegetação Florestal	Área ocupada por florestas. Consideram-se florestais as formações arbóreas com porte superior a 5 metros de altura, incluindo-se aí as áreas de Florestas Ombrófilas, Estacionais e Mistas, além de Savanas e Campinaranas Florestadas, Manguezais e Buritizais, conforme o Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013).
9	Área Úmida	Área caracterizada por vegetação natural herbácea ou arbustiva, permanente ou periodicamente inundada por água doce ou salobra. Inclui os terrenos de charcos, pântanos, campos úmidos, estuários, entre outros.
10	Vegetação Campestre	Área de formações campestres, caracterizadas por um estrato predominantemente arbustivo, esparsamente distribuído sobre um estrato gramíneo-lenhoso. Incluem-se nessa categoria as Savanas, Estepes, Formações Pioneiras e Refúgios Ecológicos, conforme o Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013). Podem estar sujeitas a pastoreio e a outras interferências antrópicas de baixa intensidade.
11	Mosaico de Ocupações em Área Campestre	Área caracterizada por ocupação mista de área agrícola, pastagem e/ ou silvicultura associada ou não a remanescentes campestres, na qual não é possível uma individualização de seus componentes na escala adotada.

12	Corpo d'água Continental	Inclui todas as águas interiores, como rios, riachos, canais e outros corpos d'água lineares. Também engloba corpos d'água naturalmente fechados (lagos naturais) e reservatórios artificiais, exceto tanques de aquicultura.
13	Corpo d'água Costeiro	Inclui as águas inseridas nas 12 milhas náuticas, conforme Lei nº 8.617, de 4 de janeiro de 1993.
14	Área Descoberta	Esta categoria engloba locais sem vegetação, como os afloramentos rochosos, penhascos, recifes e terrenos com processos de erosão ativos. Também inclui as praias, dunas e acúmulo de cascalho ao longo dos rios.

Fonte: Adaptado de IBGE (2022).

Esse conjunto de dados está disponível para todo o Brasil e em divisões de Unidades Federativas. Nesse estudo foi feito o *download* do UCS para os anos de 2000, 2010 e 2018 (ver Figuras 19a, 19b e 19c, respectivamente) do Estado da Bahia e recortada a área de estudo utilizando o *software* ArcGis. A grade cobre todo o território nacional (incluindo o mar territorial brasileiro) e contém mais de 8,7 milhões células de 1 km² (IBGE, 2022b). As classes de Uso e Cobertura do Solo identificados nos dados do IBGE (considerando os anos utilizados nesse estudo) para a área de estudo, são: Área Artificial, Área Agrícola, Pastagem com Manejo, Ocupação em Área Florestal, Sivicultura, Vegetação Florestal, Área Úmida, Vegetação Campestre, Ocupação em Área Campestre, Corpo d'água e Área Descoberta.

Figura 19 - Mapas com a classificação dos Usos e Cobertura do solo para a área de estudo para os anos: a) 2000, b) 2010 e c) 2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

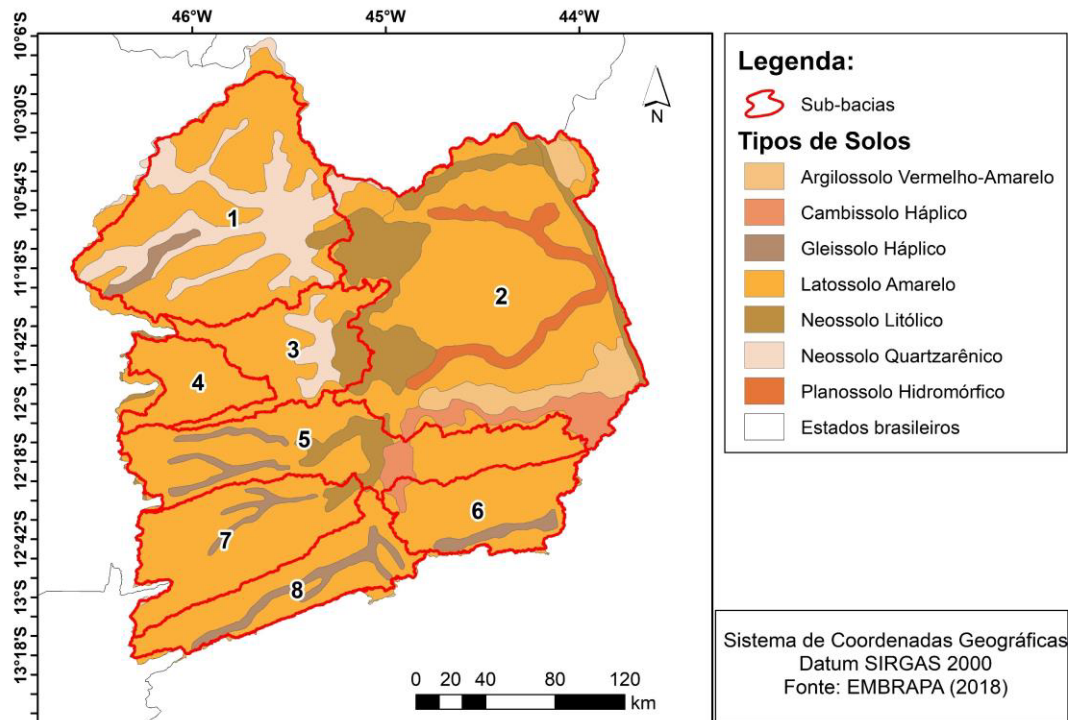
3.3.5 Modelo Digital de Elevação

O Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado foi obtido a partir do projeto Topodata, lançado em 2008, que faz parte do Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil e é administrado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Este projeto disponibiliza o MDE e suas derivações locais no Brasil, utilizando dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), que, por sua vez, são controlados e oferecidos pelo *United States Geological Survey* (USGS). O Topodata oferece dados altimétricos com resolução espacial de aproximadamente 90 metros (3 arco-segundos) e resolução vertical de 1 metro (Valeriano, 2005). Os dados atendem a uma escala articulada em 1:250.000, no formato Geotiff e encontram-se no Sistema de Coordenadas Geográficas WGS-84 (Valeriano, 2005). Os dados do MDE foram acessados pelo link <http://www.dsr.inpe.br/topodata/> e o mosaico e máscara da região foram geradas através do *software* ArcGis.

3.3.6 Tipos de solo

Para a elaboração do mapa de tipos de solo, os dados foram obtidos a partir da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). A EMBRAPA disponibiliza a informação georreferenciada, que, por sua vez, é obtida a partir do portal da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE) pelo site <https://visualizador.inde.gov.br/>. Os tipos de solos identificados nos dados da EMBRAPA (considerando o sistema brasileiro de classificação dos solos vigentes em 2006) para a área de estudo, são: Argilossolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo Háplico, Gleissolo Háplico, Latossolo Amarelo, Neossolo Litólico, Neossolo Quartzarênico e Planossolo Hidromórfico, conforme Figura 20. O estudo de Santos (2018) traz maiores informações sobre esses tipos de solo.

Figura 20 - Mapa com a classificação dos tipos de solo para a área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.7 Demandas Consuntivas

As vazões de retirada das demandas consuntivas (irrigação, abastecimento humano e indústria), no período de 1961 a 2017, foram obtidas do sítio de dados da ANA para os municípios do Brasil e foram agregadas nas sub-bacias do rio São Francisco a jusante dos reservatórios. Para tanto, foram quantificados através de técnicas de geoprocessamento, sendo expressa através da Equação 2:

$$QD_b = \sum_{m=1}^M \frac{AB_{mb}}{AT_m} \cdot QD_m, \quad (2)$$

em que QD_b é a vazão média de demanda localizada dentro da sub-bacia b (m^3/s); QD_m é a vazão média de demanda dentro do Município m (m^3/s); AB_{mb} é a área do Município m dentro da sub-bacia b (km^2); e AT_m é a área total do município m (km^2).

A metodologia abordada pela ANA para a estimativa das demandas consuntivas foram baseadas em investigações dos coeficientes técnicos disponíveis na literatura e sua compatibilidade com os dados já disponíveis (ANA, 2023). No caso da indústria, do abastecimento humano e da irrigação, que correspondem mais de 80% do uso da água no País, esse estudo apresentou coeficientes inéditos. Os maiores detalhes das estimativas das demandas

estão disponíveis no Manual de Usos Consuntivos da Água do Brasil em ANA (2019), junto com os metadados utilizados nesse estudo.

3.3.8 Índices Climáticos

Os índices climáticos foram obtidos do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) através do *website* do *Working Group on Surface Pressure* (https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/) e a TSM global através do *Kaplan Extended SST V2* (https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.kaplan_sst.html) com resolução de 5° por 5° graus de latitude e longitude (grade 72x36), ambos no período de 1931 a 2020 (totalizando 90 anos) (Enfield; Mestas-nuñez; Trimble, 2001; Rayner *et al.*, 2003).

3.4 Análise estatística

Com a finalidade de analisar a relação das variáveis de precipitação e vazões naturalizadas das BHSF com os fenômenos de baixa frequência ENOS, ODP e OMA, através dos índices climáticos supracitados, que se aplicou as estatísticas de Coeficiente de Correlação de Pearson (r) Equação 3 e as estatísticas descritivas de Desvio padrão (σ) Equação 4, Variância (σ^2) Equação 5 e Coeficiente de Variação (CV) Equação 6.

$$r = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x') \cdot (y_i - y')}{n - 1}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x')^2}{n - 1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y')^2}{n - 1}}}, \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^n (x_i - x')^2}, \quad (4)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^n (x_i - x')^2, \quad (5)$$

$$CV = \frac{\sigma}{x'}, \quad (6)$$

em que n denota um espaço amostral, x_i é a variável observada no tempo, x' é a média da variável x , y_i é a variável calculada e y' é a média da variável y . Para a r , os valores -1 e 1 indicam perfeita correlação negativa e positiva, respectivamente, existindo também a total ausência de correlação quando um resultado for igual a zero.

3.4.1 Teste de Tendência de Mann-Kendall Sen

Neste estudo, as séries de ETP, precipitação e vazão foram submetidas ao teste de Mann-Kendall dada pela Equação 7:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sinal}(Z_j - Z_i), \quad (7)$$

em que S são os valores da série em intervalos de tempo anuais; i e j são os índices de tempo, e n é o número de elementos da série (Yue; Wang, 2004). O termo $\text{sinal}(Z_j - Z_i)$ é resultado da Equação 8:

$$\text{sinal}(Z_j - Z_i) = \begin{cases} +1 & \text{se } (Z_j - Z_i) > 0 \\ 0 & \text{se } (Z_j - Z_i) = 0 \\ -1 & \text{se } (Z_j - Z_i) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Segundo Salviano, Groppo e Pellegrino (2016), quando $n \geq 10$, a variável estatística S se assemelha a uma distribuição normal, tendo sua variância calculada pela Equação 9.

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(i-1)(2i+5)}{18}, \quad (9)$$

em que $\text{Var}(S)$ é a variância da estatística S do teste de Mann-Kendall; e t_i é a quantidade de repetições em uma extensão i da série temporal.

Com a $\text{Var}(S)$ definida, o índice padronizado Z pode ser obtido. Ele segue uma distribuição normal com média igual a zero e desvio padrão igual a um, conforme a Equação 10.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \rightarrow \text{se } S > 0 \\ 0 & \rightarrow \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \rightarrow \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (10)$$

Neste estudo, considerou a hipótese nula (H_0) aceita, referente a ausência de tendência, quando o teste for menor que um valor crítico denominada α , indicado por $\alpha = 0,05$ (para uma significância estatística de 95%). A H_0 é rejeitada para $|Z| > \frac{Z_\alpha}{2}$, sendo $\frac{Z_\alpha}{2}$ o valor que possui a probabilidade de excedência igual a metade do nível de significância adotado em uma distribuição normal (Moreira; Naghettini, 2016). Além disso, o índice Z permitiu diferenciar uma tendência crescente ($Z > 0$) de uma decrescente ($Z < 0$). De outra forma, o p-valor da estatística S considera a H_0 verdadeira, para p-valor $> \alpha$ e falsa para p-valor $\leq \alpha$ (Moreira; Naghettini, 2016).

O estimador de Sen forneceu a magnitude das declividades das tendências detectadas através da estatística dada pela Equação 2:

$$\text{Sen} = \frac{X_j - X_i}{j - i}, \text{ com } i < j \quad (11)$$

onde X_i e X_j estão relacionados com os valores da variável em estudo nos tempos i e j (Moreira; Naghettini, 2016). O valor positivo ou negativo para o Sen indica tendência crescente ou decrescente, respectivamente.

As séries temporais avaliadas foram padronizadas, resultando em um conjunto de dados com média igual a zero e desvio padrão igual a 1. Essa padronização foi realizada para possibilitar a comparação da magnitude das declividades de Sen.

3.4.2 *SPI, SPEI e SRI*

Nesta pesquisa, para o estudo da seca meteorológica, foi calculado o índice de precipitação padronizada (do inglês *Standardized Precipitation Index* – SPI), desenvolvido por Mckee, Doesken e Kleist (1993). O SPI é amplamente utilizado e é considerado pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) como índice de referência global para estudos de secas meteorológicas (Achite *et al.*, 2022; Araujo Junior *et al.*, 2020; Rocha; Souza Filho; Silva, 2019; Silva *et al.*, 2021a). O SPI pode ser calculado em escalas de tempo de 1 a 48 meses.

O *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI) é uma extensão do SPI, sendo amplamente utilizado. O SPEI é projetado para levar em consideração tanto a precipitação quanto a evapotranspiração potencial (ETP) na determinação da seca. Assim, ao contrário do SPI, o SPEI capta o principal impacto do aumento das temperaturas na demanda de água. Pois a subtração do ETP dos valores de precipitação dá conta do balanço hídrico climático para o período considerado. A diferença é então ajustada a uma distribuição log-logística de três parâmetros.

Para a seca hidrológica, um índice semelhante ao SPI foi desenvolvido como o índice padronizado de escoamento superficial (do inglês *Standardized Runoff Index* –SRI), que é baseado na vazão média mensal e foi proposto por Shurkla e Wood (2008).

O pacote SPEI no *software* de programação R foi usado para calcular o SPI, o SPEI e o SRI dentro da área de estudo em uma escala de tempo de 12 e 24 meses, o que é muito importante para a avaliação hidrológica da seca (Cunha *et al.*, 2019; Rocha; Souza Filho; Silva, 2019; Rocha; Souza Filho, 2020).

O cálculo do SPI e SRI tem início com o ajuste das variáveis de precipitação e vazão, respectivamente, a uma função de densidade cumulativa (do inglês *Cumulative Density Function* – CDF). A CDF utilizada no ajuste dos dados foi a do tipo gama que possui dois parâmetros, definida por $g(x)$:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (12)$$

em que α é um parâmetro de forma, β é um parâmetro de escala, x é o valor de precipitação e Γ é a função gama. Para a Equação 11, considera-se ainda: $\alpha > 0$; $\beta > 0$ e $x > 0$.

Após o ajuste das variáveis a CDF, é aplicado o inverso da distribuição normal padronizada (Ψ) da função cumulativa $G(x)$, conforme mostra a Equação 13. Além disso, os novos parâmetros α , β e A , são computados através das Equações 14, 15 e 16, respectivamente (Mckee; Doesken; Kleist, 1993; Shukla; Wood, 2008b).

$$G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (14)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (15)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (16)$$

em que n é o número de observações de precipitação, \bar{x} é a média da amostra de dados, Ψ^{-1} é o inverso da função de probabilidade normal padronizada com média zero e variância 1.

Como a função gama é indefinida para $x = 0$ e uma distribuição de precipitação pode conter zeros, a probabilidade cumulativa se torna:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (17)$$

em que $H(x)$ é a probabilidade cumulativa e q é a probabilidade de que a precipitação seja zero.

O APÊNDICE B traz os resultados do ajuste das séries temporais a distribuição gama. A $H(x)$ é transformada em uma distribuição normal (valor final do SPI, SPEI e SRI) para a variável aleatória, com média zero e variância um. Segundo Blain (2005) no caso das variáveis se ajustar à distribuição normal, o SPI, SPEI e SRI será simplesmente a variável reduzida da distribuição normal padronizada, definido pela Equação 17.

$$\text{SPI} = \text{SPEI} = \text{SRI} = \frac{X_a - X_m}{\sigma} \quad (18)$$

em que X_a é a variável acumulada no período; X_m é a variável média do período em questão; e σ é o desvio padrão da série histórica de chuva na escala em estudo.

Os valores de SPI, SPEI e SRI podem ser interpretados para categorizar a seca ou períodos úmidos, conforme os intervalos mostrados na Tabela 4:

Tabela 4 - Associação entre os valores de SPI, SPEI e SRI e as categorias de umidade/seca.

SPI/SPEI/SRI	Categoria
≤ -2.0	Extremamente Seco
-1,5 a -1,99	Severamente Seco
-1,0 a -1,49	Moderadamente Seco
-0,99 a 0,99	Normal
1,0 a 1,49	Moderadamente úmido
1,5 a 1,99	Severamente úmido
≥ 2.0	Extremamente úmido

Fonte: Adaptado de Mckee, Doesken e Kleist (1993); Shukla e Wood (2008); Vicente-Serrano, Beguería e López-Moreno (2010).

Para este estudo, a caracterização da seca foi categorizada usando SPI, SPEI e SRI mensal para os períodos das fases conjuntas e individuais da OMA e ODP (1931 até 2020). Precisamente, um evento de seca ocorre quando o valor limite está abaixo da linha zero. As características das secas identificadas e analisadas nesse estudo, foram: Intensidade, Frequência e Severidade (Mckee; Doesken; Kleist, 1993; Shukla; Wood, 2008b; Vicente-Serrano; Beguería; López-Moreno, 2010). A Intensidade é o índice cumulativo de seca durante um evento de seca abaixo de um limite de -0,5. A Frequência, com limiar inferior a -0,5 em um período N (meses), é calculado como a razão entre a duração total da seca (Du) e o tempo total N em meses:

$$F_{-0.5} = \frac{\sum_{i=1}^e Du}{N} \quad (19)$$

Para este estudo, a duração de um evento de seca (Du) é identificada como o número de meses consecutivos em que os índices de seca (por exemplo, SPI, SRI e SPEI) estão abaixo de -0,5.

3.4.3 Período de Retorno Milenar e Deca Milenar

Para chuvas intensas o método da distribuição de Gumbel tipo I é uma das distribuições mais utilizadas (Papalexiou; Koutsoyiannis, 2013). Para a sua aplicação, se faz necessário uma série de máximos valores anuais (Back, 2002). O método de distribuição de Gumbel a probabilidade de ocorrer um evento menor ou igual que X é:

$$P[X \leq x] = F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (20)$$

em que P é a probabilidade de não-excedência do evento de valor x ; F é o valor da função de distribuição acumulada quando $X=x$; α é o parâmetro de escala (desvio-padrão da distribuição de Gumbel); e β é o parâmetro de posição (Moda da distribuição de Gumbel).

Considerando a variável reduzida y definida por $y = a(X - b)$, pode-se escrever:

$$P[X \leq x] = F(x) = e^{-e^{-y}} \quad (21)$$

Dessa forma a probabilidade de ocorrer um evento X maior ou igual a x é dada por:

$$P[X \leq x] = F(x) = 1 - e^{-e^{-y}} \quad (22)$$

Os parâmetros do modelo podem ser estimados conforme:

$$\alpha = \frac{\sigma_n}{\sigma} \quad (23)$$

$$\beta = \mu - \frac{\mu_n}{\alpha} \quad (24)$$

em que μ é a média dos valores observados de X ; σ é o desvio padrão dos valores observados de X ; μ_n e σ_n são respectivamente a média e o desvio-padrão da variável reduzida y .

Desse modo, a precipitação extrema X com período de retorno TR pode ser estimado pela equação:

$$X = \mu - (y - \mu_n) \frac{\sigma}{\sigma_n} \quad (25)$$

em que a variável reduzida y é igual a:

$$y = \mu - \sigma \left\{ 0,45 + 0,7797 \cdot \ln \left[\ln \left(\frac{TR}{TR - 1} \right) \right] \right\} \quad (26)$$

3.4.4 Análise de Change-point

Foi utilizado nesse estudo a análise de mudanças abruptas (*change-point*) para a detecção de pontos de mudanças nas séries temporais de vazão, precipitação e ETP. Essa análise utiliza a minimização do custo total, formada pelo somatório do custo associado a adequação da propriedade estatística que se deseja analisar ao seu conjunto de observações (segmentos):

$$C_t = \sum_{i=1}^{m+1} [C(y_{(\tau_{i-1}):\tau_i})] + \beta f(m) \quad (27)$$

em que C_t é o custo total; m é o total de pontos de mudança; $C(y_{(\tau_{i-1}):\tau_i})$ é a função de custo de cada segmento; e $\beta f(m)$ é um fator de penalidade.

3.4.5 Transformada de Ondeletas

A Transformada de Ondeletas (TO) é uma ferramenta bastante utilizada em diversos estudos, pois possibilita realizar a decomposição de séries não estacionárias em um espaço de tempo e frequência, o que permite determinar os modos de variabilidade dominantes, bem como a variação desses ao longo do tempo.

É um método semelhante a Transformada Janelada de Fourier (TJF), no entanto, a TO supera a limitação da TJF de uma janela ao possuir janelas móveis no tempo e espaço, podendo se dilatar e comprimir de acordo com alta e baixa frequência.

Para aplicar o TO nas séries temporais de precipitação, vazão naturalizadas e energia, foi realizada a padronização de acordo com a expressão na Equação 28:

$$Z = \frac{(X - \bar{X})}{\sigma}, \quad (28)$$

em que Z são as séries padronizadas; X são as séries médias anuais; \bar{X} são as médias das séries para todo o período; e σ é o desvio padrão das séries médias anuais.

A TO possui duas funções, denominadas de ondeletas contínuas e discretas. Dentre as contínuas a mais utilizada, e que foi usada neste estudo, é a Função Ondeleta base (FO) de Morlet. Existem várias equações para descrever a FO de Morlet, mas de uma forma simples, a mesma pode ser definida como uma onda plana modulada por uma função Gaussiana, conforme Equação 29:

$$\psi_0 = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-\frac{1}{2}t^2}, \quad (29)$$

em que ω_0 é a forma do sinal ou frequência moduladora da FO (adimensional) e t é cada valor da série temporal. Para a FO de Morlet sugere-se que o corte da ω_0 seja igual a 6, valor utilizado neste estudo (Torrence; Compo, 1998).

A TO da FO de Morlet é dada pela Equação 30:

$$W_{j,k} \left(\frac{t-k}{j} \right) = \frac{\pi^{-1/4}}{\sqrt{j}} \int_{t=-\infty}^{+\infty} f(t) e^{i\omega_0 \left(\frac{k-t}{j} \right)} e^{-1/2 \left(\frac{k-t}{j} \right)^2} dt, \quad (30)$$

em que $W_{j,k}$ é a TO da FO de Morlet, k é o fator de translação, t é o tempo, j é denominado fator de escalamento. Neste estudo a ω_0 de corte foi igual a 6, que é aquela sugerida (Torrence; Compo, 1998; Vilani; Sanches, 2013).

As ondeletas e suas bandas são funções ortogonais de modo que a correlação entre elas não é significativa (Alves; Filho; Silveira, 2013). Assim, é possível utilizar dessa ortogonalidade para obter a banda de baixa frequência, através da Equação 31:

$$R(i) = Q(i) - Q_1(i) - Q_2(i), \quad (31)$$

em que $Q(i)$ é o valor da vazão média no ano i ; $Q_1(i)$ é o valor da banda de alta frequência (um a oito anos) no ano i ; $Q_2(i)$ é o valor da banda de média frequência (nove a 39 anos) no ano i ; $R(i)$ é o valor da banda de baixa frequência (mais de 40 anos).

Neste estudo as séries temporais foram divididas em três bandas de frequência, foram elas: de alta frequência (1 a 8 anos); de média frequência (9 a 39 anos); e de baixa frequência (+40 anos).

A variância explicada (Var) foi definida pela razão entre a variância da série filtrada para uma banda (σ_i^2) e a variância da série histórica (σ_{total}^2):

$$Var = \frac{\sigma_i^2}{\sigma_{total}^2}, \quad (32)$$

Vale salientar que existe uma incerteza na filtragem das bandas da TO, pois o filtro se aproxima assintoticamente de zero da banda de frequência, podendo ocorrer pequenos erros de precisão.

3.4.6 Transformada de Coerência

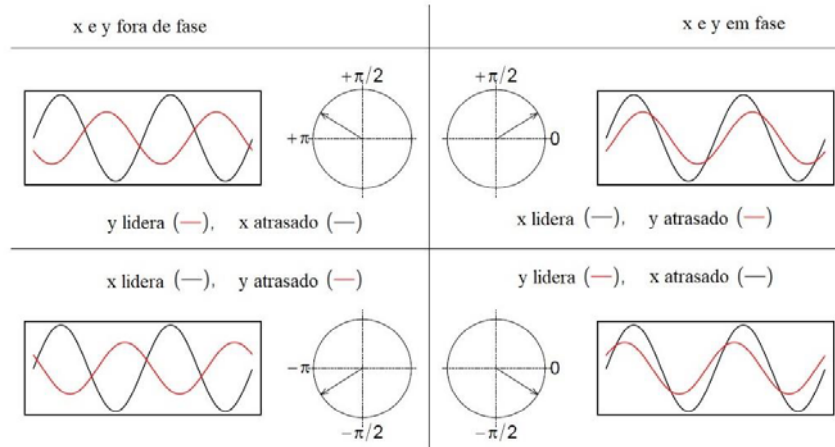
A Transformada de Coerência (TC) foi utilizado neste estudo para verificar o grau de coerência entre duas séries temporais, ou seja, o grau de variabilidade de uma determinada variável explicada pela variabilidade de outra. Foram analisadas as séries temporais dos índices climáticos com as precipitações e vazões naturalizadas. A TC é expressa pela Equação 33:

$$R_n^2(S) = \frac{|S(S^{-1}W_n^{XY}(S))|^2}{S(S^{-1}|W_n^X(S)|^2) \cdot S(S^{-1}|W_n^Y(S)|^2)}, \quad (33)$$

em que R_n é a coerência, W_n^{XY} é a Transformada Cruzada, W_n^X e W_n^Y são, respectivamente, a TO da série $X(t)$ e $Y(t)$, e S é o operador de suavização.

Através da TC é possível verificar a relação de fase entre as séries temporais das variáveis analisadas, utilizando vetores para determinar o atraso temporal de resposta de $X(t)$ em relação à $Y(t)$ ou a relação de fase entre ambas, convertido em ângulos no intervalo $[-\pi, \pi]$. Esses vetores são apresentados no espectro de potência da TC, conforme Figura 21.

Figura 21 - Diferença de fase e sua interpretação.



Fonte: Adaptado de Rösch e Schmidbauer (2018).

3.4.7 Curva de Permanência e Q90

Neste estudo, o desempenho do sistema em relação a garantia de oferta de água se deu variando os períodos definidos através das análises supracitadas, referente aos eventos de baixa frequência. Para tanto, foi utilizado a Curva de Permanência (CP) que é equivalente a um hidrograma de frequência acumuladas de ocorrência das vazões em um rio. Ela é expressa através da relação entre a vazão e a frequência (estimativa empírica) com que essa vazão é superada ou igualada, tal como:

$$CP = \frac{m}{n} \times 100, \quad (34)$$

em que m é a ordem do valor ordenado e n é o número de valores da série temporal.

A CP ajuda na análise de dados de vazões quando se deseja saber qual a porcentagem do tempo em que o rio apresenta vazões em determinada faixa ou qual a porcentagem do tempo em que um rio tem vazão suficiente para atender determinada demanda. Neste estudo a CP foi utilizada para obter a Q90. Ela tem sido utilizada como referência para a legislação na área de Meio Ambiente e de Recursos Hídricos na maioria dos Estados brasileiros e fornece uma garantia de vazão que supre o abastecimento em 90% do tempo aos usuários finais.

3.4.8 Cálculo das Anomalias Percentuais

Para as análises estatísticas das projeções da TAS e Precipitação, foi utilizado o cálculo das anomalias percentuais. Neste estudo foram utilizadas as projeções relacionadas com

os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 no período de 2021 a 2050 (século XXI), em comparação com a representação do século XX (1971 a 2000) do *historical*. Ela é expressa pela Equação 35.

$$A_{\text{anual}} = \frac{(Y_{\text{XXI}}^a - Y_{\text{XX}}^a)}{Y_{\text{XX}}^a} \times 100, \quad (35)$$

em que Y_{XXI}^a é a média anual das variáveis de precipitação e temperatura para os cenários do século XXI e Y_{XX}^a é a média anual das variáveis de precipitação e temperatura do século XX.

3.4.9 Índices de Confiabilidade, Resiliência, Vulnerabilidade e Sustentabilidade

Para a avaliação dos impactos da variabilidade de baixa frequência, mudanças climáticas e demandas consuntivas no desempenho dos reservatórios, foram considerados índices propostos por Hashimoto, Stedinger; Loucks (1982), denominados de índices de Confiabilidade, Resiliência e Vulnerabilidade.

O índice de Confiabilidade (IC) é a probabilidade da série temporal permanecer em estado satisfatório, ou seja, o percentual do tempo em que o sistema opera sem falhas (Hashimoto, Stedinger; Loucks, 1982). Ela é expressa pela equação 36.

$$IC = \left(1 - \frac{NF}{N}\right) \times 100, \quad (36)$$

em que NF é o número de falhas e N o número total da série temporal.

A falha é considerada quando a oferta é menor do que a demanda. Desse modo, dado uma vazão de demanda Q_d e uma vazão de oferta ou regularizada Q_r , tem-se a seguinte expressão para falha:

$$\begin{cases} Q_d \leq Q_r, \text{ o sistema é satisfatório} \\ Q_d > Q_r, \text{ o sistema falhou (F)} \end{cases} \quad (37)$$

O índice de Resiliência (IR) é definido pela capacidade média de recuperação do sistema de abastecimento de água, passando do estado de falha para o estado satisfatório (Hashimoto, Stedinger; Loucks, 1982). Dessa forma, ele é medido pelo inverso do valor esperado do tempo médio em que o sistema permanece em falha, e pode ser calculado por:

$$IR = (t_f - t_i) \times 100, \quad (38)$$

em que t_i é o instante de tempo tal que $Q_d \geq Q_r(t_i)$ e $Q_d > Q_r(t_i+1)$; e t_f é o instante após t_i tal que $Q_r(t_f) \geq Q_d$ e $Q_r(t_f+1) > Q_d$.

O índice de Vulnerabilidade (IV) mede a magnitude da falha, quando esta ocorre. Para Paixão et al. (2002), quanto maior o déficit hídrico, mais vulnerável será o sistema, e este

pode apresentar-se pouco resiliente, porém, bastante vulnerável ou de maneira oposta. Hashimoto, Stedinger; Loucks (1982) definem a vulnerabilidade conforme a Equação 39:

$$IV = \int_{t_i}^{t_f} f(t)dt, \text{ onde } f(t) = Q_d - Q_r \quad (39)$$

O índice de Sustentabilidade (IS) foi proposto por Loucks (1997) e é calculado através do produto do IC, IR e IV, conforme a Equação 40:

$$IS = [IC \times IR \times (1 - IV)] \quad (40)$$

O IS varia entre 0 e 1, mas nesse estudo todos os índices foi medido em percentual, para tanto, todos os índices foram multiplicados por 100. Desse modo, o IS, neste estudo, variou de 0 a 100% e indicou, através da probabilidade, recuperação e magnitude das falhas de atendimento as demandas consuntivas, o desempenho dos reservatórios da BHSF historicamente (1931 a 2020) e nos cenários futuros de mudanças climáticas e demandas crescentes (2021 a 2050).

3.5 Modelo ETS e cenários de demandas consuntivas

Para as projeções das demandas consuntivas (período de 2018 a 2050) para as sub-bacias da BHSF, considerou-se três cenários: o cenário 1 com as demandas estáticas, ou seja, considerando a última vazão retirada observada; o cenário 2 com as demandas consuntivas projetadas com o modelo ETS, considerando o limite inferior do intervalo de confiança de 95%; o cenário 3 com as demandas consuntivas projetadas com o modelo ETS; e o cenário 4 com as demandas consuntivas projetadas com o modelo ETS considerando o limite superior de 95% do intervalo de confiança.

O modelo ETS possui três componentes a saber: o Erro, a Tendência e a Sazonal (E, T, S). Essas componentes, por sua vez, podem ser aditivos (A) ou multiplicativos (M) na componente Erro; na sazonal, podem ser A ou M ou Nenhuma (N); e na Tendência, podem ser A ou M ou N ou Aditiva amortecida (Ad) ou multiplicativa amortecida (Md). Para este estudo o ETS foi baseado nos métodos descritos por Hyndman; Akram e Archibald (2008), que é disponibilizado por meio do pacote *forecast* no ambiente do *software* R. Para a escolha do melhor modelo ETS foi utilizado a estatística *Akaike's Information Criterion* (AIC), *Schwarz's Bayesian Information Criterion* (BIC) e AIC com viés removido (AICc), expressas nas Equações 41 a 42.

$$AIC = -2 \left(\frac{LL}{T} \right) + \frac{2T_p}{T}, \quad (41)$$

em que LL é o log likelihood, T_p é o total de parâmetros e T é número de observações.

$$AIC_c = AIC + \frac{2(k+2)(k+3)}{T-k-3}, \quad (42)$$

em que a expressão $\frac{2(k+2)(k+3)}{T-k-3}$ é a correção de viés.

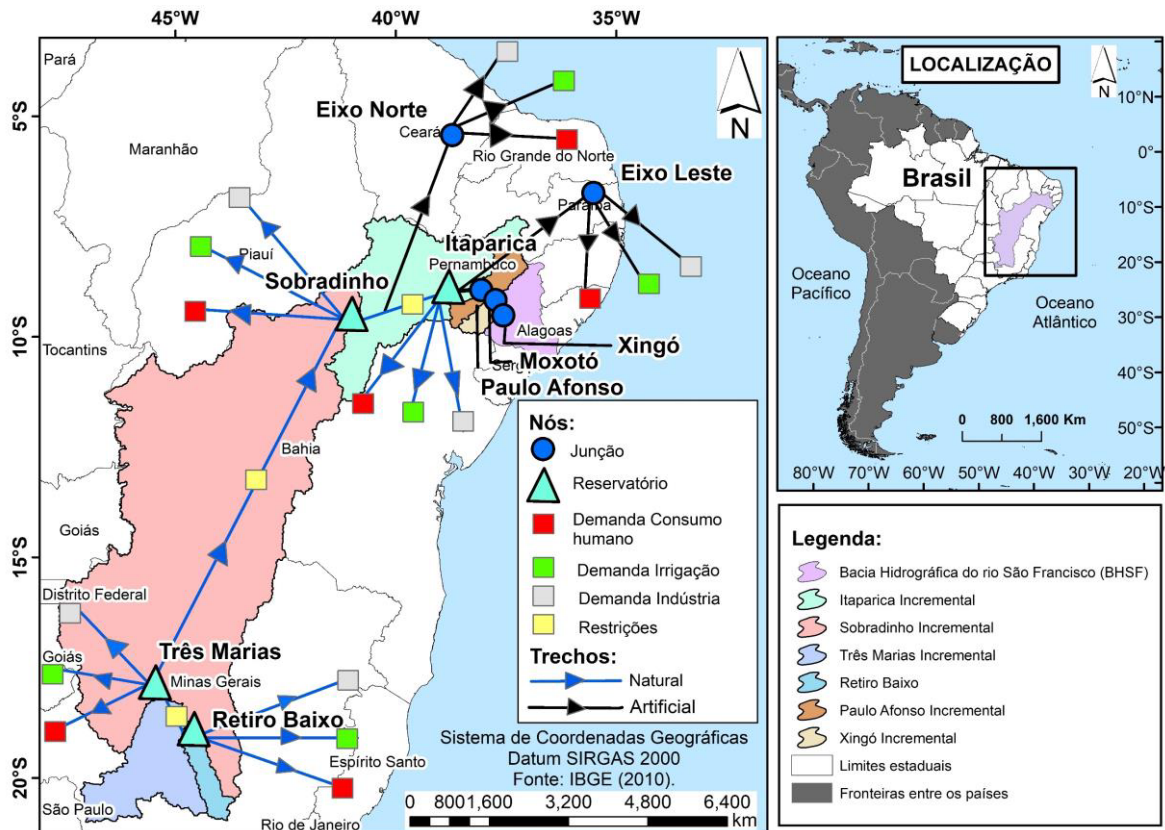
$$BIC = -2LL + k \ln(T), \quad (43)$$

em que k é a estimativa dos parâmetros dos modelos obtido através dos mínimos quadrados.

3.6 O Sistema de Suporte à Decisão

A gestão das águas da BHSF foi realizada através da operação simulada do seu hidrossistema utilizando uma rede de fluxo caracterizada por diferentes demandas e suas prioridades, bem como às garantias de abastecimento inerentes à curva de permanência de suas vazões. Os quatro reservatórios de usos múltiplos da bacia do rio São Francisco foram modelados em série, juntamente com suas demandas e os canais de transposição, formando uma rede, conforme Figura 22. Os eixos Norte e Leste da transposição do rio São Francisco foram considerados como demandas a serem atendidas pelo sistema, através da unificação de seus usos: abastecimento humano, industrial e irrigação. Estes usos também foram modelados no trecho à jusante de cada reservatório da bacia, através de demandas. Além do atendimento às demandas, o sistema modelado também atendeu aos limites máximos e mínimos de vazão nos trechos do rio conforme regulamentado pelo operador do sistema (ONS, 2017), conforme Tabela 5. Neste estudo foram utilizados os valores dos limites mínimos.

Figura 22 - Ilustração da rede utilizada no SIGA® para operação do hidrossistema da BHSF.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 - Restrições Operativas à jusante dos reservatórios da BHSFE.

Reservatório	Vazão Mínima (m ³ /s)	Vazão Máxima (m ³ /s)
Três Marias	100	2500
Sobradinho	700	8000
Itaparica	700	8000

A simulação de operação da rede é realizada por meio da equação do balanço de massa hídrica nos reservatórios, considerando a densidade constante, expressa na Equação 44:

$$V_{t+1} = V_t + I_t - E_t \cdot A_t - R_t - S_t, \quad (44)$$

em que V_t é o volume armazenado no início do período de tempo t (hm³); V_{t+1} é o volume do reservatório no início do próximo período de tempo $t+1$ (hm³); I_t é o volume afluente ao reservatório durante o período de tempo t (natural e de transferência) (hm³); E_t é a lâmina evaporada durante o período de tempo t (hm), que foi suposta constante ao longo do período; A_t é a área do espelho d'água no início do período t , que foi suposta constante para intervalos

de tempos pequenos e em função de V_t (hm^2); R_t são as Retiradas operacionais (hm^3); e a S_t é o vertimento (hm^3).

As simulações da rede tiveram as retiradas operacionais otimizadas para garantir o atendimento aos limites operativos, o máximo atendimento às demandas e a minimização do volume evaporado, durante os períodos de simulação escolhidos, por meio do *software* SIGA® que utiliza o *Multiple Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO) como algoritmo de otimização (Sugawara; Nikaido, 2014).

Durante um período em que haja falha de atendimento às demandas o SIGA® adota um sistema de prioridades, da menor para a maior, para determinar os nós do sistema que sofrerão desabastecimento.

Tabela 6 - Classificação de prioridades para simulação do sistema de reservatórios.

Demanda	Prioridade
Abastecimento Humano (HS)	1
Transposição (TRA)	2
Irrigação (IRR)	3
Indústria (IND)	4

Neste estudo foi considerado o sistema de prioridades definido na Tabela 5, que visa o atendimento prioritário ao abastecimento humano em detrimento ao da irrigação e indústria. O segundo maior valor de prioridade atribuído às demandas dos canais de Transposição do São Francisco, pois se dá pelo uso dessas águas para auxiliar sistemas de abastecimento humano de outras bacias.

3.7 Determinação da Produção de Energia nas Usinas Hidrelétricas

Convencionalmente, tem-se que a potência produzida em uma unidade hidrelétrica de energia (UHE) por:

$$P_h = G \cdot \eta_t \cdot h_l \cdot q \quad (45)$$

em que G é uma constante com valor $9,81 \cdot 10^{-3}$ ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^2$) que representa o produto entre a densidade da água ($1000 \text{ Kg}/\text{m}^3$), a gravidade (g) e uma última constante com valor 10^{-6} que converte a energia de (J) em (MJ); η_t é o rendimento hidráulico da turbina; h_l é a altura de queda líquida (m); q é a vazão turbinada em apenas uma unidade geradora (m^3/s).

Desse modo, em princípio se estabelece que a potência gerada na usina é obtida através do produto entre a Equação 46 e “n” unidades geradoras, de modo que a potência de saída na UHE corresponde a:

$$PH_{saída}(n)=G.\eta_t.hl.Q \quad (46)$$

em que $PH_{saída}$ é um vetor que possui n valores de potência gerada pela UHE (MW).

Usualmente, a altura de queda líquida tem sido representada por meio de polinômios de quarta ordem dependentes do volume armazenado (no caso do nível de montante) e da vazão defluente (no caso do nível de jusante). O valor da cota de montante é dado pelo seguinte polinômio:

$$fcm=a_0+a_1.V+a_2.V^2+a_3.V^3+a_4.V^4 \quad (47)$$

em que fcm é o valor da cota de montante (m); a_0, \dots, a_4 são os coeficientes do polinômio que representa a cota de montante para o reservatório; V é o volume armazenado (hm^3).

Por outro lado, o nível de jusante da usina é a cota do rio após a turbinagem. O mesmo pode ser dado através do polinômio que relaciona a vazão defluente (vazão turbinada - Q mais a vazão vertida - S na UHE) com os respectivos coeficientes:

$$fcj=b_0+b_1(Q+S)+b_2(Q+S)^2+b_3(Q+S)^3+b_4(Q+S)^4 \quad (48)$$

em que fcj é o valor da cota de jusante (m); S é a vazão vertida na UHE (m^3/s); $b_0 \dots b_4$ são os coeficientes do polinômio que representa a cota de jusante para o reservatório.

Desse modo, com base nas Equações 49 e 50, a altura de queda bruta (m) passa a ser:

$$hb=fcm - fcj \quad (49)$$

Contudo, nem toda essa altura está disponível na entrada da turbina, pois uma parte dela se perde quando a água passa pelo conduto forçado e demais elementos de adução. Assim, tem-se que a altura de queda líquida na unidade hidrelétrica é definida como a diferença entre hb e a perda hidráulica, como pode ser expressa por:

$$hl=hb - pl \quad (50)$$

em que pl é a perda líquida hidráulica (m).

As perdas hidráulicas, por sua vez, foram modeladas como uma função quadrática da vazão turbinada e uma determinada constante, do seguinte modo:

$$pl=k_p.q^2 \quad (51)$$

em que k_p é uma constante que depende das características físicas do conduto forçado que conecta o reservatório com uma certa unidade hidrelétrica (s^2/m^5);

Quanto ao rendimento da turbina, para construir uma modelagem mais próxima à realidade do comportamento físico do rendimento hidráulico de uma turbina, duas variáveis devem ser levadas em consideração: a altura de queda líquida que a mesma está submetida e a sua vazão turbinada (Brandão, 2004). Deste modo, esse conjunto de dados é representado através da seguinte função quadrática côncava:

$$\eta_t = r_0 + r_1 \cdot q + r_2 \cdot hl + r_3 \cdot q \cdot hl + r_4 \cdot q^2 + r_5 \cdot hl^2 \quad (52)$$

em que r_0, r_1, r_2, r_3, r_4 e r_5 são os coeficientes do polinômio que representa o rendimento de uma dada unidade hidrelétrica.

Os valores dos coeficientes dos polinômios que estão a montante (variáveis 'a', Equação 47), a jusante (variáveis 'b', Equação 38) e a eficiência da turbina (variável 'r', Equação 39) para cada reservatório, bem como as constantes utilizadas para obter a perda hidráulica (variável 'kp', Equação 51), encontram-se no Quadro 1. Esses níveis foram representados através de polinômios de quarto grau, obtidos através de regressão polinomial. Utilizou-se o Rendimento turbina-gerador (%) da UH Itaparica, disponibilizado por (Brandão, 2004), equivalente a η igual a 91%. A constante k_p para obtenção das perdas hidráulicas, pertencente à Equação 51, considerou os valores de k_p de $2,53E-05$, para a UH Três Marias; $9,84E-07$, para a UH Sobradinho; e 0 para a UH Itaparica (o que tornou p_l igual a zero, ou seja, sem perdas).

Quadro 1 - Valores dos coeficientes polinomiais.

Reservoir	Três Marias			Sobradinho			Itaparica		
	a	b	r	a	b	r	a	b	r
0	5,3E+02	5,2E+02	3,6E-01	3,7E+02	3,6E+02	3,6E-01	2,8E+02	2,5E+02	-
1	6,1E-03	1,6E-03	7,0E-03	1,4E-03	2,0E-03	1,4E-03	6,8E-03	-	-
2	-4,8E-07	-2,6E-07	7,0E-03	-5,4E-08	-3,0E-07	1,3E-02	-8,9E-07	-	-
3	2,2E-11	2,9E-11	4,7E-05	1,2E-12	2,5E-11	1,8E-05	7,0E-11	-	-
4	-3,9E-16	-1,2E-15	-4,3E-05	-9,6E-18	-7,7E-16	-1,8E-06	-2,2E-15	-	-
5	-	-	-1,2E-04	-	-	-4,0E-04	-	-	-

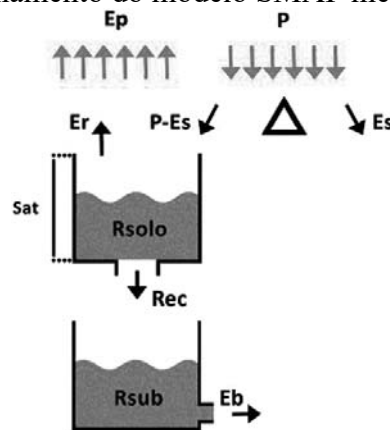
Fonte: Brandão (2004).

3.8 Modelagem hidrológica

3.8.1 SMAP

Foi utilizado neste estudo o modelo hidrológico concentrado chuva-vazão SMAP (Lopes; Braga; Conejo, 1982) adaptado para passos de tempo mensais. Ele tem o processo de balanço hidrológico baseado em dois reservatórios hipotéticos, sendo um de solo (R_{solo}) e um subterrâneo (R_{sub}), conforme Figura 50.

Figura 23 - Esquema de funcionamento do modelo SMAP mensal.



Fonte: Lopes, Braga e Conejo (1982).

O modelo SMAP possui quatro parâmetros: a capacidade de saturação do solo (SAT); o expoente relacionado à geração de escoamento superficial (pes); o coeficiente de recarga do aquífero (C_{rec}), que está relacionado com a permeabilidade da zona não saturada do solo; e a constante de recessão (K) do nível d'água do segundo reservatório R_{sub} , responsável pela geração do escoamento de base. Além de duas inicializações: a taxa de umidade inicial do solo (TU_{in}), que determina o nível inicial do segundo reservatório R_{solo} ; e o escoamento de base inicial (EB_{in}). A Tabela 1 trazem os valores das inicializações e dos parâmetros calibrados para cada reservatório da BHSF.

Os dois reservatórios são atualizados do mês 1 para o mês $i+1$ através das equações 53 e 54:

$$R_{\text{solo}}(i+1) = R_{\text{solo}}(i) + P - E_r - E_s - R_{\text{rec}}, \quad (53)$$

$$R_{\text{sub}}(i+1) = R_{\text{sub}}(i) + R_{\text{rec}} - E_b, \quad (54)$$

em que E_s é o que Escoamento Superficial em mm, P é a Precipitação em mm, E_r é a Evapotranspiração real em mm.

O primeiro parâmetro do modelo é o R_{solo} , que, por definição, recebe por valor máximo o do SAT. Por sua vez o SAT pode ser expresso pela TU_{in} pela Equação 55:

$$\text{SAT} = \frac{R_{\text{solo}}}{TU_{\text{in}}} \quad (55)$$

A E_r também é calculado através da TU_{in} e E_p que é a Evapotranspiração Potencial (uma das variáveis de entrada) através da Equação 56:

$$E_r = TU_{\text{in}} \times E_p \quad (56)$$

A recarga R_{rec} , que aparece nas equações 12 e 13, é expressa pela Equação 57:

$$R_{\text{rec}} = R_{\text{solo}} - C_{\text{rec}} \times TU_{\text{in}}^4 \quad (57)$$

O E_s é expresso pela Equação 58:

$$E_s = P \times TU_{\text{in}}^{\text{Pes}} \quad (58)$$

O EB_{in} é expresso pela Equação 59:

$$EB_{\text{in}} = R_{\text{sub}} \times \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{K}} \right] \quad (59)$$

O E_s e o EB_{in} compõe juntos com a Área, a vazão afluyente da bacia (Q) em m^3/s , dada pela Equação 60:

$$Q = \frac{(EB_{\text{in}} + E_s) \times \text{Área}}{2630} \quad (60)$$

Neste trabalho a calibração se deu em uma única etapa, na qual os parâmetros SAT, pes, CREC e K do nível da R_{SUB} que gera o R_{SOLO} , bem como as inicializações, o TU_{in} e EB_{in} , sofreram uma otimização através da ferramenta solver presente na planilha Microsoft Excel, maximizando o coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash; Sutcliffe, 1970) e minimizando o *Percent Bias* (PBIAS) (Gupta; Sorooshian; Yapo, 1999). Eles são expressos nas Equações 61 e 62:

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{sim}})_i^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs},i} - \overline{Q_{\text{obs}}})^2}, \quad (61)$$

$$\text{PBIAS} = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{sim}})_i}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs},i})}, \quad (62)$$

em que Q_{obs} é vazão observada, Q_{sim} é a vazão simulada, $\overline{Q_{\text{obs}}}$ é a média das vazões observadas; e n é o número total de observações.

Segundo Abbaspour *et al.* (2015), o NSE tem seu valor variando entre menos infinito e 1 (valor considerado perfeito). Por outro lado, valores entre 0 e 1 são considerados aceitáveis e valores ≤ 0 , indicam que o valor predito pelo modelo é pior que a média dos dados

observados (Abbaspour et al., 2015; Almeida; Pereira; Pinto, 2018). Para o PBIAS, que tem a função de avaliar o viés que a média dos valores simulados tem em relação aos observados, o valor ideal é igual a 0; variando entre valores positivos e negativos que indicam subestimação e superestimação, respectivamente, do modelo em relação aos dados observados (Abbaspour et al., 2015; Almeida; Pereira; Pinto, 2018).

Moriasi et al. (2007) chegaram em critérios da performance do modelo SWAT de acordo com os índices estatísticos NSE e PBIAS, conforme Tabela 7. Serão esses os critérios que serão utilizados nesse projeto.

Tabela 7 - Critérios utilizados como indicadores de performance da calibração e validação dos modelos hidrológicos.

Performance do modelo SWAT	NSE	PBIAS
Muito bom	$0,65 < NSE \leq 1$	$PBIAS < \pm 10\%$
Bom	$0,54 < NSE < 0,65$	$\pm 10\% < PBIAS < \pm 15\%$
Satisfatório	$0,50 < NSE < 0,54$	$\pm 15\% < PBIAS < \pm 25\%$
Insatisfatório	$NSE \leq 50$	$PBIAS > \pm 25\%$

Fonte: Adaptado de Moriasi et al. (2007).

A Tabela 8 traz as inicializações e parâmetros de calibração do modelo SMAP para os quatro reservatórios analisados.

Tabela 8 - Inicializações e Parâmetros de calibração do modelo SMAP.

Bacias	Área (km ²)	Período de calibração	TU _{in}	EB _{in}	SAT	Pes	CREC	K
Retiro Baixo	12.187	01/1996 a 12/2006	68,66	54,74	3.240,12	8,34	1,89	0,09
Três Marias	50.732	-	86,36	212,83	1.769,15	8,05	2,6	0,02
Sobradinho	467.000	-	60,7	751,65	1.500,14	5,75	4,10	0,01
Itaparica	93.188	-	97	322	5.000	5,6	0,69	13,25

Fonte: Elaborado pelo autor

3.8.2 Modelo de Regressão Linear

Para os demais reservatórios das UH's de Queimado e as de fio d'água Xingó, Moxotó e Complexo Paulo Afonso, optou-se pelo modelo de Regressão Linear. Para tanto, as vazões naturalizadas obtidas com o modelo SMAP foram utilizadas como preditora das demais, salvando os parâmetros de regressão. Isso foi possível, pois as estações dos reservatórios das UH's modeladas estão a jusante das bacias predictoras, fazendo parte da mesma rede.

Esse modelo foi utilizado em estudos que descreveram sua boa performance em representar as vazões em diversos reservatórios (Silva *et al.*, 2020; Silveira *et al.*, 2016). A

primeira etapa metodológica se deu através da padronização das séries mensais das vazões naturalizadas utilizando a Equação 63:

$$Z_{i,j,k} = \frac{q_{i,j,k} - \overline{q_{i,j}}}{\sigma_{i,j}}, \quad (63)$$

em que Z é a vazão normalizada, i o número de meses (variando de 1 a 12), k o número de anos (variando de 1931 a 2008), j o número de reservatórios (no total de 8), $q_{i,j,k}$ vazão naturalizada do posto j no mês i no ano k , $\overline{q_{i,j}}$ é a matriz que representa a média de todos os meses e postos, e $\sigma_{i,j}$ é a matriz que representa o desvio padrão da série mensal de todos os postos.

A segunda etapa foi realizar a regressão linear das vazões naturalizadas do ONS para obter os parâmetros de cada reservatório que não possui o SMAP calibrado, considerando todos os demais reservatórios como variáveis explanatórias (Itaparica, Sobradinho, Três Marias e Retiro Baixo). A regressão linear foi dada pela Equação 64:

$$Z_{i,pj,k} = \sum_{pk=1}^{pk=4} Z_{i,pk,k} \cdot \beta_{i,pk}, \quad (64)$$

em que pk são as vazões das 4 bacias obtidas através do modelo SMAP (variando de 1 a 4), pj são os reservatórios que não possuem o SMAP calibrado (variando de 1 a 4) e $\beta_{i,pk}$ os coeficientes de regressão.

3.8.3 Modelo SWAT

Para o presente estudo, como mencionado anteriormente, optou-se pela escolha do modelo distribuído de base física SWAT, pois o mesmo possibilita a modelagem de grandes e complexas bacias hidrográficas (como é o caso da região de estudo), simulando os vários e distintos processos físicos de forma distribuída (como evapotranspiração, infiltração, escoamento de água, por exemplo), distinguindo os diferentes tipos e usos do solo espacialmente ao longo de grandes intervalos de tempo (Bressiani *et al.*, 2015). Segundo Bressiani *et al.* (2015), esse modelo se destaca ainda pela sua robustez, capacidade de análise e correlação que é possível se obter entre os elementos físicos de uma bacia hidrográfica.

O modelo SWAT é desenvolvido pelo *Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture* (ARS/USDA) dos Estados Unidos e disponibilizado livremente; tendo apresentado resultados satisfatórios em diversos trabalhos aplicados em diversas regiões do globo nos últimos anos (Brighenti; Bonumá; Chaffe, 2016; Hasan; Wyseure, 2018; Lima; Rosman; Fernandes, 2016; Qin *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2023; Wagena *et al.*, 2018).

O ciclo hidrológico do modelo SWAT é baseado na Equação 65 do balanço hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (P - Q_s - ET - W_s - Q_{gw}), \quad (65)$$

onde, SW_t e SW_0 são os armazenamentos de água no solo nos tempos final e inicial, respectivamente, em mm, t é o tempo em dia, P é a precipitação em mm, Q_s é o escoamento superficial em mm, ET é evapotranspiração em mm, W_s é a percolação em mm e Q_{gw} é o escoamento de base em mm (Neitsch *et al.*, 2011).

O escoamento superficial é uma das fases do ciclo hidrológico proveniente do excedente das águas precipitadas que não se infiltraram. Como o próprio nome sugere, estas águas não infiltradas escoam pelos declives em direção a depressões, lagos, cursos d'água e mares e acabam por empocar nas depressões que existem na superfície do solo (Pruski; Brandão; Silva, 2003). O escoamento superficial pode ser definido ainda desde o excesso de precipitação que se desloca pela superfície após uma chuva de longa duração até o escoamento que ocorre no leito de um curso d'água (Righetto, 1998; Tucci, 2009).

Tucci (2009), discorre que o escoamento pode ocorrer predominantemente sobre a superfície do solo, nas pequenas bacias. Para grandes bacias, o escoamento ocorre por meio do deslocamento da onda cheia através de um canal definido, com pequena declividade.

O cálculo do escoamento superficial é uma das primeiras etapas cumpridas no processo de simulação hidrológica realizada pelo modelo SWAT, visto que corresponde à fase terrestre do ciclo hidrológico. O escoamento é calculado para cada sub-bacia pré-definida pelo usuário, utilizando totais de precipitação diários ou subdiários, simulando o volume e as taxas máximas do escoamento (Neitsch *et al.*, 2011).

Dentre os recursos oferecidos pelo modelo para o cálculo do escoamento superficial, estão os métodos de cálculo: método da Curva Número (1972) e método de Green-Ampt (1911). O método da Curva Número utilizado pelo SWAT é uma modificação proposta pelo *Soil Conservation Service* (USDA; SCS, 1972) e um dos métodos empíricos mais utilizados devido a sua precisão e facilidade de aplicação.

Este método tem como característica a variação não linear entre os parâmetros Número da Curva (CN, do inglês *Curve Number*) e o teor de umidade do solo. À medida que o solo se aproxima do ponto de murcha, o valor do Número da Curva decresce. De outra forma, este valor cresce conforme o solo se aproxima da saturação. O CN é pré-determinado baseando-se em informações de cobertura do solo, do tipo de solo e das condições de umidade antecedentes e compreende valores entre 30 e 100, nos quais valores mais baixos apontam

menor potencial de geração de escoamento e valores mais altos indicam maior potencial (Arroio Junior, 2016; USDA, 1986).

A Equação 65 mostra como é efetuado o cálculo do escoamento superficial pelo método da Curva Número:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0,2S)^2}{R_{day} + 0,8S}, \quad (65)$$

em que Q_{surf} é o escoamento superficial produzido durante determinada precipitação (mm), R_{day} trata-se da precipitação acumulada (mm) e S é a capacidade máxima de infiltração (mm), onde está relacionada com o CN através da Equação 66:

$$S = \left(\frac{25400}{CN} \right) - 254. \quad (66)$$

O método de infiltração de Green & Ampt (Green; Ampt, 1911), denominado também método por excesso de chuva, exige a entrada de dados de precipitação subdiários e destaca o cálculo do processo de infiltração, assumindo água excedente na superfície simulando, portanto, o escoamento em base subdiária (Neitsch *et al.*, 2011).

O cálculo da taxa de infiltração pelo método de Green & Ampt é feito através da Equação 67:

$$f(t) = K_e \cdot \left(1 + \frac{\psi_{wf} \cdot \Delta\theta_v}{F_{inf,t}} \right), \quad (67)$$

sendo $f(t)$ a taxa de infiltração no tempo t (mm/h), K_e é a condutividade hidráulica efetiva, ψ_{wf} é a frente de molhamento matricial potencial, $\Delta\theta_v$ é a mudança no conteúdo de umidade e $F_{inf,t}$ é a infiltração cumulativa (mm). Vale ressaltar, que esta equação assume o perfil do solo como sendo homogêneo e a distribuição uniforme da umidade antecedente (Iensen; Bauer Schultz; Santos, 2015).

O modelo SWAT calcula a quantidade de água que entra no solo a cada intervalo de tempo. O excesso de precipitação não é calculado quando a taxa de infiltração se torna maior que a intensidade do evento de precipitação, o que sugere que toda a chuva que ocorre neste intervalo de tempo é infiltrada no solo. De outra forma, se a taxa de infiltração não excede a intensidade do evento, sugere-se que essa chuva em excesso seja escoada (King *et al.*, 1999).

Segundo Tufa e Sime (2021), os passos da execução do ArcSWAT se dividem em: (i) delimitação da bacia; (ii) criação das HRUs; (iii) configuração e execução do modelo SWAT através da inserção dos dados climáticos e (iv) Calibração e Validação do modelo.

Segundo Tufa e Sime (2021), o SWAT parte do modelo digital de terreno delineando o padrão da rede de drenagem (com a densidade hidrológica selecionada pelo

usuário). Esse passo permite esboçar a foz e o contorno da bacia. Após isso, o modelo SWAT liga aos cursos de água a montante da foz as respectivas sub bacias que, por sua vez, são subdivididas em Unidades de Respostas Hidrológicas (URH).

As URH consistem em sub bacias que são homogêneas em relação as características topográficas, de solo e uso do solo. Após esse passo é calculado componentes do escoamento associadas a cada uma das URH, através das equações de balanço hídrico e a modelos de fluxo adaptados às condições de escoamento superficial, subperifical e subterrâneo. Por fim, esses volumes de água seguem as linhas de água e, ao longo destas, seguem ao longo do ponto mais a jusante da bacia hidrográfica. É nesse passo que é contabilizado o valor global do caudal. Mais detalhes sobre esses passos e configurações e padronização do modelo serão mencionados no próximo tópico.

3.8.3.1 *Delineamento da Bacia*

No ambiente ArcGis, em sua forma que integra o modelo SWAT (o ArcSWAT), o delineamento da bacia hidrográfica foi realizado de forma automática através da função *Delineate Watershed*. O primeiro dado de entrada para esta operação é o MDE, que deverá ser selecionado. O passo seguinte foi definir os tamanhos de limite para criação de canais e fluxos, que podem ter unidades como km² ou hectares, ou ainda pelo número de células. Definidos os limites, foi criado os fluxos e canais através da função *Create Streams*.

Pode ser necessário ainda, selecionar e mesclar sub-bacias através da função *Merge subbasins*. Isso é especialmente importante para evitar pequenas sub bacias. Verificada e realizada esta etapa, foram adicionadas fontes pontuais e reservatórios às sub bacias existentes através das funções *Add point source to each subbasin* e *Add*. Por fim, foram calculadas e salvas as informações sobre a bacia, concluindo com o delineamento da bacia hidrográfica e ativando a opção de criar as Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs, do inglês *Hydrologic Response Units*).

3.8.3.2 *Criação das HRUs*

As Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) usadas pela SWAT são divisões de bacias em unidades menores, cada uma com uma combinação específica de solo / uso da terra (cultura) / inclinação. Para criá-las foi usada a função *Create HRUs*. Em seguida, pretende-se

converter os valores numéricos encontrados nos mapas de uso do solo e solo em códigos de uso da terra e nomes de solo da SWAT, respectivamente.

A leitura dos dados dos mapas de MDE, uso da terra, solo e declive, necessária para calcular as HRUs, foi feita através da função *Read*. Depois que todos os dados foram lidos e armazenados, a opção *Single/Multiple HRUs* foi ativada. As opções de terra, solo, declive e HRU dominante fornecerá apenas uma HRU para cada sub-bacia (ou seja, a opção de HRU único). O Uso e Cobertura do Solo dominante, tipos de solo, MDE (declive) escolherá o Uso e Cobertura do Solo com a maior área na sub bacia, os tipos de solo com a maior área na sub bacia, e a faixa de declive com a maior área na sub bacias. A HRU dominante selecionará a maior das HRUs potenciais em cada sub bacia e faz com que seu Uso e Cobertura do Solo, tipos de solo e declive sejam os escolhidos para toda a sub bacia. Após estas etapas, espera-se finalizar o processo de criação das HRUs.

3.8.3.3 *Dados Climáticos*

Os dados Climáticos são inseridos no ArcSWAT em formato de tabelas, para isso, o usuário precisa inicialmente obedecer a algumas regras para inserção de cada variável, são elas: (i) o cabeçalho da tabela deve consistir em ID de colunas (ID da estação), NOME, LAT (latitude), LONG (longitude) e ELEVATION; (ii) o formato dos dados climáticos precisa seguir, por sua vez, na primeira linha com a data no formato ano/mês/dia seguida dos valores climáticos diários. Além disso, para os valores ausentes, coloca-se -99. Isso é feita separadamente para cada variável, com exceção das temperaturas mínimas e máximas, pois as mesmas devem ser separadas apenas por uma vírgula; e (iii) todos os dados devem ser salvos na mesma pasta (Tufa; Sime, 2021).

3.8.3.4 *Calibração e Validação*

O procedimento de calibração e validação pretendida por esse projeto engloba o uso do *software* independente SWAT-CUP, onde CUP é *Calibration and Uncertainty Procedures* ou em português Procedimentos de Calibração e Incerteza. Ele foi desenvolvido para a análises de incertezas e sensibilidades, calibração e validação, para as simulações com o modelo SWAT (Abbaspour *et al.*, 2015).

O SWAT-CUP contém cinco procedimentos de calibração (UFI-2, PSO, GLUE, ParaSol e MCMC), incluindo ainda funções para validação e análise de sensibilidade

(ABBASPOUR et al., 2015; ALMEIDA; PEREIRA; PINTO, 2018). Para o presente estudo, foi utilizado o procedimento SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting*, versão 2). Segundo Rouholahnejad *et al.* (2012), o procedimento SUFI-2 utiliza o método do hipercubo latino para determinação dos parâmetros; sendo o processo inicializado com uma faixa de valores escolhida pelo usuário. Cabe ao usuário também estipular quantas vezes esse procedimento irá se repetir, ou seja, quantas interações são necessárias (Brighenti; Bonumá; Chaffe, 2016). Todavia, segundo Abbaspour *et al.* (2015) é recomendado um número de simulações entre 500 e 1000 interações. Além do que foi dito, a escolha do procedimento SUFI-2 também se deu pelo elevado número de trabalhos que o utilizaram; relatando que ele apresentou resultados eficientes (Abbaspour et al., 2015; Almeida; Pereira; Pinto, 2018; Brighenti; Bonumá; Chaffe, 2016).

Dentre esses trabalhos, o de Almeida, Pereira e Pinto (2018) avaliaram, de maneira mais enfática, o uso do SWAT-CUP com o procedimento SUFI-2, no qual chegaram à conclusão de que, em geral, o modelo SWAT foi bom e adequado em termos de desempenho de calibração e validação na simulação da vazão na Bacia do Rio Mucuri; fazendo uso dos índices estatísticos coeficientes de determinação, coeficiente de Nash-Sutcliffe e percentual de tendência.

3.9 Mudanças Climáticas

3.9.1 Remoção de Viés

Foi utilizado a Função de Distribuição Acumulada Gama para ajustar os dados provenientes dos modelos com os dados observados. Isso é feito, pois os resultados dos modelos climáticos, como os modelos CMIP6, apresentam erros sistemáticos, principalmente relacionado ao viés. (Silva et al., 2021; Silveira; Souza Filho; Vasconcelos Júnior, 2017). A Função de Distribuição Acumulada Gama é expressa pela Equação 68:

$$f_x(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} x^{\gamma-1} e^{-x/\beta}, \quad (68)$$

em que x é a variável (precipitação ou TAS nesse caso); β é o parâmetro de escala; γ é o parâmetro de forma; e Γ é a função Gama.

O ajuste dos dados dos modelos com os dados observados das variáveis de precipitação e TAS se deu na escala mensal, onde cada série temporal (modelada e observada) se encaixaram a uma Função de Distribuição Acumulada Gama, sendo salvos os parâmetros β

e γ . Foram considerados 12 ajustes gama, um para cada mês do ano, ou seja, todas as precipitações/TAS que ocorreram ao longo de cada mês de janeiro são agrupadas e gerados os parâmetros. Em seguida, o mesmo procedimento é realizado para os outros meses.

As curvas de distribuição de probabilidade acumulada geradas possibilitam conferir o comportamento probabilístico dos dados modelados em relação aos dados observados. Logo, o valor corrigido da precipitação/TAS dos modelos foi obtido ajustando ao valor da precipitação/TAS correspondente à mesma probabilidade de ocorrência na curva dos valores observados.

3.9.2 *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*

As projeções das mudanças climáticas foram analisadas através dos dados provenientes do CMIP6. Eles são resultados das simulações de cinco MCG disponíveis para *download* até dezembro de 2020 que possuem cenários de projeções, são eles: *Canadian Earth System Model 5nd generation* (CanESM5), *Institut Pierre-Simon Laplace-5 Component Models version A-Medium Resolution* (IPSL-CM5A-MR), *Model for Interdisciplinary Research on Climate version 6* (MIROC6), *Beijing Climate Center-Climate System Model version 2-Medium Resolution* (BCC-CSM2-MR), e *Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0* (MRI-ESM2.0). A Tabela 9 traz as instituições, países e trabalhos que dissertam sobre os modelos supracitados.

Tabela 9 - Modelos do CMIP6 com Instituições, países e citações.

Modelos	Instituição ou Organização (Países)	Citações
CanESM5	Canadian Earth System Model 5nd generation (Canadá)	(Swart et al., 2019)
IPSL-CMSA-MR	Institut Pierre-Simon Laplace (França)	(Boucher et al., 2020)
MIROC6	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (Japão)	(Hirota et al., 2018)
BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center climate system model version 2 (China)	(Wu et al., 2019)
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute Earth System Model version 2 (Japão)	(Yukimoto et al., 2019)

4 RESULTADOS

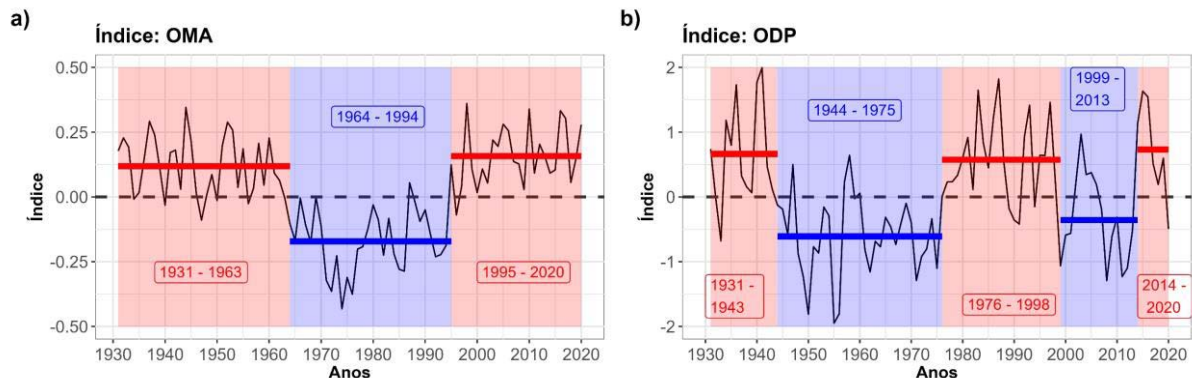
Os resultados foram divididos em: (i) análise histórica das variáveis climáticas, hidrológicas e energéticas; (ii) Modelagem hidrológica; (iii) Cenários climáticos, hidrológicos e energéticos; e (iv) Monitoramento do UCS.

4.1 Análise histórica das variáveis climáticas, hidrológicas e energética

4.1.1 Índices Climáticos

A Figura 24 e a Tabela 10 trazem as análises do teste de *Changepoints* para os índices climáticos da OMA e da ODP.

Figura 24 - Teste de *changepoints* aplicado nos índices climáticos da OMA e ODP anuais no período de 1931 a 2020.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 - Períodos das fases individuais dos índices climáticos da OMA e ODP obtidos através da análise de *changepoint*.

Índice	Período	Fase	Duração	Média	Desvio Padrão	CV
OMA	1931 – 1963	OMA+	33 anos	0,12	0,11	0,94
	1964 – 1994	OMA–	31 anos	–0,17	0,12	–0,69
	1995 – 2020	OMA+	25 anos	0,15	0,11	0,72
ODP	1931 – 1943	ODP+	13 anos	0,66	0,81	1,21
	1944 – 1975	ODP–	32 anos	–0,61	0,62	–1,02
	1976 – 1998	ODP+	23 anos	0,57	0,64	1,11
	1999 – 2013	ODP–	15 anos	–0,36	0,67	–1,88
	2014 – 2020	ODP+	6 anos	0,73	0,76	1,04

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dessa análise foi possível definir três períodos para a OMA, com uma fase OMA– no período de 1964 a 1994; e duas fases OMA+ no período de 1931 a 1963 e de 1995 a 2020. No caso da ODP, as fases identificadas foram: ODP+ nos períodos de 1931 a 1943, de 1976 a 1998 e de 2014 a 2020; e ODP– nos períodos de 1944 a 1975 e de 1999 a 2013. Essas fases coincidiram com os resultados obtidos nos estudos de Rocha e Souza Filho (2020) e Kayano, Andreoli e Souza (2019), que aplicaram o teste de *Changepoints* e de média móvel de 121 meses, respectivamente.

Além dos períodos individuais, também foram analisados os períodos com as fases conjuntas dos índices climáticos da OMA e da ODP (ver Tabela 11). Os resultados mostraram que períodos mais longos ocorreram durante as fases opostas desses fenômenos, ou seja, na fase OMA+/ODP– no período de 1944 a 1963 (com duração de 15 anos) e no período de 1999 a 2013 (com duração de 20 anos); e na fase OMA–/ODP+ no período de 1976 a 1994 (com duração de 19 anos), do que quando as duas oscilações estão nas mesmas fases, ou seja, na fase OMA+/ODP+ no período de 1931 a 1943 (com duração de 13 anos), na fase OMA–/ODP– no período de 1964 a 1975 (com duração de 12 anos), na fase OMA+/ODP+ no período de 1995 a 1998 (com duração de 4 anos) e na fase OMA+/ODP+ no período de 2014 a 2020 (com duração de 7 anos) .

Tabela 11 - Períodos analisados de acordo com as fases conjuntas dos índices climáticos da OMA e ODP obtidos através da análise de *changepoint*.

Período	Fase	Duração
1931-1943	OMA+/ODP+	13 anos
1944-1963	OMA+/ODP–	20 anos
1964-1975	OMA–/ODP–	12 anos
1976-1994	OMA–/ODP+	19 anos
1995-1998	OMA+/ODP+	4 anos
1999-2013	OMA+/ODP–	15 anos
2014-2020	OMA+/ODP+	7 anos

Fonte: Elaborado pelo autor.

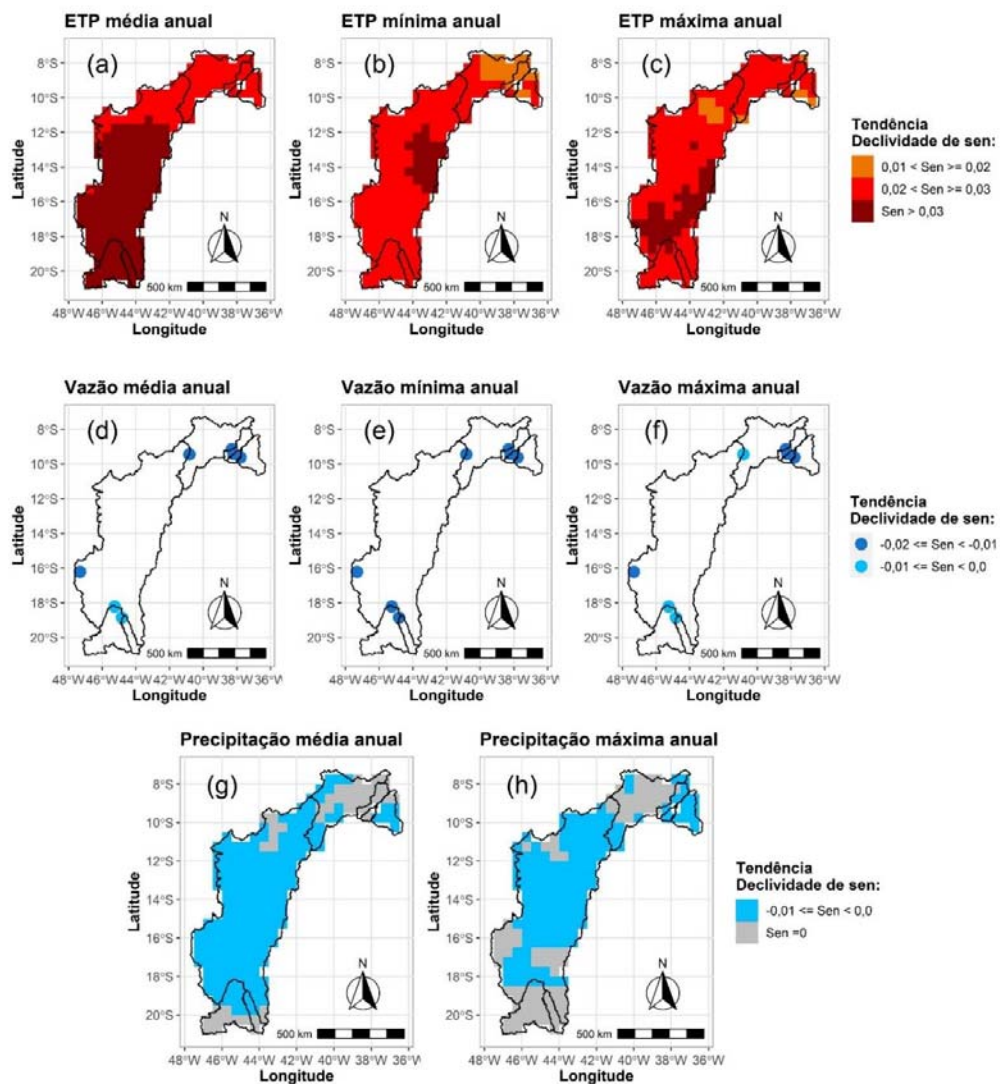
Esse resultado foi justificado no estudo de Kucharski *et al.* (2016) devido a relação inversa da TSM na escala multidecenal, com a OMA+ induzindo a ODP– e a OMA– induzindo a ODP+. Esses autores mostraram que durante a OMA+ os ventos alísios são acelerados anormalmente no Pacífico Equatorial Central, o que fortalece o mecanismo de retroalimentação de Bjerknes. Já esse mecanismo fortalece a ressurgência na costa oeste equatorial da América

do Sul, o que contribui para esfriar o Pacífico Tropical e induz as condições de ODP-. De forma análoga ocorre em relação a OMA- e a ODP+ com padrões de anomalias da TSM invertidos.

4.1.2 Teste de Tendência

A Figura 25 apresenta o resultado, de forma espacial, da análise de tendência com o teste de Mann-Kendall Sen para os pontos de grade do CRU, de onde foram obtidos os dados de precipitação e temperatura para o cálculo da ETP, e para as vazões das bacias dos reservatórios obtidos do ONS.

Figura 25 - Tendência de acordo com o teste de Mann-Kendall Sen das séries temporais padronizadas das variáveis de ETP: (a) média, (b) mínima e (c) máxima anual; da vazão: (d) média, (e) mínima e (f) máxima anual; e Precipitação: (g) média e (h) máxima anual.



Fonte: Elaborado pelo autor.

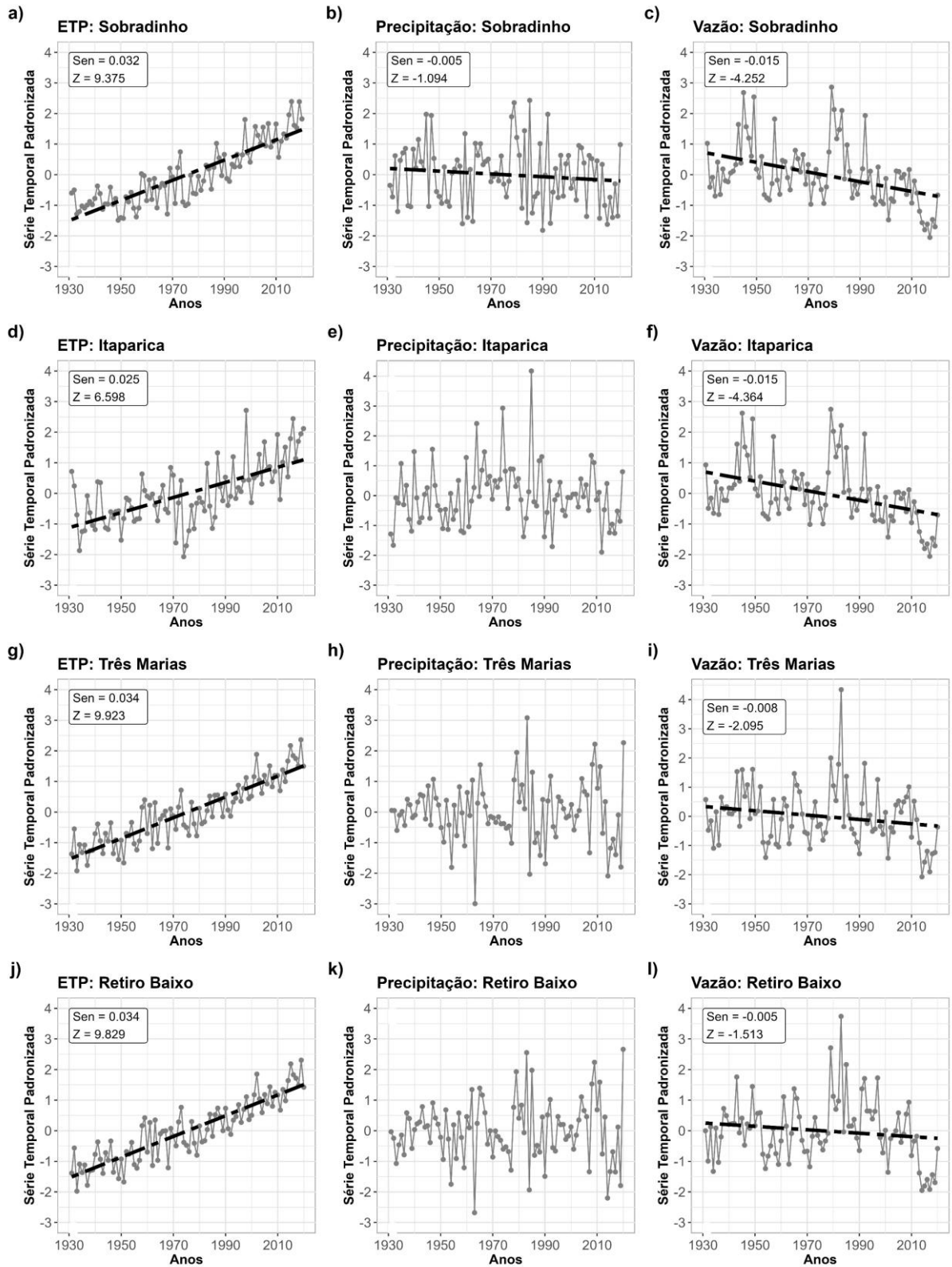
As Figuras 25a, 25b e 25c exibem as tendências das variáveis de ETP média, mínima e máxima anual, respectivamente, de 1931 até 2020 para os pontos de grade do CRU contidos na BHSF. É possível verificar a presença de tendência com significância estatística em todos os pontos de grade do CRU, sendo positivo em todos os casos. Para a média anual (Figura 25a) a magnitude foi mais significativa (acima de 0,03) nos pontos de grade contidos nas bacias dos reservatórios de Três Marias e Retiro Baixo, e boa parte da bacia do reservatório de Sobradinho. Para as demais bacias dos reservatórios a magnitude ficou entre 0,02 e 0,03. Para a mínima e máxima anual da ETP (Figuras 6b e 6c) a magnitude foi menor quando comparado com a média para as bacias dos reservatórios de Três Marias, Retiro Baixo e em grande extensão da bacia do reservatório de Sobradinho, com valores entre 0,02 e 0,03. Nas bacias dos reservatórios de Xingó, Paulo Afonso e boa parte da bacia de Itaparica também apresentaram magnitude entre 0,01 e 0,02 (Figura 25b), enquanto as máximas anuais tiveram magnitudes entre 0,02 e 0,03 (Figura 25c).

As vazões também apresentaram tendência com significância estatística, sendo negativo para todos os reservatórios (Figuras 25d, 25e e 25f). Para as vazões anuais mínima, todos os reservatórios apresentaram magnitude entre $-0,01$ e $-0,02$ (Figura 25e). Para as vazões anuais média, com exceção dos reservatórios de Três Maria e Retiro Baixo que apresentaram magnitude entre 0,0 e $-0,01$, os demais reservatórios também apresentaram magnitude entre $-0,01$ e $-0,02$ (Figura 25d). Para as vazões anuais máximas, com exceções dos reservatórios de Sobradinho, Três Marias e Retiro Baixo que apresentaram magnitude entre 0 e $-0,01$, os demais reservatórios também apresentam magnitude entre $-0,01$ e $-0,02$ (Figura 25f).

As Figuras 25g e 25h apresentam as tendências das séries de precipitação média diária anual e máxima diária anual, respectivamente, de 1931 até 2020 para os pontos de grade do CRU contidos na BHSF. Observou-se que a maioria dos pontos de grade apresentaram ausência de tendência estatisticamente significante, com exceção da bacia do reservatório de Sobradinho. Para os pontos de grade que apresentaram tendência com significância estatística, tiveram tendência negativa com magnitude aproximada de $-0,01$.

A Figura 26 apresenta a análise de tendência com o teste de Mann-kendall Sen das variáveis de ETP, precipitação e vazão anuais para as bacias dos reservatórios de Sobradinho, Itaparica, Três Marias e Retiro Baixo. As séries temporais foram padronizadas com a intenção de comparar as magnitudes das tendências entre as variáveis analisadas e entre as diferentes bacias dos reservatórios.

Figura 26 - Tendência das séries temporais de acordo com o teste de Mann-Kendall Sen. As linhas tracejadas em preto representam a tendência.



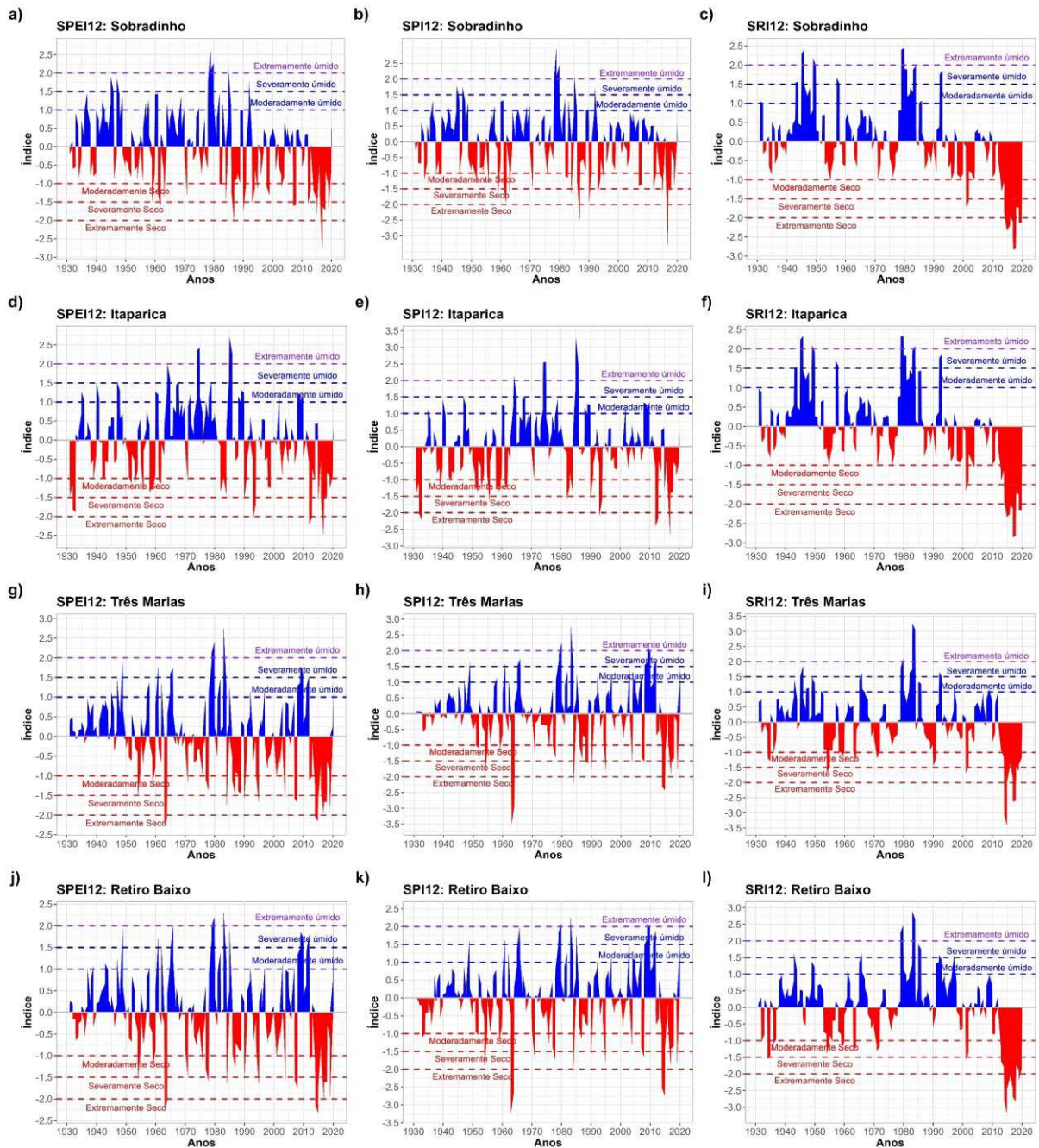
Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado da análise de tendência apresentou significância estatística em todas as séries temporais de ETP anual e vazão média anual, sendo positiva e negativa, respectivamente. Especificamente para a bacia de Sobradinho, a precipitação anual também apresentou tendência, sendo negativa. Nas demais bacias, o teste de Mann-Kendall não identificou tendência para as séries temporais de precipitação. Além disso, foi possível perceber semelhança na declividade Sen da série de ETP anual de todas as bacias avaliadas, sugerindo uma taxa de crescimento anual semelhante em todas elas. Nas séries de vazões média anual a declividade foi próxima entre as bacias de Sobradinho e Retiro Baixo com Sen de $-0,05$, enquanto as demais bacias, Três Marias e Itaparica, apresentaram declividade com Sen de $-0,08$ e $-0,015$, respectivamente.

4.1.3 SPI, SPEI e SRI

A Figura 27 traz os resultados do SPEI12, SPI12 e SRI12 na escala de tempo de 12 meses. O período de 2010 a 2020 apresentou valores negativos para todos os índices de seca e reservatórios analisados, chegando à classificação de extremamente seco. Esse período coincide com a fase de ODP+, que influencia negativamente as chuvas na região do NEB. Especificamente para a SRI12 de Sobradinho e Itaparica também se observou um período longo com valores negativos que se estendeu de 1999 a 2005. De outra forma, o período de 1979 a 1990 se destacou com valores positivos dos índices SPI, SPEI e SRI, coincidindo com a OMA-. Diante desses resultados, não foi tão notório a influência das fases do ENOS, ODP e OMA no impacto direto nas secas na BHSF. Para tanto, foi calculado espacialmente as frequências e intensidades dessas secas nos períodos das fases individuais e conjuntas da OMA e ODP.

Figura 27 - SPEI12, SPI12 e SRI12 dos reservatórios de: (a) Sobradinho; (b) Itaparica; (c) Três Marias; e (d) Retiro Baixo para o período de 1931 a 2020.

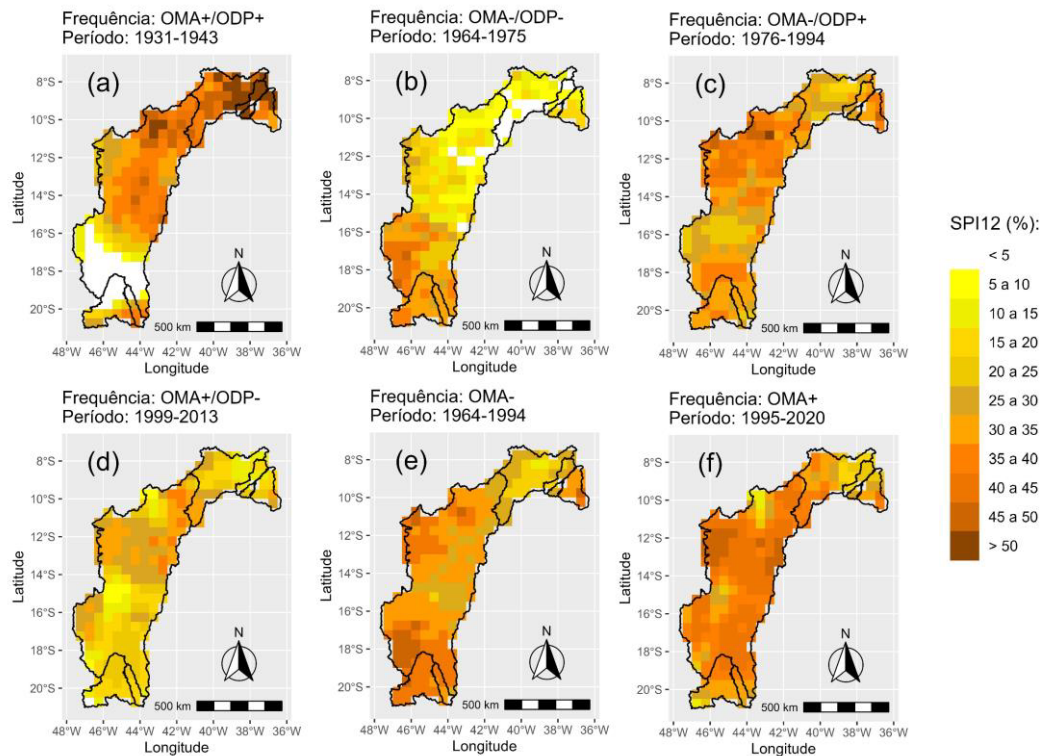


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3.1 Frequência

A Figura 28 traz os resultados da frequência percentual da seca espacial de acordo com o SPI12 para os diferentes períodos associadas com as fases conjuntas e individuais da OMA e ODP.

Figura 28 - Frequência percentual do período de seca, segundo o SPI12 para as fases conjuntas e individuais da OMA e ODP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

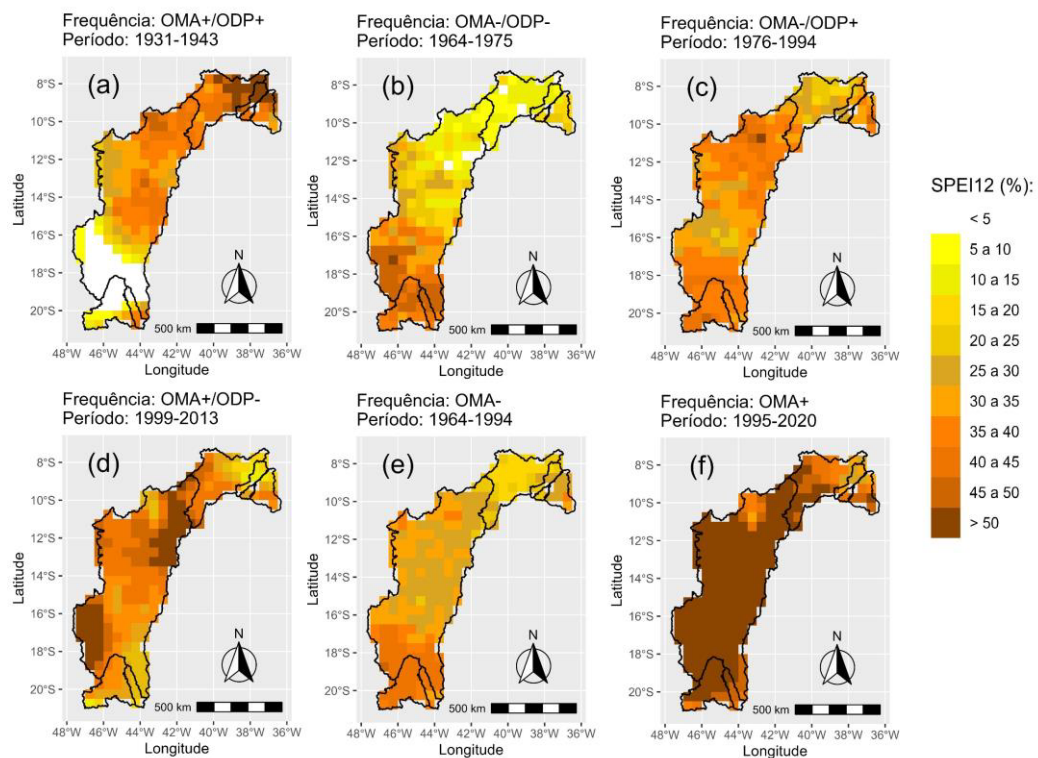
Para a fase conjunta OMA+ e ODP+ (ver Figura 28a) no período de 1931 a 1943, verificou maior frequência de seca nas bacias de Itaparica, Paulo Afonso, Moxotó e Xingó com magnitude variando de 40% a acima de 50% e de 25% a acima de 50% na parte central e norte da bacia de Sobradinho. Para as bacias de Três Marias e Retiro Baixo verificou-se menor frequência da seca, com magnitude variando de menor que 5% a 40%.

Para o período de 1964 a 1975, associado as fases conjuntas da OMA- e da ODP-, observou-se um padrão oposto das fases OMA+/ODP+. Na fase OMA-/ODP-, houve maior frequência de seca na região das bacias de Três Marias e Retiro Baixo, com magnitude entre 15% e 50%. Nas bacias de Itaparica, Paulo Afonso, Moxotó e Xingó a magnitude variou de menor de 5% até 15%. Na fase conjunta OMA-/ODP+ (período de 1976 a 1994) o SPI12 e SPI24 teve maior variação da frequência variando entre 15% e 45% em detrimento a fase conjunta da OMA+/ODP- (período de 1999 a 2013) que para o SPI12 apresentou frequência 5% a 15% na maior área da BHSF, ou seja, as fases conjuntas apresentaram mesma influência espacialmente, mas a fase OMA-/ODP+ apresentou maior frequência de seca no período analisado. As fases da OMA também foram analisadas e mostraram que a fase OMA+ apresenta

maior frequência de secas em detrimento a fase OMA—com valores $>50\%$ sobre a região norte da bacia de Sobradinho.

A Figura 29 também mostrou que a frequência percentual da seca espacial de acordo com o SPEI12 apresenta maiores valores percentuais nas fases conjuntas OMA+/ODP+ e na fase individual OMA+ em detrimento as fases conjuntas OMA—/ODP— e individual OMA—.

Figura 29 - Frequência percentual do período de seca, segundo o SPEI12 para as fases conjuntas e individuais da OMA e ODP.



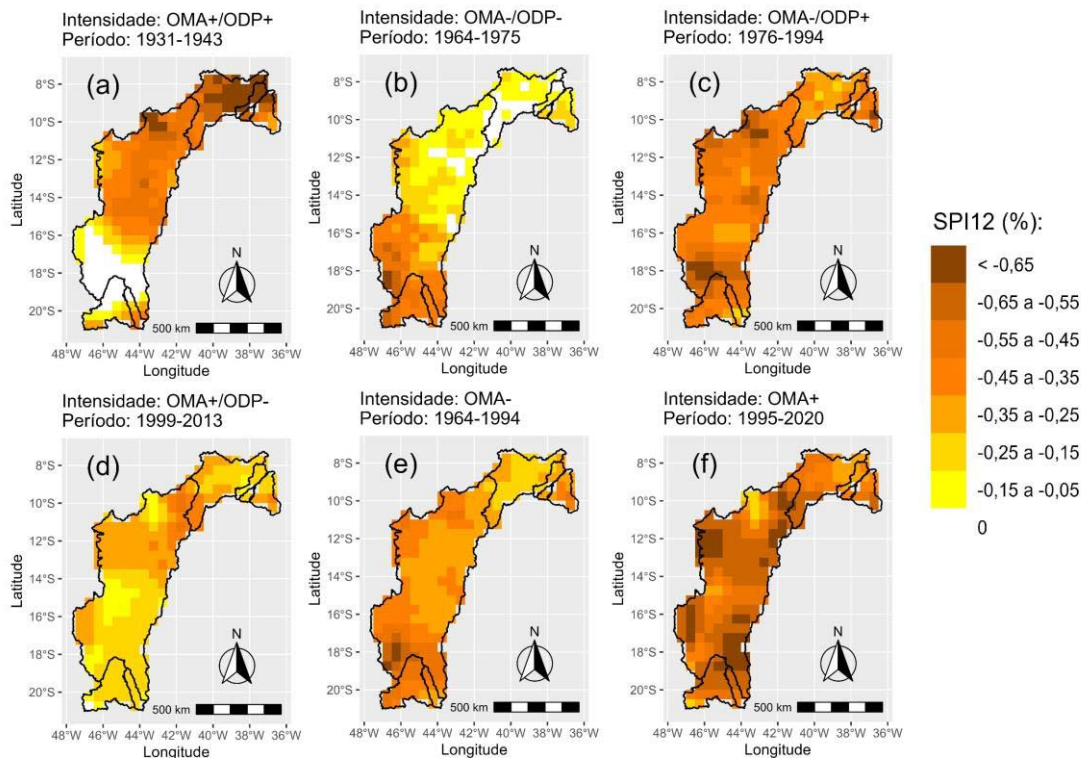
Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com esses resultados, é possível perceber que as bacias localizadas ao norte e sul da BHSF possuem influências opostas das fases conjuntas iguais da ODP e OMA. Mesmo essas fases conjuntas iguais possuírem menor período em relação aos períodos conjuntos com fases opostas da ODP e OMA (como já mencionado anteriormente), tais fases tem impactos significativos na seca e são divergentes entre as bacias. Além disso, em comparação com o SPI, o SPEI apresentou maiores valores de frequência, indicando um maior impacto hidrológico devido a evapotranspiração.

4.1.3.2 Intensidade

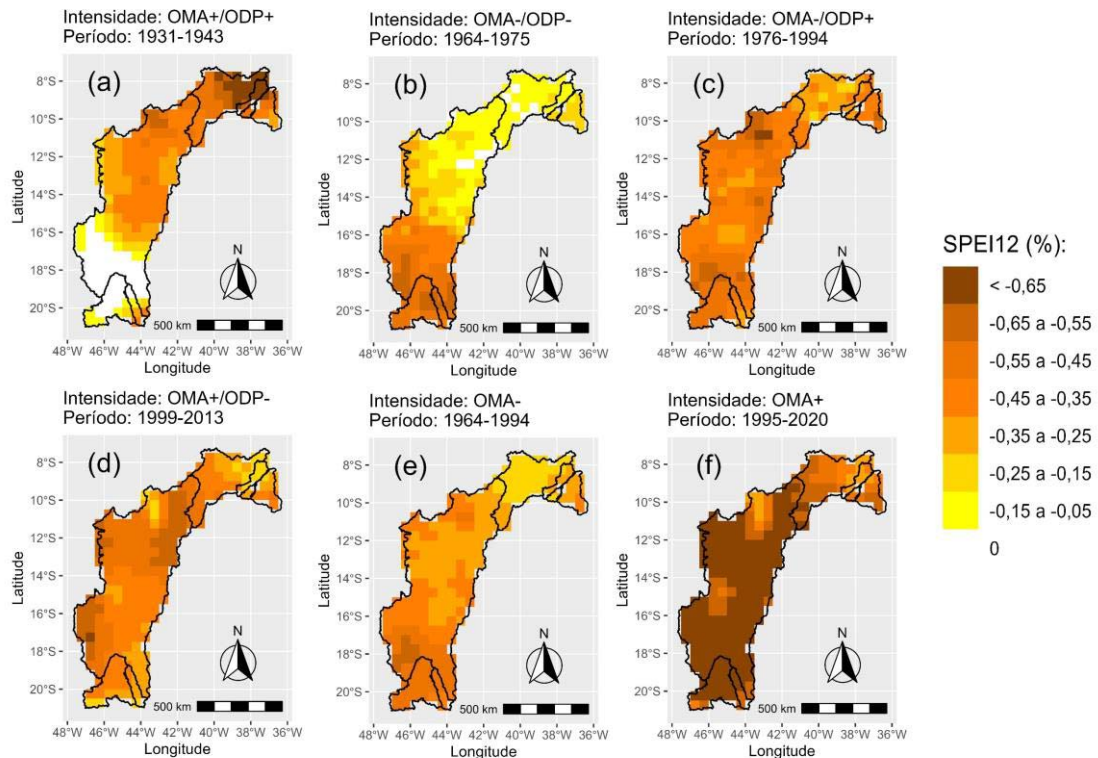
A Figuras 30 e 31 trazem os resultados da intensidade das secas de acordo com o SPI12 e SPEI12, respectivamente. Assim como nas frequências das secas, foi possível verificar a influência direta das fases da ODP e OMA nas intensidades da seca, com o período de atuação da fase conjunta OMA+/ODP+ (1931 a 1943) favorecendo a intensidade das secas nas bacias localizados ao norte da BHSF (Itaparica, Paulo Afonso, Moxotó, Xingó e norte da bacia de Sobradinho) e suprimindo a intensidade das secas nas bacias localizadas mais ao sul da BHSF (Três Marias, Retiro Baixo e sul da bacia de Sobradinho). Para a fase conjunta OMA-/ODP- observou um padrão oposto, ou seja, nesse período (1964 a 1975) houve intensidade das secas mais ao sul do que no norte da BHSF, com as bacias de Três Marias, Retiro Baixo e sul de Sobradinho apresentando maiores intensidades e as bacias de Itaparica, Paulo Afonso, Moxotó, Xingó e norte da bacia de Sobradinho apresentando menores intensidades. A intensidade das secas foi semelhante nessas fases conjuntas tanto para o SPI quanto para o SPEI.

Figura 30 - Intensidade do período de seca, segundo o SPI12 para as fases conjuntas e individuais da OMA e ODP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 - Intensidade do período de seca, segundo o SPEI12 para as fases conjuntas e individuais da OMA e ODP.



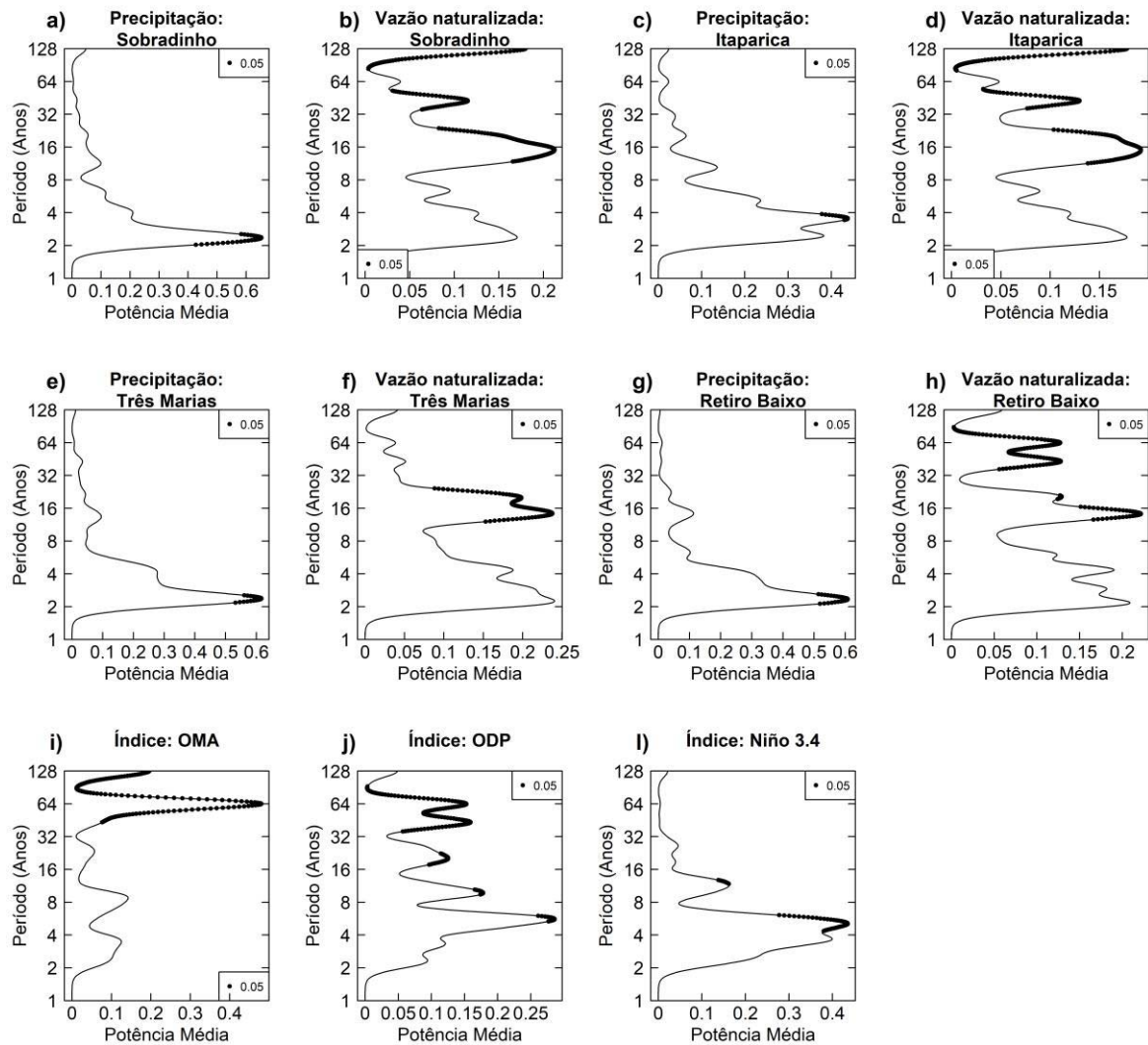
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas fases conjuntas OMA–/ODP+ e OMA+/ODP– (período de 1999 a 2013) (período de 1976 a 1994) não houve mudanças espaciais na intensidade das secas e pouca mudança na magnitude da intensidade. Por outro lado, assim como na frequência, as fases individuais da OMA apresentaram influência direta nas intensidades das secas, com a fase OMA+ com maiores magnitudes em detrimento a fase OMA–.

4.1.4 Análise de TO, variância explicada e TC

As potências médias das TO mostraram uma possível influência de bandas de frequências entre 2 e 4 anos para a precipitação (ver Figura 32). Para as vazões as potências médias das TO mostraram uma possível influência de bandas de frequência entre 8 e 32 anos e entre 32 e 128 anos para a maioria das bacias dos reservatórios analisados, com nível de significância estatística de 0,05. A exceção foi a série temporal de vazão de Três Marias que não apresentou possível influência de bandas de frequências entre 32 e 128 anos.

Figura 32 - Potência média das TO das séries temporais de precipitações, vazões e dos índices OMA, ODP e Niño 3.4.

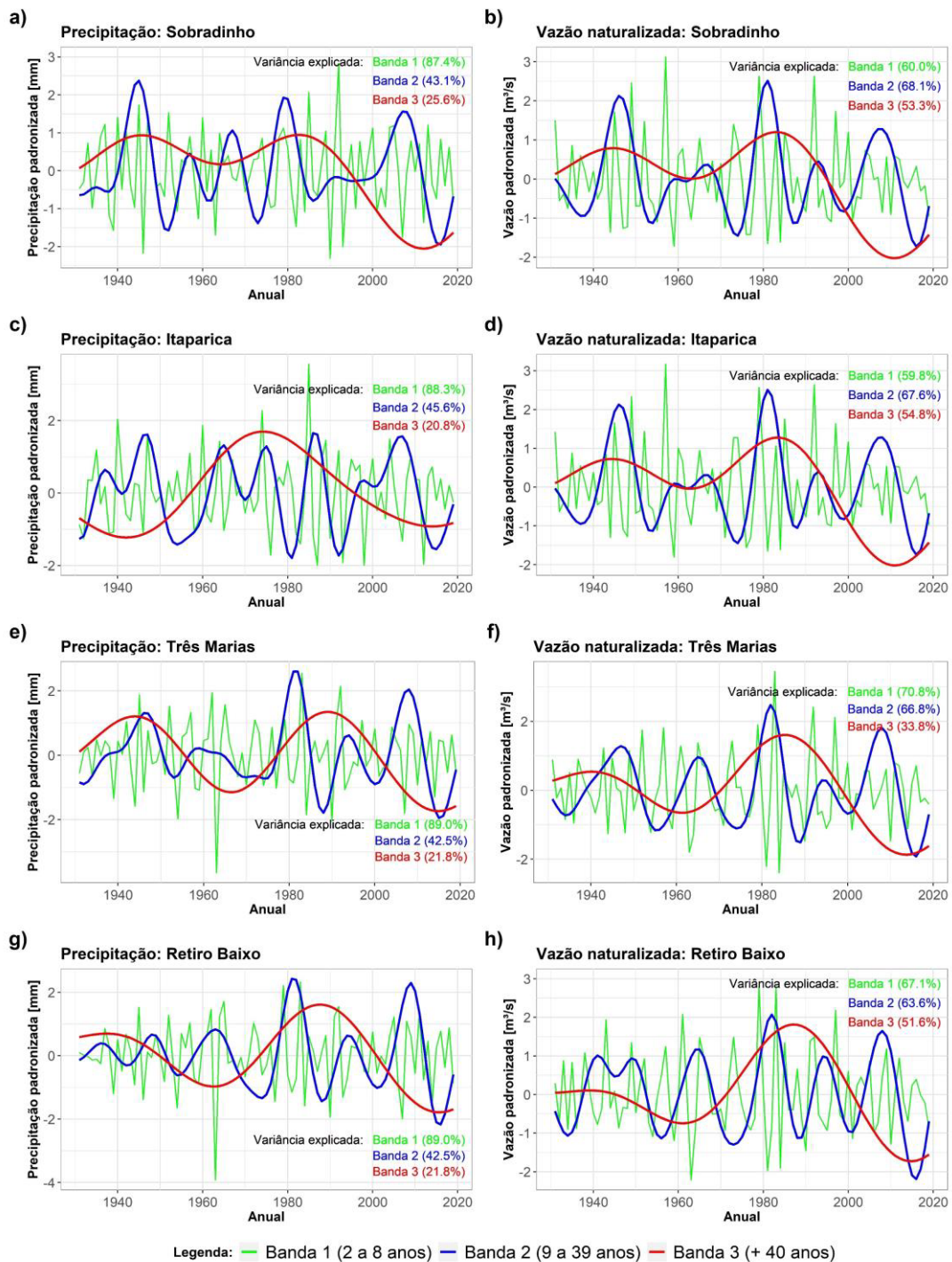


Fonte: Elaborado pelo autor.

As potências médias dos índices climáticos da OMA, da ODP e do Niño 3.4 (Figuras 32i, 32j e 32k) mostraram uma possível influência nas bandas de frequências entre 32 e 128 anos, entre 32 e 64 anos e entre 2 e 8 anos, respectivamente. A influência na banda de frequência entre 32 e 128 anos apresentado no índice climático da OMA se assemelha com o observado nas potências média das séries de vazões de Sobradinho e Itaparica, enquanto a banda de frequência entre 32 e 64 anos apresentado pelo índice da ODP se assemelhou a apresentada pela potência de média da série de vazão de Retiro Baixo. Da mesma forma que a potência média de ondeleta com banda de frequência entre 2 e 8 anos do índice do Niño 3.4 apresentou semelhança com as potências médias de ondeletas das séries temporais de precipitação de todas as bacias dos reservatórios analisados neste estudo.

Na Figura 33 são apresentados a variância explicada pela banda de alta frequência (1 a 8 anos), média frequência (9 a 39 anos) e baixa frequência junto com o ruído (mais de 40 anos), banda 1, banda 2 e banda 3, respectivamente, para as séries temporais de precipitação e vazão das bacias analisadas.

Figura 33 - Variância explicada pela banda de alta frequência (1 a 8 anos), média frequência (9 a 39 anos) e baixa frequência (mais de 40 anos).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi possível observar que a série temporal da precipitação e da vazão de Sobradinho, Três Marias e Retiro Baixo possuem uma oscilação periódica na banda de baixa frequência com aproximadamente 30 anos, com crista entre os anos de 1950 e 1980 e vales próximo do ano de 1960 e entre os anos de 2010 e 2020, esse último período com influência da fase ODP+. O mesmo ocorre com a vazão de Itaparica (ver Figura 33d), enquanto a sua precipitação apresentou dois vales entre os anos de 1930 e 1950 e entre os anos de 2000 e 2020 e uma crista entre os anos de 1960 e 1990.

As Figuras 34 e 35 trazem as TC entre as séries temporais dos índices climáticos do Niño 3.4, ODP e OMA e os dados de precipitação e vazão, respectivamente, das bacias hidrográficas dos reservatórios analisados neste estudo.

Figura 34 – TC entre os índices climáticos (Niño 3.4, OMA e ODP) e a precipitação. Período de 1931 a 2020.

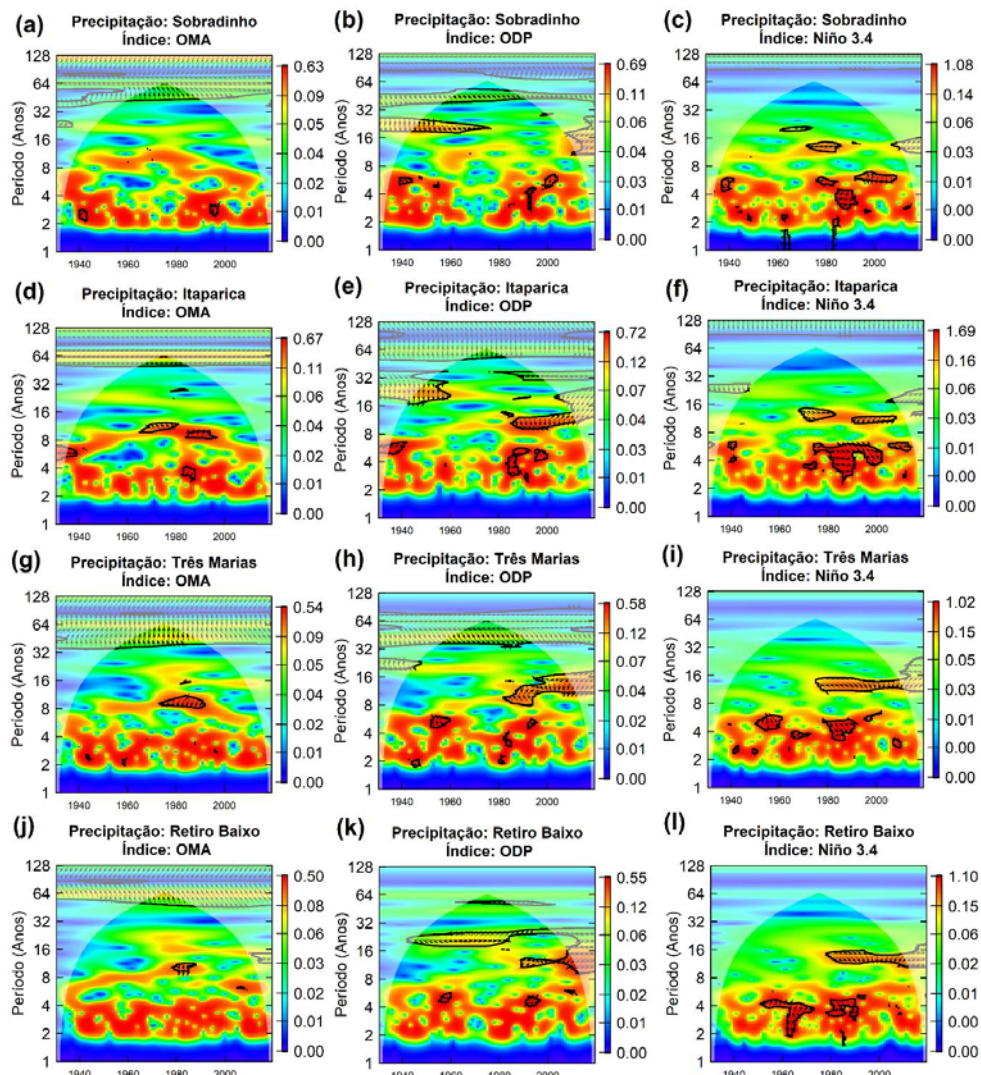
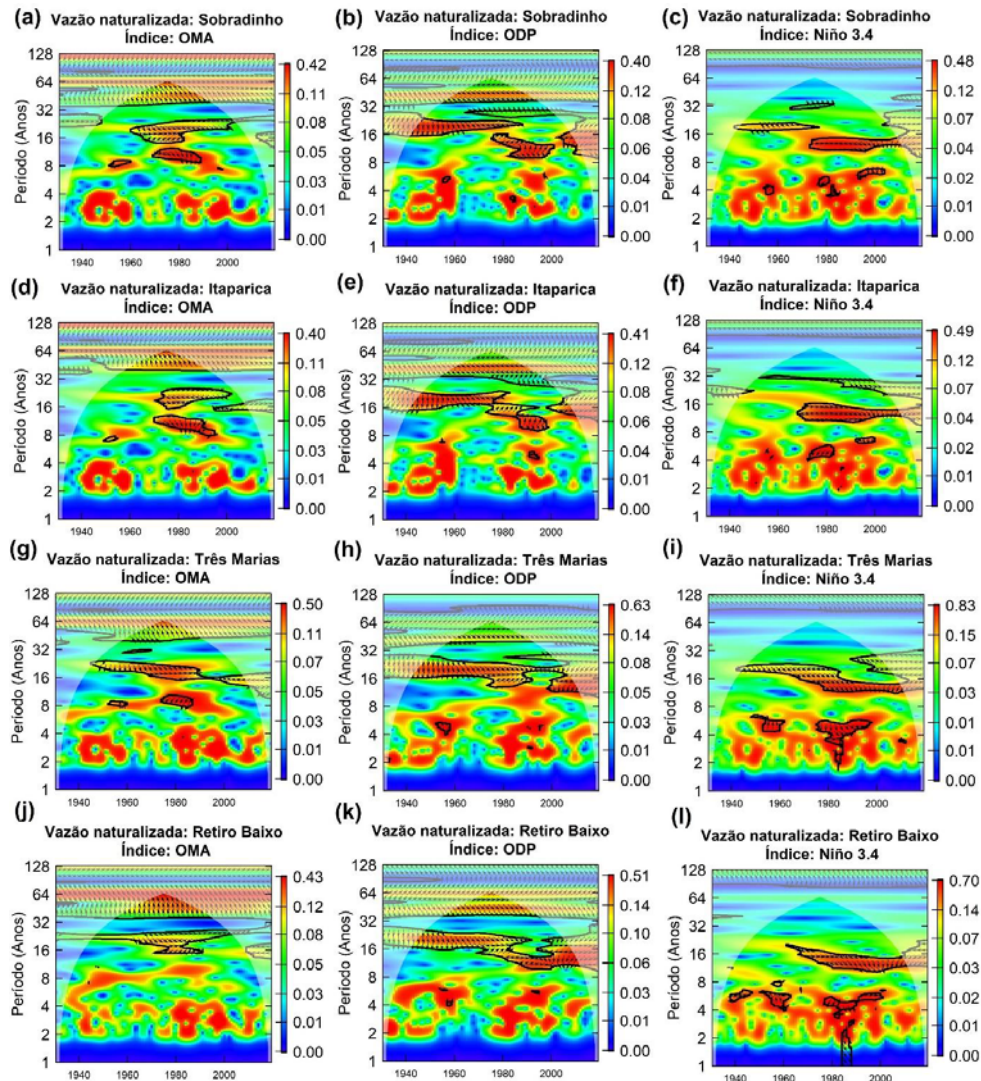


Figura 35 - TC entre os índices climáticos (Niño 3.4, OMA e ODP) e a vazão. Período de 1931 a 2020.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A precipitação apresentou áreas significativas, principalmente para o índice Niño 3.4 e ODP. A TC entre a precipitação e o índice ODP apresentaram áreas com significância com altos valores $>0,4$ para Sobradinho e Itaparica e $>0,65$ para Três Marias e Retiro Baixo para quase toda a série temporal. Destacou-se o período entre 1980 e 2000 com banda entre 2 e 8 anos e no período após o ano 2000 com banda entre 8 e 16 anos para todos os reservatórios analisados.

A vazão também apresentou áreas significativas com altos valores, sendo acima de $>0,4$ para todos os índices, com destaque para Três Marias que apresentou valores $>0,6$ e $>0,8$

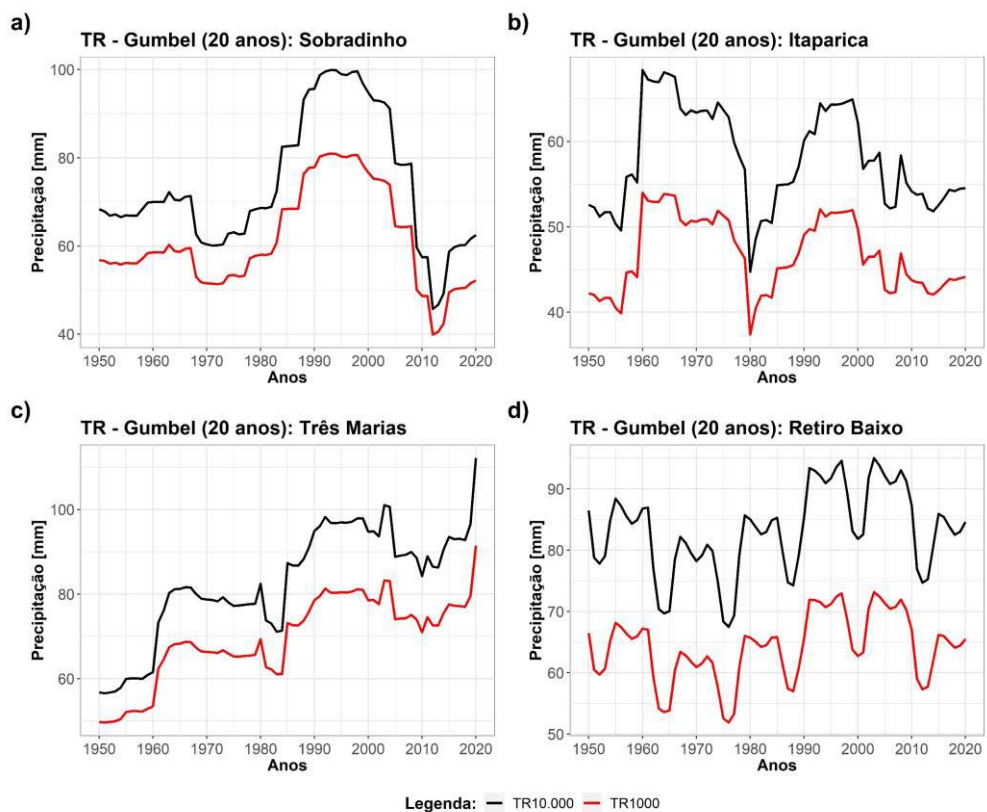
para o índice da ODP e Niño 3.4, respectivamente. Assim como na precipitação, o período de 1980 a 2000 se destacou, no entanto, com banda de mais baixa frequência, entre 8 e 32 anos.

Esses resultados corroboram com outros estudos que analisaram as bandas de frequências e variâncias explicadas de precipitação e vazões de reservatórios do NEB e setor elétrico brasileiro (Alves; Filho; Silveira, 2013; Rocha; Souza Filho; Silva, 2019; Rocha; Souza Filho, 2020), principalmente no estudo de Alves, Souza Filho e Silveira (2013) que também demonstrou a não estacionariedade das séries temporais de vazões dos reservatórios do setor elétrico e que essa não estacionariedade sofriam influência direta, principalmente do índice OMA e ODP.

4.1.5 Tempo de Retorno Milenar e Deca Milenar

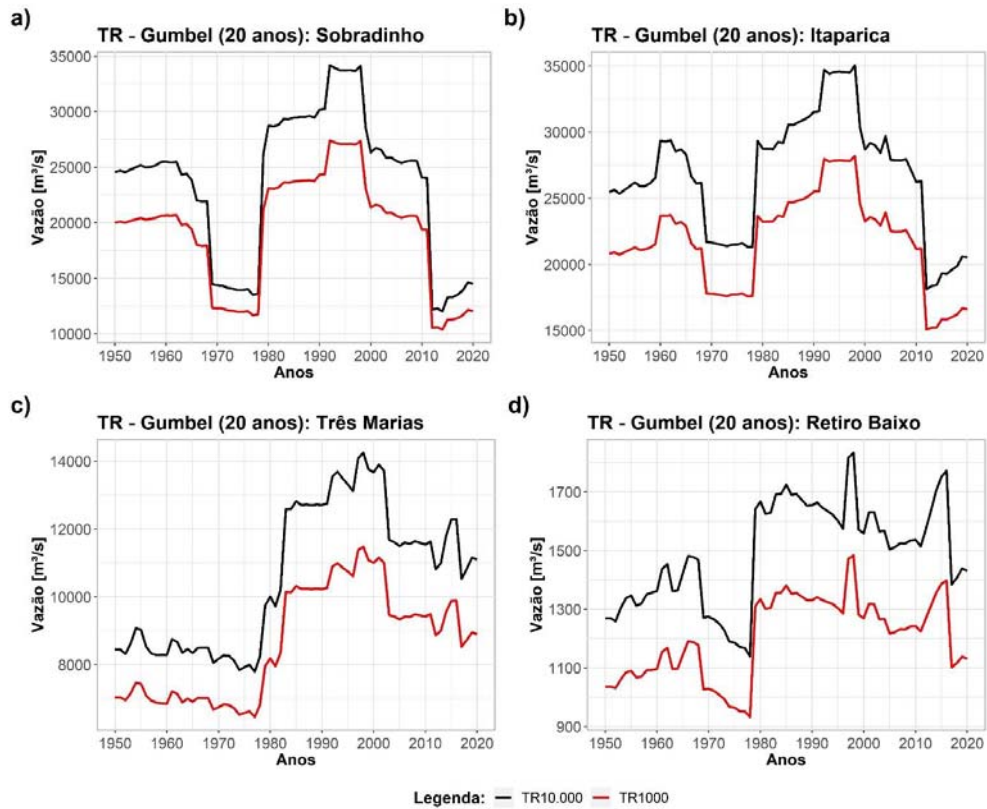
Nas Figuras 36 e 37 é possível analisar as cheias nos reservatórios de Sobradinho, Itaparica, Três Marias e Retiro Baixo com janela de 20 anos e TR1.000 e TR10.000.

Figura 36 - TR Gumbel com janela de 20 anos para o TR1000 e para o TR10.000 da precipitação das bacias: a) Sobradinho, b) Itaparica, c) Três Marias e d) Retiro Baixo. Período de 1931 a 2020.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 - TR Gumbel com janela de 20 anos para o TR1000 e para o TR10.000 das vazões dos reservatórios: a) Sobradinho, b) Itaparica, c) Três Marias e d) Retiro Baixo. Período de 1931 a 2020.



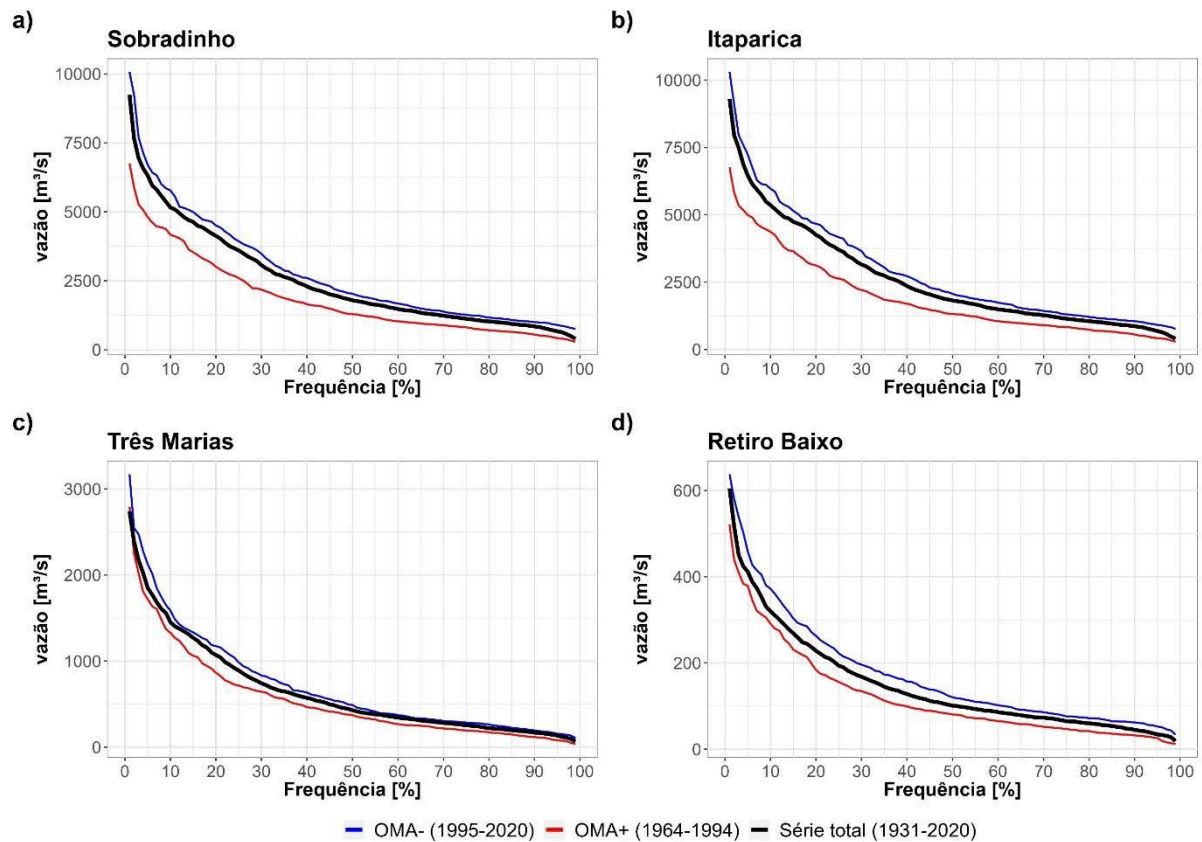
Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os gráficos dos TR1000 e TR10.000 com os gráficos do teste de *Changepoints* dos índices da OMA e da ODP foi possível perceber as mudanças de patamares das cheias com as fases da OMA e da ODP. A partir do ano de 1980, por exemplo, percebe-se aumento abrupto das vazões, que chega ao ápice entre os anos de 1995 e 2000, período da fase OMA⁻ e da fase ODP⁺. Após esse ápice as vazões mudam de patamar positivo para negativa com a diminuição abrupta, período no qual coincide com a fase da OMA⁺ e com a fase da ODP⁻. Esses resultados coincidem com o estudo de Alves, Souza Filho e Silveira (2013) que também analisados os tempos de retorno milenar e deca milenar das vazões naturalizadas dos principais reservatórios do Sistema Interligado Nacional, dentre eles os reservatórios de Sobradinho e Xingó, e verificaram a influência de baixa frequência dos fenômenos ODP e OMA.

4.1.6 Curva de Permanência e Q90

A Figura 38 traz o resultado da CP para as vazões naturais afluentes de Sobradinho, Itaparica, Três Marias e Retiro Baixo variando nos períodos das fases da OMA em comparação com a série temporal total no período de 1931 a 2020. Observa-se uma forte influência das fases da OMA tanto nos máximos como nos mínimos das vazões de garantia de todas as bacias analisadas, sendo mais significativo nas bacias de Sobradinho e Itaparica. Na fase OMA+ observou redução significativa das vazões de garantias, enquanto na fase OMA- teve aumento significativo em comparação com o período total da série temporal. Tais resultados coincidem com os de outros estudos, como o de Rocha e Souza Filho (2020), e estão associados ao posicionamento da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que influenciam nas chuvas na região Sudeste e parte da região Sul do Brasil.

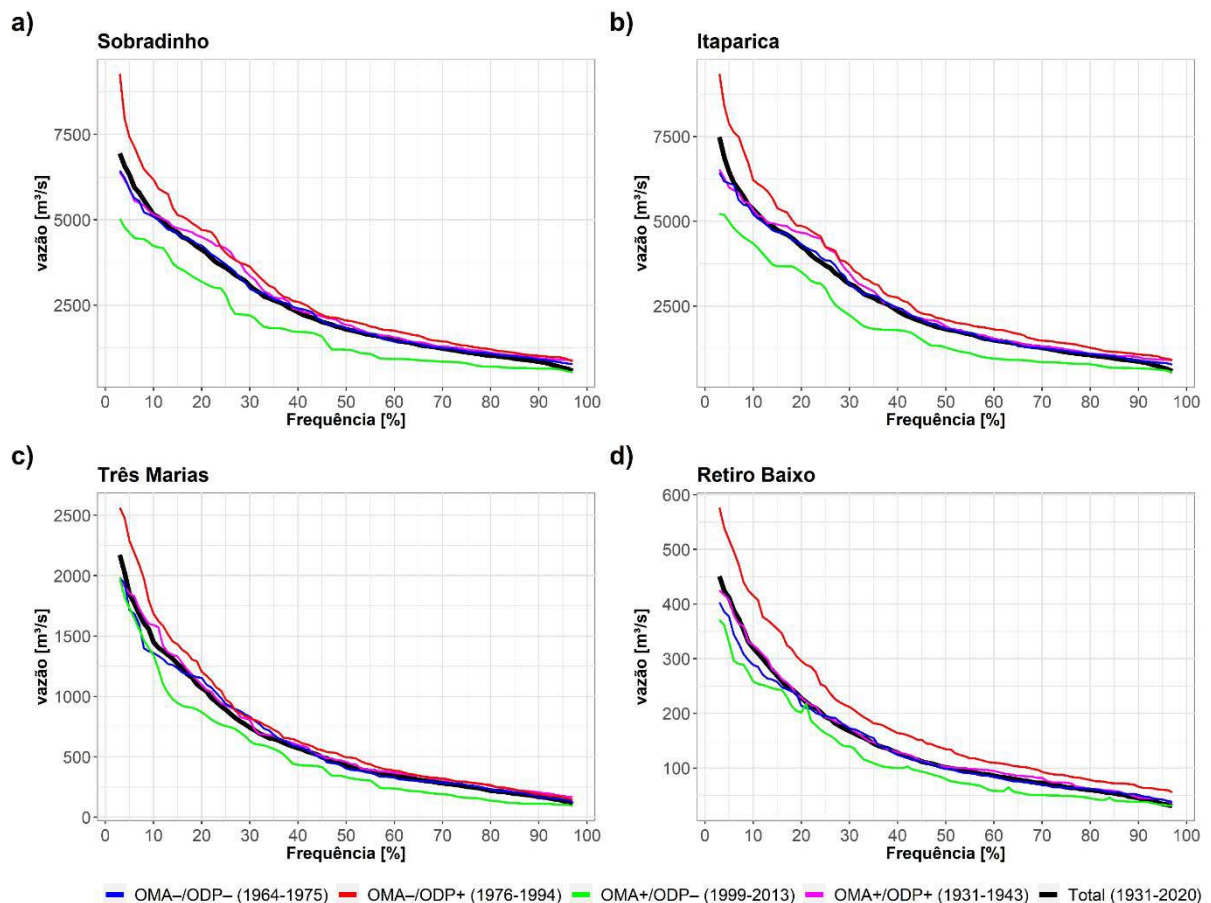
Figura 38 - Resultado da CP para as vazões naturalizadas de (a) Sobradinho, (b) Itaparica, (c) Três Marias e d) Retiro Baixo para o período da OMA+ (1964 a 1994), OMA- (1995 a 2019) e para a série total (1931-2019).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além dos períodos individuais, também foram analisados os períodos com as fases conjuntas dos índices climáticos da OMA e da ODP, são eles: OMA+/ODP+ (1931 a 1943); OMA-/ODP- (1964 a 1975); OMA-/ODP+ (1976 a 1994); e OMA+/ODP- (1999 a 2013), conforme Figura 39. Assim como nas fases individuais da OMA, nota-se uma clara influência das fases em conjunto da OMA e ODP tanto nos máximos como nos mínimos das vazões de garantia de todas as bacias analisadas. Durante as fases opostas da OMA-/ODP+ (1976 a 1994) todos os reservatórios apresentaram aumento das vazões de garantia; e durante a fase OMA+/ODP- (1999 a 2013) todos os reservatórios apresentaram redução.

Figura 39 - Resultado da CP para as vazões naturalizadas de (a) Sobradinho, (b) Itaparica, (c) Três Marias e d) Retiro Baixo para o período da OMA+/ODP+ (1931 a 1943); OMA-/ODP- (1964 a 1975); OMA-/ODP+ (1976 a 1994); e OMA+/ODP- (1999 a 2013).

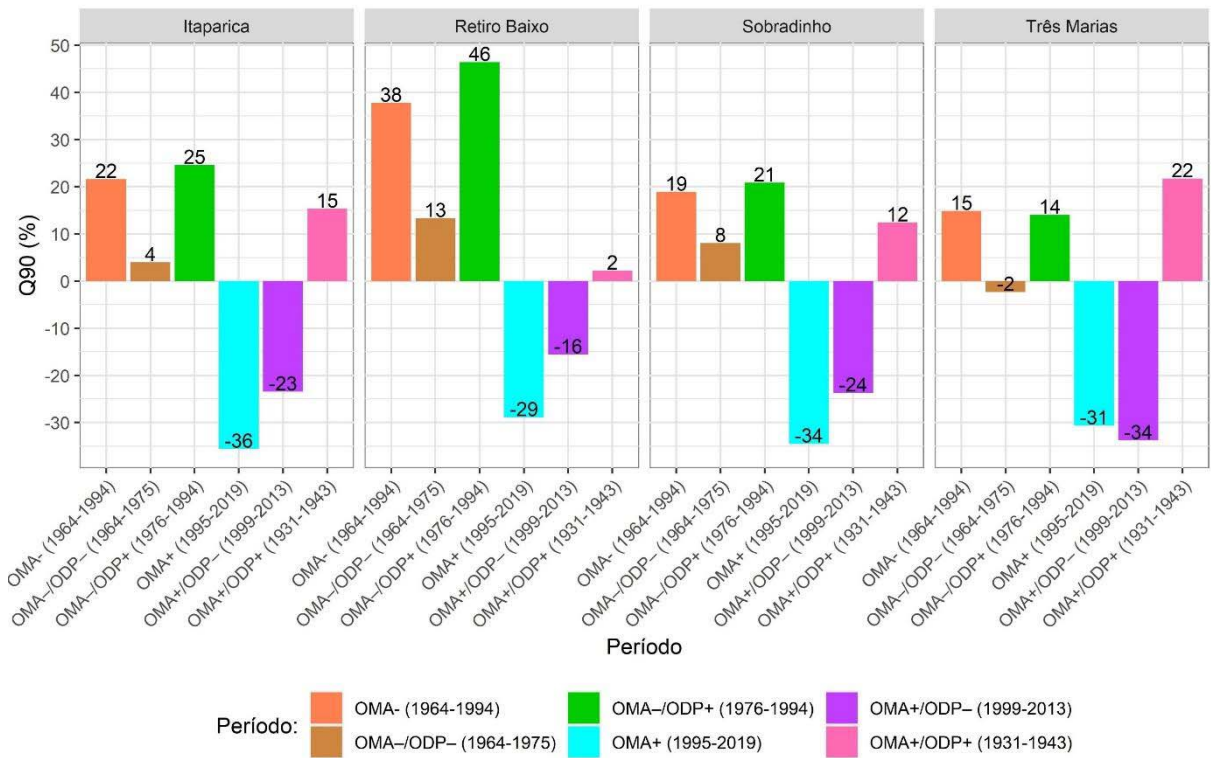


Fonte: Elaborado pelo autor.

Por outro lado, durante as mesmas fases, OMA+/ODP+ (1931 a 1943) e OMA-/ODP- (1964 a 1975), que possuem influência oposta nas chuvas na região das bacias, as vazões de garantia ficaram próximas do período de referência (1931 a 2019).

A Figura 40 traz as anomalias calculadas da Q90 entre os períodos das fases individuais da OMA: OMA+ (1964 a 1994) e OMA- (1995 a 2019). E para as fases conjuntas da OMA e ODP: OMA+/ODP+ (1931 a 1943), OMA-/ODP- (1964 a 1975), OMA-/ODP+ (1976 a 1994) e OMA+/ODP- (1999 a 2013), em relação ao período total (1931 a 2019). Observa-se uma forte influência das fases da OMA na Q90 de todas as bacias analisadas. Na fase OMA+ (1995 a 2019) observou redução significativa da Q90, enquanto na fase OMA- (1964 a 1994) teve aumento significativo em comparação com o período total da série temporal (1931 a 2019). Se destacou a redução de 36% para Itaparica e aumento de 38% em Retiro Baixo nas fases OMA- e OMA+, respectivamente.

Figura 40 - Anomalia percentual da Q90 para o período da OMA- (1964 a 1994), OMA+ (1995 a 2019); OMA+/ODP+ (1931 a 1943); OMA-/ODP- (1964 a 1975); OMA-/ODP+(1976 a 1994); e OMA+/ODP- (1999 a 2013) em relação ao período total da série 1931 a 2020.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas fases opostas OMA-/ODP+ (1976 a 1994) todos os reservatórios apresentaram aumento da Q90, com destaque do reservatório de Retiro Baixo que apresentou aumento de 46%. Para as fases opostas OMA+/ODP- (1999 a 2013) todos os reservatórios apresentaram redução da Q90, com destaque para o reservatório de Três Marias que apresentou redução de 34%. Para as mesmas fases, OMA+/ODP+ (1931 a 1943), houve aumento da Q90 de todos os

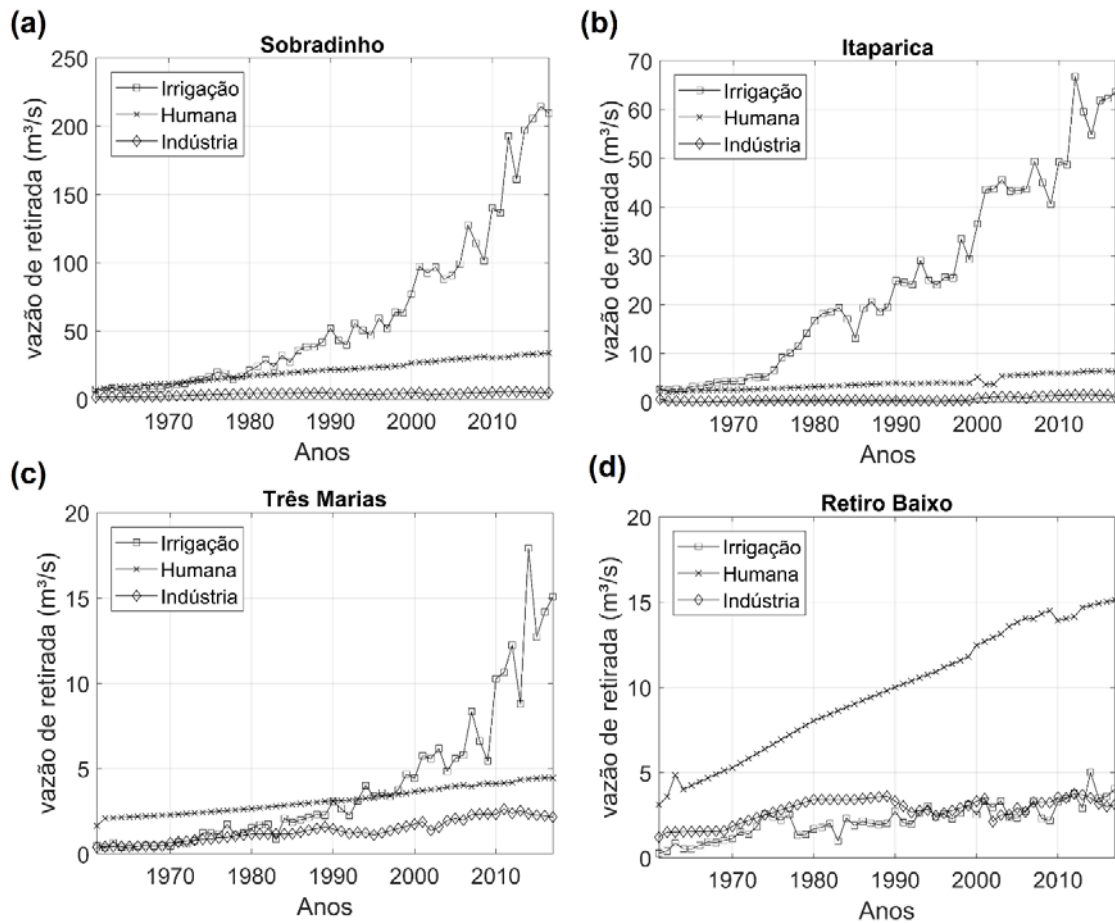
reservatórios. Todavia, a maioria dos reservatórios apresentaram aumento com menor magnitude nessas fases quando comparados com o aumento apresentado durante a fase OMA– (1964 a 1994) e as fases conjuntas opostas OMA–/ODP+ (1976 a 1994). A exceção foi o reservatório de Três Marias, que nessa fase apresentou aumento de 22%, o que superou os aumentos de 15% e 14%, durante as fases OMA– (1964 a 1994) e OMA–/ODP+ (1976 a 1994), respectivamente. O mesmo ocorreu para as mesmas fases OMA–/ODP– (1964 a 1975), quando a maioria dos reservatórios apresentaram aumento da Q90, e o reservatório de Três Marias apresentou redução de 2%.

Esse resultado de aumento e de redução para Três Marias, indica o predomínio das fases ODP, que na fase ODP+ tem influência no aumento das chuvas na região, enquanto a fase ODP– é responsável pela redução das chuvas. Tais resultados tem concordância com o estudo de Kayano, Andreoli e Souza (2020) que demonstraram que as fases conjuntas OMA e ODP positiva (negativa) apresentam anomalias positivas (negativas) de precipitação em parte da região Sudeste do Brasil, onde está localizada o reservatório de Três Marias.

4.1.7 Demandas Consuntivas

A Figura 41 traz as vazões de retirada das demandas consuntivas de consumo humano, irrigação e indústria para o período de 1961 a 2016. É possível verificar que na maioria dos reservatórios a demanda de irrigação supera muito as demais demandas consuntivas. Além disso, apresenta um crescimento exponencial elevado ao longo dos anos, passando de abaixo de 50 m³/s em 1931 para acima de 200 m³/s para o reservatório de Sobradinho. Para o reservatório de Itaparica, as vazões retiradas de irrigação passaram de abaixo de 10 m³/s para acima de 50 m³/s. No reservatório de Três Marias o aumento também foi considerável, passando de 5 m³/s para próximo de 15 m³/s no ano de 2016. A exceção foi o reservatório de Retiro Baixo no qual a demanda de consumo humano superou as outras demandas analisadas nesse estudo. Mas também apresentou crescimento considerável, passando de abaixo de 5 m³/s para próximo de 15 m³/s no ano de 2016.

Figura 41 - Demandas consuntivas de irrigação, consumo humano e indústria para os reservatórios de (a) Sobradinho; (b) Itaparica; (c) Três Marias; e (d) Retiro Baixo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.8 Análise do índice de Desempenho

A Tabela 12 traz os resultados dos índices de Confiabilidade, Resiliência e Vulnerabilidade para os reservatórios de Sobradinho, Itaparica, Três Marias e Retiro Baixo, além dos Eixos Norte (EN) e Leste (EL) da transposição do rio São Francisco. No período de 1961 a 2016, mesmo com as reduções nas vazões de garantia nas fases OMA+ (1995 a 2016) e OMA+/ODP- (1999 a 2013), a maioria dos reservatórios não apresentaram falhas de atendimento as demandas consuntivas. O que fez os índices de Confiabilidade e Resiliência apresentarem 100% e 0% de Vulnerabilidade. A exceção foi o reservatório de Retiro Baixo que não atendeu as demandas de Irrigação e Indústria, apresentando 0% de Confiabilidade e Resiliência, e 100% de Vulnerabilidade para essas demandas. Esses resultados coincidem com os obtidos no estudo de Costa et al. (2021), que utilizaram demandas estáticas no seu estudo.

Tabela 12 - Índices de Confiabilidade, Resiliência e Vulnerabilidade dos reservatórios de Retiro Baixo, Três Marias, Sobradinho e Itaparica, e para os EN e EL da transposição do rio São Francisco. Período de 1961 a 2016.

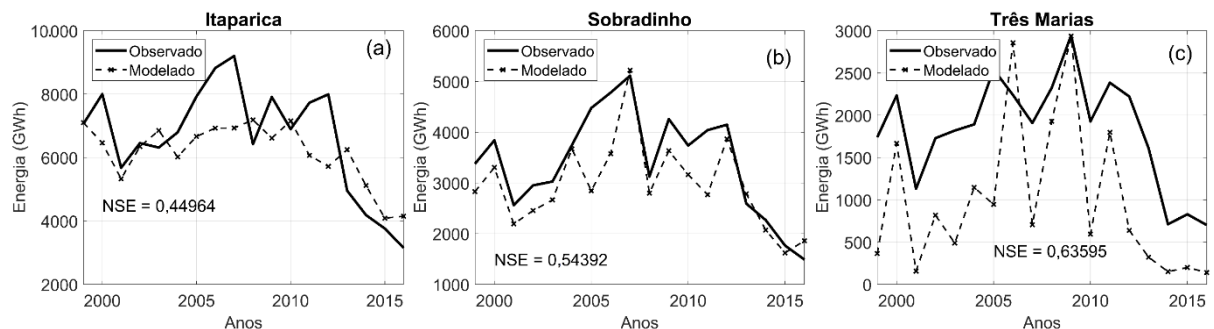
Reservatórios	Confiabilidade (%)			Resiliência (%)			Vulnerabilidade (%)		
	Hum	Irr	Ind	Hum	Irr	Ind	Hum	Irr	Ind
Retiro Baixo	100	0	0	100	0	0	0	100	100
Três Marias	100	100	100	100	100	100	0	0	0
Sobradinho	100	100	100	100	100	100	0	0	0
Itaparica	100	100	100	100	100	100	0	0	0
Transposição EN	100			100			0		
Transposição EL	100			100			0		

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.9 Análise Energética

A Figura 42 traz a validação com o coeficiente de NSE obtida a partir da comparação da estimativa das Energias dos reservatórios das usinas hidrelétricas de Itaparica, Sobradinho e Três Marias utilizando o *software* SIGA® com as séries observadas obtidas da ONS no período de 1999 a 2016.

Figura 42 - Validação das estimativas das Energias dos reservatórios das usinas hidrelétricas de (a) Itaparica, (b) Sobradinho e (c) Três Marias para o período de 1999 a 2016 com o *software* SIGA®.

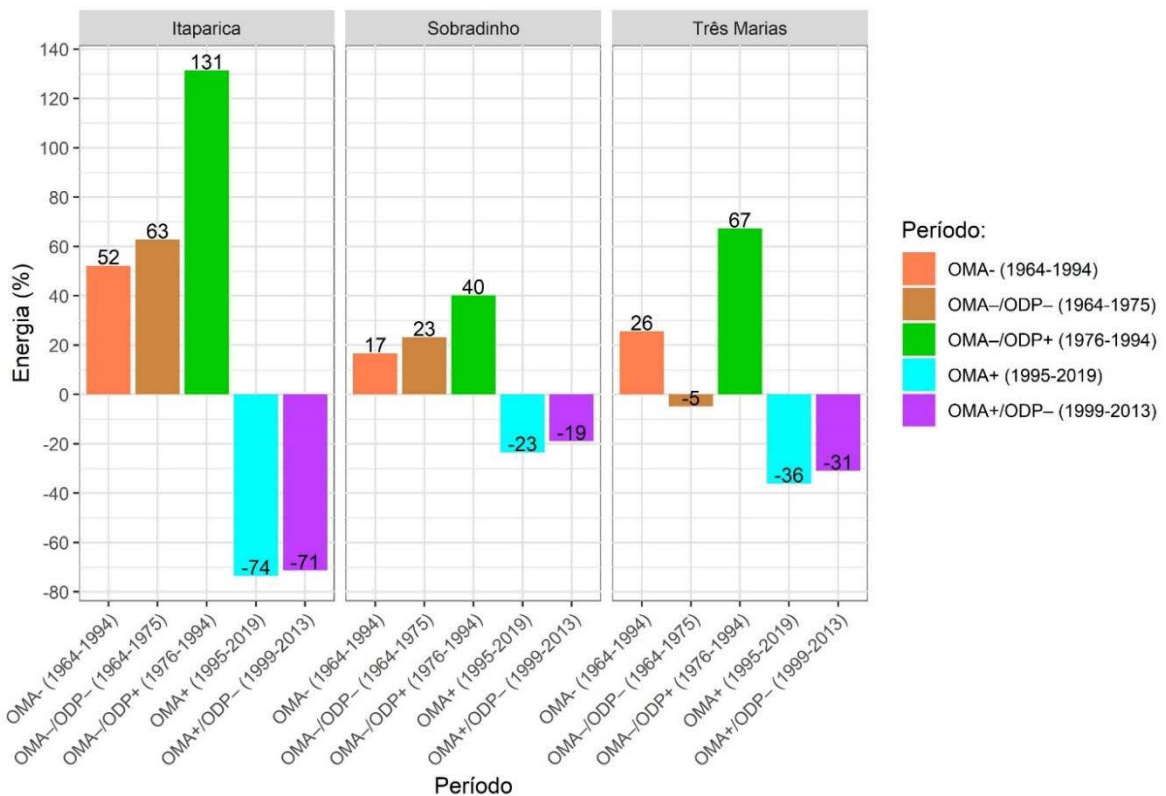


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados mostram que a operação simulada com o *software* SIGA® apresentou boa performance para o cálculo da energia gerada quando comparado com o observado. Como a NSE prioriza os valores máximos da série temporal, mesmo a energia hidrelétrica gerada com o modelo apresentando discrepâncias em Três Marias quando comparada a energia hidrelétrica observada, os valores máximos foram bem representados, resultando em NSE de aproximadamente 0,64.

A Figura 43 traz as anomalias calculadas entre os períodos das fases individuais da OMA e em conjunto com as fases da ODP em relação ao período total. Os resultados mostraram que existe uma relação entre as fases dos fenômenos de baixa frequência da OMA e ODP e a geração de energia hidrelétrica. Pois, durante a fase fria da OMA– houve aumento na geração de energia em todos os reservatórios analisados; e na fase quente OMA+, obteve-se padrão oposto, ou seja, com a redução significativa da energia gerada. Se destacou o reservatório de Itaparica, que apresentou aumento de 52% e redução de 74 %. Essas altas magnitudes podem ter sido superestimadas, uma vez que Itaparica apresentou a pior performance entre os reservatórios, com NSE de aproximadamente 0,45%.

Figura 43 - Anomalia percentual da geração de energia para o período da OMA+ (1964 a 1994), OMA- (1995 a 2019); OMA-/ODP- (1964 a 1975); OMA-/ODP+(1976 a 1994); e OMA+/ODP- (1995 a 2013) em relação ao período total da série 1964 a 2020.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a análise das fases conjuntas dos fenômenos da OMA e ODP, durante as fases opostas de OMA−/ODP+ (1995 a 2019) todos os reservatórios apresentaram aumento da geração de energia; e durante a fase OMA+/ODP− todos os reservatórios apresentaram redução da geração de energia. Por outro lado, durante as mesmas fases, OMA−/ODP− (1964 a 1975), houve aumento da geração de energia nos reservatórios de Itaparica e Sobradinho, enquanto para Três Marias houve redução. Esse resultado de redução para Três Marias, mais uma vez indica o predomínio da fase ODP− na região, responsável pela redução das chuvas, pois a fase OMA− influencia no aumento das chuvas na região (Kayano et al., 2018; Kayano; Andreoli; Souza, 2019).

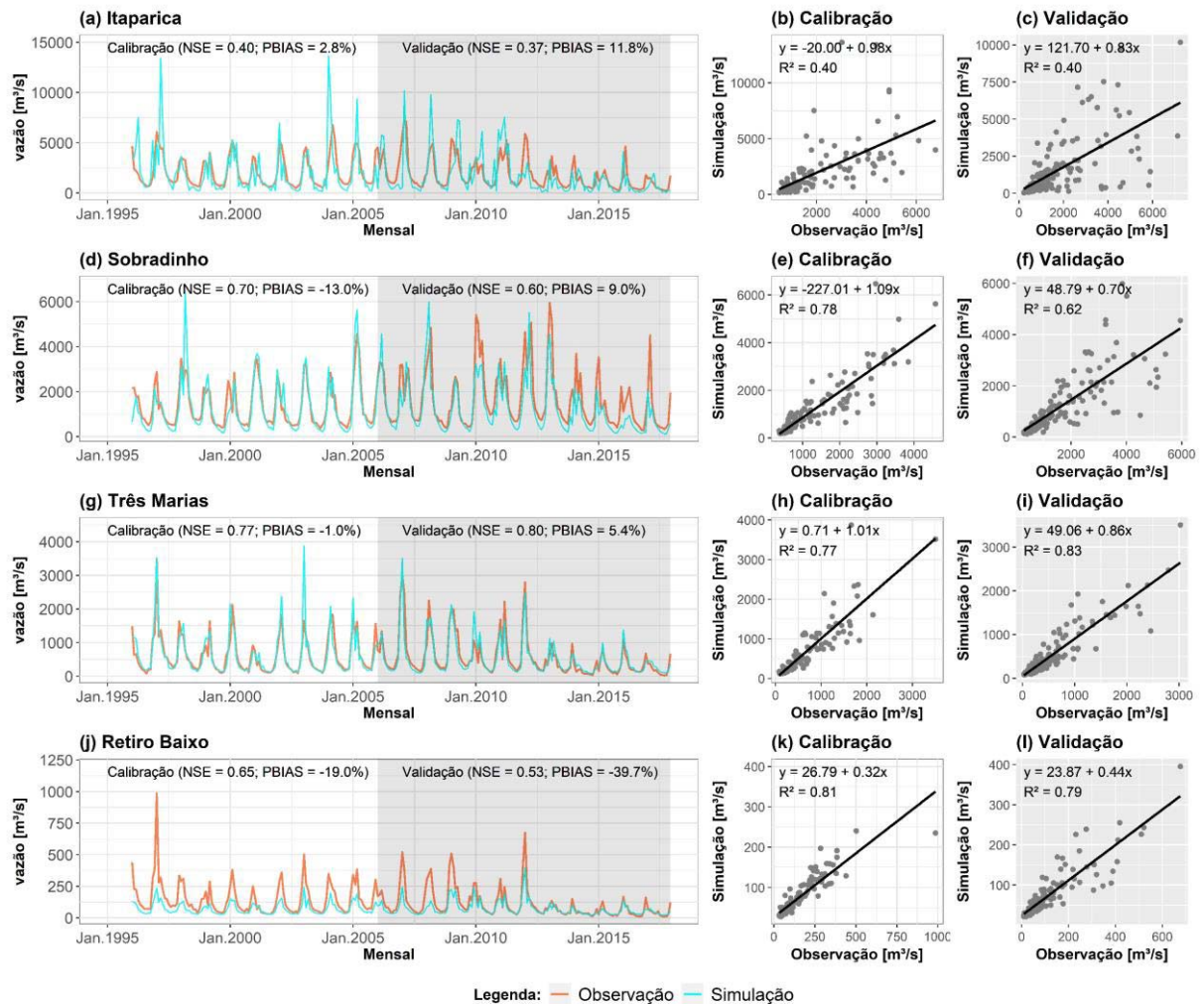
Esses resultados foram bem superiores aos apresentados no estudo de Costa et al. (2021), que utilizou as vazões de retirada estáticas, o que sugere que os seus resultados podem ter sido suavizados por não considerar o crescimento das demandas consuntivas. Mas também se complementam por apresentarem a mesma tendência.

4.2 Modelagem Hidrológica

4.2.1 *Calibração e Validação do modelo SMAP*

A Figura 44 traz os resultados da etapa de calibração (1996 a 2005) e validação (2006 a 2017) das vazões simuladas com o modelo SMAP em comparação com as vazões naturalizadas da ONS. Foi possível perceber que a maioria dos reservatórios apresentaram boa performance de acordo com a classificação apresentada no estudo de Almeida, Pereira e Pinto (2018), em que o modelo é considerado “muito bom” se $0,75 < NSE < 1,00$ e $PBIAS < \pm 10$, “bom” se $0,60 < NSE \leq 0,75$ e $\pm 10 < PBIAS \leq \pm 15$, e “satisfatório” se $0,36 < NSE \leq 0,60$ e $\pm 15 < PBIAS \leq \pm 25$. A única exceção foi no período de validação do reservatório de Retiro Baixo, que apresentou PBIAS igual a -39% , período no qual o modelo SMAP superestimou as vazões naturalizadas da ONS abaixo do satisfatório. As vazões também foram superestimadas no período de calibração no reservatório de Retiro Baixo, Sobradinho e Três Marias por apresentarem PBIAS negativo de -19% , -13% e -1% , respectivamente; enquanto no reservatório de Itaparica as vazões foram subestimadas com PBIAS positivo de $2,8\%$.

Figura 44 - Resultados da etapa de calibração (1996 a 2005) e validação (2006 a 2017) das vazões simuladas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

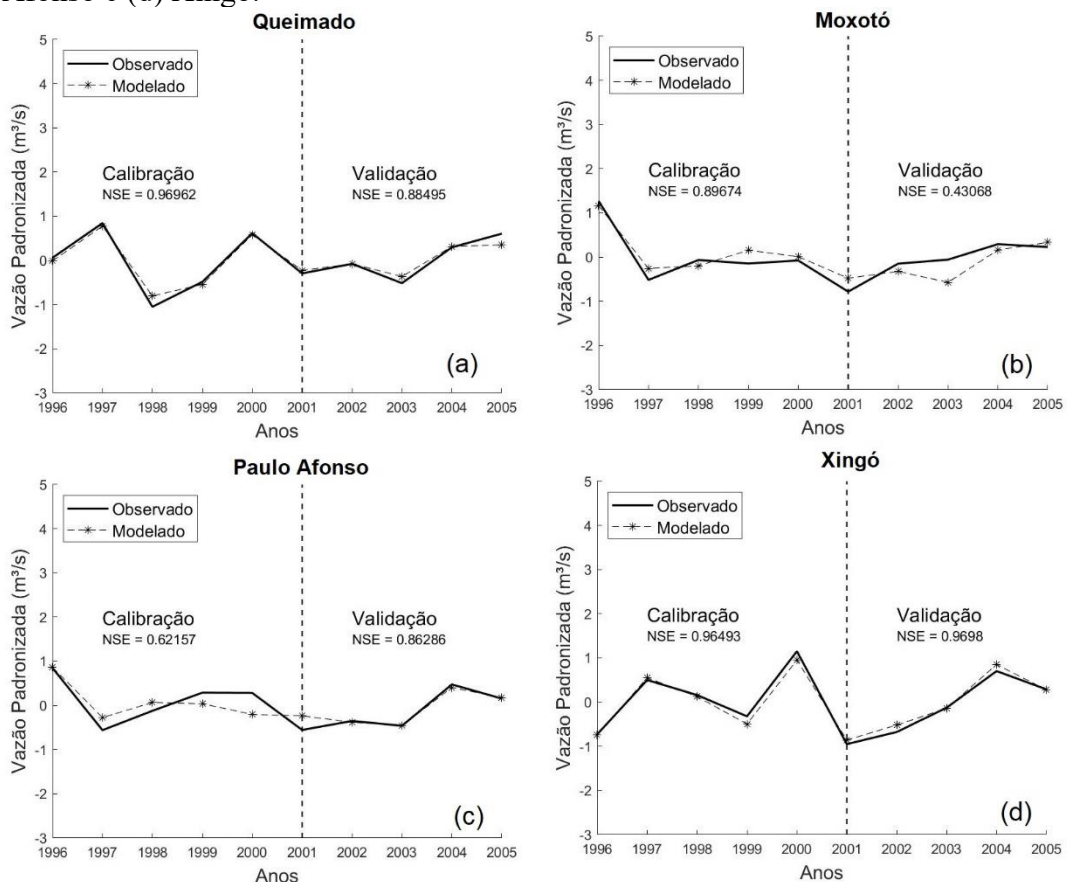
No período de validação, com exceção de Retiro Baixo, as vazões simuladas dos reservatórios foram subestimadas. Em relação ao NSE, o reservatório de Itaparica foi o que apresentou os menores coeficientes, tanto na calibração como na validação, com classificação “satisfatório”. Enquanto o reservatório de Três Marias apresentou os maiores coeficientes, com classificação “muito bom”.

4.2.2 Calibração e Validação do modelo de Regressão Linear

A Figura 45 traz os resultados da etapa de calibração e validação das vazões simuladas com o modelo de Regressão Linear para as estações das UH's de fio d'água (Moxotó, Paulo Afonso e Xingó) e Queimado. Observa-se a boa performance do modelo de Regressão Linear em representar as vazões naturalizadas da ONS, com o NSE apresentando valores acima

0,8 para a calibração e a validação das UH's de Queimado e Xingó. O NSE também foi acima de 0,8 na calibração da UH de Moxotó e na validação de Paulo Afonso. Na calibração da UH de Paulo Afonso o NSE apresentou valor acima de 0,6. O menor valor de NSE foi verificado na validação de Moxotó com valor de 0,43, no entanto, ainda sendo satisfatório de acordo com a classificação de Almeida; Pereira e Pinto (2018).

Figura 45 - Resultados da etapa de calibração (1996 a 2001) e validação (2002 a 2005) das vazões simuladas com o modelo de Regressão Linear para (a) Queimado, (b) Moxotó, (c) Paulo Afonso e (d) Xingó.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3 Calibração e Validação do Modelo SWAT

Para o período de calibração e validação do modelo SWAT, as séries temporais foram divididas conforme descrito na Tabela 14. Para o primeiro período (1982 – 2000) foi utilizado o ano de 2000 do dado de Uso e Cobertura do Solo. No segundo período (2000 – 2015) foi utilizado o ano de 2018 do dado de Uso e Cobertura do Solo. Além disso, 3 anos de aquecimento foram usados como testes iniciais de estabilidade dos parâmetros e não foram contabilizados nos procedimentos de calibração e validação.

Tabela 13 - Divisão das séries temporais para calibração e validação do modelo SWAT.

Período de Simulação	Aquecimento	Calibração	Validação
1982 – 2000	1982 – 1985	1986 – 1994	1995 – 2000
2000 – 2015	2000 – 2003	2004 – 2008	2009 – 2015

Fonte: Elaborado pelo autor.

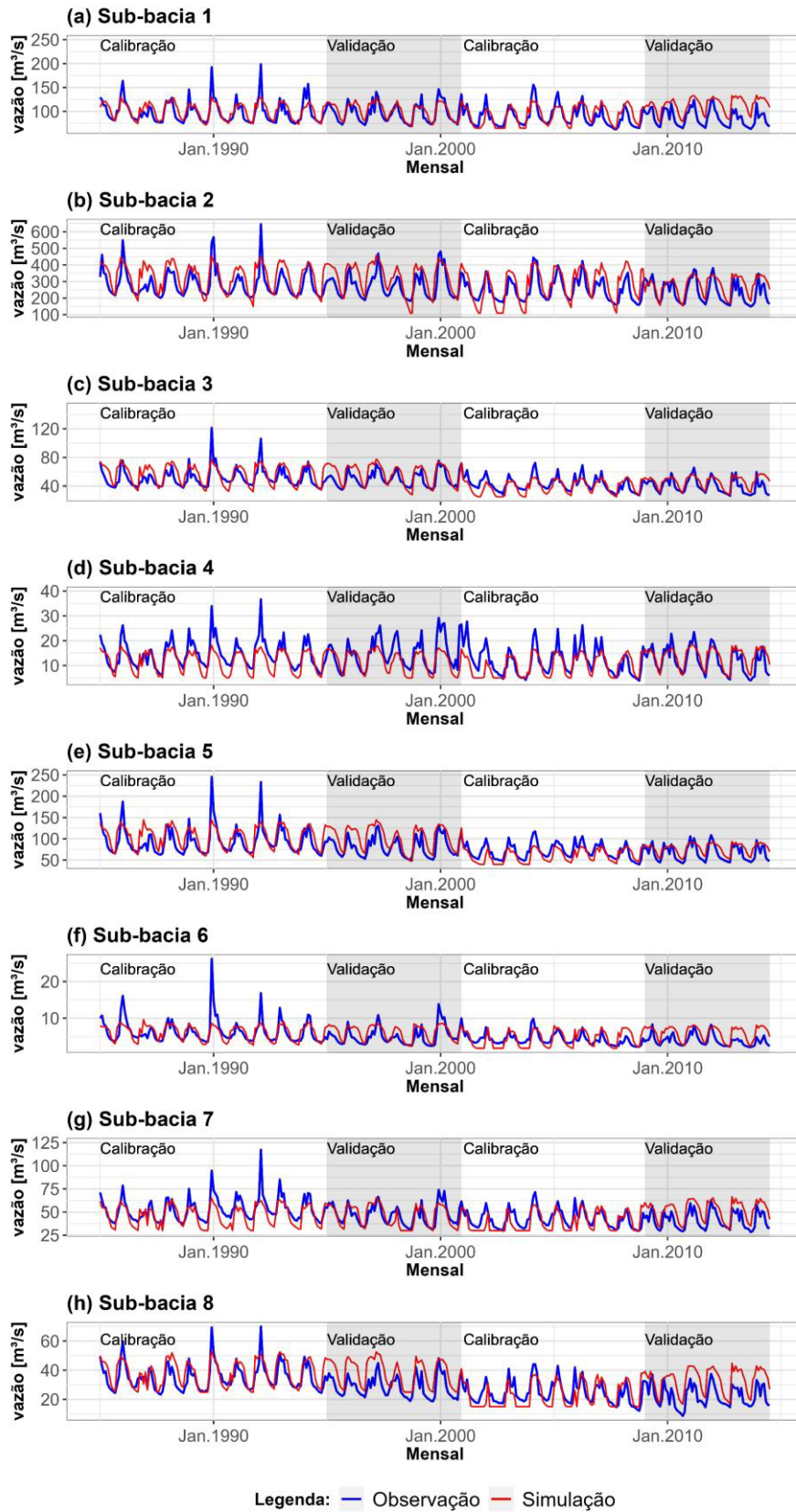
A Tabela 14 e a Figura 46 trazem os resultados do processo de calibração e validação com índices de R^2 , NSE e PBIAS e os gráficos dos dados de vazões observados e simulados com o modelo SWAT, respectivamente, para os diferentes períodos.

Tabela 14 - Resultados dos processos de calibração e validação do modelo SWAT para os diferentes períodos e sub-bacias.

Sub-bacia	Estação	Período	Processo	R^2	NSE	PBIAS
1	46790000	1986 – 1994	Calibração	0,75	0,73	14,6%
		1995 – 2000	Validação	0,83	0,85	12,3%
		2004 – 2008	Calibração	0,73	0,61	9,9%
		2009 – 2015	Validação	0,80	0,78	-12,0%
2	46902000	1986 – 1994	Calibração	0,92	0,82	-12,9%
		1995 – 2000	Validação	0,81	0,70	-15,9%
		2004 – 2008	Calibração	0,78	0,72	-15,0%
		2009 – 2015	Validação	0,80	0,77	-14,3%
3	46590000	1986 – 1994	Calibração	0,88	0,78	-9,2%
		1995 – 2000	Validação	0,80	0,97	-12,2%
		2004 – 2008	Calibração	0,85	0,83	-7,7%
		2009 – 2015	Validação	0,93	0,85	-13,1%
4	46570000	1986 – 1994	Calibração	0,77	0,65	22,7%
		1995 – 2000	Validação	0,73	0,59	23,7%
		2004 – 2008	Calibração	0,85	0,82	10,1%
		2009 – 2015	Validação	0,82	0,66	-9,9%
5	46550000	1986 – 1994	Calibração	0,71	0,61	-9,7%
		1995 – 2000	Validação	0,82	0,96	-21,0%
		2004 – 2008	Calibração	0,82	0,81	12,7%
		2009 – 2015	Validação	0,62	0,54	-13,5%
6	46490000	1986 – 1994	Calibração	0,62	0,67	-4,7%
		1995 – 2000	Validação	0,68	0,90	-0,7%
		2004 – 2008	Calibração	0,74	0,71	3,6%
		2009 – 2015	Validação	0,68	0,59	-21,8%
7	46455000	1986 – 1994	Calibração	0,77	0,67	13,7%
		1995 – 2000	Validação	0,60	0,57	2,2%
		2004 – 2008	Calibração	0,52	0,46	3,1%
		2009 – 2015	Validação	0,64	0,61	20,3%
8	46415000	1986 – 1994	Calibração	0,61	0,46	-7,5%
		1995 – 2000	Validação	0,63	0,60	-24,2%
		2004 – 2008	Calibração	0,45	0,38	-1,1%
		2009 – 2015	Validação	0,58	-1,76	-32,4%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 46 - Resultados dos processos de calibração e validação do modelo SWAT para os diferentes períodos e sub-bacias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Eles mostram que a maioria das sub-bacias apresentaram resultados no mínimo satisfatório. A exceção foi a sub-bacia 8, que apresentou resultado insatisfatório na calibração (período de 2004 a 2008) com o parâmetro de R^2 com o valor de 0,45 e na validação (período de 2009 a 2014) com os valores de NSE e PBIAS de -1,76 e -32,4%, respectivamente. Para os demais períodos, de 1985 a 1994 (período de calibração) e de 1995 a 2000 (período de validação) a sub-bacia 8 obteve resultados satisfatório.

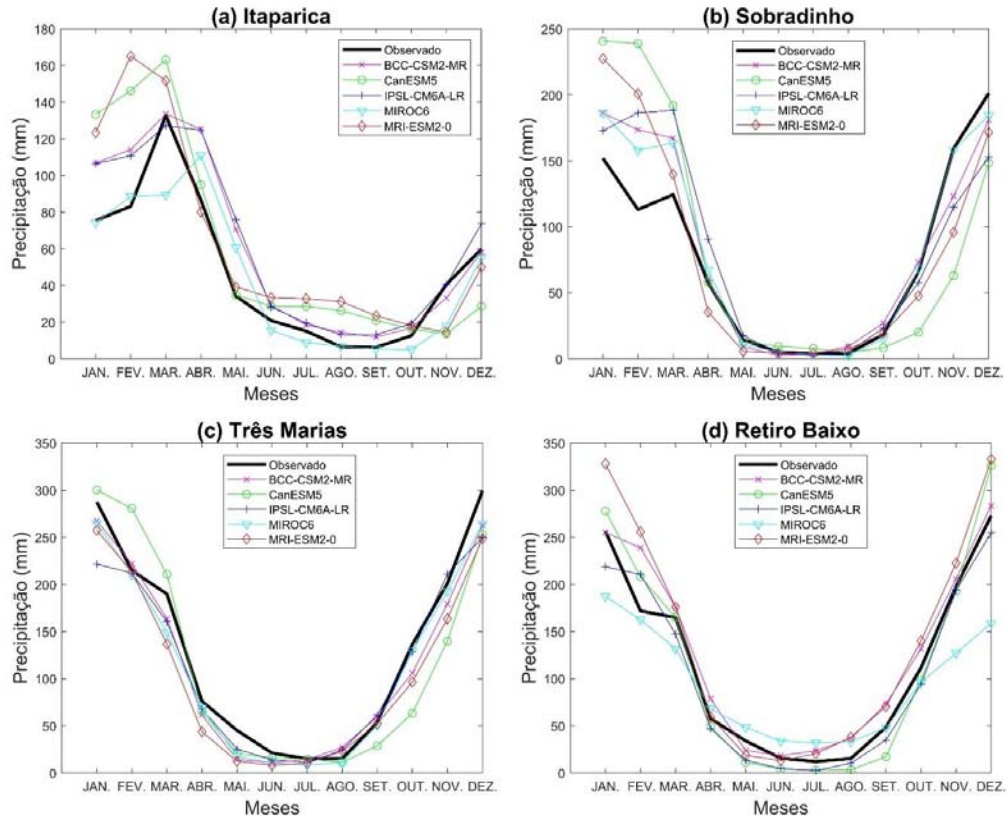
Esses resultados insatisfatórios nos períodos específicos de 2000 a 2014 podem ter relação com a alta variabilidade das chuvas associado com a seca severa que se estendeu de 2012 a 2018 nessa região e podem não ter sido representada pelos dados do CFSR. Pois não possui postos pluviométricos na área da sub-bacia 8.

4.3 Cenários de mudanças climáticas, hidrológicas e energéticas

4.3.1 *Performance dos modelos do CMIP6*

A Figura 47 traz a sazonalidade das precipitações dos modelos do CMIP6 em comparação com o observado da ANA. Foi possível verificar que a correção de viés fez um bom ajuste dos resultados modelados com o observado, trazendo o mesmo comportamento sazonal. Nas bacias de Sobradinho e Itaparica, a maioria dos modelos superestimaram a precipitação nos meses de janeiro, fevereiro e março, e subestimaram nos meses de novembro e dezembro. Na bacia de Três Marias, a maioria dos modelos subestimaram a precipitação em todos os meses analisados, com exceção do modelo CanESM5 que superestimou a precipitação nos meses de janeiro, fevereiro e março. Na bacia de Retiro Baixo a maioria dos modelos superestimaram a precipitação em todos os meses analisados, com exceção do modelo CanESM5 que subestimou a precipitação nos meses de janeiro, fevereiro e março.

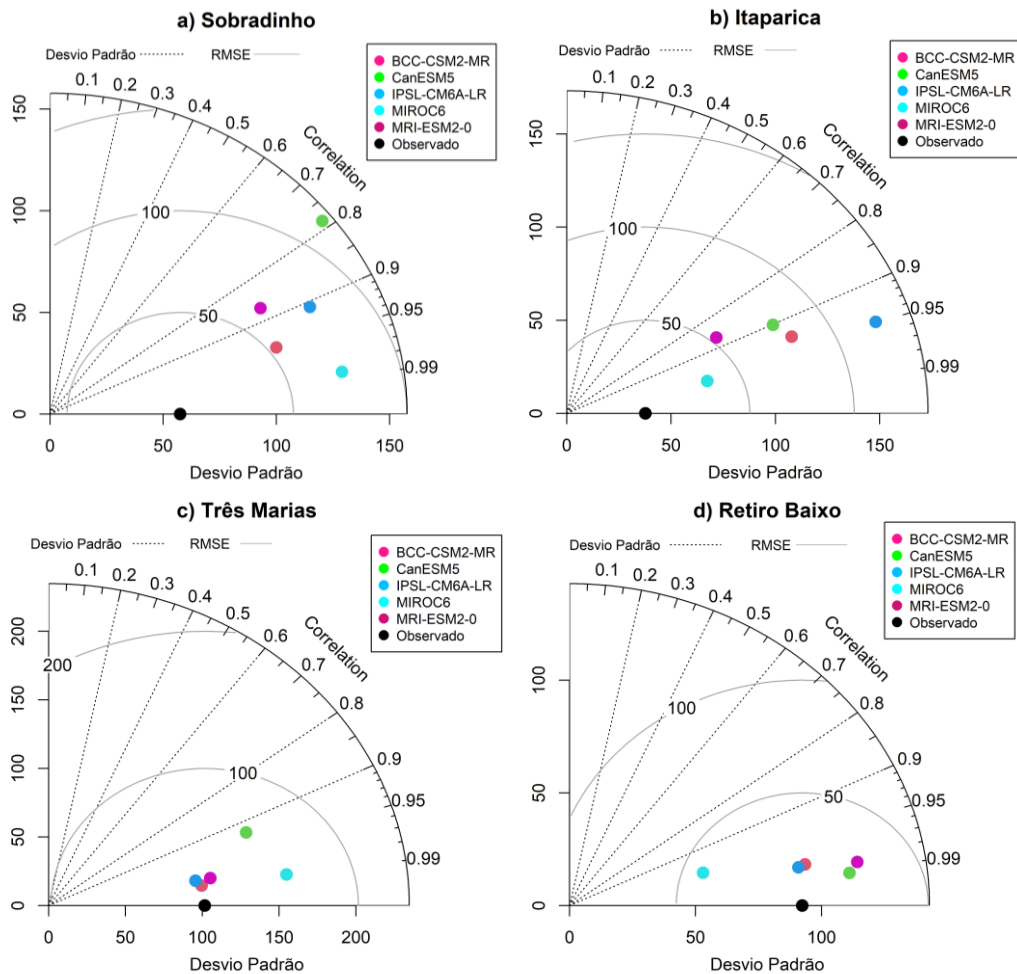
Figura 47 - Sazonalidade dos modelos do CMIP6 (linhas coloridas) e sazonalidade observada (linha na cor preto).



Fonte: Elaborado pelo autor.

O diagrama de Taylor da sazonalidade da precipitação dos modelos do CMIP6 referente aos dados observados mostrou que a maioria dos modelos apresentaram boa performance, com r acima de 0,9, conforme Figura 48. No entanto, nas bacias hidrográficas localizadas mais ao sul da BHSF (Três Marias e Retiro Baixo) os modelos representaram melhor a sazonalidade das precipitações, com maiores r e menores σ e RMSE. Tal fato pode estar relacionado com a maior variabilidade das precipitações nas bacias hidrográficas de Sobradinho e Itaparica devido à localização destas, em parte no caso de Sobradinho, na região Semiárida do Brasil – região conhecida por longos períodos de estiagens e alta variabilidade das chuvas. O modelo CanESM5, por exemplo, apresentou r inferior a 0,8 e maiores σ e RMSE em relação aos demais modelos na bacia hidrográfica de Sobradinho. Enquanto na bacia hidrográfica de Itaparica, o modelo IPSL-CM6A-LR foi o que apresentou o maior RMSE, acima de 100. Esse último caso coincide com o estudo de Silveira *et al.* (2016), no qual mostrou que, dentre os 27 modelos do CMIP5, o modelo francês foi um dos que apresentaram as piores performances na representação da sazonalidade das precipitações na bacia hidrográfica do rio São Francisco.

Figura 48 - Diagrama de Taylor da média sazonal de precipitação dos modelos do CMIP6 no cenário histórico tendo por referência os dados observados da ANA, ambos no período de 1901 a 2000.

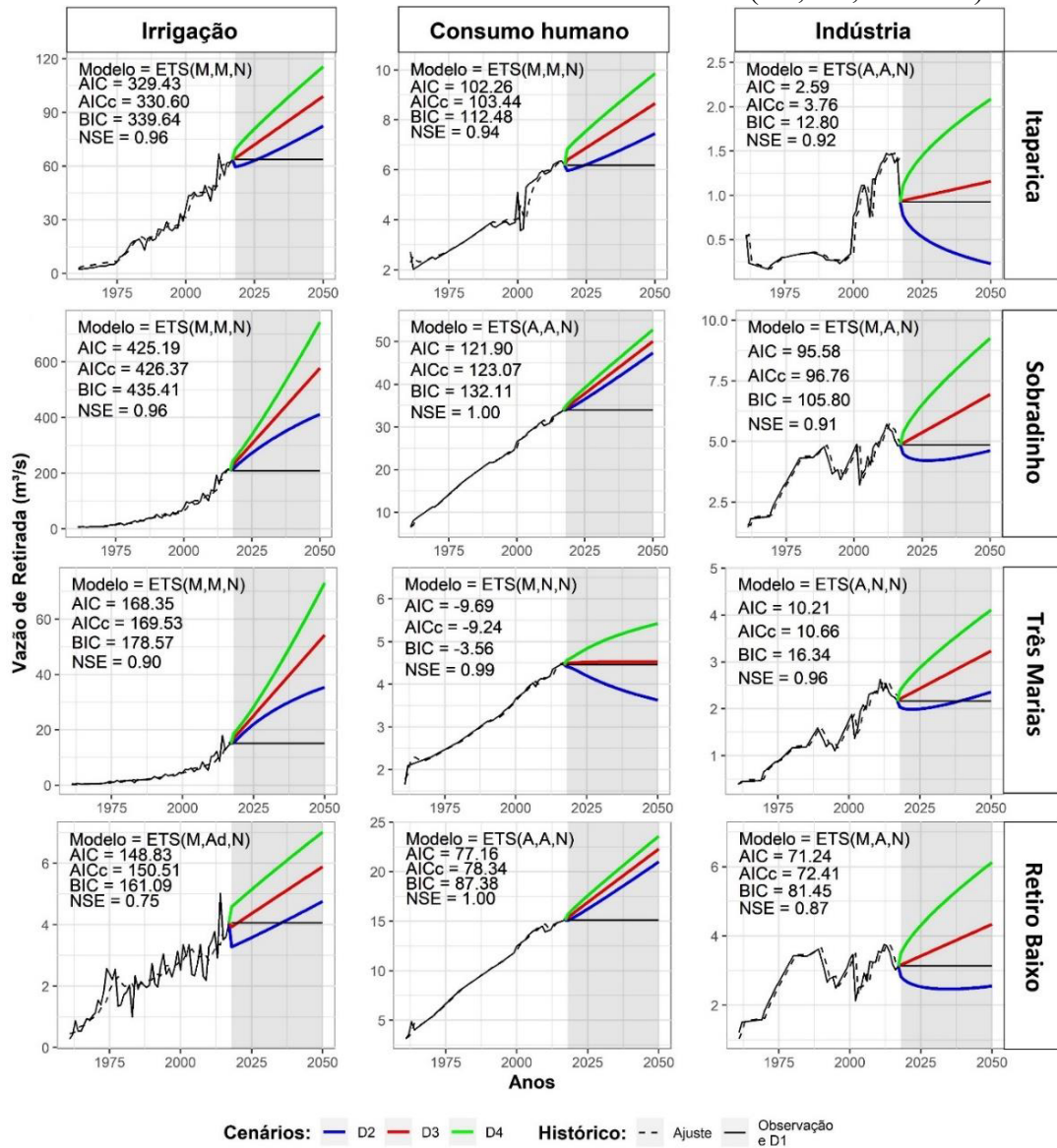


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Projeções das Demandas Consuntivas

A Figura 49 traz as séries históricas observadas das vazões de retirada das demandas consuntivas (1961 a 2017), bem como o melhor ajuste obtido com o modelo ETS e suas projeções para o período de 2018 a 2050. Observa-se que na maioria dos casos para a demanda de irrigação, o modelo ETS(M,M,N) foi o que apresentou o melhor ajuste, a exceção foi para o reservatório de Retiro Baixo que o modelo ETS(M,Ad,N) obteve o melhor ajuste. Além disso, observou-se que todas as vazões de retirada apresentaram crescimento exponencial em todos os reservatórios e para todas as demandas consuntivas. Dessas, se destaca a demanda da irrigação com as maiores taxas médias anuais de crescimento, com valores de 6,80%, 7,42%, 10,99% e 9,29% em Itaparica, Sobradinho, Três Marias e Retiro Baixo, respectivamente (ver Tabela 15).

Figura 49 - Demandas consuntivas históricas e cenários futuros (D1, D2, D3 e D4).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 - Taxa média de crescimento anual das demandas consuntivas.

Reservatório	Demandas	Taxa média de crescimento anual (%)			
		Histórico (1961-2017)	D2	D3	D4
Itaparica	Irrigação	6,80	0,81	1,35	1,73
	Consumo Humano	1,88	0,54	0,95	1,25
	Industria	2,87	-3,73	0,66	2,46
Sobradinho	Irrigação	7,42	1,41	2,93	3,80
	Consumo Humano	3,03	0,97	1,18	1,36
	Industria	2,53	-0,70	1,07	1,99
Três Marias	Irrigação	10,99	1,80	3,70	4,62
	Consumo Humano	1,84	-1,02	0,02	0,77
	Industria	3,53	-0,08	1,19	1,93
Retiro Baixo	Irrigação	9,29	1,10	1,27	1,37
	Consumo Humano	2,99	0,97	1,16	1,34
	Industria	2,15	-1,53	0,99	2,06

Fonte: Elaborado pelo autor.

Também é a demanda da irrigação que possui os maiores valores totais de vazões de retiradas em três dos quatro reservatórios analisados. A exceção foi o reservatório de Retiro Baixo, no qual a demanda humana superou as demais. O modelo ETS projetou, para a maioria das demandas consuntivas, cenários de crescimento para o período de 2018 a 2050. As exceções foram as demandas da indústria que, no cenário D2 (mais otimista), projetou redução das vazões retiradas com taxa média anual de $-3,73\%$, $-0,70\%$, $-0,08\%$ e $-1,53\%$ para os reservatórios de Itaparica, Sobradinho, Três Marias e Retiro Baixo, respectivamente, e do Consumo humano com taxa média anual de $-1,02\%$ para o reservatório de Três Marias.

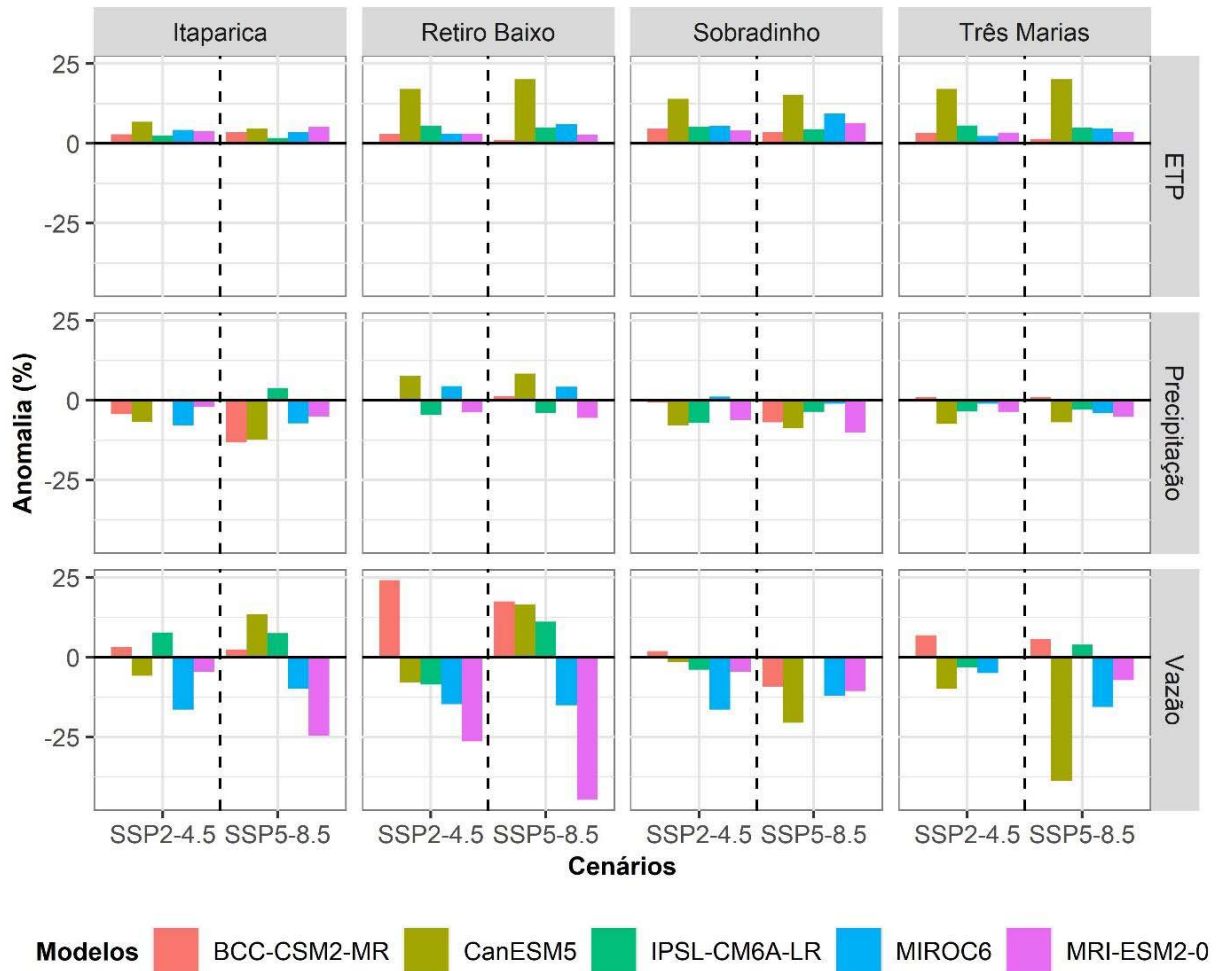
4.3.3 Anomalia Padronizada

Neste tópico são apresentadas as anomalias padronizadas dos cenários futuros (2021 a 2050) em relação ao período histórico (1971 a 2000) das variáveis hidrológicas, demandas consuntivas e hidrológicas.

4.3.3.1 Cenários hidrológicos

A Figura 50 traz as anomalias das variáveis de ETP, precipitação e vazões médias anuais dos modelos do CMIP6 nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para o período de 2021 a 2050 em comparação com o cenário *historical* (1971 a 2000). Observou-se que todos os modelos indicam aumento da ETP nos dois cenários futuros e para todos os reservatórios analisados. Enquanto para a precipitação a maioria dos modelos indicaram redução para os reservatórios de Itaparica, Sobradinho e Três Marias, com magnitude próximo de -15% no cenário SSP5-8.5. A exceção foi o modelo IPSL-CM6A-LR, que indicou aumento da precipitação para o reservatório de Itaparica no cenário SSP5-8.5 com magnitude próximo de 5% . No reservatório de Retiro Baixo houve incerteza em relação a precipitação, com os modelos BCC-CSM2-MR, CanESM5 e IPSL-CM6A-LR indicando aumento; enquanto os modelos MIROC6 e MRI-ESM2-0 indicam diminuição da precipitação.

Figura 50 - Anomalia percentual das variáveis de ETP, precipitação e vazão média anual dos modelos do CMIP6.



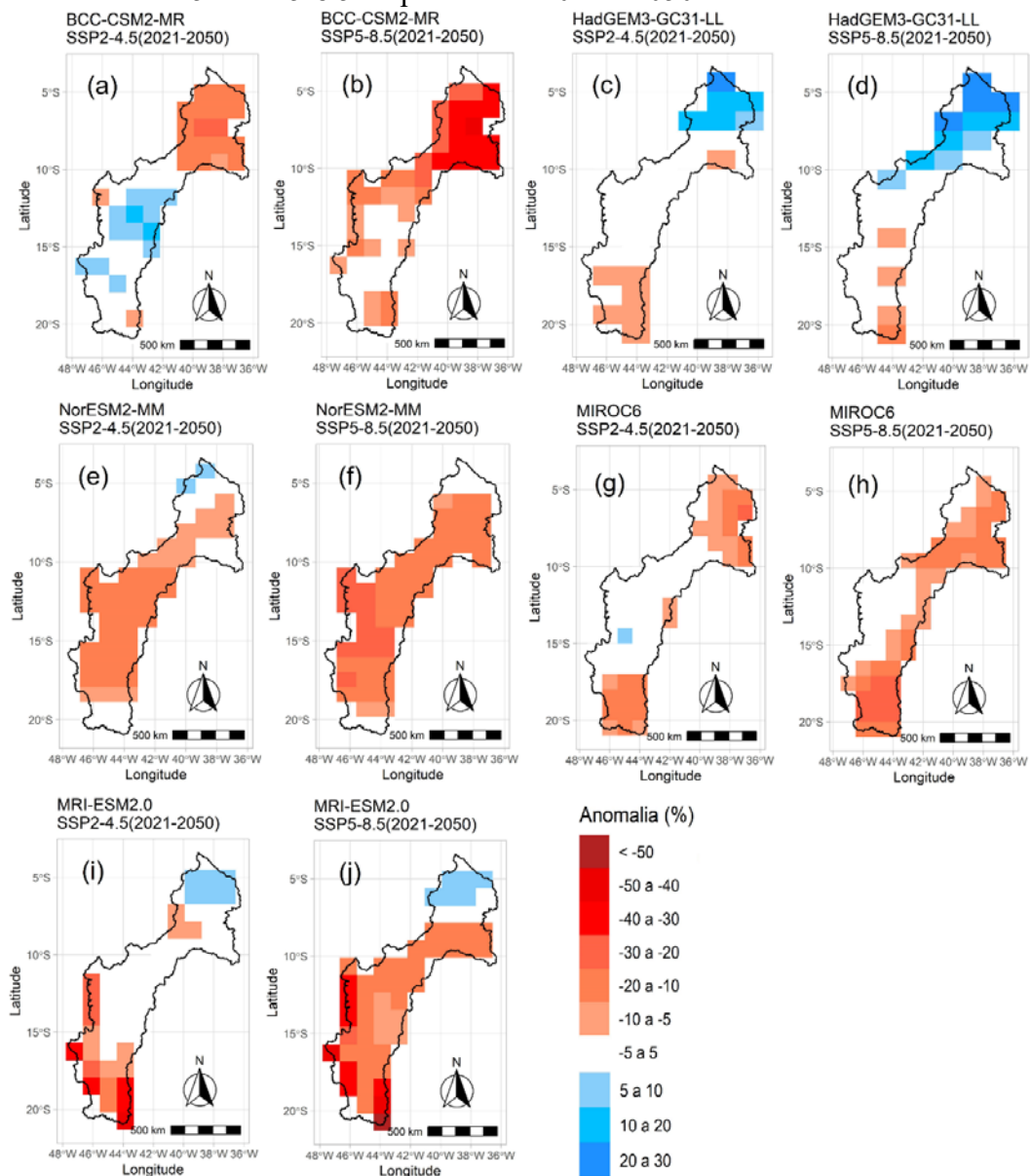
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as vazões a maioria dos modelos indicaram redução para os reservatórios de Sobradinho e Três Marias, com as maiores magnitudes no cenário SSP5-8.5. Destaque para o modelo CanESM5 que indicou redução com magnitude próximo de -25% no reservatório de Sobradinho e próximo de -40% no reservatório de Três Marias. Para os demais reservatórios os modelos apresentaram incerteza em relação ao sinal e magnitude das anomalias das vazões médias anuais. Destaque para os modelos MIROC6 e MRI-ESM2-0 que indicaram redução da vazão para todos os reservatórios.

O conjunto dos modelos do CMIP6, especialmente, apresentaram divergência quanto ao sinal das anomalias da precipitação para a BESF, conforme mostra a Figura 51. Os modelos BCC-CSM2-MR, MIROC6 e NorESM2-MM indicaram uma possível redução da precipitação para a região da transposição com magnitude variando entre -10% e -30% , dependendo do cenário de projeção. Além deles, os modelos adGESM3-GC31-LL e MRI-

ESM2.0 também indicaram aumento da precipitação na região da transposição em todos os períodos e cenários analisados. Resultados semelhantes sobre as divergências dos modelos para a precipitação foram encontrados no estudo de Silveira et al. (2016), utilizando os GCM do projeto CMIP5, onde as anomalias de precipitação ficaram entre -20% e 20% em cada período de 30 anos (2011 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2100) para a bacia do rio São Francisco.

Figura 51 - Anomalias percentual de precipitação dos modelos do CMIP6 sobre a BESF para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 no período de 2021 a 2050.

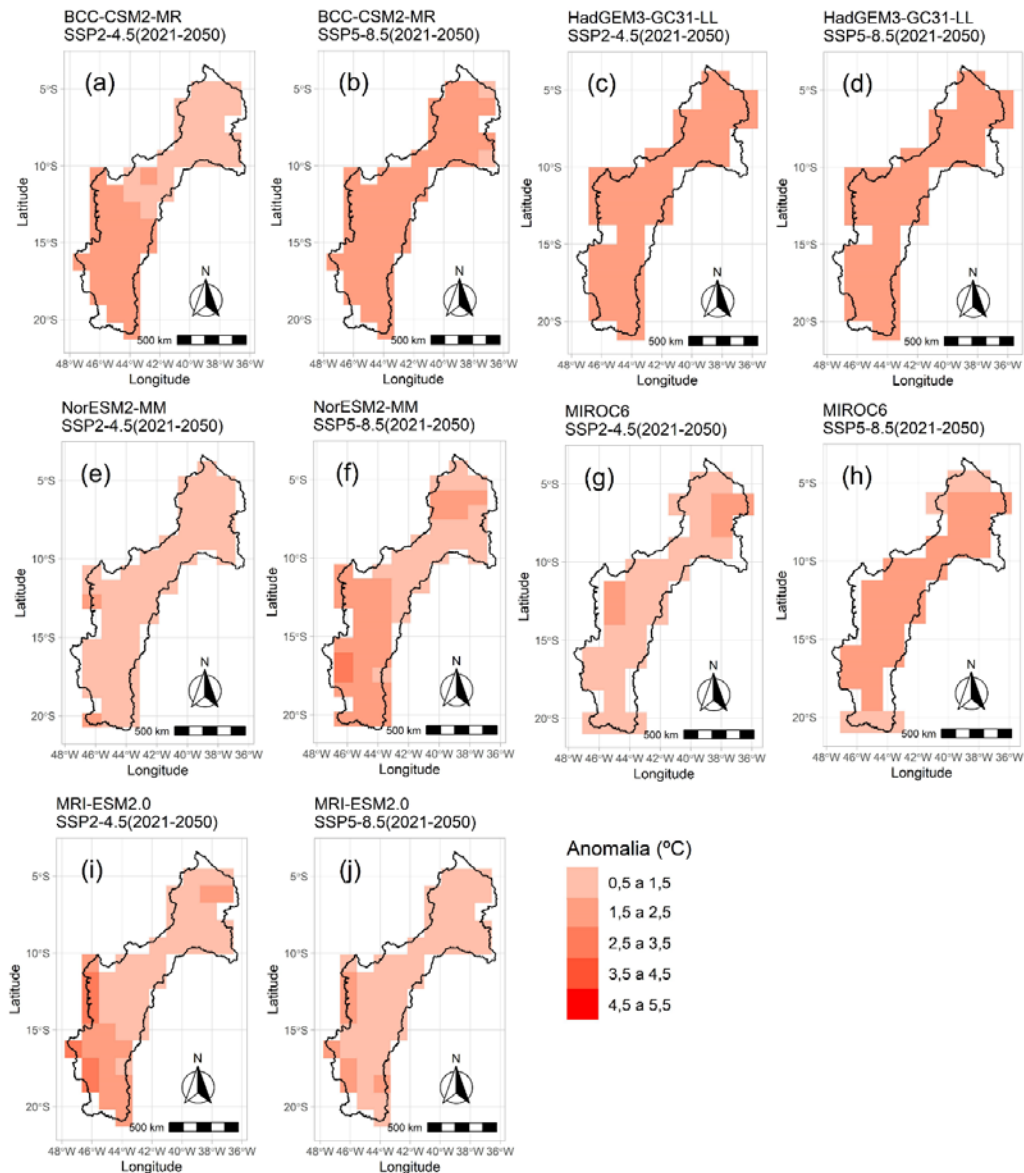


Fonte: Elaborado pelo autor.

As anomalias anuais das projeções do conjunto dos modelos do CMIP6 para o século XXI nos períodos de 2021 a 2050 em relação ao século XX (no período de 1951 a 2000),

coincidem na indicação de aumento da TAS para toda a BESF, para os cenários de projeções SSP2-4.5 e SSP5-8.5, conforme a Figura 52. O conjunto dos modelos apresentaram anomalias de TAS, no período de 2021 a 2050, com aumento entre 0,5 e 2,5°C.

Figura 52 - Anomalias percentual da TAS dos modelos do CMIP6 sobre a BESF para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 no período de 2021 a 2050.

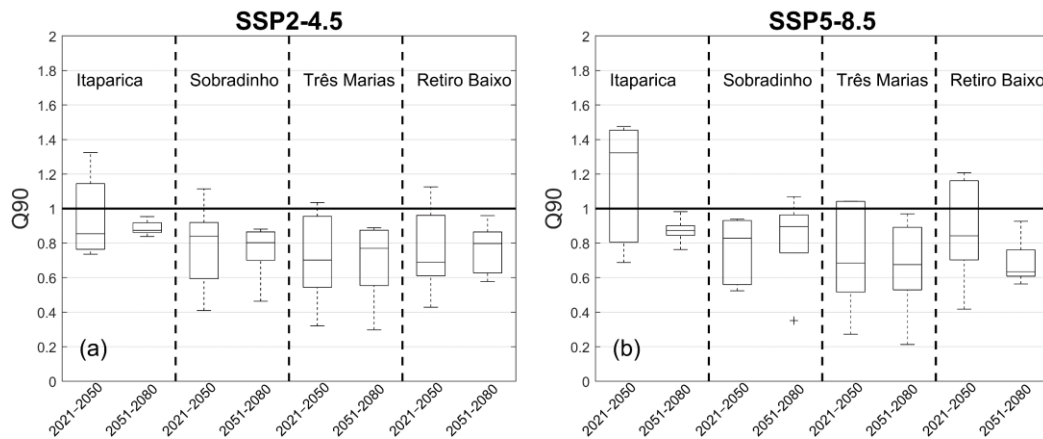


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 53 apresenta os box-plots da razão entre a Q90 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 variando em 30 anos (2021-2050 e 2051-2080) e a Q90 no período *historical* (1971-2000) para os reservatórios da BHSFE, correspondentes aos cinco modelos analisados. O conjunto dos modelos indicaram reduções na Q90 para a maioria dos reservatórios da BHSFE

e para os dois períodos analisados. A exceção foi o reservatório de Itaparica, que para o cenário SSP5-8.5, no período de 2021 a 2050, a mediana dos modelos indicou aumento na Q90.

Figura 53 - Razão entre a vazão: (a) Q90 do cenário futuro SSP2-4.5 (2021-2050 e 2051-2080) e a Q90 do período Historical (1901-2000) e (b) Q90 dos modelos do cenário futuro SSP5-8.5 (2021-2050 e 2051-2080) e a Q90 do período Historical (1971-2000).

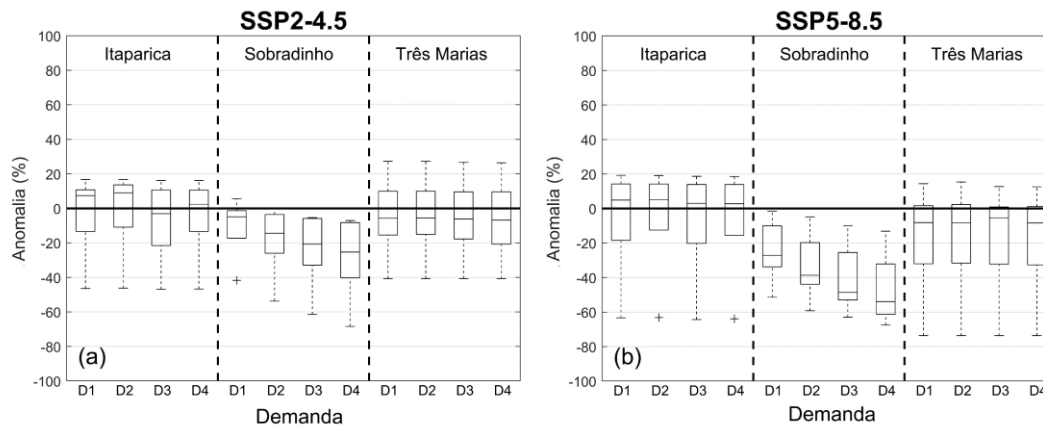


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3.2 Cenários Energéticos

A Figura 54 indica o comportamento das anomalias na média percentual das Energias das UH's de Itaparica, Sobradinho e Três Marias mostrada pelos modelos do CMIP6 para o período futuro de 2021 a 2050 para os cenários climáticos SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e de demandas D1, D2, D3 e D4 em relação ao período de 1901 a 2000 do *historical*.

Figura 54 - Anomalia percentual anual das Energias das UH's de Itaparica, Sobradinho e Três Marias obtidas com o Software SIGA com as projeções das demandas consuntivas D1, D2, D3 e D4 com o cenário: a) SSP2-4.5 e b) SSP5-8.5 no período de 2021 a 2050.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os modelos para o cenário SSP5-8.5 indicam projeções com reduções de Energia hidrelétrica mais intensas do que o cenário SSP2-4.5 para dois, das três UH's analisadas nesse estudo, sendo a UH de Itaparica a exceção com os modelos indicando, para os dois cenários do clima futuro e para a maioria dos cenários das demandas consuntivas, aumento da Energia hidrelétrica.

No que diz respeito às demandas consuntivas, foi possível observar que a UH de Sobradinho foi a que demonstrou maior sensibilidade aos cenários futuros dessas demandas, tendo apresentado maior intensidade na diminuição da UH ao passo que os cenários de demandas vão ficando mais pessimista, ou seja, o cenário de D4 apresentou maior intensidade da diminuição da Energia hidrelétrica com mediana menor que -50%, em detrimento aos demais cenários de demandas consuntivas D1 (sem alteração das demandas a partir de 2016) com aproximadamente -30%, D2 com aproximadamente -40% e D3 com aproximadamente -50% no cenário SSP5-8.5. Nas UH's de Três Marias e Itaparica houve pouca alteração em função das demandas consuntivas, ficando as medianas das anomalias próximas de -10% e 10%, respectivamente, nos dois cenários climáticos (SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

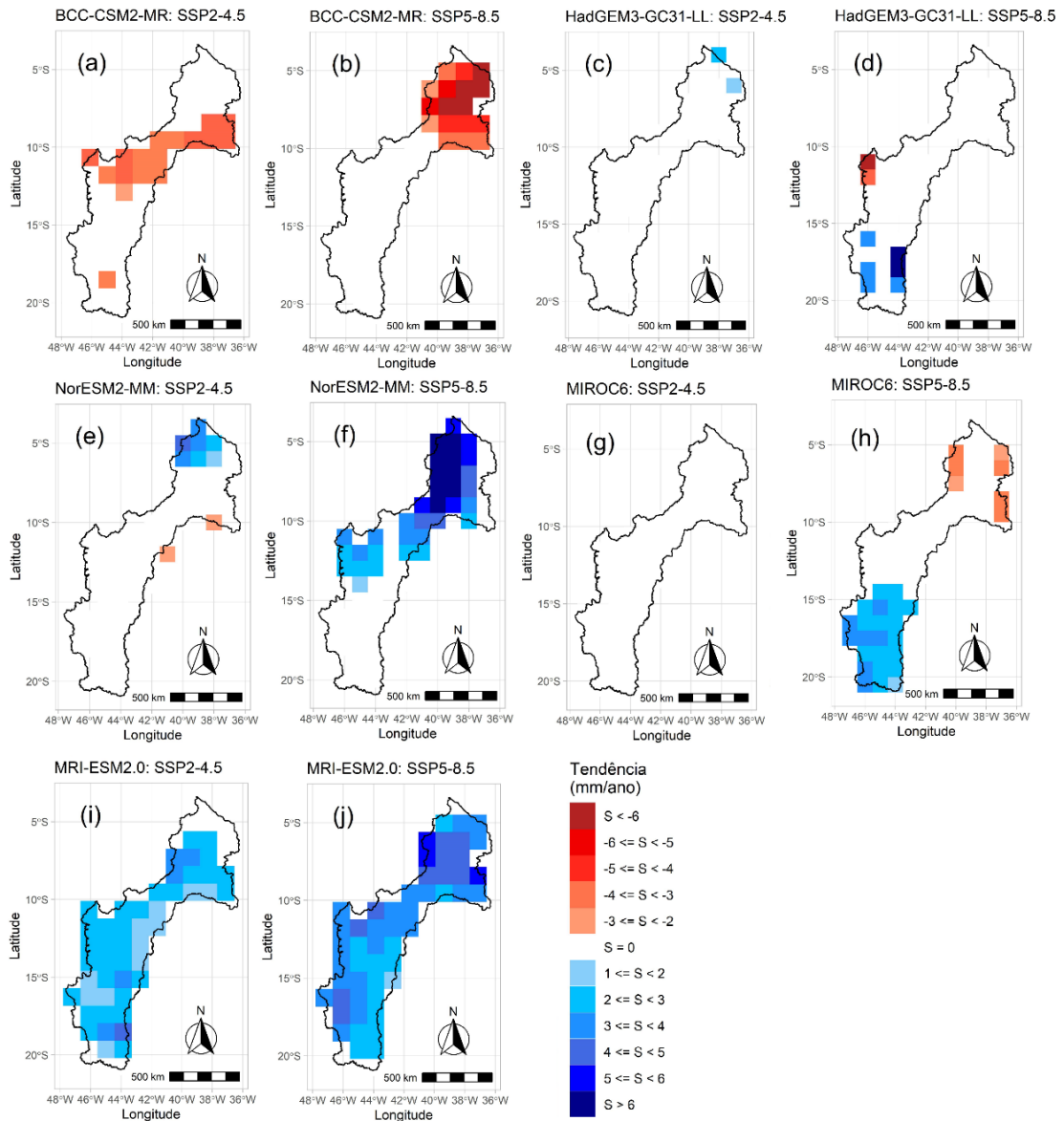
4.3.4 Teste de Tendência

4.3.4.1 Cenários hidrológicos

Na Figura 55 são apresentadas as tendências dos modelos para os cenários de projeções para o século XXI (período de 2015 a 2100) da precipitação usando o teste de Mann-Kendall Sen. Para o conjunto dos modelos que apresentaram tendência significativa, foi possível observar que o aumento das emissões de GEE sugere um maior impacto nas precipitações, pois, na maioria dos casos, o módulo de declividade é maior para o cenário SSP5-8.5 em detrimento ao cenário SSP2-4.5. Todavia, os modelos apresentam divergências espaciais em relação ao sinal das declividades das tendências. O modelo MRI-ESM2.0 indicou tendência positiva para praticamente toda a BESF, variando entre 2 a acima de 6 mm, dependendo do cenário de projeção. Os modelos BCC-CSM2-MR e MIROC6 no cenário SSP5-8.5 apresentaram tendência negativa nas regiões da transposição, parte do baixo São Francisco e parte do submédio São Francisco – regiões afetadas pelo clima do Semiárido e com menor taxa pluviométrica anual. Desses modelos, a versão anterior do modelo BCC-CSM2-MR do CMIP6, o BCC-CSM1-MR do CMIP5, foi o que apresentou a melhor performance no estudo de Silveira

et al. (2016). Os modelos HadGEM3-GC31-LL e MIROC6 no cenário SSP5-8.5 indicaram tendência positiva no baixo São Francisco.

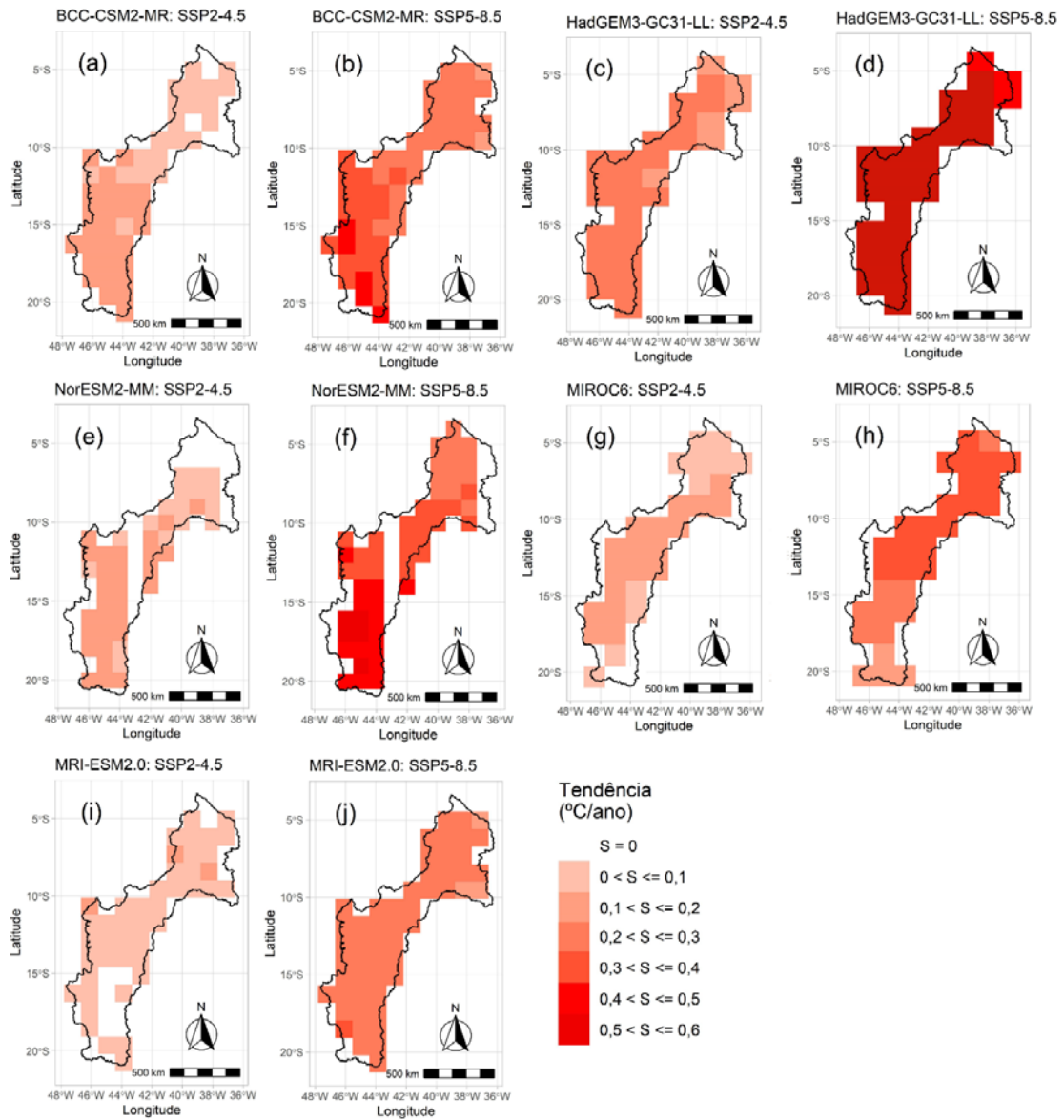
Figura 55 - Tendência, de acordo com o teste de Mann-Kendall Sen, da precipitação nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 dos modelos do CMIP6 para o período de 2006 a 2100.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 56 são apresentadas as tendências dos modelos para os cenários de projeções para o século XXI (período de 2015 a 2100) da TAS usando o teste de Mann-Kendall Sen. Para as regiões que apresentaram tendência significativa, todos os modelos indicaram tendência positiva para a TAS.

Figura 56 - Tendência, de acordo com o teste de Mann-Kendall Sen, da TAS nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 dos modelos do CMIP6 para o período de 2006 a 2100.

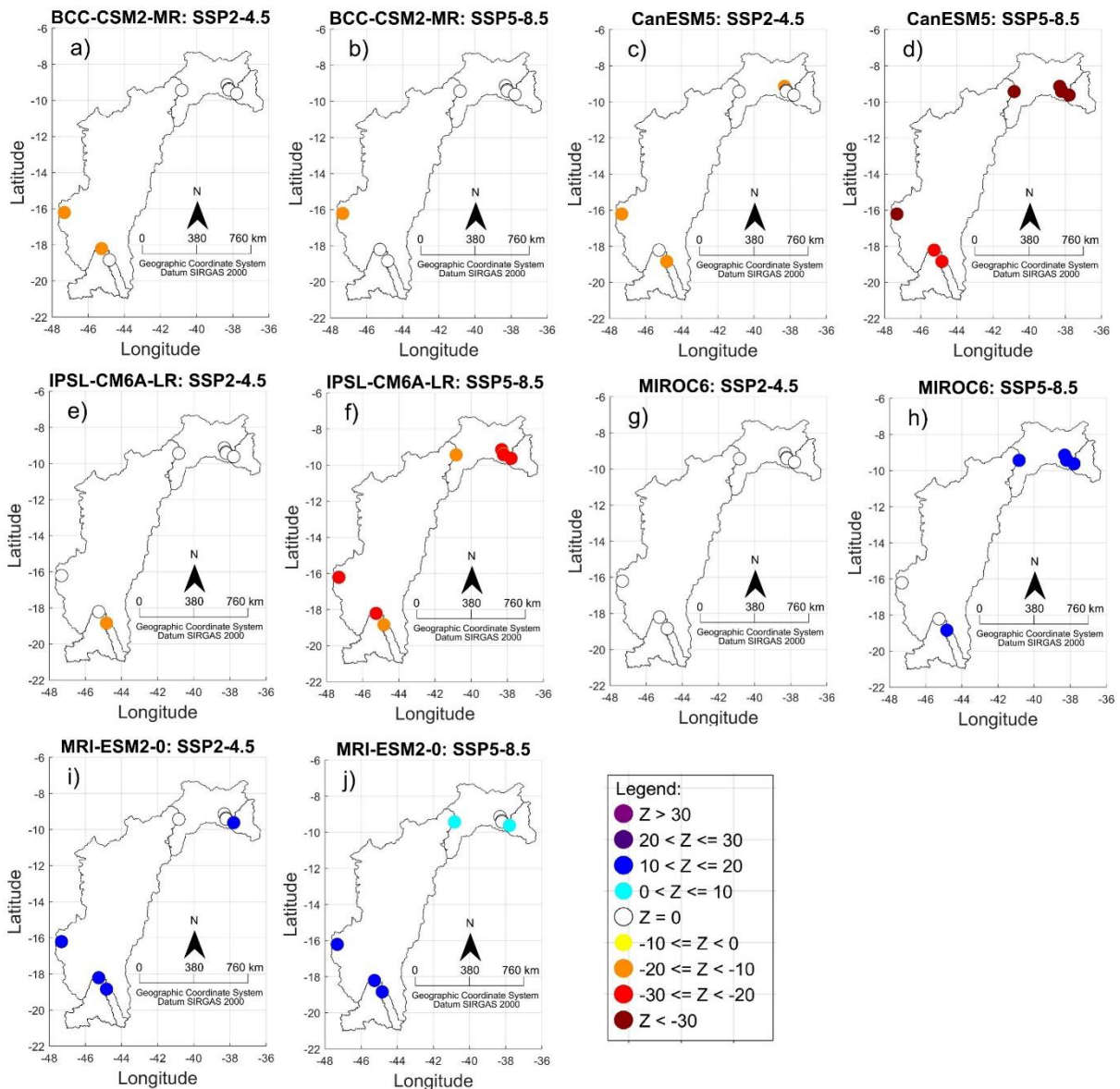


Fonte: Elaborado pelo autor.

Como nas anomalias anuais, o teste de tendência de Mann-Kendall Sen mostra uma clara evidência que o aumento das emissões dos GEE sugere um maior impacto na TAS, pois em todos os casos o módulo da magnitude da tendência é sempre maior no cenário SSP5-8.5 em detrimento ao cenário SSP2-4.5. Os modelos BCC-CSM2-MR e HadGEM3-GC31-LL demonstraram serem mais pessimistas, apresentando tendência com aumento superior a 0,6 °C para o século XXI para praticamente toda a BESF no cenário SSP5-8.5. Enquanto o modelo MIROC6 apresentaram as menores magnitudes das tendências com valores máximos entre 0,3 a 0,4°C no cenário SSP5-8.5.

Na Figura 57 são mostradas as declividades da tendência dos modelos do CMIP6 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 (período de 2017 a 2100) em relação ao *historical* (período de 1971 a 2000) das vazões naturais afluentes dos reservatórios da BHSFE, de acordo com o teste de Mann-Kendall Sen.

Figura 57 - Tendência, de acordo com o teste de Mann-Kendall para as precipitações padronizadas anual, referente aos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 do CMIP6 no período de 2017 a 2100.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o conjunto dos modelos que apresentaram tendência significativa, foi possível notar que o aumento das emissões de gases de efeito estufa sugere um maior impacto nas vazões, pois, na maioria dos casos, o módulo de declividade é maior para o cenário SSP5-8.5

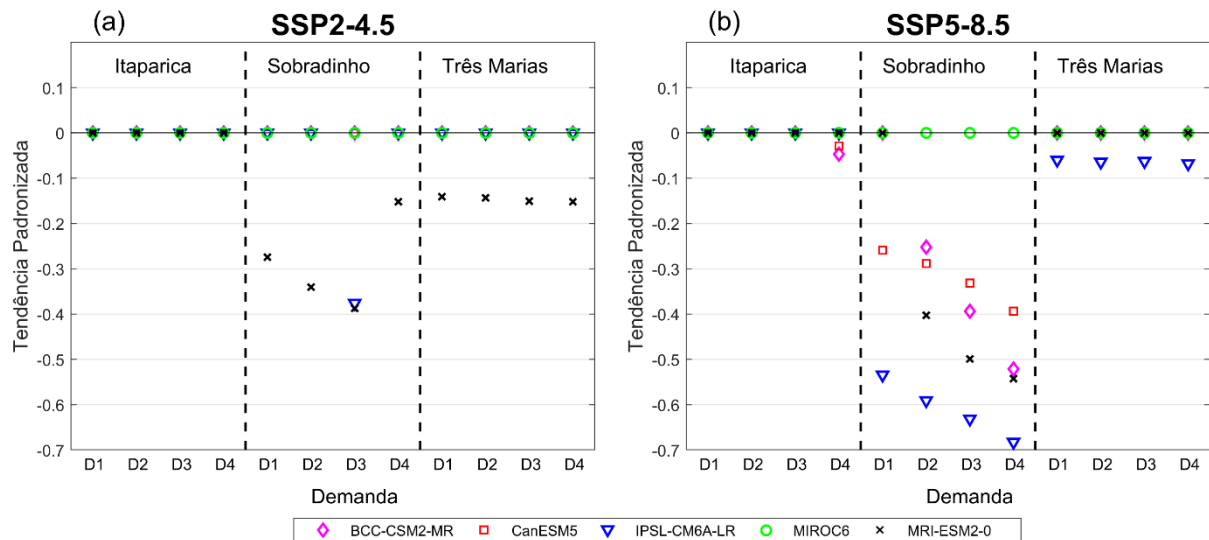
em detrimento ao cenário SSP2-4.5. Tal fato pode estar relacionado ao maior aumento de temperatura projetado pelo cenário SSP5-8.5, resultando em um maior aumento na PET projetada para o século XXI, como é mostrado no trabalho de Silveira et al (2016) com os dados do CMIP5.

Os modelos MIROC6 e MRI-ESM2-0 indicaram tendência positiva, enquanto os demais modelos projetaram tendência negativa, com declividade do modelo CanESM5 apresentando valor inferior a -0.30 para os reservatórios de Queimado, Sobradinho, Itaparica, Moxotó, Xingó e Complexo Paulo Afonso 1, 2, 3 e 4.

4.3.4.2 Cenários Energéticos

Na Figura 58 são mostradas as declividades da tendência dos modelos do CMIP6 para os cenários do clima futuro SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e das demandas consuntivas D1, D2, D3 e D4 usando o teste de Mann-Kendall Sen das Energias das UH's de Itaparica, Sobradinho e Três Marias.

Figura 58 - Tendência de acordo com o teste de Mann-Kendal Sen da Energia hidrelétrica anual padronizada, referente aos cenários: a) SSP2-4.5 e b) SSP5-8.5 para o período de 2021-2050. D1, D2, D3 e D4 são as projeções das demandas consuntivas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

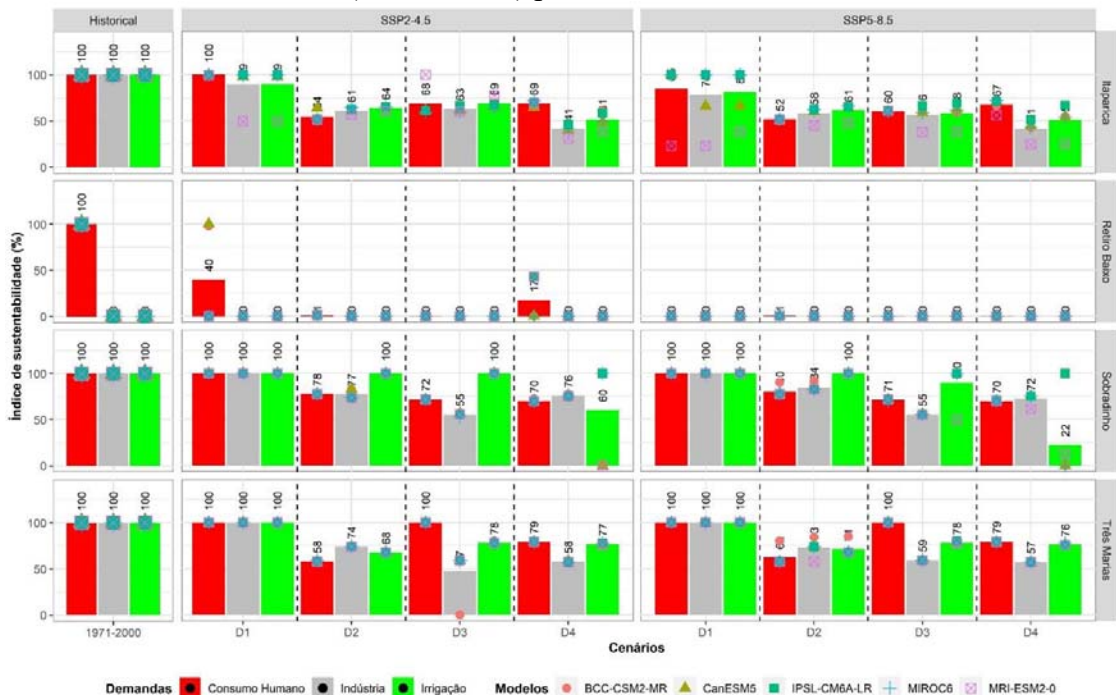
Analisando o conjunto de modelos que possuem tendência significativa, há uma clara evidência na UH de Sobradinho, que o aumento das emissões de gases de efeito estufa sugere um maior impacto na geração de energia elétrica, visto que o módulo de declividade é

maior para o cenário SSP5-8.5 em detrimento ao SSP2-4.5. Além disso, também ficou evidente na UH de Sobradinho, a maior magnitude dos módulos de declividade dos cenários das demandas consuntivas mais pessimistas. Dentre os modelos que indicaram reduções na geração de energia elétrica, se destaca o modelo IPSL-CM6A-LR chegando ao modulo de declividade de -0,7 no cenário D4. Na UH de Três Marias, para o cenário SSP2-4.5, somente o modelo MRI-ESM2-0 apresentou tendência significativa com declividade negativa em todos os cenários de demandas consuntivas, enquanto no cenário SSP5-8.5 somente o modelo IPSL-CM6A-LR apresentou tendência significativa, sendo também negativa. Na UH de Itaparica, somente no cenário climático SSP5-8.5 e no cenário de demanda D4, os modelos BCC-CSM2-MR e CanESM5 apresentaram tendência significativa, sendo estas com declividades negativas próximas de -0.05.

4.3.5 Análise do desempenho do Sistema Hídrico

A Figura 59 traz os resultados para o IS para as demandas consuntivas no período *historical* (1971 a 2000) e nos cenários de projeções analisadas para a próxima década (2021 a 2050).

Figura 59 - IS percentual dos modelos do CMIP6 no período historical (1971 a 2000) e cenários de mudanças climáticas SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e cenários das projeções de demandas consuntivas D1, D2, D3 e D4 (2021 a 2050) para os reservatórios da BHSF.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O IS, como já mencionado, considera os indicadores de IC, IR e IV (ver APÊNDICE D). Sendo proposto para refletir, de um modo geral, o quão as demandas são atendidas, considerando-se a frequência, magnitude e duração das falhas do seu atendimento. Os resultados mostraram que todos os reservatórios apresentaram diminuição dos IS de acordo com a gravidade dos cenários de projeções das demandas consuntivas e das mudanças climáticas.

No reservatório de Itaparica, para a demanda de consumo humano, o IS apresentou valor de 100% no período *historical* e nos cenários D1 e SSP2-4.5; e obteve o menor valor com a magnitude de 54% nos cenários D2 e SSP2-4.5. A demanda da indústria obteve IS menor em todos os cenários de mudanças climáticas (SSP2-4.5) e de demandas consuntivas (D1, D2, D3 e D4), apresentando 100% somente no cenário *historical* (1971 a 2000). O seu menor valor de IS foi nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 de mudanças climáticas em conjunto com o cenário D4 das demandas consuntivas com a magnitude de 41%. Na demanda de irrigação, assim como na demanda da indústria, somente no cenário *historical* (1971 a 2000) houve 100% de IS. O menor valor do IS ocorreu nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 de mudanças climáticas em conjunto com o cenário D4 das demandas consuntivas com a magnitude de 51%.

No reservatório de Sobradinho o IS diminuiu na demanda de Consumo humano com média de 100% no período *historical* e nos cenários D1, SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para 70% nos cenários D4, SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Na demanda da indústria a média percentual passou de 100% no período *historical* e nos cenários D1, SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para 55% nos cenários D3, SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Na demanda da irrigação quase não houve falhas, apresentando IS de 100% para o período *historical* e quase todos os cenários de mudanças climáticas e demandas consuntivas, a exceção foi nos cenários SSP2-4.5 e D4 com valor de IS de 60%; nos cenários SSP5-8.5 e D3 com valor de IS de 80%; e nos cenários SSP5-8.5 e D4 com valor de IS de 22%.

O reservatório de Retiro Baixo foi o único reservatório analisado que possui falhas no período *historical*, apresentando IS com média igual a 0% para as demandas de Irrigação e Indústria no período *historical* e em todos os cenários analisados. Para a demanda de Consumo humano, houve redução de 100% no período *historical* para 40% nos cenários D1 e SSP2-4.5, 17% nos cenários D4 e SSP2-4.5 e 0% nos demais cenários.

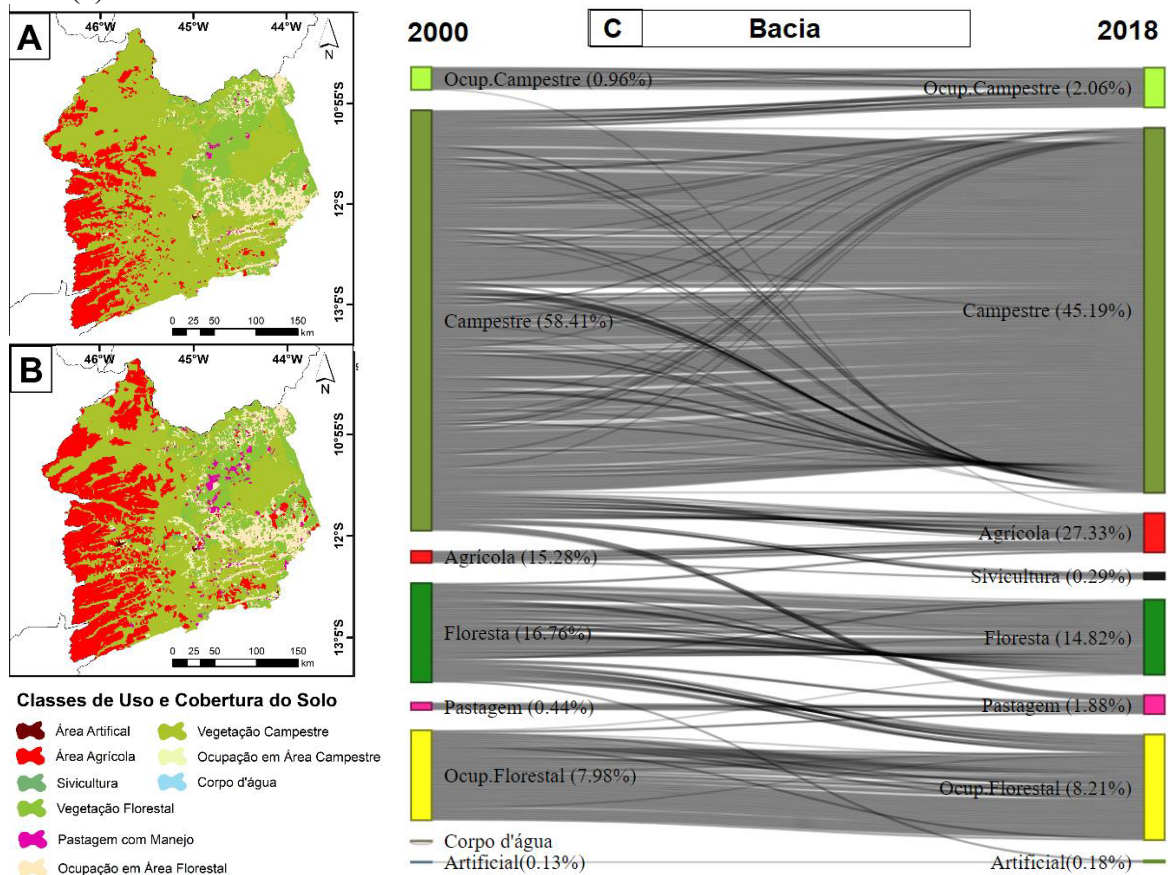
No reservatório de Três Marias também houve diminuição do IS para todas as demandas analisadas. No período *historical* e nos cenários D1, SSP2-4.5 e SSP5-8.5 apresentou média de 100% para todas as demandas analisadas. No cenário de demanda D2 e cenários climáticos SSP2-4.5 e SSP5-8.5 a demanda de consumo humano também apresentou IS de 100%. Mas nos demais houve diminuição de acordo com os cenários de demandas futuras. Para

o consumo humano, o menor valor de IS ocorreu nos cenários SSP2-4.5 e D2 com magnitude de 58%. Para a demanda da indústria o menor valor de IS ocorreu nos cenários SSP2-4.5 e D2 com magnitude de 47%. Na demanda da irrigação o menor valor de IS ocorreu nos cenários SSP2-4.5 e D2 com magnitude de 68%.

4.4 Monitoramento do Uso e Cobertura do Solo

A Figura 60 apresenta a evolução do Uso e Cobertura do Solo da BHG entre os anos de 2000 e 2018.

Figura 60 - Evolução do Uso e Cobertura do Solo da BHG espacialmente para os anos de 2000 (a) e para o ano de 2018 (b); e o diagrama de Sankey com a evolução percentual entre esses anos (c).



Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras 60a e 60b mostram essa evolução do Uso e Cobertura do Solo espacialmente no ano de 2000 e 2018, respectivamente; e a Figura 70c traz o diagrama de Sankey com a evolução do Uso e Cobertura do Solo percentual de cada classe em relação a área

total da bacia. Ao longo da bacia foi possível observar a expansão da Área Agrícola, que aumentou de 15,28% no ano de 2000 para 27,33% no ano de 2018, e da Pastagem com manejo, que aumentou de 0,44% no ano de 2000 para 1,88% no ano de 2018, em detrimento da Vegetação Campestre (vegetação típica do Cerrado), que diminuiu de 58,41% no ano de 2000 para 45,19% no ano de 2018, e da Vegetação Florestal, que diminuiu de 16,76% no ano de 2000 para 14,82% no ano de 2018. Também houve aumento das áreas de Ocupação Campestre, passando de 0,96% no ano de 2000 para 2,06% no ano de 2018; da Ocupação em Área Florestal de 7,98% no ano de 2000 para 8,21% no ano de 2018; e da Área Artificial, passando de 0,13% para 0,18%. Em resumo foi possível perceber o aumento significativo das classes dos Usos e Cobertura do Solo antropogênico em detrimento ao Uso e Cobertura do Solo natural.

4.4.1 Análise da Q90

Os resultados das simulações sob diferentes cenários estão descritos na Tabela 16. O cenário 2 avalia se o UCS do ano de 2000 tivesse permanecido constante, com predominância de vegetação e pouca atividade agrícola e pecuária, teria havido pouca mudança em termos de vazão da Q90 comparados com o cenário observado. Enquanto o cenário 1 avalia a Q90 com o UCS do ano de 2018. O APÊNDICE B traz maiores detalhes das CP com os máximos e mínimos das vazões para todas as sub-bacias analisadas.

Tabela 16 - Comparação da Q90 observada e simulada para os cenários 1 e 2.

Bacia	Observado (1985-2000)	Simulado (1985-2000)	Observado (2001-2014)	Cenário 1 (2001-2014)	Cenário 2 (2001-2014)	Mudança Observada	Mudança Cenário 1	Mudança Cenário 2
1	77,3 m ³ /s	62,8 m ³ /s	67,3 m ³ /s	50,5 m ³ /s	55,5 m ³ /s	12,9%	19,7%	11,7%
2	212,5 m ³ /s	209,7 m ³ /s	165,5 m ³ /s	152,8 m ³ /s	162,3 m ³ /s	22,1%	27,1%	22,6%
3	39,3 m ³ /s	36,6 m ³ /s	29,1 m ³ /s	27,8 m ³ /s	30,3 m ³ /s	26,0%	24,1%	17,3%
4	8,1 m ³ /s	5,5 m ³ /s	5,6 m ³ /s	5,0 m ³ /s	5,0 m ³ /s	31,7%	9,5%	9,4%
5	65,6 m ³ /s	67,0 m ³ /s	47,1 m ³ /s	39,9 m ³ /s	48,6 m ³ /s	28,2%	40,5%	27,5%
6	3,7 m ³ /s	2,7 m ³ /s	2,5 m ³ /s	1,5 m ³ /s	2,0 m ³ /s	31,5%	44,4%	25,9%
7	38,6 m ³ /s	31,6 m ³ /s	30,9 m ³ /s	21,7 m ³ /s	24,5 m ³ /s	20,1%	31,3%	22,6%
8	24,8 m ³ /s	25,9 m ³ /s	14,7 m ³ /s	10,5 m ³ /s	20,6 m ³ /s	40,7%	59,4%	20,7%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se queda da Q90 em todas as bacias caso o UCS no ano 2000 tivesse permanecido contínuo ao longo do ano (cenário 2) quando comparado com a Q90 das bacias com o cenário 1 (com a mudança do UCS para o ano de 2018). Essa redução indica que os impactos das mudanças no UCS afetam significativamente a disponibilidade hídrica.

5 DISCUSSÃO

5.1 Análise histórica das variáveis climáticas, hidrológicas e energéticas

Este estudo revela indícios de que o ENOS, ODP e OMA afetaram significativamente o regime de vazões dos reservatórios da BHSF e que ocorrem tendências positivas e negativas das séries temporais da ETP e da vazão, respectivamente. Tais influências impactam nas secas, com o aumento da intensidade e frequência em fase OMA+ e ODP+, e nas cheias nas fases de OMA- e ODP-. No que diz respeito à tendência da ETP, a variável cresce continuamente e parece não variar com as fases da OMA e ODP.

Os resultados do teste de TO da potência média e TC entre os dados de SPI, SPEI, SRI e os índices climáticos El Niño 3.4, ODP e OMA para a BHSF são semelhantes aos obtidos por Rocha, Souza Filho e Silva (2019) para bacia hidrográfica do Orós entre esses mesmos índices climáticos e o SPI.

As tendências de crescimento da ETP podem ser justificadas pelo aumento da agricultura irrigada na BHSF. Pois segundo o estudo de Han, Xu e Yang (2017), o aumento da área irrigada no distrito de irrigação Awati, localizado na China, resultou em um acréscimo da ETP. As conclusões de Santos, Calijuri e Assis (2022) corroboram o comportamento observado da tendência da ETP na BHSF. Esses autores destacam que as mudanças de UCS contribuíram para o aumento dos fluxos de radiação e calor próximo à superfície terrestre, levando a um aumento da ETP.

Além disso, as alterações no microclima, induzidas pelas modificações antrópicas no UCS ou aquecimento da superfície devido ao efeito-estufa, podem resultar no aumento da temperatura da superfície terrestre. Sendo assim, o método utilizado para determinação da ETP é Hargreaves-Samani que utiliza apenas a temperatura máxima e mínima como dado de entrada, esses aumentos na temperatura da superfície terrestre podem ter impactos significativos nessa componente hidrológica. A homogeneidade das tendências, por sua vez, pode ser atribuída à interpolação espacial realizada para os pontos de grade do CRU utilizando dados observados *in situ* (Lima *et al.*, 2022).

5.2 Modelagem hidrológica

Neste estudo as vazões dos principais reservatórios da BHSF foram estimadas através do modelo SMAP, processo que incluiu período de calibração (1996 a 2005) e validação

(2006 a 2017). Nesses processos observou-se que a maioria dos reservatórios apresentou bom desempenho de acordo com a classificação apresentada no estudo de Almeida, Pereira e Pinto (2018), que utiliza NSE e PBIAS como métricas.

A exceção ocorreu no período de validação do reservatório Retiro Baixo, que apresentou PBIAS igual a $-39,7\%$, período em que o modelo SMAP superestimou as vazões naturalizadas do ONS com métrica abaixo do considerado satisfatório. Além disso, o reservatório de Itaparica foi o que apresentou o menor valor de NSE, obtendo apenas classificação satisfatória. Isso pode estar relacionado à alta variabilidade de chuvas e vazões na região, conforme mencionado em diversos estudos (Fetter; Oliveira; Steinke, 2018; Hounsou-Gbo et al., 2015; Silva; Silva, 2012).

Através das simulações pode-se perceber que o modelo SWAT em relação ao modelo SMAP apresentaram, levando em consideração os valores NSE e PBIAS, melhor performance na calibração e validação das vazões dos reservatórios analisadas na escala de tempo mensal.

O SMAP geralmente possui parâmetros impossíveis de serem determinados por observações diretas, condicionando sua obtenção à calibração do modelo com base em dados observados de entrada e saída. Isso, inevitavelmente, agrega incertezas à estimativa desses parâmetros, pois há um número limitado de observações e, a depender da Função Objetivo (F.O) utilizada para aferir a calibração, seu valor pode divergir entre calibrações com diferentes F.O (Lima, 2022). Ademais, a correlação entre os parâmetros e a heterogeneidade espaço-temporal destes também agregam incertezas em suas estimativas (Lima, 2022). A identificação incerta desses parâmetros leva a incertezas nas saídas do modelo hidrológico, podendo fornecer informações imprecisas sobre o escoamento superficial ou descargas pontuais (Almeida; Pereira; Pinto, 2018; Bahati; Ogenrwoth; Sempewo, 2021).

O modelo SWAT, por sua vez, tem a sua calibração automática através da utilização do software SWAT-CUP, desenvolvido por Abbaspour *et al.* (2007). SWAT-CUP possibilita a realização da análise de sensibilidade, calibração e verificação dos parâmetros do modelo SWAT a partir de cinco diferentes algoritmos, dentre eles, o mais utilizado é o SUFI-2 (Abbaspour et al., 2007, 2015; Abbaspour; Vaghefi; Srinivasan, 2017).

No SUFI-2 levam-se em conta, para a análise de incerteza, todas as suas fontes, como a incerteza nas variáveis de entrada, o conceitual do modelo e as incertezas nos parâmetros e nos dados medidos (Abbaspour et al., 2007, 2015; Abbaspour; Vaghefi; Srinivasan, 2017). O grau para o qual todas as incertezas são contabilizadas é quantificado por

uma medida referida como o fator-P, que é a percentagem dos dados medidos delimitados pela incerteza de predição de 95% (95PPU).

Com isso o modelo SWAT consegue minimizar as incertezas associadas ao processo de calibração e validação, o que pode justificar a sua melhor performance quando comparado ao modelo SMAP.

Por outro lado, segundo Abbaspour *et al.* (2015), a calibração e a análise de incerteza estão intimamente ligadas e nenhum resultado de calibração deve ser apresentado sem uma quantificação do grau de incerteza na previsão do modelo. Pois, segundo o autor, nenhum algoritmo de calibração automática pode substituir o conhecimento do analista em relação à hidrologia das bacias hidrográficas e às questões de calibração.

Diante disso, o fato de ser uma bacia menor, também pode ter contribuído para o melhor ajuste do modelo SWAT e sua uma melhor performance, quando comparado com o modelo SMAP e o ajuste para uma grande bacia hidrográfica, como é o caso da BHSF.

5.3 Cenários de mudanças climáticas, hidrológicas e energética

Em relação aos modelos CMIP6 foi realizado um teste de desempenho, que mostrou que os modelos são eficientes em representar a sazonalidade da precipitação sobre o BHSF. Esses resultados corroboram com os estudos de Dias e Reboita (2021) e Oliveira *et al.* (2023), que avaliaram o desempenho de 46 e 50 modelos CMIP6, respectivamente, na América do Sul e nas regiões sul da Amazônia e sudeste do Brasil. Dentre os modelos avaliados, os cinco modelos utilizados neste estudo apresentaram bom desempenho e o modelo IPSL-CM6A-LR se destacou como um dos modelos com melhor performance.

Este resultado demonstra que o modelo IPSL-CM6A-LR apresentou uma grande melhoria em relação à sua versão anterior, o IPSL-CM5A-LR do CMIP5. Pois no estudo de Silveira *et al.* (2016), que avaliou o desempenho dos modelos do CMIP5 na representação da precipitação sazonal sobre o SFRB, o modelo francês foi um dos que apresentou pior desempenho.

Essa melhoria do modelo IPSL-CM6A-LR em relação à sua versão anterior foi objeto de estudo no trabalho de Boucher *et al.* (2020). Os autores justificaram seu aumento de performance a melhoria de diferentes componentes do modelo, seu acoplamento e o clima simulado em comparação com as versões anteriores. Por outro lado, embora tenham sido reduzidos, vários vieses e deficiências conhecidas, por exemplo, a frequência dupla da Zona de Convergência Intertropical de bloqueios de inverno em latitudes médias e a dinâmica ENOS

persistem na versão atual do CMIP6. Esta condição pode explicar o maior desvio para o reservatório de Itaparica, onde a variabilidade sazonal é mais sensível a estes fenômenos, especialmente o ENOS para a região de estudo.

Para as projeções climáticas para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, os modelos CMIP6 indicaram aumento do ETP para todos os reservatórios analisados. Para precipitação os modelos indicaram incertezas com os modelos BCC-CSM2-MR, CanESM5 e IPSL-CM6A-LR indicando aumento, enquanto os modelos MIROC6 e MRI-ESM2-0 indicaram diminuição na precipitação. Para vazão, a maioria dos modelos CMIP6 indicou redução para os reservatórios de Itaparica, Sobradinho e Três Marias, com magnitude entre -25% e -40% para o cenário SSP5-8.5. Esses resultados estão próximos aos obtidos em estudos que utilizaram os modelos CMIP5 e analisaram os possíveis cenários RCP4.5 e RCP8.5 sobre a BHSF (Jong *et al.*, 2018; Silveira *et al.*, 2013, 2016).

Dentre esses trabalhos que utilizaram os modelos CMIP5, destaca-se o trabalho de Silveira *et al.* (2016) que mostrou que os modelos diferem quanto ao futuro da precipitação para ambos os cenários. Porém, concordam que a temperatura deverá aumentar no período de 2011 a 2100, discordando apenas quanto à magnitude. Para o cenário RCP8.5, os impactos na temperatura são maiores, especialmente nos últimos 30 anos do século XXI, onde a anomalia de temperatura é superior a 4 °C para a maioria dos modelos.

Assim, resultados semelhantes entre as bases de dados CMIP5 e CMIP6 mostram a coesão nas metodologias adotadas para a projeção das variáveis climáticas. Desta forma, estudos recentes como este acabam por contribuir para a confirmação de resultados obtidos em estudos anteriores, respeitando as incertezas associadas ao processo.

Além desses resultados, as projeções das demandas de consumo indicaram um aumento significativo. As exceções foram as demandas da indústria que, no cenário D2 (mais otimista), projetou redução nas vazões regularizadas com taxa média anual de -3,73%, -0,70%, -0,08% e -1,53% para os reservatórios de Itaparica, Sobradinho, Três Marias e Retiro Baixo, respectivamente, e consumo humano com taxa média anual de -1,02% para o reservatório de Três Marias. Nesses resultados foram analisados 4 cenários das demandas consuntivas, estático e 3 possíveis cenários de crescimento através do modelo ETS. Esses resultados são inéditos e trazem o diferencial das demandas consuntivas crescentes nos impactos futuros sobre a segurança hídrica e energética.

No estudo de Costa *et al.* (2022), por exemplo, foram utilizadas demandas consuntivas fixas para a operação do sistema hidrelétrico do BHSF para verificar a influência dos fenômenos de baixa frequência na geração de energia hidrelétrica. Ele afirma que foi uma

limitação utilizar demandas fixas, pois os resultados dos impactos podem ter sido suavizados. O estudo de Ferrarini et al. (2020) demonstrou o possível aumento da irrigação por meio da expansão da agricultura local na BHSF nas próximas duas décadas, o que pode intensificar as disputas pela água na bacia.

Com as projeções das demandas consuntivas e das mudanças climáticas nas próximas décadas, este estudo avaliou o desempenho dos reservatórios da BHSF no atendimento às demandas consuntivas com a operação do sistema de água de acordo com a lei 9.433, que prioriza o consumo humano em detrimento dos demais consumos.

Os resultados mostraram diminuição do IS na maioria dos reservatórios analisados, o que indica falha no atendimento as demandas. Além disso, com exceção do reservatório Retiro Baixo, que apresentou IS de 0% no cenário histórico para as demandas de Irrigação e Indústria, os demais reservatórios apenas apresentaram queda no IS nos cenários conjuntos de mudanças climáticas e aumento de demandas consumistas. Este resultado demonstra que as mudanças climáticas não são suficientes para causar impactos no desempenho dos reservatórios ao ponto de lavá-los a falha de atendimento as demandas consuntivas.

Este impacto do conjunto de cenários de mudanças climáticas e do aumento das demandas de consumo no desempenho de reservatórios de uso múltiplo também foi relatado em outros estudos (Hadri et al., 2022; Islam, 2022; Khoi *et al.*, 2021). Em alguns casos sendo mais grave do que o observado neste estudo. O estudo de Islam (2022) mostrou que estes cenários levariam a um aumento de falhas no atendimento as demandas consuntivas de cerca de +22% para o horizonte de 2050 e a um aumento no esgotamento do lençol freático que poderia atingir 2 m³/ano na região de Chichaoua, cidade do sul de Marrocos.

5.4 Mudanças antrópicas do UCS

Os mapas de 2000 e 2018 foram selecionados com base na modificação do UCS, no qual foi possível observar principalmente o aumento da agricultura de 15,28% para 27,33% em detrimento da vegetação campestre de 58,41% para 45,19%. Esses dois períodos representam bem a ascensão da agricultura e a diminuição das áreas de vegetação campestre e, portanto, foram utilizados como cenários de conservação e modificações, respectivamente.

Após a escolha dos mapas foi realizada a calibração e validação do modelo hidrológico SWAT com os mapas separados, conforme a metodologia proposta e aplicada por Niraula, Meixner e Norman (2015) e Silva et al., (2023). Esse método é conhecido como “método de fixação de mudança” dois períodos para a calibração utilizando os dois mapas de

UCS. Foram realizadas ao todo 4 simulações (com duas calibrações e duas validações) e analisados dois períodos com três cenários: 1985 a 2000 com o mapa do UCS de 2000 (simulado), 2001 a 2014 com o mapa do UCS de 2018 (cenário 1 – modificação), e 2001 a 2014 com o mapa do UCS de 2000 (cenário 2 – conservação), para compreender os impactos no escoamento superficial e nos componentes do equilíbrio hidrológico.

Além dos índices estatísticos supracitados (NSE e PBIAS), alguns parâmetros foram considerados para calibração, conforme Tabela 17. Eles foram escolhidos tendo por critério a sua sensibilidade com o uso do *software* SWAT-CUP. Foram necessários 11 parâmetros para simular os processos hidrológicos a BHG. Os parâmetros que exercem maior influência estão associados com a recarga das águas subterrâneas, evapotranspiração, escoamento lateral, escoamento superficial e profundidade do solo. Esse resultado corrobora com o estudo de Silva et al. (2013) que analisou um dos afluentes da BHG e chegou em 9 parâmetros, que também estavam associado com os mesmos processos hidrológicos supracitados.

Tabela 17 - Parâmetros do modelo SWAT que foram utilizados na calibração.

Parâmetro	Descrição	Alcance
CN2	Curva Número inicial para condição de umidade do solo II	35-85
SOL_AWC	Armazenamento de água no solo ($\text{mmH}_2\text{O mmsolo}^{-1}$)	0-1
ESCO	Coefficiente de compensação de evaporação de água no solo	0-1
GW_DELAY	Intervalo de tempo para recarga do aquífero (dias)	0-500
GW_QMN	Nível limite de água no aquífero livre para ocorrer o fluxo de retorno (mm)	0-5000
GW_REVAP	Coefficiente de ascensão de água à zona de saturação	0,02-0,2
RCHRG_DP	Coefficiente de percolação da água para o aquífero profundo (mm)	0-1
SLSOIL	Comprimento da declividade para o escoamento sub superficial (m)	0-150
LATTIME	Escoamento lateral (dias)	0-180
CANMAX	Água interceptada (mm)	0-100
CH_N2	Coefficiente de Manning para o canal principal	0,01-0,3

Fonte: Elaborados pelo autor.

O CN2 foi o parâmetro com maior sensibilidade e corrobora com vários outros estudos (Nyatuame; Amekudzi; Agodzo, 2020; Santos *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2023). Segundo Silva et al. (2023) este parâmetro corresponde ao escoamento superficial e está diretamente conectado aos picos de vazão. Em seguida vieram os parâmetros ESCO, GW_DELAY, GW_QMN, GW_REVA, RCHRG_DP, SLSOIL e LATTIME com exceção do ESCO, SLSOIL e LATTIME os demais parâmetros expressam forte relação com processos hidrogeológicos. Segundo Silva et al. (2023) isso pode ser explicado pela predominância de solos profundos do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo. O parâmetro ESCO corresponde ao processo de evapotranspiração, no qual valores elevados significam maiores quantidades de água transferidas para a atmosfera pelos processos físicos das plantas (Silva *et al.* 2023).

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este estudo revela indícios de que o ENOS, ODP e OMA afetam significativamente as precipitações, ETP e o regime de vazões dos reservatórios da BHSF e que ocorrem tendências positivas e negativas das séries temporais da ETP e da vazão, respectivamente. Tais influências impactam nas secas, com o aumento da intensidade e frequência em fase OMA+ e ODP+, e nas cheias nas fases de OMA- e ODP-.

Tais impactos tiveram influência direta na geração de energia hidrelétrica, pois durante a fase fria da OMA- houve aumento na geração de energia em todos os reservatórios analisados; e na fase quente OMA+, obteve-se padrão oposto, ou seja, com a redução significativa da energia hidrelétrica gerada.

No que diz respeito aos cenários, o conjunto de modelos indicou reduções na Q90 para a maioria dos reservatórios da BHSF nos dois períodos analisados (2021–2050 e 2051–2100). Exceto para o reservatório de Itaparica, que para o cenário SSP5-8.5, de 2021 a 2050, a mediana dos modelos indicou um aumento na Q90. Para o conjunto de modelos que apresentaram tendência significativa de acordo com o teste de Mann-Kendall Sen, o aumento nas emissões de gases de efeito estufa indica impacto mais significativo nas vazões, pois o módulo de inclinação foi maior para o cenário SSP5-8.5 do que para o cenário SSP2-4.5.

Quatro cenários possíveis de demandas de consumo foram projetados para 2017-2051, juntamente com o cenário climático futuro (SSP2-4.5 e SSP5-8.5). Para o cenário SSP5-8.5, os modelos indicaram projeções com reduções da geração de energias hidrelétricas mais intensas do que no cenário SSP2-4.5 nas UHE Sobradinho e Três Marias. A exceção foi a UHE Itaparica, em que os modelos indicaram, para os dois cenários climáticos futuros e para a maioria dos cenários de demandas consuntivas, um aumento na geração de energia hidrelétrica. A UHE Sobradinho foi a que apresentou maior sensibilidade aos cenários futuros de demandas consuntivas, apresentando maior intensidade na redução de energia hidrelétrica variando de -30% a -50% no período de 2021 a 2050 em comparação com o período histórico (1971 a 2000).

Com relação ao desempenho dos reservatórios, a partir dos resultados apresentados neste estudo, foi possível verificar impactos significativos no atendimento às demandas consuntivas. Os resultados mostraram que todos os reservatórios apresentaram diminuição dos IS de acordo com a gravidade dos cenários de projeções das demandas consuntivas e das mudanças climáticas. Destaque negativo para a bacia de Sobradinho que nos cenários SSP5-8.5 e D4 apresentou IS de 22% para a demanda de irrigação.

Ao longo da bacia foi possível observar a expansão da Área Agrícola, que aumentou de 15,28% no ano de 2000 para 27,33% no ano de 2018, e da Pastagem com manejo, que aumentou de 0,44% no ano de 2000 para 1,88% no ano de 2018, em detrimento da Vegetação Campestre (vegetação típica do Cerrado), que diminuiu de 58,41% no ano de 2000 para 45,19% no ano de 2018, e da Vegetação Florestal, que diminuiu de 16,76% no ano de 2000 para 14,82% no ano de 2018. Também houve aumento das áreas de Ocupação Campestre, passando de 0,96% no ano de 2000 para 2,06% no ano de 2018; da Ocupação em Área Florestal de 7,98% no ano de 2000 para 8,21% no ano de 2018; e da Área Artificial, passando de 0,13% para 0,18%.

Os cenários de alteração do UCS (2000 e 2018) indicam redução da vazão. Se o uso e ocupação do solo (2000) tivesse permanecido inalterado e a vegetação natural tivesse sido mantida, o Q90 seria maior do que no cenário atual. Em geral, a redução das vazões se deve às mudanças no UCS, especialmente à intensa atividade agrícola, principal agente responsável pelas mudanças nas classes de UCS na região.

A possível redução na disponibilidade de água e energia e o aumento nas demandas de consumo, especialmente a demanda de irrigação, revela que os conflitos futuros podem se intensificar entre os múltiplos usos. Além disso, uma possível desaceleração econômica devido à redução de água para a agricultura e a indústria, a escassez de abastecimento de água e a crise no setor elétrico da região são possíveis resultados futuros.

A necessidade de novas políticas para restringir o crescimento da irrigação e para prevenir e se opor à captação ilegal de água é evidente na BHSF. No que diz respeito à geração de energia hidrelétrica, com o aumento da necessidade de água para atender às demandas de consumo, é necessário investir cada vez mais em formas alternativas de geração de energia elétrica para suprir essa redução na geração hidrelétrica. Além disso, soluções específicas podem incluir técnicas mais eficientes de distribuição de água e irrigação, tratamento de esgoto para uso agrícola, mudança para culturas mais resistentes à seca induzida pelas mudanças climáticas, educação sobre o uso da água, reflorestamento e revegetação de zonas ribeirinhas e reflorestamento em áreas específicas.

Duas possibilidades para aumentar a geração futura de energia podem ser implementadas, resultando em *feedback* positivo ou negativo sobre as mudanças climáticas. O *feedback* positivo para as mudanças climáticas seria um investimento em energia não renovável, como a geração de energia térmica que usa combustíveis fósseis e emite CO₂ na atmosfera. Em 2015, esse tipo de energia foi responsável por 47% de toda a energia gerada na região do NEB. A outra possibilidade diante desses cenários e com *feedback* negativo para as mudanças

climáticas seria o investimento maciço em fontes renováveis, como a eólica e a solar. Em 2018, a participação da energia eólica já foi de aproximadamente 52% na região.

No geral, este estudo mostrou que as mudanças climáticas associadas às crescentes demandas de consumo de usuários existentes e novos podem afetar significativamente a produção de hidroeletricidade na BHSF. Em um futuro incerto, planejar proativamente como o nexo água, clima, energia e alimento irá interagir nas próximas décadas é a chave para promover um futuro sustentável para a sociedade. Esses resultados apoiam a necessidade de investir em energia renovável para compensar as perdas de produção hidrelétrica e investir em regulamentação de irrigação na região.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K. C. et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 333, n. 2–4, p. 413–430, 2007.
- ABBASPOUR, K. C. et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, v. 524, p. 733–752, 2015.
- ABBASPOUR, K. C.; VAGHEFI, S. A.; SRINIVASAN, R. A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water assessment: A review of papers from the 2016 international SWAT conference. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 1, 2017.
- ABERA, F. F. et al. Optimal operation of hydropower reservoirs under climate change: The case of Tekeze reservoir, Eastern Nile. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 3, 2018.
- ACHITE, M. et al. Forecasting of SPI and SRI Using Multiplicative ARIMA under Climate Variability in a Mediterranean Region: Wadi Ouahrane Basin, Algeria. **Climate**, v. 10, n. 3, 2022.
- ALMEIDA, R. A.; PEREIRA, S. B.; PINTO, D. B. F. Calibration and validation of the SWAT hydrological model for the Mucuri river basin. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 1, p. 55–63, 2018.
- ALVES, B.; FILHO, F.; SILVEIRA, C. Análise de Tendências e Padrões de Variação das Séries Históricas de Vazões do Operador Nacional do Sistema (ONS). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 4, p. 19–34, 2013.
- ANA. **Atlas Irrigação. Uso da água na agricultura irrigada** Agência Nacional de Águas. [s.l.] 1, 2017a. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/atlasirrigacao/>>.
- ANA. **Conjuntura Dos Recursos Do Brasil**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2017_rel.pdf>.
- ANA. **Plano Nacional de Recursos Hídricos** ANA. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.ana.gov.br>.
- ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos Informe Anual**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>>.
- ANDRADE, B. C. C. et al. Remote sensing-based actual evapotranspiration assessment in a data-scarce area of Brazil: A case study of the Urucua Aquifer System. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 98, 2021.
- ARAÚJO JUNIOR, L. M. et al. Avaliação De Índices De Seca Meteorológica E Hidrológica Em Relação Ao Impacto De Acumulação De Água Em Reservatório: Um Estudo De Caso Para O Reservatório De Jucazinho-Pe. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, v. 13, n. 2, p. 382, 2020.

- BAHATI, H. K.; OGENRWOTH, A.; SEMPEWO, J. I. Quantifying the potential impacts of land-use and climate change on hydropower reliability of muzizi hydropower plant, Uganda. **Journal of Water and Climate Change**, v. 12, n. 6, p. 2526–2554, 2021.
- BOUCHER, O. et al. Presentation and Evaluation of the IPSL-CM6A-LR Climate Model. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 12, n. 7, p. 1–52, 2020.
- BRANDÃO, J. L. B. Modelo para operação de sistemas de reservatórios com usos múltiplos. **Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo**, p. 182 p., 2004.
- BRASIL. **Projeto de Integração do São Francisco**. Disponível em: <<https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ProjetoRioSaoFrancisco/ArquivosPDF/documentostecnicos/RIMAJULHO2004.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- BRESSIANI, D. DE A. et al. A review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 1–27, 2015.
- BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 53–64, 2016.
- BRITO, S. S. B. et al. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 2, p. 517–529, 2018.
- CAMPOS, J. N. B. Paradigms and Public Policies on Drought in Northeast Brazil: A Historical Perspective. **Environmental Management**, v. 55, n. 5, p. 1052–1063, 2015.
- CHAMPAGNE, O. et al. Interdecadal variability of streamflow in the Hudson Bay Lowlands watersheds driven by atmospheric circulation. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 36, n. December 2020, p. 100868, 2021.
- CHESF. **Companhia hidroelétrica de são francisco (chesf)Sobradinho**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.chesf.gov.br/SistemaChesf/Pages/SistemaGeracao/Sobradinho.aspx>>. Acesso em: 1 jan. 2020a.
- CHESF. **Companhia hidro elétrica de são francisco (chesf)Sobradinho**. [s.l: s.n.].
- COSTA, J. M. F. DA et al. The water, climate and energy nexus in the São Francisco River Basin, Brazil: an analysis of decadal climate variability. **Hydrological Sciences Journal**, v. 67, n. 1, p. 1–20, 2022.
- CUNHA, A. P. M. A. et al. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, v. 10, n. 11, 2019.
- DIAS, C. G.; REBOITA, M. S. Assessment of CMIP6 Simulations over Tropical South America. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 03, p. 1282–1295, 2021.
- EINI, M. R. et al. High accuracy of precipitation reanalyses resulted in good river discharge

simulations in a semi-arid basin. **Ecological Engineering**, v. 131, n. March, p. 107–119, 2019.

ENFIELD, D. B.; MESTAS-NUÑEZ, A. M.; TRIMBLE, P. J. The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 10, p. 2077–2080, 15 maio 2001.

EYRING, V. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 5, p. 1937–1958, 2016.

FAR. IPCC First Assessment Report: Policymaker Summary of Working Group I. **Climate Change: The 1990 and 1992 IPCC Assessments**, p. 63–85, 1990.

FASULLO, J. T.; PHILLIPS, A. S.; DESER, C. Evaluation of Leading Modes of Climate Variability in the CMIP Archives. **Journal of Climate**, v. 33, n. 13, p. 5527–5545, 2020.

FERNANDES, R. DE O. et al. Intercomparação das vazões regularizadas de grandes reservatórios da bacia do Rio Jaguaribe-CE em cenários de mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, 2017.

FERRARINI, A. DOS S. F. et al. Water demand prospects for irrigation in the São Francisco river: Brazilian public policy. **Water Policy**, v. 22, n. 3, p. 449–467, 2020.

FETTER, R.; DE OLIVEIRA, C. H.; STEINKE, E. T. Proposition of an index for the study of the variability of space-temporal rainfall in Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 2, p. 225–237, 2018.

GAO, D.; CHEN, A. S.; MEMON, F. A. **A Systematic Review of Methods for Investigating Climate Change Impacts on Water-Energy-Food Nexus**. [s.l.] Springer Netherlands, 2023.

GIDDEN, M. J. et al. Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: A dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 4, p. 1443–1475, 2019.

GONÇALVES, R. D.; CHANG, H. K. Hydrogeological model of the Urucuia aquifer system in the Rio Grande basin (Bahia, Brazil). **Geociências**, v. 36, n. 2, p. 205–220, 2017.

GOODARZI, M. R.; VAGHEEI, H.; MOHTAR, R. H. The impact of climate change on water and energy security. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 20, n. 7, p. 2530–2546, 2020.

GREEN, W. H.; AMPT, G. A. Study on Soil Physics. **J. Agric. Sci**, v. 4 (1), p. 1, 1911.

GUIMARÃES, S. O. et al. Projeções de mudanças climáticas sobre o nordeste Brasileiro dos modelos do CMIP5 e do CORDEX. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, p. 337–365, 2016.

GUO, Y. et al. Responses of hydropower generation and sustainability to changes in reservoir

policy, climate and land use under uncertainty: A case study of Xinanjiang Reservoir in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 281, p. 124609, 2021.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 4, n. 2, p. 135–143, 1999.

HADRI, A. et al. Integrated water management under climate change through the application of the WEAP model in a Mediterranean arid region. **Journal of Water and Climate Change**, v. 13, n. 6, p. 2414–2442, 2022.

HAN, S.; XU, D.; YANG, Z. Irrigation-induced changes in evapotranspiration demand of Awati irrigation district, northwest China: Weakening the effects of water saving? **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 9, 2017.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 1, n. 2, p. 96–99, 1985.

HARRIS, I. et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. **Scientific Data**, v. 7, n. 1, p. 1–18, 2020.

HASAN, M. M.; WYSEURE, G. Impact of climate change on hydropower generation in Rio Jubones Basin, Ecuador. **Water Science and Engineering**, v. 11, n. 2, p. 157–166, 2018.

HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. **Water Resources Research**, v. 18, n. 1, p. 14–20, 1982.

HENLEY, B. J. Pacific decadal climate variability: Indices, patterns and tropical-extratropical interactions. **Global and Planetary Change**, v. 155, n. May, p. 42–55, 2017.

HIROTA, N. et al. Roles of shallow convective moistening in the eastward propagation of the MJO in MIROC6. **Journal of Climate**, v. 31, n. 8, p. 3033–3047, 2018.

HOUNSOU-GBO, G. A. et al. Tropical Atlantic contributions to strong rainfall variability along the northeast Brazilian coast. **Advances in Meteorology**, v. 2015, 2015.

HYNDMAN, R. J.; AKRAM, M.; ARCHIBALD, B. C. The admissible parameter space for exponential smoothing models. **Annals of the Institute of Statistical Mathematics**, v. 60, n. 2, p. 407–426, 2008.

IBGE. Indicadores IBGE - Levantamento Sistemático da Produção Agrícola, Estatística da Produção Agrícola. **Ibge**, p. 148, 2022a.

IBGE. **Monitoramento da cobertura e uso da terra do Brasil : 2018/2020 / IBGE, Coordenação de Meio Ambiente.** [s.l: s.n.].

IENSEN, I. R. R.; BAUER SCHULTZ, G.; SANTOS, I. DOS. Simulation of Green and Blue Water Impacts Caused by Climate Changes in the Apucarantina River Watershed, Southern Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 01, p. 179–186, 2015.

IPCC. **Second Assessment: Climate Change**Ipcc. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://archive.ipcc.ch/pdf/climate-changes-1995/ipcc-2nd-assessment/2nd-assessment-en.pdf>><<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/2nd-assessment-en-1.pdf>>.

IPCC. Summary for policymakers. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, v. 9781107025, p. 3–22, 2014.

IPCC. **Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**Cambridge University Press. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/03736245.2010.480842>>.

IPCC. **Summary for Policymakers: Climate Change 2022_ Impacts, Adaptation and Vulnerability_Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [s.l: s.n.].

IPCC. **Climate Change 2021 – The Physical Science Basis**. [s.l: s.n.].

ISLAM, M. R. Impact of climate-induced extreme events and demand–supply gap on water resources in Bangladesh. **Journal of Water and Climate Change**, v. 13, n. 4, p. 1878–1899, 2022.

JONG, P. et al. Hydroelectric production from Brazil’s São Francisco River could cease due to climate change and inter-annual variability. **Science of the Total Environment**, v. 634, p. 1540–1553, 2018.

KAYANO, M. T. et al. How the two nodes of the tropical Atlantic sea surface temperature dipole relate the climate of the surrounding regions during austral autumn. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 10, p. 3927–3941, 2018.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V.; SOUZA, R. A. F. DE. El Niño–Southern Oscillation related teleconnections over South America under distinct Atlantic Multidecadal Oscillation and Pacific Interdecadal Oscillation backgrounds: La Niña. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 3, p. 1359–1372, 2019.

KHOI, D. N. et al. Assessment of climate change impact on water availability in the upper Dong Nai River Basin, Vietnam. **Journal of Water and Climate Change**, v. 12, n. 8, p. 3851–3864, 2021.

KUCHARSKI, F. et al. Atlantic forcing of Pacific decadal variability. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 7–8, p. 2337–2351, 2016.

KURIQI, A. et al. Water-energy-ecosystem nexus: Balancing competing interests at a run-of-river hydropower plant coupling a hydrologic–eco-hydraulic approach. **Energy Conversion and Management**, v. 223, n. May, 2020.

LIMA, C. E. S. et al. Anthropogenic Changes in Land Use and Land Cover and Their Impacts on the Hydrological Variables of the São Francisco River Basin, Brazil. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 19, 2022.

LIMA, C. E. S. **EVOLUÇÃO DO USO E COBERTURA NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO E SEUS IMPACTOS NAS VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS.** [s.l: s.n.].

LIMA, L. DOS S.; ROSMAN, P. C. C.; FERNANDES, N. F. Acoplamento de Modelos Hidrológicos e Hidrodinâmicos para Prognóstico Ambiental Detalhado de Longo Prazo. **Programa de Engenharia Oceânica - Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica - COPPE**, v. Ph.D., p. 144, 2016.

LIMBERGER, L.; SILVA, M. E. S. Precipitação Observada Na Amazônia Brasileira: Redes Convencionais E Dados Da Reanálise I Do Ncep/Ncar, Cru E Gpcc. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 20–37, 2018.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. SMAP - A Simplified Hydrological Model, Applied Modelling in Catchment Hydrology. **Water Resources Publications**, p. 1982, 1982.

LOUCKS, D. P. Quantification des tendances de la durabilité des systèmes. **Hydrological Sciences Journal**, v. 42, n. 4, p. 513–530, 1997.

MACIEL, G. M. et al. Daily water flow forecasting via coupling between SMAP and deep learning. **IEEE Access**, v. 8, p. 204660–204675, 2020.

MANTUA, N. J. et al. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 6, p. 1069–1079, 1997.

MARENGO, J. A. et al. Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C. **Natural Hazards**, v. 103, n. 2, p. 2589–2611, 2020.

MCGINN, A. J. et al. Twenty years of change: Land and water resources in the Chindwin catchment, Myanmar between 1999 and 2019. **Science of the Total Environment**, v. 798, p. 148766, 2021.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. **The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales.** Eighth Conference on Applied Climatology. **Anais...**1993

MOREIRA, J. G. DO V.; NAGHETTINI, M. Detecção de Tendências Monotônicas Temporais e Relação com Erros dos Tipos I e II: Estudo de Caso em Séries de Precipitações Diárias Máximas Anuais do Estado do Acre. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p. 394–402, 2016.

MORIASI, D. N. et al. MODEL EVALUATION GUIDELINES FOR SYSTEMATIC QUANTIFICATION OF ACCURACY IN WATERSHED SIMULATIONS. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, p. 227–234, 2007.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970.

NEITSCH, S. . et al. Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. **Texas Water Resources Institute**, p. 1–647, 2011.

NEWMAN, M.; SHIN, S. I.; ALEXANDER, M. A. Natural variation in ENSO flavors. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 14, p. 1–7, 2011.

NIRAULA, R.; MEIXNER, T.; NORMAN, L. M. Determining the importance of model calibration for forecasting absolute/relative changes in streamflow from LULC and climate changes. **Journal of Hydrology**, v. 522, p. 439–451, 2015.

NYATUAME, M.; AMEKUDZI, L. K.; AGODZO, S. K. Assessing the land use/land cover and climate change impact on water balance on Tordzie watershed. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 20, n. June, p. 100381, 2020.

O'NEILL, B. C. et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 9, p. 3461–3482, 2016.

OLIVEIRA, D. M. et al. Performance of CMIP6 climate models in simulating precipitation in subdomains of South America in the historical period. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 1, p. 116–133, 2023.

OLIVEIRA, V. A. DE et al. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 15, p. 5005–5023, 2017.

OLIVEIRA, V. A. et al. Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. **Ecological Engineering**, v. 133, n. April, p. 20–31, 2019.

ONS. **Módulo 5 - Submódulo 5.13: Manual de Procedimentos da Operação** Procedimentos de Rede. [s.l: s.n.].

ONS. **Submódulo 23.5: Critérios para estudos hidrológicos** Procedimentos de Rede. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.ons.org.br>.

ONS. **Plano de Operação Energética 2019-2023**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/PEN_Executivo_2019-2023.pdf>.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. Previsão de vazões e geração de cenários de aflúências. Submódulo 9.5. 2017.

PAPALEXIOU, S. M.; KOUTSOYIANNIS, D. Battle of extreme value distributions : A global survey on extreme daily rainfall. **Water Resources Research**, v. 49, n. 1, p. 187–201, 2013.

PONTES FILHO, J. D. et al. Copula-Based Multivariate Frequency Analysis of the. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 834, p. 22, 2020.

QIN, P. et al. Climate change impacts on Three Gorges Reservoir impoundment and hydropower generation. **Journal of Hydrology**, v. 580, n. July 2019, p. 123922, 2020.

QIN, P. et al. Projected impacts of climate change on major dams in the Upper Yangtze River

- Basin. **Climatic Change**, v. 170, n. 1–2, p. 10584, 2022.
- RAYNER, N. A. et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 108, n. 14, 2003.
- REBOITA, M. S. et al. Influência dos Diferentes Tipos do Fenômeno El Niño na Precipitação da América do Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 06, p. 1275–1291, 2021.
- ROCHA, R. V.; SOUZA FILHO, F. DE A. DE; SILVA, S. M. O. DA. Análise da Relação entre a Precipitação Média do Reservatório Orós, Brasil - Ceará, e os índices PDO e AMO Através da Análise de Changepoints e Transformada de Ondeletas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 1, p. 139–149, 2019.
- ROCHA, R. V.; SOUZA FILHO, F. DE A. Mapping abrupt streamflow shift in an abrupt climate shift through multiple change point methodologies: Brazil case study. **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 16, p. 2783–2796, 2020.
- ROLIM, L.; SOUZA FILHO, F. Shift Detection in Hydrological Regimes and Pluriannual Low-Frequency Streamflow Forecasting Using the Hidden Markov Model. **Water**, v. 12, n. 7, p. 2058, 20 jul. 2020.
- RÖSCH, A.; SCHMIDBAUER, H. WaveletComp: Computational Wavelet Analysis. R package version 1.1. p. 1–38, 2018.
- SALVIANO, M. F.; GROppo, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 64–73, 2016.
- SANTOS, C. A. S. et al. Using a hierarchical approach to calibrate SWAT and predict the semi-arid hydrologic regime of northeastern Brazil. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 9, 2018.
- SANTOS, H. G. DOS. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. [s.l: s.n.].
- SANTOS, N. A. DOS; SIQUEIRA, A. H. B.; MELO, M. L. D. DE. Precipitação sobre a América do Sul e suas relações com a Oscilação Multidecadal do Atlântico e a Oscilação do Atlântico Norte. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, p. 361–376, 15 jul. 2016.
- SCHAEFLI, B. Projecting hydropower production under future climates: a guide for decision-makers and modellers to interpret and design climate change impact assessments. **Water**, p. 1–25, 2015.
- SCHNEIDER, U. et al. Evaluating the hydrological cycle over land using the newly-corrected precipitation climatology from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC). **Atmosphere**, v. 8, n. 3, 2017.
- SHUKLA, S.; WOOD, A. W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. **Geophysical Research Letters**, v. 1, p. 1–7, 2008a.
- SHUKLA, S.; WOOD, A. W. Use of a standardized runoff index for characterizing

hydrologic drought. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 2, p. 1–7, 2008b.

SIDERIUS, C. et al. Climate variability affects water-energy-food infrastructure performance in East Africa. **One Earth**, v. 4, n. 3, p. 397–410, 2021.

SILVA, G. K. DA et al. Análise da Variabilidade Espaço-Temporal do SPI: Um Estudo de Caso para a Sub-Bacia Choró, Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 3 suppl, p. 539–549, 2021a.

SILVA, L. S. DA et al. Assessment of changes in land use and occupation on the hydrological regime of a basin in the west of Bahia. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 123, n. January, p. 104218, 2023.

SILVA, M. E. S.; SILVA, C. B. Variabilidade Climática – Processos Físicos E Dinâmicos Nos Oceanos E Atmosfera. **Geography Department, University of Sao Paulo**, n. 2012, p. 372–406, 2012.

SILVA, M. V. M. et al. Projections of climate change in streamflow and affluent natural energy in Brazilian hydroelectric sector of cordex models. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, p. 1–15, 2020.

SILVA, M. V. M. et al. Naturalized streamflows and Affluent Natural Energy projections for the Brazilian hydropower sector for the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios of the CMIP6. **Journal of Water and Climate Change**, p. 1–22, 2021b.

SILVA, M. V. M. et al. Projection of Climate Change and Consumptive Demands Projections Impacts on Hydropower Generation in the São Francisco River Basin, Brazil. **Water**, v. 13, n. 3, p. 332, 2021c.

SILVEIRA, C. DA S. et al. Performance assessment of CMIP5 models concerning the representation of precipitation variation patterns in the twentieth century on the northeast of Brazil, Amazon and Prata Basin and analysis of projections for the scenery RCP8.5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 317–330, 2013.

SILVEIRA, C. DA S. et al. Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 2, p. 416–428, 2016.

SILVEIRA, C. DA S.; SOUZA FILHO, F. DE A.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. DAS C. Streamflow projections for the Brazilian hydropower sector from RCP scenarios. **Journal of Water and Climate Change**, v. 8, n. 1, p. 114–126, 2017.

SOUZA, C. A. DE; REBOITA, M. S. Ferramenta para o monitoramento dos padrões de teleconexão na América do Sul. **Terrae Didatica**, v. 17, p. e02109, 2021.

SUGAWARA, E.; NIKAIDO, H. Properties of AdeABC and AdeIJK efflux systems of *Acinetobacter baumannii* compared with those of the AcrAB-TolC system of *Escherichia coli*. **Antimicrobial Agents and Chemotherapy**, v. 58, n. 12, p. 7250–7257, 2014.

SWART, N. C. et al. The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3).

Geoscientific Model Development, v. 12, n. 11, p. 4823–4873, 2019.

TAR. Synthesis Report. Summary for Policymakers. **Climate Change 2001. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, n. September, p. 34, 2001.

TEUTSCHBEIN, C. et al. Future drought propagation through the water-energy-food-ecosystem nexus – A Nordic perspective. **Journal of Hydrology**, v. 617, n. December 2022, 2023.

TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, p. 49–57, 1998.

TUFA, F. G.; SIME, C. H. Stream flow modeling using SWAT model and the model performance evaluation in Toba sub-watershed, Ethiopia. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 7, n. 4, p. 2653–2665, 2021.

VALERIANO, M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 3595–3602, 2005.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, I. J. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. **Journal of Climate**, v. 23, p. 1696–1718, 2010.

WAGENA, M. B. et al. Impact of climate change and climate anomalies on hydrologic and biogeochemical processes in an agricultural catchment of the Chesapeake Bay watershed, USA. **Science of the Total Environment**, v. 637–638, p. 1443–1454, 2018.

WU, T. et al. The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): The main progress from CMIP5 to CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 4, p. 1573–1600, 2019.

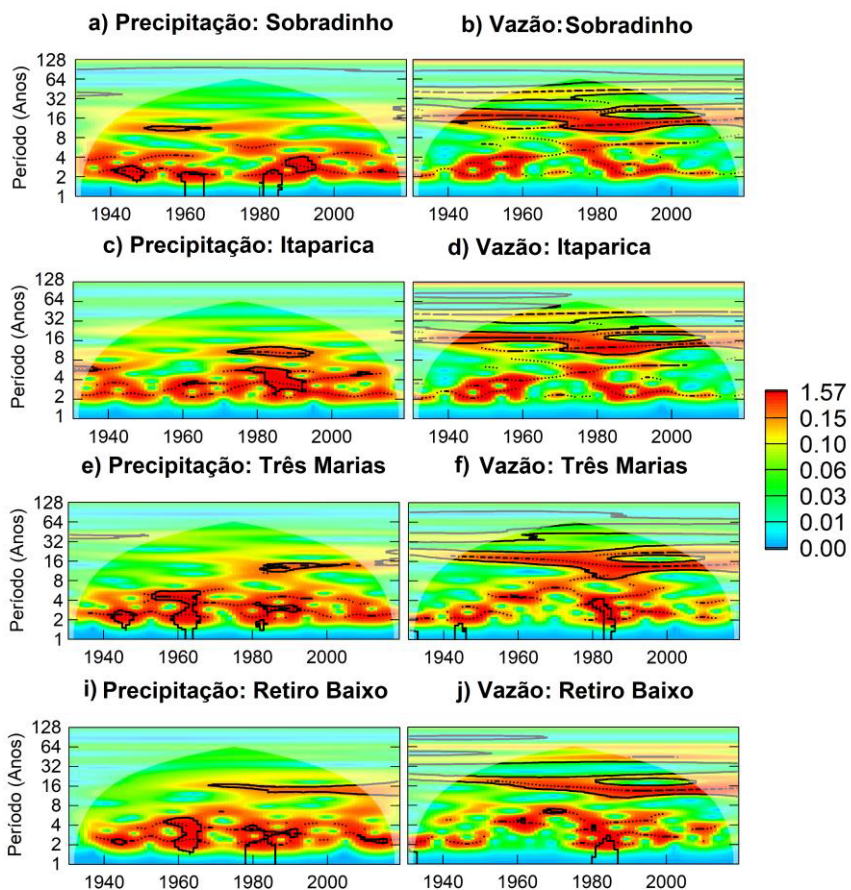
YUAN ZHANG; WALLACE, J. M.; BATTISTI, D. S. ENSO-like interdecadal variability: 1900-93. **Journal of Climate**, v. 10, n. 5, p. 1004–1020, 1997.

YUE, S.; WANG, C. Y. The Mann-Kendall Test Modified by Effective Sample Size to Detect Trend in Serially Correlated Hydrological Series. **Water Resources Management**, v. 13, n. 3, p. 245–259, 2004.

YUKIMOTO, S. et al. The meteorological research institute Earth system model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the physical component. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 97, n. 5, p. 931–965, 2019.

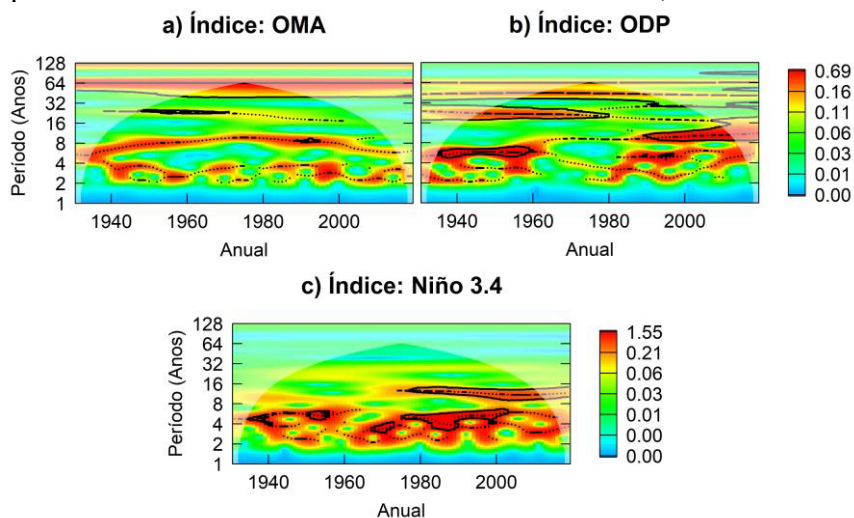
APÊNDICE A

Figura 61 - Espectro de Potência da TO das séries temporais de precipitações e vazões.



Fonte: Elaborado pelo autor.

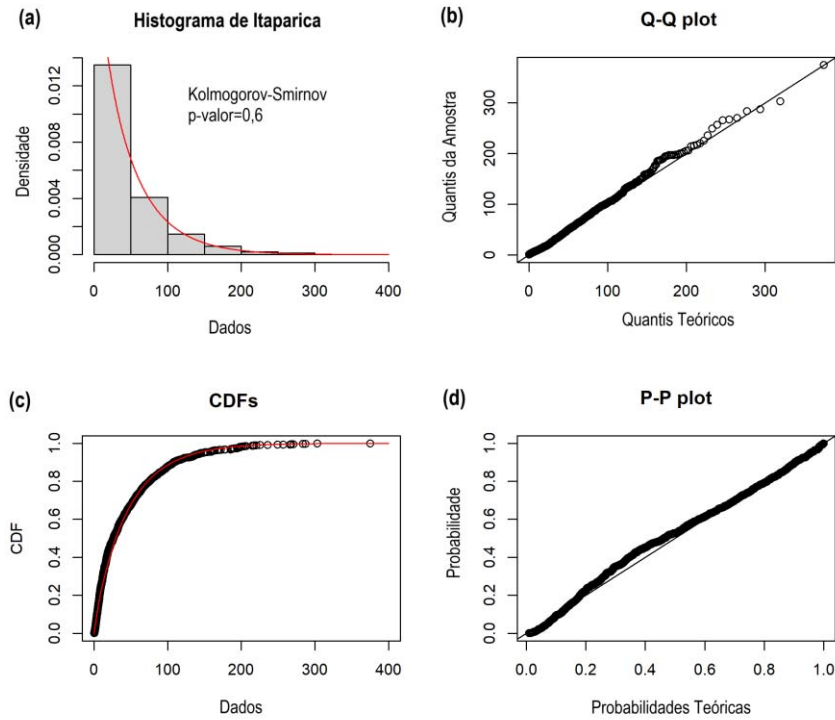
Figura 62 - Espectro de Potência das ondeletas dos índices OMA, ODP e Niño 3.4.



Fonte: Elaborado pelo autor.

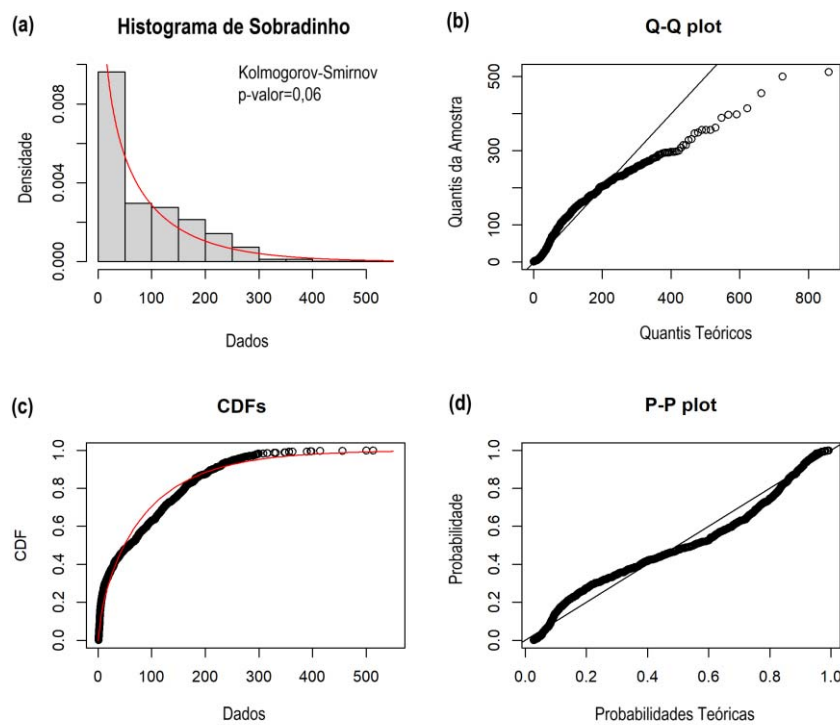
APÊNDICE B

Figura 63 - vazão: (a) Histograma de Itaparica; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.



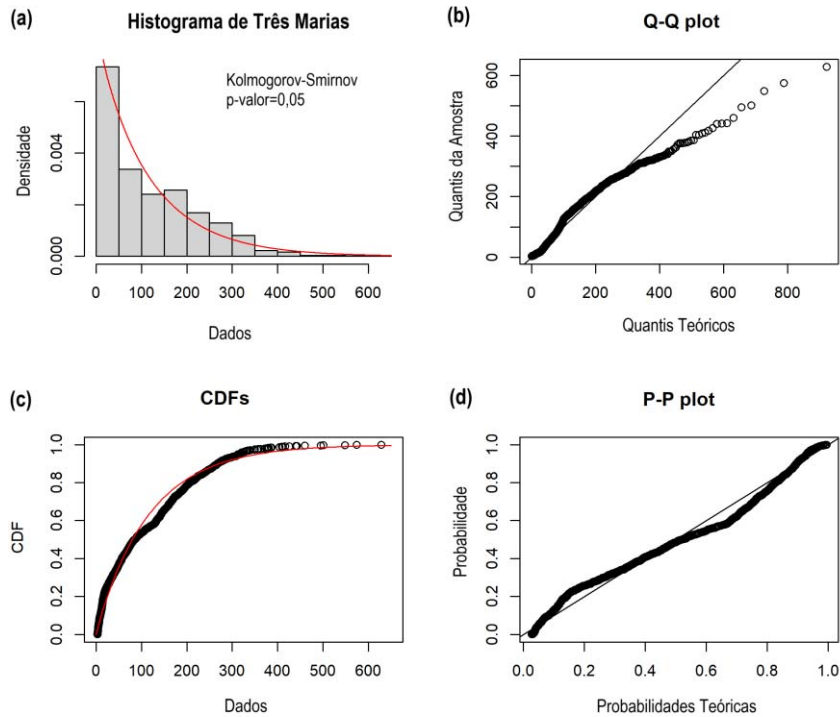
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 64 - vazão: (a) Histograma de Sobradinho; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.



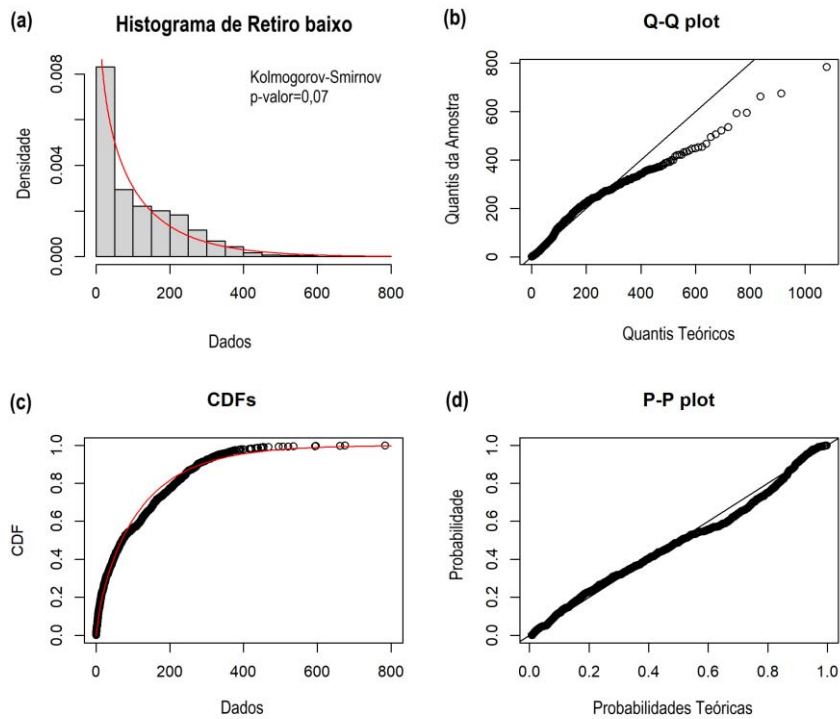
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 65 - vazão: (a) Histograma de Três Marias; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.



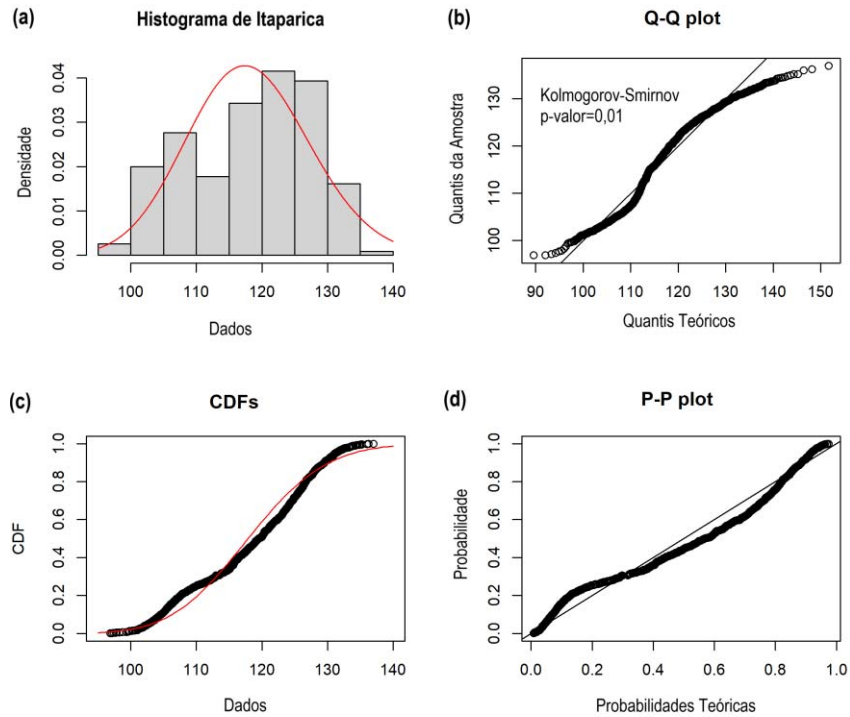
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 66 - vazão: (a) Histograma de Retiro Baixo; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.



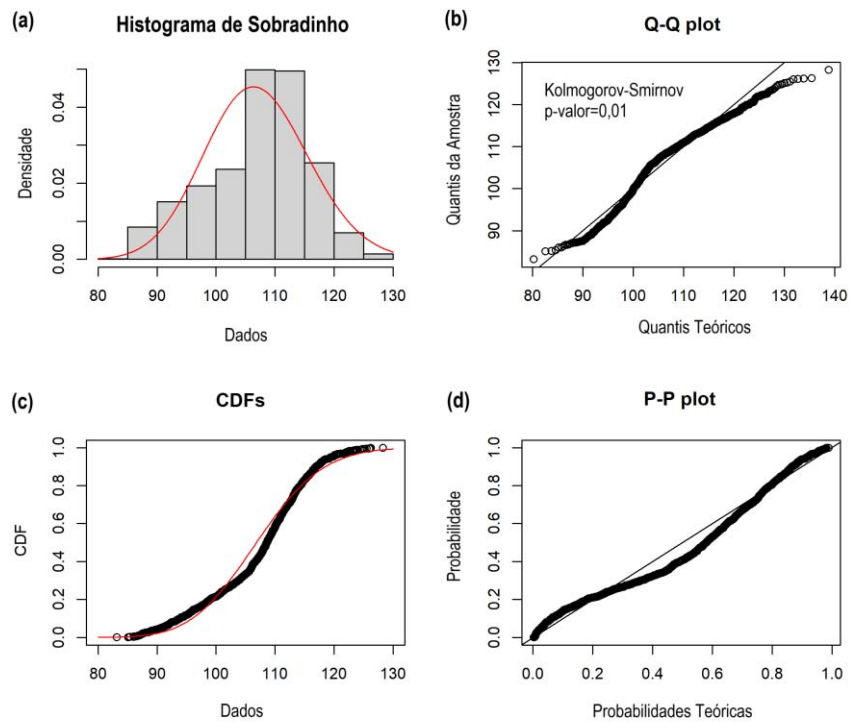
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 67 - ETP: (a) Histograma de Itaparica; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.



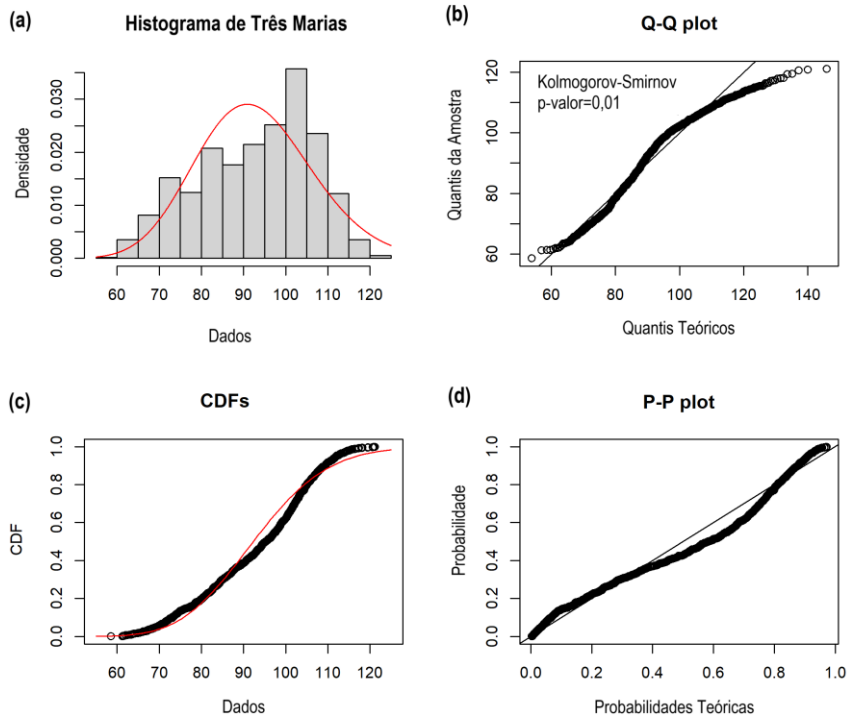
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 68 - ETP: (a) Histograma de Sobradinho; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.



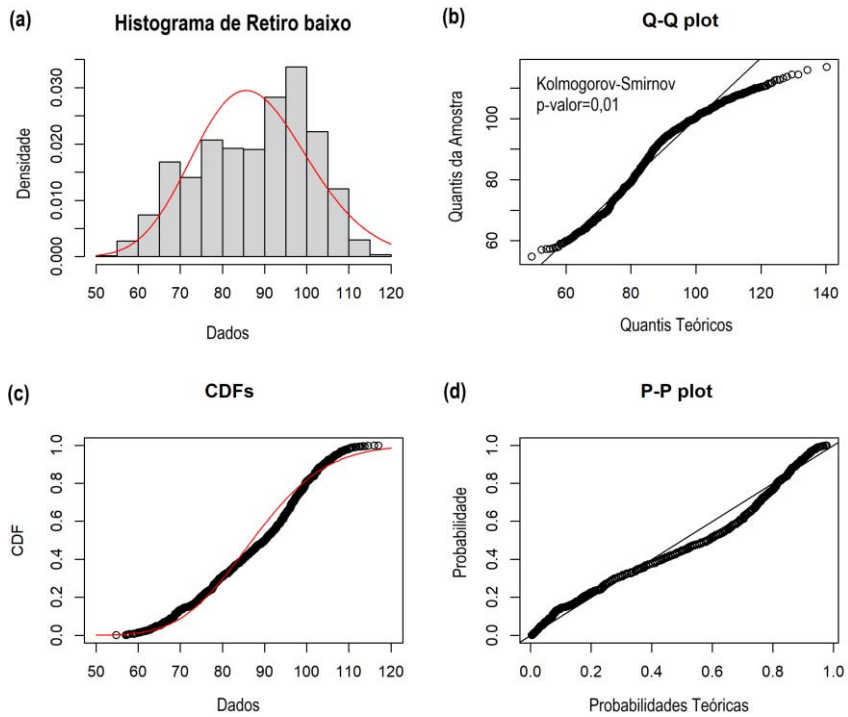
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 69 - ETP: (a) Histograma de Três Marias; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.



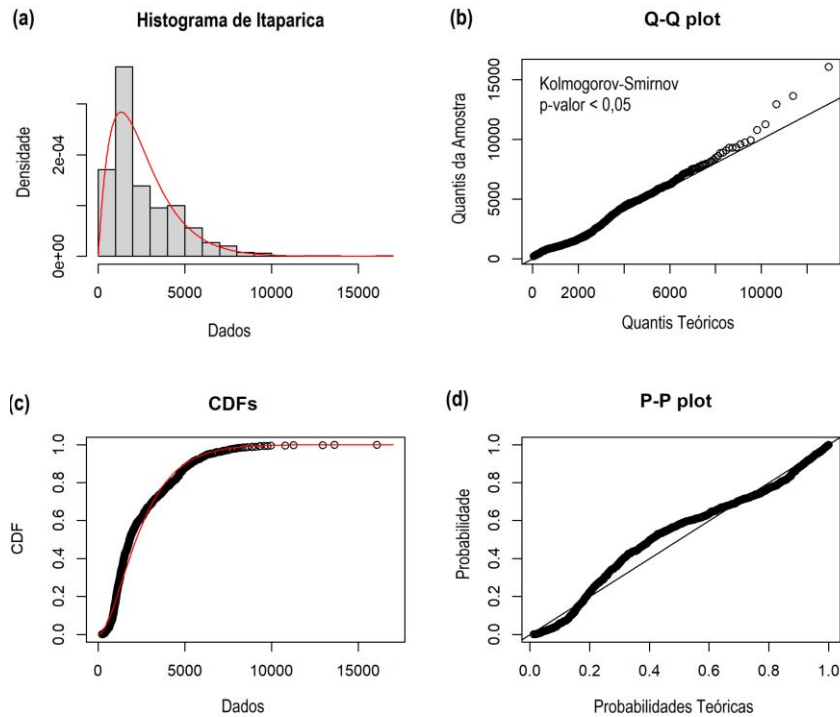
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 70 - ETP: (a) Histograma de Retiro Baixo; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.



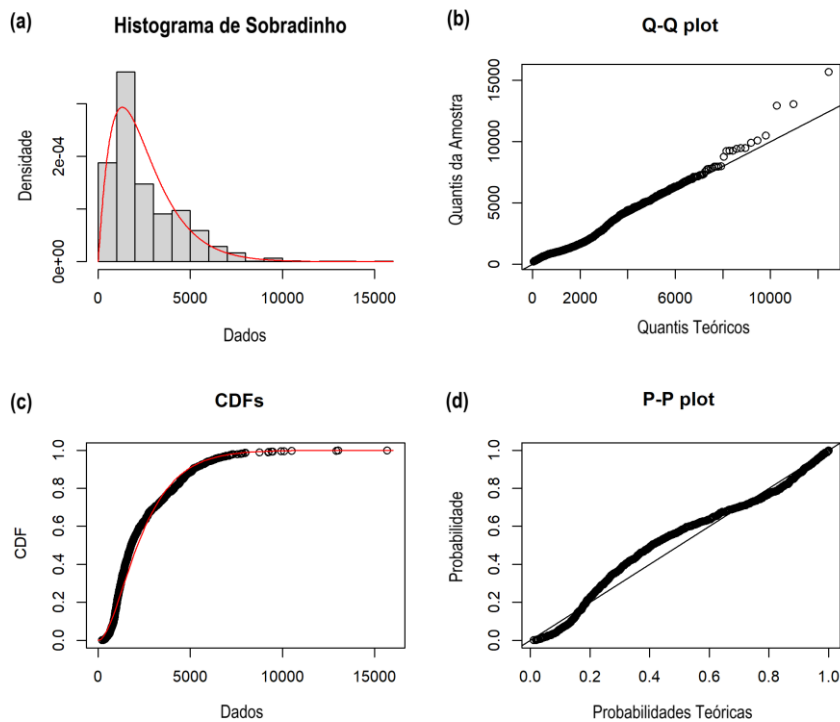
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 71 - precipitação: (a) Histograma de Itaparica; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.



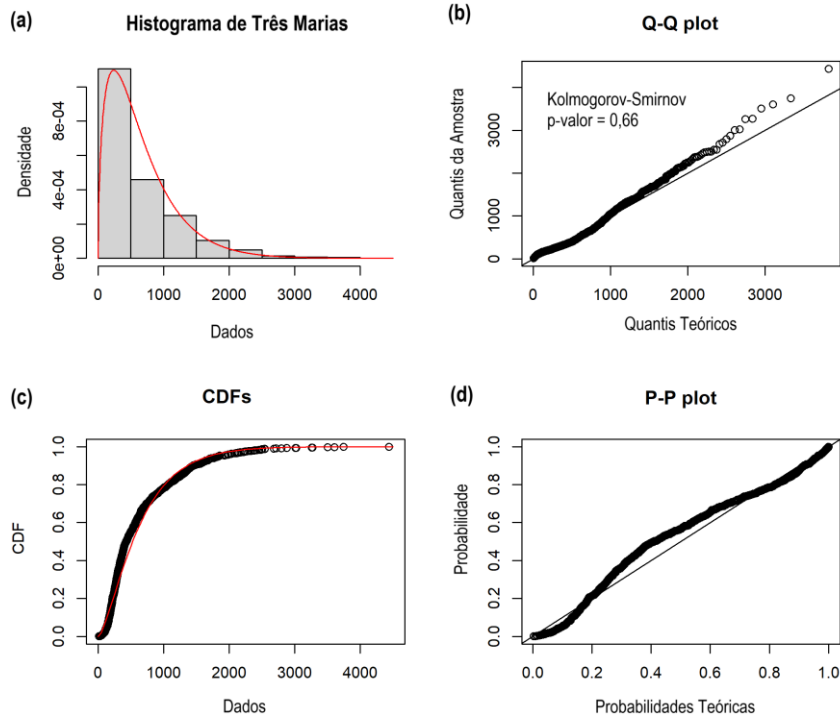
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 72 - precipitação: (a) Histograma de Sobradinho; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.



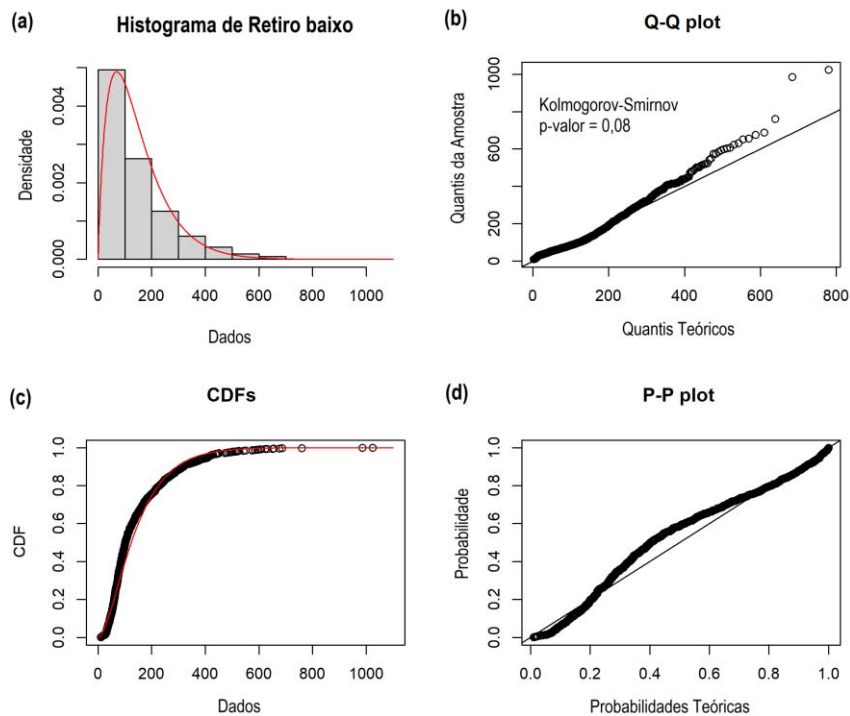
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 73 - precipitação: (a) Histograma de Três Marias; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.



Fonte: Elaborado pelo autor.

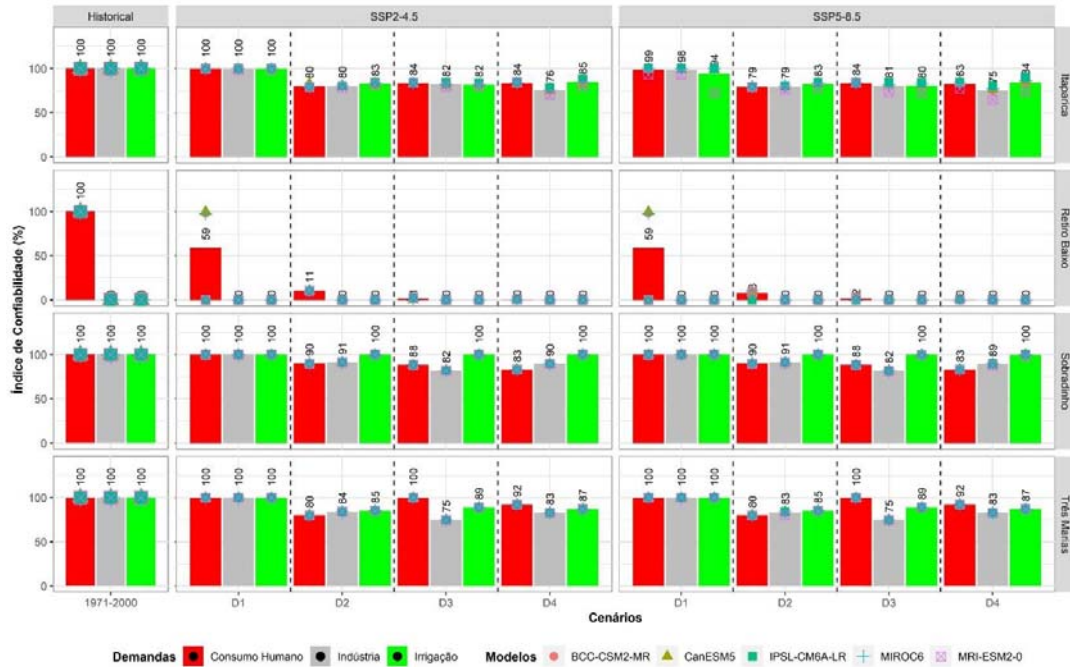
Figura 74 - precipitação: (a) Histograma de Retiro Baixo; (b) Q-Q plot; (c) CDFs e (d) p-p plot.



Fonte: Elaborado pelo autor.

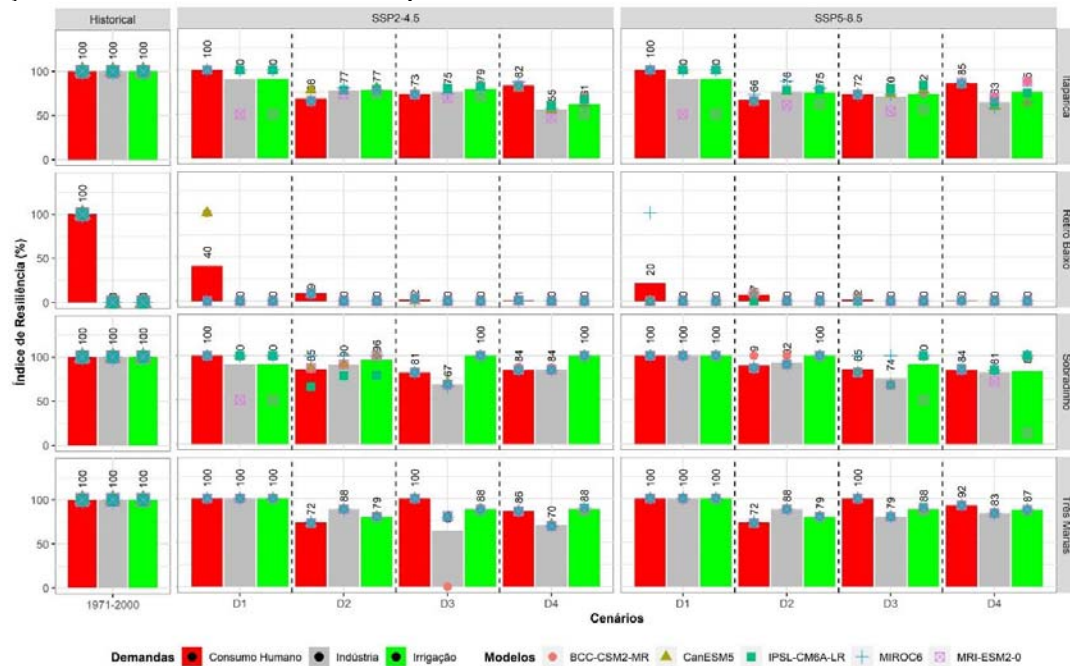
APÊNDICE C

Figura 75 - Índice de confiabilidade dos modelos do CMIP6 no período *historical* (1971 a 2000) e cenários de mudanças climáticas SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e nos cenários D1, D2, D3 e D4 das projeções de demandas consuntivas para os reservatórios da BHSF.



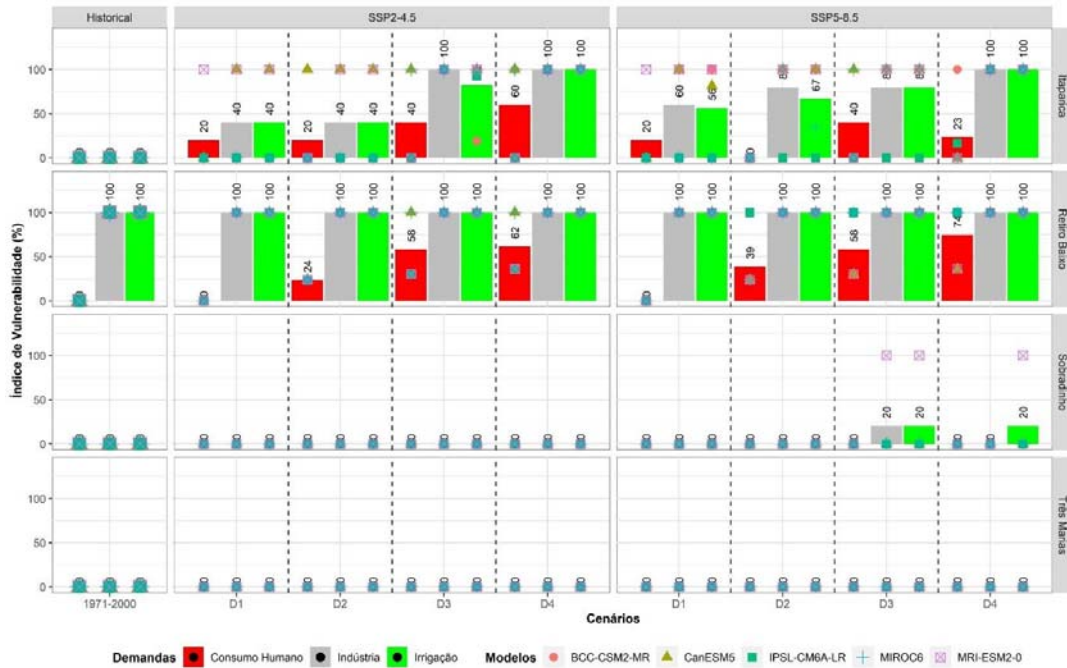
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 76 - Índice de Resiliência dos modelos do CMIP6 no período *historical* (1971 a 2000) e cenários de mudanças climáticas SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e nos cenários D1, D2, D3 e D4 das projeções de demandas consuntivas para os reservatórios da BHSF.



Fonte: Elaborado pelo autor.

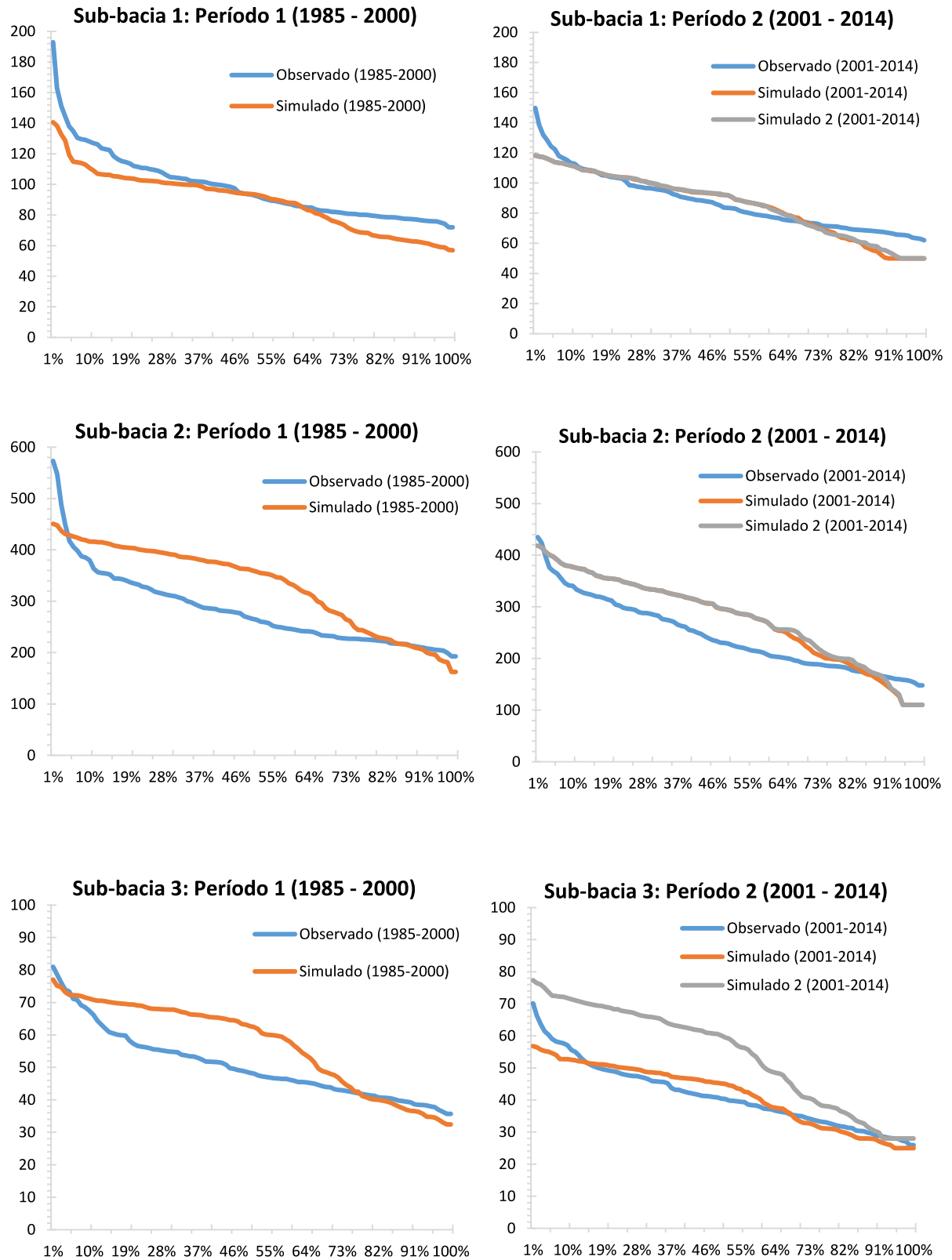
Figura 77 - Índice de Vulnerabilidade dos modelos do CMIP6 no período histórico (1971 a 2000) e cenários de mudanças climáticas SSP2-4.5 e SSP5-8.5 e nos cenários D1, D2, D3 e D4 das projeções de demandas consuntivas para os reservatórios da BHSF.

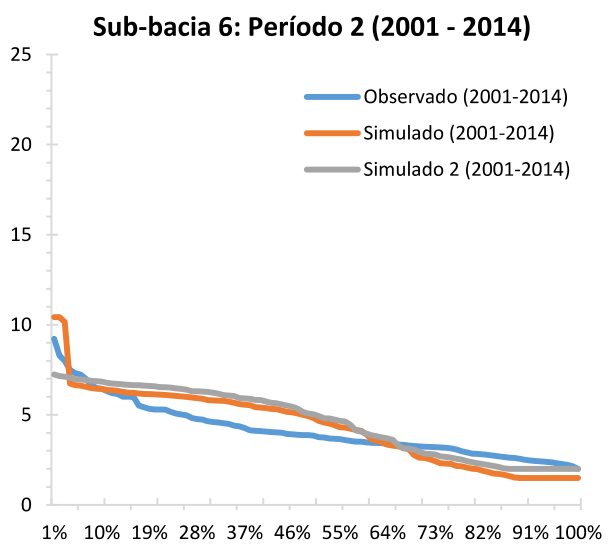
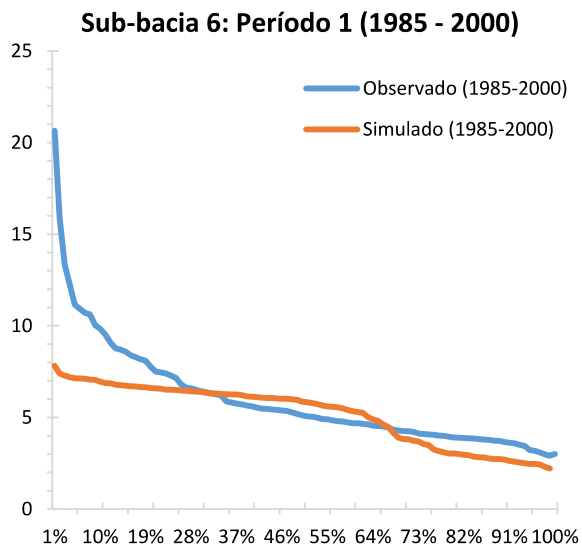
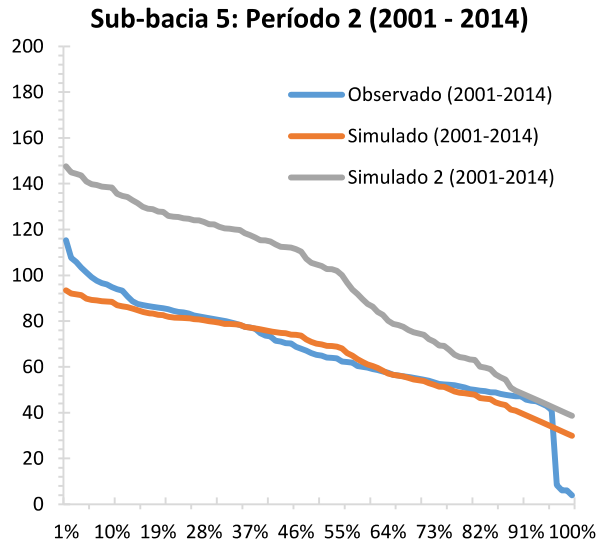
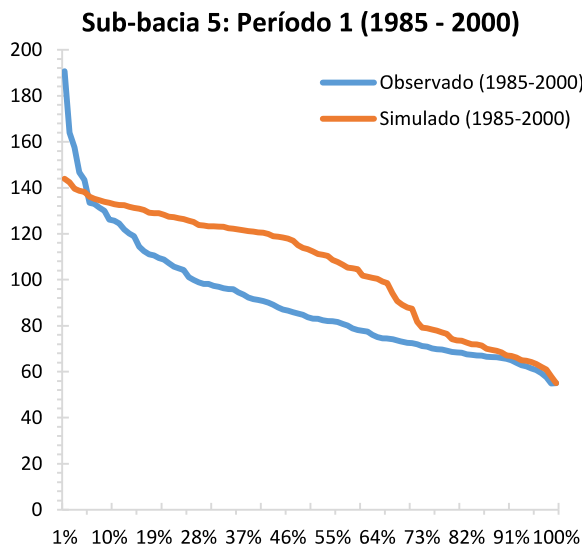
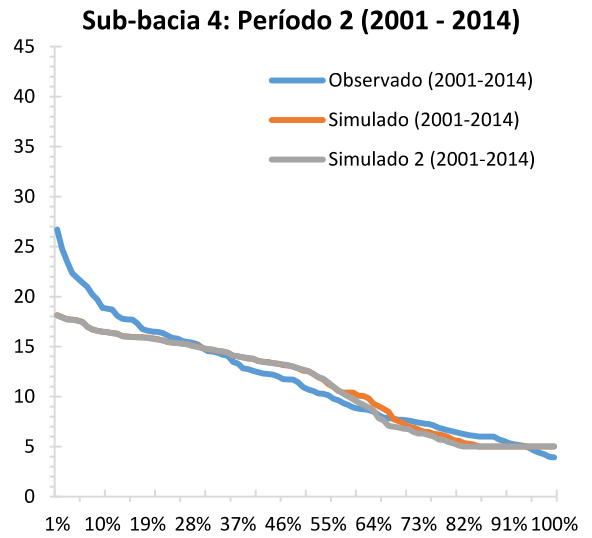
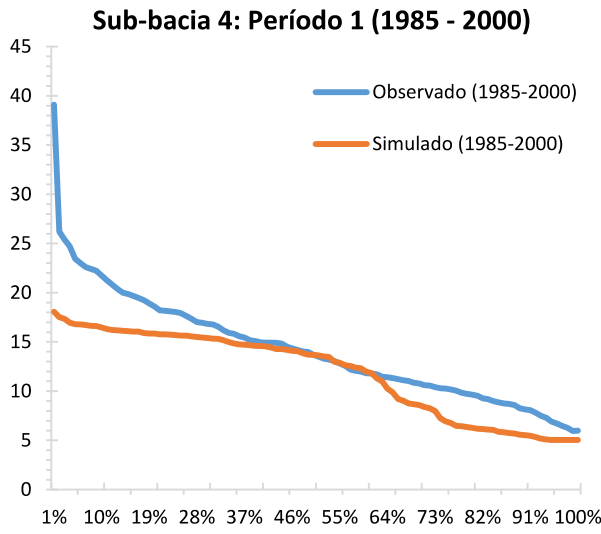


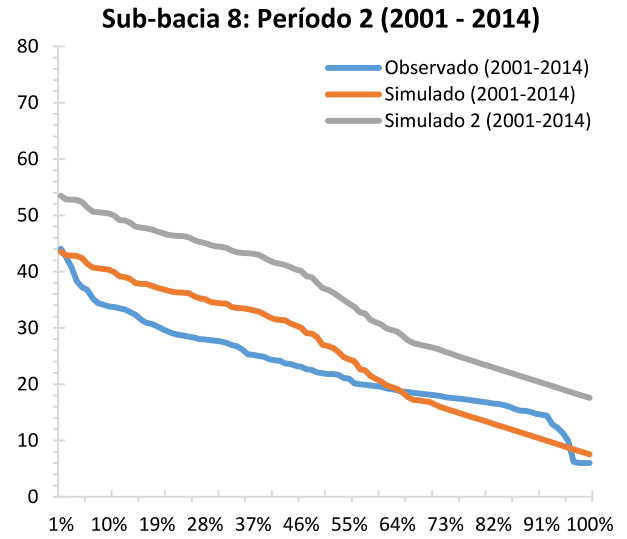
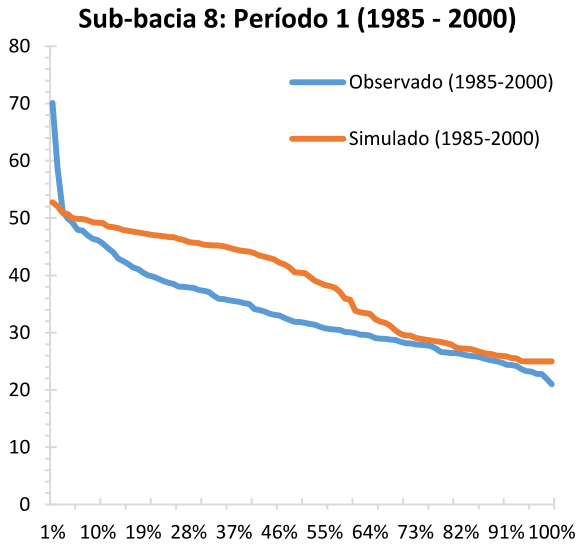
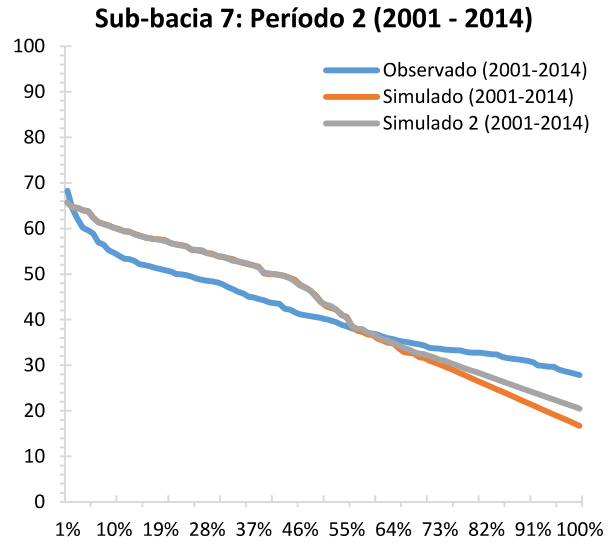
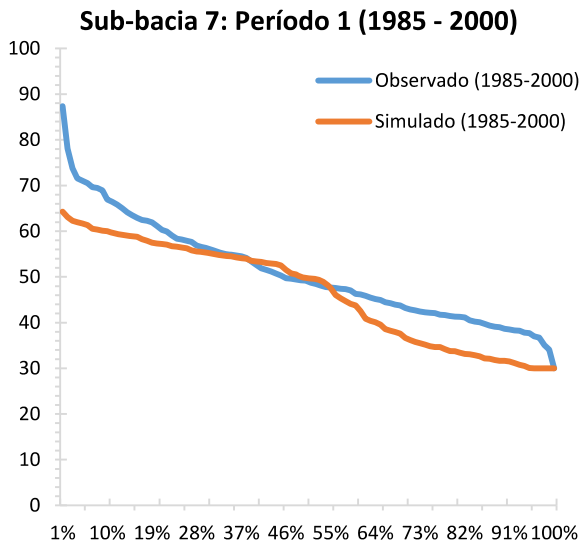
Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE D

Figura 78 - CP das vazões para o período 1 (1985-2000) e Período 2 (2001-2014) nos cenários 1 e 2.







Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO A – CATÁLOGO DO NEXO ÁGUA-ENERGIA

Tabela 18 - Catálogo de métodos utilizados nos impactos das mudanças climáticas no conjunto de amostras de estudos Água-Energia, categorizados por Modelagem baseada em Física

Modelos	Propósito	Dados	Tempo	Estudos de referência
45 estudos (75%)				
SWAT	Simulação da qualidade e quantidade de águas superficiais e subterrâneas	Dados meteorológicos, MDE, uso do solo e características do solo	diário	de Oliveira et al. 2017 ; Abera et al. 2018 ; Goodarzi et al. 2020 ; Qin et al. 2020a ; Bahati et al. 2021 ; Guo et al. 2021 ; Shrestha et al. 2021 ; Wang et al. 2021a ; Qin et al. 2022 ; Ramião et al. 2023
Variable Infiltration Capacity (VIC)	Simulação dos fluxos terra-atmosfera e do processo da superfície terrestre	Dados meteorológicos, dados de bandas de elevação, informações sobre cobertura do solo	diário	Forrest et al. 2018 ; Zhong et al. 2019 ; Li et al. 2020 ; Zhong et al. 2020 ; Yun et al. 2021 ; Zhao et al. 2021b ; Zhao et al. 2022
Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV)	Simulação de fluxo de fluxo	Dados meteorológicos, DEM, dados de uso/cobertura da terra	horas	Mousavi et al. 2018 ; Adera and Alfredsen 2020 ; Jakimavicius et al. 2020 ; Carlino et al. 2021 ; Mutsindikwa et al. 2021
Xinjiang Model	Simulação de fluxo de fluxo	Dados meteorológicos	diário	Feng et al. 2018 , 2021
Hydrological Predictions for the Environment (HYPE)	Simulação de fluxo de água e substâncias	Dados climáticos, elevação, rede de cursos de água, tipo de solo e uso do solo	diário	Skoulikaris 2021

NedborAfstromnings Model (NAM)	Simulação de vazão e teor de umidade do solo	Dados meteorológicos	diário	Yimere e Assefa 2021
MIKE NAM	Simulação de processos de chuva-escoamento	Dados meteorológicos	diário	Adynkiewicz-Piragas e Miszuk 2020
IHACRES	Simulação de fluxo de fluxo	Dados meteorológicos	diário	Zolghadr-Asti et al. 2019
Veralgemeend Conceptueel Hydrologisch (VHM)	Simulação de processos de chuva-escoamento	Dados meteorológicos	diário	Donk et al. 2018
ABCD water balance model	Simulação de fluxo de fluxo	Dados meteorológicos	diário	Khalkhali et al. 2018
Topkapi-ETH	Simulação de processos hidrológicos adequada para áreas montanhosas glaciares	Dados climáticos, topografia, tipo de solo e vegetação	hora	Anghileri et al. 2018
HEC-HMS	Simulação de processos hidrológicos	Dados meteorológicos, MDE, tipo de uso do solo e características do solo	10 minutos	Goodarzi et al. 2020

WaterGAP	Simulação de fluxos de água, armazenamento, captação de água e usos de consumo	Dados climáticos, dados populacionais, cobertura do solo, tipo de solo, topografia, dados de armazenamento de água e dados de uso de água	diário	Turner et al. 2017
The PCRaster GLOBAL Water Balance model (PCR-GLOBWB)	Simulação de processos hidrológicos e avaliação de recursos hídricos	Características do solo, cobertura terrestre, topografia, dados meteorológicos	diário	Meng et al. 2020
Finnish Environment Institute's Watershed Simulation and Forecasting System (WSFS)	Simulação de processos hidrológicos	Dados meteorológicos, topografia, características do solo, uso do solo e vegetação	diário	Jaaskelainen et al. 2018
Integrated Catchment Hydrological Model (ICHYMOD)	Simulação de processos de chuva-escoamento	Dados meteorológicos	hora	François et al. 2018
GR2M +	Simulação de fluxo de fluxo	Dados meteorológicos	mensal	Wagner et al. 2017
GR4J	Simulação de processos de chuva-escoamento	Dados meteorológicos	diário	Zhong et al. 2021

Poli-hydro	Simulação de equilíbrio hidrológico e roteamento de fluxo	Dados meteorológicos em grade, DEM e cobertura do solo	Diário	Bombelli et al. 2021
Coupled routing and excess storage model (CREST)	Superfície terrestre, fluxos de água subterrâneos e simulação de armazenamentos	Dados meteorológicos, DEM, características do solo e cobertura da terra	Diário	Zhao et al. 2021b
1 K-DHM	Simulação de processos de chuva-escoamento	Dados meteorológicos e topografia	10 minutos	Meema et al. 2021
Modelo de Grandes Bacias (MGB)	Simulação de processos hidrológicos	Dados meteorológicos, topografia, características do solo e cobertura do solo	diário	Almeida e cols. 2021
Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP)	Simulação de processos de chuva-escoamento	Dados meteorológicos e área de drenagem	diário	da Silva et al. 2021
HYMOD	Simulação de processos de chuva-escoamento	Dados meteorológicos	diário	Chilkoti et al. 2017
11 estudos (18%)				

Water Evaluation and Planning system (WEAP)	Planejamento de recursos hídricos	DEM, dados de demanda, dados de abastecimento, hidrologia, águas subterrâneas e reservatórios	mensal	Spalding-Fecher et al. 2017 ; Sun et al. 2018 ; Goodarzi et al. 2020 ; Obahoundje et al. 2021 ; Shirsat et al. 2021
The Reservoir System Simulation (HEC-ResSim)	Modelagem de operações de reservatórios em um ou mais reservatórios para uma variedade de metas e restrições operacionais	Propriedades do reservatório, características de controle e operação, propriedades de roteamento fluvial	5 minutos	Beheshti et al. 2019 ; Shrestha et al. 2021 ; Skoulikaris 2021 ; Wang et al. 2021a
The Information System for Water Allocation Management (SIGA)	Simulação de planejamento e operação de sistemas de recursos hídricos	Demandas e prioridades, propriedades de roteamento fluvial	mensal	da Silva et al. 2021
Reservoir Evaluation System Perspective Reservoir Model (HEC-ResPRM)	Avaliação de estratégias de gestão de reservatórios	Conectividade de rede, fluxos hidrológicos e funções de penalidade para reservatórios e ligações	mensal	Abera et al. 2018
10 estudos (17%)				

Long-Range Energy Alternatives Planning (LEAP)	Análise da política energética e avaliação da mitigação das alterações climáticas	Dados energéticos, dados climáticos, dados sociais e económicos	Anual	Spalding-Fecher et al. 2017 ; Sun et al. 2018 ; Zhou et al. 2019
TIMES_PT	Otimização de um sistema energético de menor custo para satisfazer a procura de serviços energéticos e as restrições dos utilizadores	Dados socioeconómicos, potenciais de recursos e preços do fornecimento de energia primária, restrições políticas e serviços energéticos	5 anos	Teotônio et al. 2017
Regional Integration and Planning Assessment (RIPA) tool	Otimização do mix de geração e transmissão	Geração hidroeléctrica, preços sombra das restrições à capacidade hidroeléctrica e derramamento de energia	mensal	Yimere e Assefa 2021
The Generation Evaluation System (GENESYS) model	Avaliação da adequação do fornecimento de energia	Dados de tecnologia, dados de custos, demandas e dados de energia	hora	Turner et al. 2019

EnergyPLAN	Simulação de operação de sistemas de energia	Dados técnicos, dados econômicos e demandas energéticas	hora	Jaaskelainen et al. 2018
PRIMES-IEM power system model	Simulação do sistema elétrico	Capacidades, demandas, carga, preços de combustível e carbono, reservas, redes e regras de mercado das usinas	hora	Carlino et al. 2021
Hydropower simulator nMAG	Simulação de sistemas hidrelétricos	Afluência, informações de produção, estratégia operacional e mercado de energia	diário	Adera e Alfredsen 2020
Poli-power	Otimização da produção hidrelétrica	Vazões, preços, demanda de energia hidrelétrica e geometria do reservatório	diário	Bombelli et al. 2021
2 estudos (3%)				

<p>The coupled Water Balance Model and Thermoelectric Power and Thermal Pollution Model (WBM TP2M)</p>	<p>Simulação de operações de usinas de energia</p>	<p>fluxos hidrológicos, condições climáticas, incluindo temperatura e umidade do ar</p>	<p>3 minutos</p>	<p>Miara et al. 2017</p>
<p>Global Change Assessment Model (GCAM)</p>	<p>Simulação de interações entre vários sistemas entre sociedade-terra-clima</p>	<p>Recursos energéticos, tecnologias e utilizadores, informações sobre agricultura e utilização do solo, emissões de gases com efeito de estufa, parâmetros de feedback climático, socioeconomia, informações sobre políticas</p>	<p>5 anos</p>	<p>Graham et al. 2020</p>

Fonte: Adaptado de Gao, Chen e Memon (2023).