

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**

# **METEOROLOGIA**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Matheus Henrique Bezerra de Melo**

**Análise Hidroclimática em Bacias Hidrográficas  
no Semiárido Brasileiro de acordo com projeções do  
CMIP6**

**Campina Grande, Fevereiro de 2024**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**MATHEUS HENRIQUE BEZERRA DE MELO**

**ANÁLISE HIDROCLIMÁTICA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS NO SEMIÁRIDO  
BRASILEIRO DE ACORDO COM PROJEÇÕES DO CMIP6**

**CAMPINA GRANDE/PB**

**Fevereiro-2024**

MATHEUS HENRIQUE BEZERRA DE MELO

**ANÁLISE HIDROCLIMÁTICA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS NO SEMIÁRIDO  
BRASILEIRO DE ACORDO COM PROJEÇÕES DO CMIP6**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

**Área de concentração:** Meteorologia de Meso e Grande Escalas

**Sub-área:** Climatologia

**Orientador:** Prof. Dr. Helber Barros Gomes

**CAMPINA GRANDE/PB**

**Fevereiro-2024**

M528a      Melo, Matheus Henrique Bezerra de.  
              Análise hidroclimática em bacias hidrográficas no semiárido brasileiro de acordo com projeções do CMIP6. / Matheus Henrique Bezerra de Melo – Campina Grande, 2024.  
              74 f. : il. color.

              Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.  
              "Orientação: Prof. Dr. Helber Barros Gomes."  
              Referências.

              1. Mudanças climáticas. 2. Disponibilidade hídrica. 3. Balanço hídrico climatológico. 4. Conservação de biomassa. 5. IPCC AR6. I. Gomes, Helber Barros. II. Título.

CDU 556.51(043)

MATHEUS HENRIQUE BEZERRA DE MELO

ANÁLISE HIDROCLIMÁTICA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS NO SEMIÁRIDO  
BRASILEIRO DE ACORDO COM PROJEÇÕES DO CMIP6

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 20/02/2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
 **HELBER BARROS GOMES**  
Data: 11/04/2024 17:05:06-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. HELBER BARROS GOMES  
Instituto de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Alagoas.

Documento assinado digitalmente  
 **MADSON TAVARES SILVA**  
Data: 11/04/2024 11:21:51-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

Documento assinado digitalmente  
 **SAMUELSON LOPES CABRAL**  
Data: 11/04/2024 11:58:36-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. SAMUELSON LOPES CABRAL  
Centro Nacional de Monitoramento  
e Alertas de Desastres Naturais

Dedico este trabalho a Deus, sem  
Ele nada seria possível.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus pela minha vida e ter me dado saúde para enfrentar os desafios impostos.

Aos meus pais, Janilson de Lima Azevedo e Ione Claudia Bezerra de Melo Lima, por todos os ensinamentos e me passar tranquilidade na hora das dificuldades.

À minha esposa, Yohanna Layssa dos Santos Melo, por ter conseguido extrair o que há de melhor em mim, em todos os aspectos da vida, me dando palavras de incentivo e de carinho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Helber Barros Gomes, por ter se tornado um amigo nesta caminhada, me ajudando muito nessa fase, dando conselhos e ensinamentos que levarei por toda minha vida acadêmica e pessoal.

Aos membros da banca avaliadora, Prof. Dr. Madson Tavares Silva e Dr. Samuellson Lopes Cabral, agradeço generosamente pelo tempo dedicado à análise deste trabalho e pelas sugestões de melhoria.

Ao corpo docente da UFCG, por ter ministrado tantas aulas boas (principalmente sensoriamento remoto, na qual irei levar para toda minha acadêmica), à dedicação do PPGMET para melhorar cada vez mais, agradeço a Arilene por sempre ter me atendido e sanado as minhas dúvidas em relação aos processos.

Ao meu avô, Edésio Lima de Melo, no qual considero um pai para mim, que nesse período enfrentou problemas de saúde e que agora está melhor, e que sempre me incentivou a estudar e melhorar de vida através do estudo.

À minha avó, Maria Celuta Bezerra de Melo (*in memoriam*), pela pessoa magnífica que foi na minha vida e por sempre acreditar em mim.

# **ANÁLISE HIDROCLIMÁTICA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS NO SEMIÁRIDO SASBRASILEIRO DE ACORDO COM PROJEÇÕES DO CMIP6**

## **RESUMO**

As sub-bacias hidrográficas de SOBRADINHO, TRÊS MARIAS e RETIRO BAIXO, estão localizadas no Rio São Francisco, no qual abrange grande parte do Nordeste do Brasil e desempenham um papel fundamental na produção de biomassa e água de qualidade para a região, além de ser importante para a conservação da biodiversidade. A gestão dos recursos hídricos é essencial para garantir o uso efetivo da água. As mudanças climáticas, impulsionadas pela atividade humana, têm impactos significativos no ciclo hidrológico global, incluindo o aumento das temperaturas, o derretimento de geleiras, as alterações nas correntes marinhas e no regime de chuvas, bem como a redução da quantidade de água armazenada nos rios e lagos. O Painel Intergovernamental de Mudanças Climática (IPCC AR6) é um relatório importante que avalia o conhecimento climático e descreve como as mudanças climáticas afetam diversos elementos climáticos. A compreensão dos fluxos hídricos também é crucial para o planejamento de medidas de proteção e recuperação da qualidade dos recursos hídricos. O estudo visa estimar o balanço hídrico mensal da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, focalizando nas sub-bacias de Retiro Baixo, Sobradinho e Três Marias. Para isso, foram empregados o método de Thornthwaite e o modelo hidrológico SMAP, buscando compreender as variações nos recursos hídricos ao longo do tempo e antecipar possíveis cenários climáticos futuros na região. A climatologia nas sub-bacias sob o histórico (1990-2014) traz diferença em relação aos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 (2015-2035; 2045-2065; 2079-2100) em que revela aumento nas temperaturas e variações nas precipitações. O balanço hídrico destaca déficits acentuados, especialmente em Três Marias e Sobradinho sob SSP5-8.5 nas faixas temporais mais distantes (2045-2065; 2079-2100), enquanto o histórico (1990-2014) e a faixa 2015-2035 apresentam déficits e excedentes semelhantes. O uso do SMAP para projetar vazão mostra bom desempenho, mas padrões distintos na vazão calculada e observada destacam desafios na representação precisa, especialmente em Sobradinho e Retiro Baixo durante períodos chuvosos e Três Marias no período seco. Em síntese, a atualização do modelo é vital para projeções precisas diante das mudanças ambientais, revelando-se fundamental para o planejamento sustentável dos recursos hídricos na região.

**Palavras-chave:** Mudanças climáticas; Disponibilidade hídrica; Balanço Hídrico Climatológico; Conservação da biomassa; IPCC AR6.

# HYDROCLIMATIC ANALYSIS IN RIVER BASINS IN SEMI-ARID BRAZILIAN ACCORDING TO CMIP6 PROJECTIONS

## ABSTRACT

The hydrographic sub-basins of SOBRADINHO, TRÊS MARIAS, and RETIRO BAIXO are located in the São Francisco River, which covers a large part of Northeast Brazil and plays a fundamental role in the production of biomass and quality water for the region, as well as being important for biodiversity conservation. Water resource management is essential to ensure effective water use. Climate change, driven by human activity, has significant impacts on the global hydrological cycle, including rising temperatures, glacier melting, changes in ocean currents and rainfall patterns, and a reduction in the amount of water stored in rivers and lakes. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC AR6) is an important report that assesses climate knowledge and describes how climate change affects various climatic elements. Understanding water flows is also crucial for planning measures to protect and recover the quality of water resources. The study aims to estimate the monthly water balance of the São Francisco River basin, focusing on the sub-basins of Retiro Baixo, Sobradinho, and Três Marias. For this purpose, the Thornthwaite method and the SMAP hydrological model were employed to understand variations in water resources over time and anticipate possible future climatic scenarios in the region. Climatology in the sub-basins under the historical period (1990-2014) differs from the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios (2015-2035; 2045-2065; 2079-2100), revealing increases in temperatures and variations in precipitation. The water balance highlights pronounced deficits, especially in Três Marias and Sobradinho under SSP5-8.5 in the more distant time frames (2045-2065; 2079-2100), while the historical period (1990-2014) and the 2015-2035 range show similar deficits and surpluses. The use of SMAP to project flow shows good performance, but distinct patterns in calculated and observed flow highlight challenges in precise representation, especially in Sobradinho and Retiro Baixo during rainy periods and Três Marias in the dry period. In summary, model updates are crucial for accurate projections in the face of environmental changes, proving essential for sustainable water resource planning in the region.

**Keywords:** Climate changes; Water availability; Climatological Water Balance; Biomass conservation; IPCC AR6.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>11</b>
<b>3 REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>12</b>
3.1 CLIMATOLOGIA NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO	12
3.2 CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DE ACORDO COM OS MODELOS DO IPCC	13
3.3 BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO	14
3.4 MODELO HIDROLÓGICO SMAP	15
<b>4 DADOS E METODOLOGIA</b>	<b>17</b>
4.1 ÁREA DE ESTUDO	17
4.2 DADOS	18
4.3 BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO	21
4.4 MODELO HIDROLÓGICO SMAP	23
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>25</b>
5.1 CLIMATOLOGIA NAS SUB-BACIAS	26
<b>5.1.1 Climatologia na sub-bacia de Retiro Baixo</b>	<b>26</b>
<b>5.1.2 Climatologia na sub-bacia de Três Marias</b>	<b>32</b>
<b>5.1.3 Climatologia na sub-bacia de Sobradinho</b>	<b>39</b>
5.2 BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO PROPOSTO POR THORNTHWAITE NAS SUB-BACIAS	46
<b>5.2.1 Balanço hídrico climatológico na sub-bacia de Retiro Baixo</b>	<b>46</b>
<b>5.2.2 Balanço hídrico climatológico na sub-bacia de Três Marias</b>	<b>49</b>
<b>5.2.3 Balanço hídrico climatológico na sub-bacia de Sobradinho</b>	<b>51</b>
5.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA VIA SMAP	54
<b>5.3.1 Modelagem hidrológica via SMAP na sub-bacia de Retiro Baixo</b>	<b>55</b>
<b>5.3.2 Modelagem hidrológica via SMAP na sub-bacia de Três Marias</b>	<b>59</b>
<b>5.3.3 Modelagem hidrológica via SMAP na sub-bacia de Sobradinho</b>	<b>63</b>
<b>6 CONCLUSÃO</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>70</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Localização da área de estudo .....	17
Figura 2 -	Fluxograma da determinação do balanço hídrico proposto por Thornthwaite e Mather (1995).....	22
Figura 3 -	Modelo SMAP mensal.....	23
Figura 4 -	Média de temperatura do histórico dos modelos em Retiro Baixo nos meses de janeiro a dezembro (1990 a 2014) .....	27
Figura 5 -	Temperatura média dos cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 para os modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 na sub-bacia de Retiro Baixo, para as faixas temporais de 2015-2035, 2045-2065 e 2079-2100.....	28
Figura 6 -	Precipitação média dos históricos para os modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 na sub-bacia de Retiro Baixo, para a faixa temporal de 1990 a 2014.....	29
Figura 7 -	Precipitação média dos cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 para os modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 na sub-bacia de Retiro Baixo, para as faixas temporais de 2015-2035, 2045-2065 e 2079-2100.....	30
Figura 8 -	Faixas temporais e modelos de acordo com a temperatura média dos cenários de médias emissões (ssp2-4.5) e altas emissões (ssp5-8.5).....	31
Figura 9 -	Faixas temporais e modelos de acordo com a precipitação média dos cenários de médias emissões (ssp2-4.5) e altas emissões (ssp5-8.5).....	32
Figura 10 -	Média de temperatura do histórico dos modelos em Três Marias nos meses de janeiro a dezembro (1990 a 2014) .....	33
Figura 11 -	Temperatura média dos cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 para os modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 na sub-bacia de Retiro Baixo, para as faixas temporais de 2015-2035, 2045-2065 e 2079-2100.....	35
Figura 12 -	Média de temperatura do histórico dos modelos em Três Marias nos meses de janeiro a dezembro (1990 a 2014).....	35

Figura 13 - Temperatura média dos cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 para os modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 na sub-bacia de Retiro Baixo, para as faixas temporais de 2015-2035, 2045-2065 e 2079-2100.....	37
Figura 14 - Faixas temporais e modelos de acordo com a temperatura média dos cenários de médias emissões (ssp2-4.5) e altas emissões (ssp5-8.5).....	38
Figura 15 - Faixas temporais e modelos de acordo com a precipitação média dos cenários de médias emissões (ssp2-4.5) e altas emissões (ssp5-8.5).....	38
Figura 16 - Média de precipitação do histórico dos modelos em Sobradinho nos meses de janeiro a dezembro (1990 a 2014).....	40
Figura 17 - Precipitação média dos cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 para os modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 na sub-bacia de Sobradinho, para as faixas temporais de 2015-2035, 2045-2065 e 2079-2100.....	41
Figura 18 - Média de temperatura do histórico dos modelos em Sobradinho nos meses de janeiro a dezembro (1990 a 2014).....	42
Figura 19 - Temperatura média dos cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 para os modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 na sub-bacia de Sobradinho, para as faixas temporais de 2015-2035, 2045-2065 e 2079-2100.....	44
Figura 20 - Faixas temporais e modelos de acordo com a temperatura média dos cenários de médias emissões (ssp2-4.5) e altas emissões (ssp5-8.5).....	45
Figura 21 - Faixas temporais e modelos de acordo com a precipitação média dos cenários de médias emissões (ssp2-4.5) e altas emissões (ssp5-8.5).....	45
Figura 22 - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Retiro Baixo, entre os anos de 1990 a 2014, da média dos modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2.....	47
Figura 23 - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Retiro Baixo, entre os anos de 2015 a 2035, da média dos modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 pelo cenário ssp2-4.5(a) e ssp5-8.5 (b).....	47

Figura 24 - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Retiro Baixo, entre os anos de 2045 a 2065, da média dos modelos ACESSES1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2.....	48
Figura 25 - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Retiro Baixo, entre os anos de 2079 a 2100, da média dos modelos ACESSES1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2.....	48
Figura 26 - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Três Marias, entre os anos de 1990 a 2014, da média dos modelos ACESSES1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2.....	50
Figura 27 - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Três Marias, entre os anos de 2015 a 2035, da média dos modelos ACESSES1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 pelo cenário ssp2-4.5(a) e ssp5-8.5 (b).....	50
Figura 28 - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Três Marias, entre os anos de 2045 a 2065, da média dos modelos ACESSES1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 pelo cenário ssp2-4.5(a) e ssp5-8.5 (b).....	50
Figura 29 - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Três Marias, entre os anos de 2079 a 2100, da média dos modelos ACESSES1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 pelo cenário ssp2-4.5(a) e ssp5-8.5 (b).....	51
Figura 30 - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Sobradinho, entre os anos de 1990 a 2014, da média dos modelos ACESSES1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2.....	52
Figura 31 - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Sobradinho, entre os anos de 2015 a 2035, da média dos modelos ACESSES1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 pelo cenário ssp2-4.5(a) e ssp5-8.5 (b).....	52
Figura 32 - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Sobradinho, entre os anos de 2045 a 2065, da média dos modelos ACESSES1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 pelo cenário ssp2-4.5(a) e ssp5-8.5 (b).....	53
Figura 33 - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Sobradinho, entre os anos de 2079 a 2100, da média dos modelos ACESSES1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 pelo cenário ssp2-4.5(a) e ssp5-8.5 (b).....	53
Figura 34 - Coeficientes de correlação linear para os períodos de calibração, validação (ssp2-4.5; ssp5-8.5) e período total, para a sub-bacia do Retiro Baixo utilizando o SMAP.....	56
Figura 35 - Vazão calculada vs vazão observada entre os anos de 2008 à 2014 de acordo com o histórico dos modelos na sub-bacia de Retiro Baixo.....	58

Figura 36 - Vazão calculada vs vazão observada ao longo do período entre 2015 à 2021 segundo a média dos modelos e de acordo com dois cenários: (a) ssp2-4.5 e (b) ssp5-8.5 em Retiro Baixo.....	59
Figura 37 - Coeficientes de correlação linear para os períodos de calibração, validação (ssp2-4.5; ssp5-8.5) e período total, para a sub-bacia de Três Marias utilizando o SMAP.....	60
Figura 38 - Vazão calculada vs vazão observada entre os anos de 2008 à 2014 de acordo com o histórico dos modelos na sub-bacia de Três Marias.....	62
Figura 39 - Vazão calculada vs vazão observada ao longo do período entre 2015 à 2021 segundo a média dos modelos e de acordo com dois cenários: (a) ssp2-4.5 e (b) ssp5-8.5 em Três Marias.....	63
Figura 40 - Coeficientes de correlação linear para os períodos de calibração, validação (ssp2-4.5; ssp5-8.5) e período total, para a sub-bacia de Sobradinho utilizando o SMAP.....	64
Figura 41 - Vazão calculada vs vazão observada entre os anos de 2008 à 2014 de acordo com o histórico dos modelos na sub-bacia de Sobradinho.....	65
Figura 42 - Vazão calculada vs vazão observada ao longo do período entre 2015 à 2021 segundo a média dos modelos e de acordo com dois cenários: (a) ssp2-4.5 e (b) ssp5-8.5 em Sobradinho.....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Modelos do CMIP6.....	20
Tabela 2-	Parâmetros calibráveis do modelo SMAP para a sub-bacia de Retiro Baixo.....	55
Tabela 3-	Coefficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) para a sub-bacia de Retiro Baixo.....	56
Tabela 4-	Parâmetros calibráveis do modelo SMAP para a sub-bacia de Três Marias.....	59
Tabela 5-	Coefficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) para a sub-bacia de Três Marias.....	60
Tabela 6-	Parâmetros calibráveis do modelo SMAP para a sub-bacia de Sobradinho.....	63
Tabela 7-	Coefficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) para a sub-bacia de Sobradinho.....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>BHC</b>	Balanço hídrico climatológico
<b>BHSF</b>	Bacia hidrográfica do São Francisco
<b>CAD</b>	Capacidade de água disponível no solo
<b>CMIP 6</b>	Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
<b>ENOS</b>	El Niño Oscilação Sul
<b>ETP</b>	Evapotranspiração
<b>GEE</b>	Gases de Efeito Estufa
<b>HN</b>	Hemisfério Norte
<b>IPCC</b>	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
<b>NE</b>	Nordeste
<b>P</b>	Precipitação
<b>RCP</b>	Representative Concentration Pathway
<b>SIN</b>	Sistema Interligado Nacional
<b>SMAP</b>	Soil Moisture Accounting Procedure
<b>SSP</b>	The Shared Socio Economic Pathways
<b>TSM</b>	Temperatura da Superfície do Mar
<b>ZCAS</b>	Zona de Convergência do Atlântico Sul
<b>ZCIT</b>	Zona de Convergência Intertropical

## 1. INTRODUÇÃO

As sub-bacias de Retiro Baixo, Três Marias e Sobradinho, estão localizadas na Bacia Hidrográfica do São Francisco (BHSF), no qual abrange quase toda a área da região Nordeste do Brasil, cobrindo estados como Minas Gerais, Bahia, Pernambuco e algumas partes do Ceará, Paraíba, Piauí, Alagoas e Sergipe. Esta bacia também atravessa cinco estados brasileiros, possuindo milhares de canais, rios e igarapés que contribuem para a produção de biomassa e água para a região. A região da bacia hidrográfica do São Francisco também é importante para a conservação da biodiversidade, pois abriga muitas espécies da flora e fauna em risco de extinção (JONG et al., 2018).

A gestão de recursos hídricos empregada para o controle de vazões e dos usos das águas é uma das principais formas pelas quais as nações podem garantir o uso efetivo deste recurso precioso em seus territórios. É importante desenvolver políticas eficazes de conservação hídrica que possam ser facilmente implementadas, pois o futuro da disponibilidade de água doce depende cada vez mais das medidas adotadas. As mudanças climáticas, causadas pelas atividades humanas, contribuem para o aumento da temperatura global da Terra, o que, por sua vez, tem um papel importante no ciclo hidrológico global (PÖRTNER, 2022).

Segundo Arnell (2019), o aumento das temperaturas contribui para o derretimento das geleiras, elevando o nível dos mares e oceanos, e resultando em maior intensidade de chuvas e inundações em regiões costeiras. Esses efeitos, por sua vez, contribuem para a alteração de correntes marinhas e do regime de chuvas, modificando a hidrologia global. Além disso, as temperaturas mais elevadas também reduzem a quantidade de água armazenada nos rios, lagos e lençóis freáticos, de modo que influenciam a disponibilidade hídrica a curto e longo prazo.

O 6º Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre o Clima - *Intergovernmental Panel on Climate Change* - (IPCC AR6) consiste em avaliar o estado geral do conhecimento climático. Este relatório específico tem como objetivo descrever as principais noções atuais de como mudanças climáticas globais afetam a temperatura, chuva, vento, névoa, eventos extremos e vários outros elementos climáticos.

Conforme Reichert et al. (2017), o balanço hídrico climatológico é um recurso hidrológico importante para o planejamento de uso da água e a gestão dos recursos hídricos. O balanço hídrico é o resultado da variação temporal de volume de água dentro de uma bacia

hidrográfica e fornece informações importantes sobre as variações de armazenamento de água na bacia, que é determinado pela diferença entre a entrada e saída de água. Ao identificar as tendências e sazonalidades nos recursos hídricos, podem ser concebidos planos de recursos hídricos que garantam a disponibilização suficiente e regular aos usuários. Além disso, a compreensão dos fluxos hídricos permite planejar de forma adequada as medidas de proteção e recuperação da qualidade dos recursos hídricos, proposto por Thornthwaite.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

→ Analisar a projeção de temperatura e precipitação nas sub-bacias e estimar o balanço hídrico mensal da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, considerando suas principais sub-bacias: Retiro Baixo, Sobradinho e Três Marias durante o clima presente (1990 a 2014) e futuro (2015 a 2100) através do método de Thornthwaite. Além disso, estimar as vazões utilizando o modelo hidrológico SMAP, considerando o histórico compreendido entre 2008 e 2014, bem como os cenários prospectivos de 2015 a 2021.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

→ Avaliar os dados do Balanço hídrico climatológico por Thornthwaite para o período histórico e as tendências futuras através dos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para quatro modelos *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6), sendo eles: ACCESS-ESM1-5, CanESM5, MIROC6 e MRI-ESM2-0;

→ Analisar a climatologia sazonal para o período histórico e a tendência de suas projeções para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 baseado nos quatro modelos CMIP6;

→ Avaliar o balanço de água anual dessas sub-bacias para analisar os déficits e excedentes hídricos, tanto históricos quanto futuros desses quatro modelos;

→ Avaliar as vazões mensais através do modelo hidrológico SMAP para os cenários de emissões SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 CLIMATOLOGIA NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

De acordo com Kelly (2017), às mudanças nos padrões de escoamento nas bacias hidrográficas têm implicações diretas na geração hidroelétrica. Essas mudanças podem resultar em impactos significativos no desempenho e na eficiência das usinas hidrelétricas, afetando a disponibilidade de água necessária para a produção de energia elétrica.

No Alto São Francisco e no Médio São Francisco, a quadra chuvosa é de novembro a março, devido o efeito da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), e o seu período de seca é entre maio a agosto, com isso, ocorre a redução da disponibilidade energética na região (Da Silva et al., 2011). Conforme ZILLI; CARVALHO; LINTNER (2018), a ZCAS um mecanismo dinâmico causador de precipitação durante o período de novembro a março nas regiões das sub-bacias do Alto e Médio São Francisco. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um padrão sinótico ativo e manifesta-se nas proximidades da linha do Equador. A ZCIT constitui uma vasta área de convergência dos ventos alísios do nordeste, deslocando-se do sistema de alta pressão ou anticiclone subtropical no Hemisfério Norte (HN). No norte da América do Sul, observa-se um aumento da convecção sobre essa região, resultando no transporte de umidade sobre o Nordeste Brasileiro (UTIDA et al., 2018), sendo um dos causadores de chuvas nas sub-bacias.

Conforme Federova et al. (2016), as massas de ar frio são escassamente investigadas na área do Nordeste do Brasil (NEB), entretanto, pesquisas prévias indicam que essas massas de ar, cujas extremidades alcançam o NEB, exercem impacto nas condições climáticas da região, a utilização de uma dispersão lateral da temperatura potencial equivalente e o transporte associado são os elementos inovadores na determinação de áreas frontais e irão respaldar a projeção na efetiva operação diária, gerando volumes de chuvas, e atua nas regiões do centro-oeste, sudeste e sul do Nordeste Brasileiro, onde está a maior parte da bacia do Rio São Francisco.

A região semiárida da bacia do rio são francisco emerge em desafios de escassez em seus mananciais, com a ameaça iminente de esgotamento dos reservatórios de água. Esse panorama crítico tem sido intensificado pelas elevadas taxas de evapotranspiração e pela distribuição desigual da precipitação, caracterizada pela sua variabilidade ao longo do tempo,

o que propicia a manifestação de períodos prolongados de estiagem e acentua os déficits hídricos (MARQUES, 2023).

### 3.2 CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DE ACORDO COM OS MODELOS DO IPCC

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) informa uma precaução de uma considerável ameaça ao desenvolvimento sustentável, pois incide sobre segmentos importantes da população, como os setores da saúde, áreas costeiras, florestas, biodiversidade, recursos hídricos, além de afetar áreas econômicas como pesca, produção florestal, geração de energia e indústrias. O IPCC alerta para impactos significativos, de alta magnitude, na América do Sul, com ênfase nos recursos hídricos, impondo desafios aos governos latino-americanos, especialmente ao Brasil, no que tange à implementação de medidas de mitigação e adaptação. Isso visa a um melhor gerenciamento dos riscos climáticos, com repercussões diretas na população global (O'NEILL, 2017).

O aquecimento global vem sendo observado nas últimas décadas acarretando mudanças no ciclo da água, mudanças nos padrões de precipitação e evapotranspiração, desencadeando impactos diretos à umidade do solo, reservas subterrâneas e geração do escoamento superficial (IPCC, 2001; IPCC, 2007).

Segundo Van Vuuren et al. (2011), Taylor et al. (2012) e Flato et al. (2013), para o modelo AR5 do IPCC foi estabelecido cenários de mudanças climáticas para estudar as mudanças decorrente das ações do homem (antrópicas), elas também orientam os Centros de Meteorologia Global, fazendo a comparação dos resultados, trazendo o histórico no qual traz condições similares ao que foi observado para o clima presente, e os cenários futuros com rotas representativas de concentração de gases de efeito estufa, os chamados Representative Concentration Pathway (RCP): RCP 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5, em que correspondem respectivamente por médias de concentrações 450, 650, 850 e 1370 ppm de CO<sub>2</sub>. Em relação a série temporais, foram divididos em quatro períodos: o primeiro é denominado o período histórico, entre 1950 à 1999, os outros períodos referem-se às projeções para o presente século, e está dividido em 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2099 (HAJIMA, 2014).

O sexto relatório de avaliação (AR6), analisou que as mudanças climáticas atuais são reais, causadas pela atividade do homem no meio ambiente e se intensificando numa

velocidade surpreendente, sem precedentes nos últimos 2 mil anos. Mostrando potenciais graves para a humanidade e para a Terra, incluindo ainda mais tempestades, secas severas e ondas de calor extremo. De acordo com o relatório, a intensidade e a frequência dos eventos climáticos extremos aumentaram na maioria das áreas desde 1950 e se agravaram nas próximas décadas proporcionalmente ao aquecimento global. Em comparação com o IPCC AR5 (2013), o quinto relatório de avaliação dizia ser “extremamente provável” que a influência humana fosse causa do aquecimento observado, entretanto o IPCC AR6 (2021) acrescenta mais certeza, notando que a mudança climática induzida pelo homem afeta muitos extremos climáticos e meteorológicos em todas as regiões do globo (IPCC AR6, 2021).

De acordo com PEDERSEN (2022), o IPCC AR6 (2021) utilizou cinco novos cenários de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), eles foram identificados pela sigla SSPs que significa em inglês The Shared Socio Economic Pathways, para o período de 2015 a 2100, trazendo projeções mais apuradas de impacto das emissões de GEE no sistema climático terrestre, os cenários são: SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7 e o SSP5-8.5. Conforme Zhou (2021), com o IPCC AR6 (2021) temos uma nova projeção climática que cobre a emissão de baixo custo para o prometido metas de emissões líquidas zero para o ano de 2050, a projeção sob o cenário SSP1-1.9 fornece informações úteis para condições em que todos os países seriam capazes de cumprir suas promessas de atingir emissões zero de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) até meados do século.

É notório que o IPCC AR6 (2021) relatou diversos fatores relevantes, entre eles, que o dióxido de carbono é aditivo, cada tonelada aquece o planeta, assim a situação humana na terra irá ficar cada vez mais desafiadora se não houver uma redução de GEE, entretanto ainda dá tempo para evitar mudanças climáticas perigosas e os efeitos da redução das emissões seriam sentidas em cada década (MING, 2021).

### 3.3 BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO

A identificação do índice de aridez é importante para saber o grau de desertificação da região, pois quanto maior seu índice, maior será a susceptibilidade do local à desertificação. Esse índice também dá uma visão geral das condições climáticas da região, alertando a população para que possa preparar estratégias de adaptação e mitigação.

A fim de preencher a falta de diagnóstico climático do índice de aridez, o balanço hídrico climatológico de Thornthwaite & Mather (1955) surge como uma ferramenta essencial. Com o auxílio dessa ferramenta, é possível obter o padrão climático de uma determinada região, incluindo períodos de excedente e déficit hídrico. Dessa forma, essa ferramenta desempenha um papel crucial no estudo do processo de desertificação, permitindo a avaliação de seu avanço e grau de desenvolvimento. Além disso, é uma ferramenta estratégica para o planejamento de políticas públicas, agrometeorologia e gerenciamento dos recursos hídricos.

O balanço hídrico fornece informações importantes sobre a água disponível para uso dos ecossistemas do local, como a manutenção de habitats, bem como para o uso pela população local. A compreensão e análise do balanço hídrico da região é essencial para promover o uso adequado e eficiente da água e para garantir seu aproveitamento sustentável para todos os fins, como abastecimento de água para uso doméstico, irrigação agrícola e sustentação de ecossistemas naturais, diversas formas de representar o balanço hídrico são comumente utilizadas em pesquisas científicas, como gráficos, tabelas e mapas. Essas representações têm como objetivo principal descrever de forma mais detalhada os dados obtidos e fornecer uma compreensão mais precisa e abrangente do balanço hídrico climatológico (BHC) (FERREIRA, 2018).

### 3.4 MODELO HIDROLÓGICO SMAP

O modelo hidrológico SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo chuva-vazão, foi criado em 1981 por Lopes, Braga e Conejo (1982), com início desenvolvido para intervalo de tempo diário, entretanto ocorreram adaptações e foram apresentadas versões diárias e mensais (CASTANHARO et al., 2007). Segundo Lopes (1999), o modelo obteve desenvolvimento a partir da experiência com a aplicação do modelo Stanford Watershed IV e modelo Mero em trabalhos realizados pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo.

De acordo com Calvalcante (2017), o SMAP pode ter uma divisão em três fases de calibração, a primeira fase ocorre quando o modelo é ajustado, assim como a determinação dos seus parâmetros, a segunda fase é a validação, na qual é a simulação do modelo com parâmetros estimados e verifica a validade do ajuste através de comparação com dados do

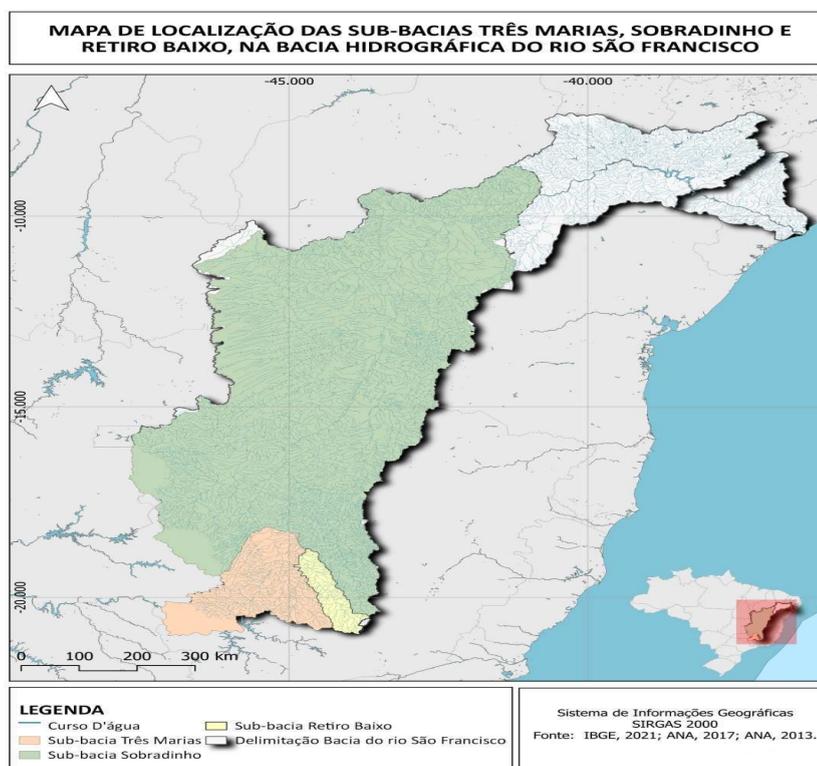
histórico, e a última fase é a previsão, ocorre simulação do sistema com os parâmetros ajustados para a quantificação de suas respostas a diferentes entradas.

## 4. DADOS E METODOLOGIA

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do projeto é a Bacia Hidrográfica do São Francisco (BHSF; Figura 1), que abrange as três sub-bacias principais: Sobradinho, Três Marias e Retiro Baixo. O rio São Francisco desempenha um papel estratégico de grande importância para o Brasil, uma vez que atende a múltiplas demandas tanto de consumo como de outros usos da água. Os benefícios decorrentes desse uso vão além dos limites da própria bacia hidrográfica, incluindo a geração de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN) e a transferência de águas para outras regiões.

Conforme ilustrado na Figura 1, além da delimitação da BHSF como área de estudo, foram selecionadas três sub-bacias para a área de estudo principal (Sobradinho, Três Marias e Retiro Baixo) para realizar análises mais detalhadas sobre os impactos das alterações antrópicas no ciclo hidrológico, com isso, essa abordagem permite uma compreensão mais aprofundada dos efeitos das atividades humanas nessas áreas específicas no Rio São Francisco.



**Figura 1** - Localização da área de estudo. Fonte: Elaborada pelo autor.

A Bacia Hidrográfica do São Francisco (BHSF) é uma importante bacia hidrográfica brasileira, localizada na região Nordeste do país. Engloba as macrorregiões Sudeste e Nordeste, atravessando parcialmente o distrito federal e seis estados: Minas Gerais, Goiás, Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe. Com uma área de drenagem de 639.129 km<sup>2</sup> e uma extensão de 2863 km, a BHSF possui uma diversidade climática e ambiental, variando entre as regiões semiáridas e tropicais úmidas, com resquícios da Mata Atlântica e ecossistema estuário. Possui 28 afluentes, desaguando no Oceano Atlântico na divisa entre os estados de Alagoas e Sergipe (CBHSF, 2016).

Além da geração de energia elétrica, a BHSF também é utilizada para irrigação, pesca, navegação, abastecimento público e atividades econômicas diversas. Contudo, o uso intensivo dos recursos hídricos na região associado ao clima semiárido e alterações climáticas têm contribuído para redução das reservas hídricas, conflitos pelo uso da água e consequente degradação ambiental.

Esses reservatórios são de extrema importância para a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, pois são responsáveis pela regulação dos fluxos de água na bacia, além de serem utilizados para a geração de energia elétrica, abastecimento público, irrigação e navegação. O Reservatório de Sobradinho, localizado na Bahia, é o maior reservatório da BHSF e é utilizado principalmente para a geração de energia elétrica. Já o Reservatório de Três Marias, localizado em Minas Gerais, é utilizado tanto para a geração de energia quanto para a irrigação e abastecimento de água. Por fim, o Reservatório de Retiro Baixo, também em Minas Gerais, utilizado para geração de energia elétrica e regulação da vazão do rio São Francisco (CGEE/ANA, 2012; ONS, 2020).

#### 4.2 DADOS

Os dados hidrológicos empregados referem-se à vazão, evapotranspiração, temperatura e precipitação. No que diz respeito à vazão calculada, utilizaram-se os dados de precipitação provenientes dos modelos do CMIP6 (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>), conforme detalhado na Tabela 1. Já para a evapotranspiração, os cálculos foram realizados por meio do método de Thornthwaite. Os dados de temperatura média foram obtidos igualmente dos modelos do CMIP6. Quanto à vazão observada, foram empregados os dados disponíveis pela

Agência Nacional de Águas (ANA) na escala mensal (<https://www.snirh.gov.br/usos-da-agua>).

Para avaliar as condições climáticas atuais, foram empregadas interações de simulações históricas realizadas por quatro diferentes modelos participantes do projeto CMIP6/IPCC, que a partir desses dados, foram obtidos a vazão calculada para as determinadas sub-bacias no período de 2008 a 2021. Tais modelos também serão utilizados para as análises das projeções climáticas futuras, baseados nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, para os intervalos de tempo entre 2015-2035, 2045-2065 e 2079-2100. A seleção dos modelos levou em conta a habilidade das simulações nas sub-bacias hidrográficas de Sobradinho, Retiro Baixo e Três Marias em cada experimento, bem como as resoluções originais das grades utilizadas por esses modelos.

Na tabela 1 mostra os modelos, as instituição ou organização e o país. O modelo MRIESM2-0 (YUKIMOTO et al, 2019), proveniente da *Meteorological Research Institute* (MRI) no Japão, tem uma resolução de grade de  $1,60^{\circ} \times 3,20^{\circ}$  de latitude por longitude. O MIROC6 (SHIOGAMA,2019), desenvolvido pela *Atmosphere and Ocean Research Institute* (*University of Tokyo*), *National Institute for Environmental Studies* e *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology* (MIROC6), também no Japão, apresenta uma resolução de grade de  $1,28^{\circ} \times 2,56^{\circ}$  de latitude por longitude. O ACCESSESM1-5 (ZIEHN et al, 2019) da *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO) na Austrália, tem uma resolução de grade de  $1,45^{\circ} \times 1,92^{\circ}$  de latitude por longitude. Por último, o modelo CanESM5 (SWART et al, 2019), criado pela *Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis* (CCCma) no Canadá, possui uma resolução de grade de  $0,64^{\circ} \times 1,28^{\circ}$  de latitude por longitude.

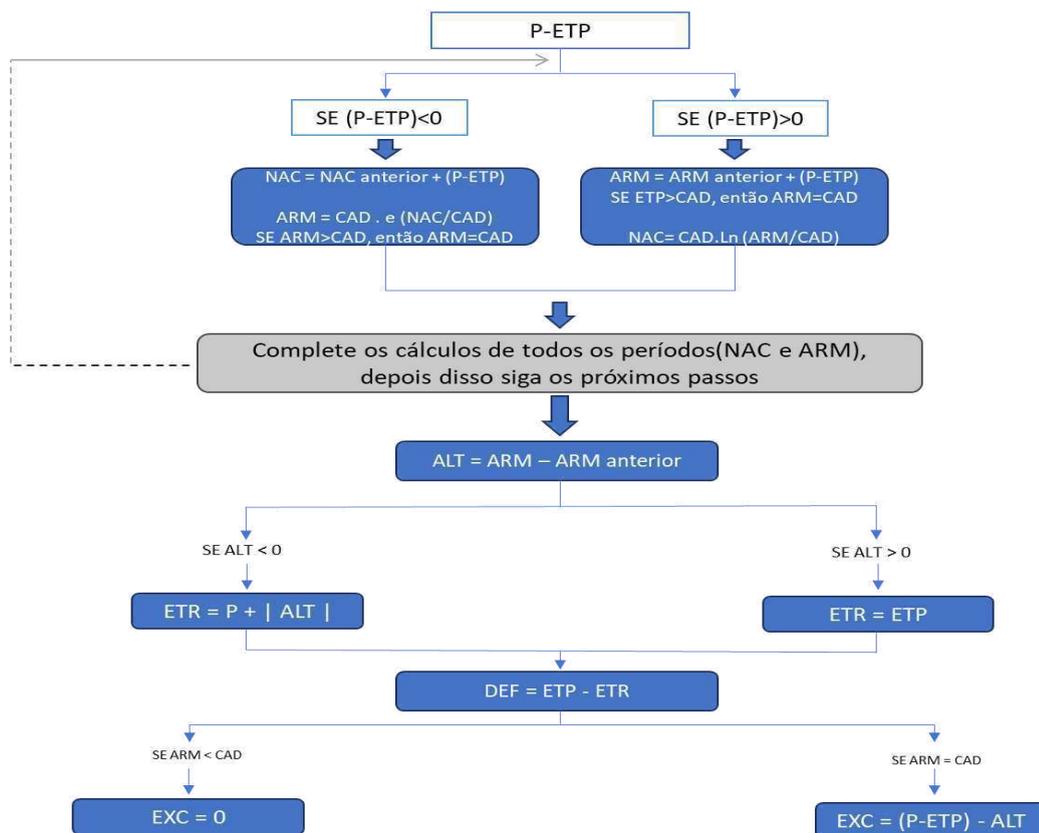
**Tabela 1** - Modelos do CMIP6

Modelos	Instituição ou Organização (país)
MRI-ESM2-0	<i>Meteorological Research Institute Earth System Model version 2 (Japão)</i>
MIROC6	<i>Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (Japão)</i>
ACCESS-ESM1-5	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Austrália)</i>
CanESM5	<i>Canadian Earth System Model 5th generation (Canadá)</i>

### 4.3 BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO

O cálculo do balanço hídrico climatológico é realizado com base na precipitação (P), evapotranspiração potencial (ETP) e capacidade de água disponível no solo (CAD). A CAD é uma variável físico-hídrica geralmente determinada pela diferença entre o ponto de murcha permanente e a capacidade de campo, que são estados de água do solo na curva de retenção hídrica. A capacidade de água disponível no solo (CAD) varia de acordo com o tipo de solo e, neste estudo, foi estabelecida como sendo igual a 100 mm para simplificação.

De maneira geral, o balanço hídrico climatológico mensal é calculado como a diferença entre a precipitação (P) e a evapotranspiração potencial (ETP), ambos representando médias mensais nas sub-bacias. Se a precipitação for superior à evapotranspiração potencial ( $P > ETP$ ), ocorre um excedente de água (EXC). Por outro lado, se a precipitação for inferior à evapotranspiração potencial ( $P < ETP$ ), há um déficit hídrico (DEF). A diferença entre P e ETP é avaliada ao longo dos meses, e com base na ocorrência de excedente hídrico ( $P > ETP$ ) ou déficit hídrico ( $P < ETP$ ), o armazenamento (ARM) e sua variação (ALT) são calculados utilizando relações logarítmicas e exponenciais, respectivamente, conforme mostrado no esquema apresentado na Figura 2.



**Figura 2** - Fluxograma da determinação do balanço hídrico proposto por Thornthwaite e Mather (1995).

Legenda: P é a precipitação (mm); ETP é a evapotranspiração potencial (mm); NAC é o acumulado negativo (mm); CAD é a capacidade de água disponível (mm); ALT é a alteração do ARM; DEF é a deficiência hídrica (mm); EXC é o excedente hídrico (mm). Fonte: Adaptada de Rolim et al. (2020).

A evapotranspiração potencial mensal média nas sub-bacias foi utilizada o método proposto por Thornthwaite e Mather (1955), obteve-se a estimativa do Balanço Hídrico Climatológico (BHC), que, por sua vez, é dependente da evapotranspiração potencial (ETP) determinada pelo método de Thornthwaite (1948), segundo a equação 1:

$$ETP = 16. (10. T/I)^a \quad (1)$$

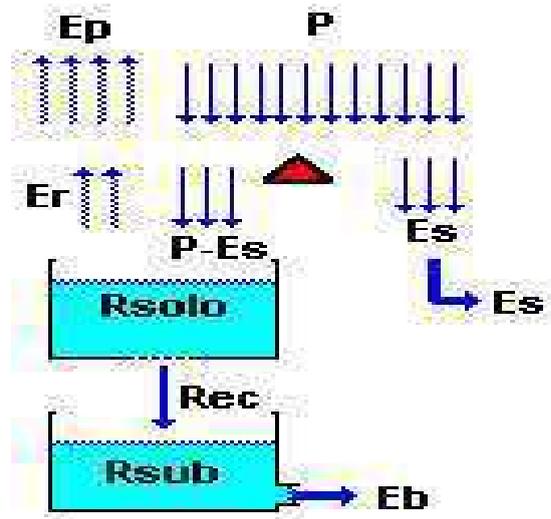
A temperatura média do mês, representada por T em °C, e o nível de calor da região estudada (Equação 2), denotada por I, estão interligados. O nível de calor depende do ritmo anual da temperatura, levando em consideração o efeito térmico de cada mês. O expoente “a” (Equação 3) é uma função de I, conforme descrito por Pereira, Angelocci e Sentelhas em 2002.

$$I = \sum^{1,12} (t/5)^{1,514} \quad (2)$$

$$a = 6,75 \times 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 0,01791 \cdot I + 0,492 \quad (3)$$

#### 4.4 MODELO HIDROLÓGICO SMAP

O modelo SMAP é uma ferramenta de simulação hidrológica que converte dados de chuva em vazão. Neste estudo, utilizou-se a versão mensal do modelo, conforme ilustrado na Figura 3.



**Figura 3** - Modelo SMAP mensal. Fonte: Lopes(1999).

Em que: RSOLO: reservatório do solo (zona aerada); RSUP: reservatório da superfície da bacia; RSUP: reservatório subterrâneo (zona saturada); P: precipitação; Es: escoamento superficial; Ep: evaporação potencial; Er: Evaporação real; Rec: recarga subterrânea; Eb: escoamento básico.

A versão mensal do modelo apresenta três parâmetros característicos da bacia, a constante de recessão (kkt), a vazão básica inicial (Ebin) e o teor de umidade inicial (Tuin). Os três parâmetros serão determinados empiricamente, onde será definido um valor inicial e aferido manualmente.

Nessa versão mostrada na Figura 1 sendo formada por dois reservatórios matemáticos tendo suas variáveis de estado atualizadas mensalmente pelas equações 4 e 5.

$$R_{solo}(i + 1) = R_{solo}(i) + P - E_s - E_r - Rec \quad (4)$$

$$R_{sub}(i + 1) = R_{sub}(i) + Rec - E_b \quad (5)$$

Em cada ciclo do modelo, os elementos do balanço hídrico do SMAP, detalhados nas Equações 4 e 5, são renovados por meio de funções de transferência. Essas funções empregam os parâmetros do modelo para imitar as características físicas da bacia que influenciam na geração do escoamento superficial.

$$E_r(t) = Tu(t)ETP(t) \quad (6)$$

$$E_s(t) = P(t) (Tu(t))^{PES} \quad (7)$$

$$REC(t) = CREC (Tu(t)) ^4 R_{solo}(t - 1) \quad (8)$$

$$E_b(t) = R_{sub}(t - 1)(1 - 0,5^{(1/K)}) \quad (9)$$

Ao concluir cada atualização, levando em conta que o fluxo observado provém do escoamento superficial e do escoamento de base, é possível determinar a vazão média mensal, m<sup>3</sup>/s, usando a equação 10.

$$Q = (E_s + E_b) * Ad/2630 \quad (10)$$

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo, foram conduzidas análises abrangentes da climatologia, do balanço hídrico e do modelo hidrológico SMAP das sub-bacias de Sobradinho, Três Marias e Retiro Baixo, considerando projeções climáticas de quatro modelos atmosféricos distintos (ACCESS-ESM1-5, CanESM5, MIROC6 e o MRI-ESM2-0). Os modelos utilizados representaram diferentes cenários de emissão de CO<sub>2</sub>, nomeadamente o ssp 2-4.5 e o ssp 5-8.5.

Os resultados obtidos revelaram informações importantes sobre as variações climáticas esperadas e os possíveis impactos no balanço hídrico das sub-bacias estudadas. Foram analisados tanto os dados históricos quanto as projeções futuras, a fim de identificar tendências e padrões significativos.

Ao comparar os quatro modelos atmosféricos utilizados, foram observadas diferenças nas projeções climáticas e nos balanços hídricos resultantes. Cada modelo apresentou particularidades em termos de magnitude e distribuição espacial das mudanças climáticas projetadas, bem como nas estimativas de déficits e excedentes hídricos nas sub-bacias.

Em relação ao presente estudo, foram realizadas análises detalhadas da climatologia e do balanço hídrico, dividindo os resultados em três tópicos principais: climatologia, modelagem hidrológica por meio do balanço hídrico climatológico e a modelagem via SMAP.

**Climatologia:** Neste tópico, foram examinadas as características climáticas da região de estudo. Para isso, foram utilizados dados históricos de variáveis climáticas, como temperatura e precipitação. A análise da climatologia permitiu compreender os padrões sazonais, as variações interanuais e as tendências de longo prazo relacionadas ao clima da região. Essas informações são fundamentais para entender a dinâmica climática local e as mudanças que podem ocorrer ao longo do tempo.

**Balanço Hídrico Climatológico:** No tópico de balanço hídrico climatológico, foram investigadas as interações entre a precipitação, a evapotranspiração e a disponibilidade de água na região de estudo. Essa análise envolveu o cálculo das entradas e saídas de água, incluindo a precipitação, a evapotranspiração e a armazenagem de água no solo. O balanço hídrico é crucial para avaliar a disponibilidade de água na região, identificar déficits ou

excedentes hídricos, e entender como esses padrões podem variar ao longo das diferentes estações do ano.

**Modelo hidrológico SMAP:** Nesse tópico do modelo SMAP, é um sistema que investiga estimativas precisas e mensais de vazões, contribuindo para aplicações como previsão de secas, gerenciamento de recursos hídricos e monitoramento agrícola. Esse modelo é uma ferramenta valiosa para entender as interações entre a precipitação e a vazão de uma determinada área, sendo fundamental para tomada de decisões relacionadas.

## 5.1 CLIMATOLOGIA NAS SUB-BACIAS

### 5.1.1 Climatologia na sub-bacia de Retiro Baixo

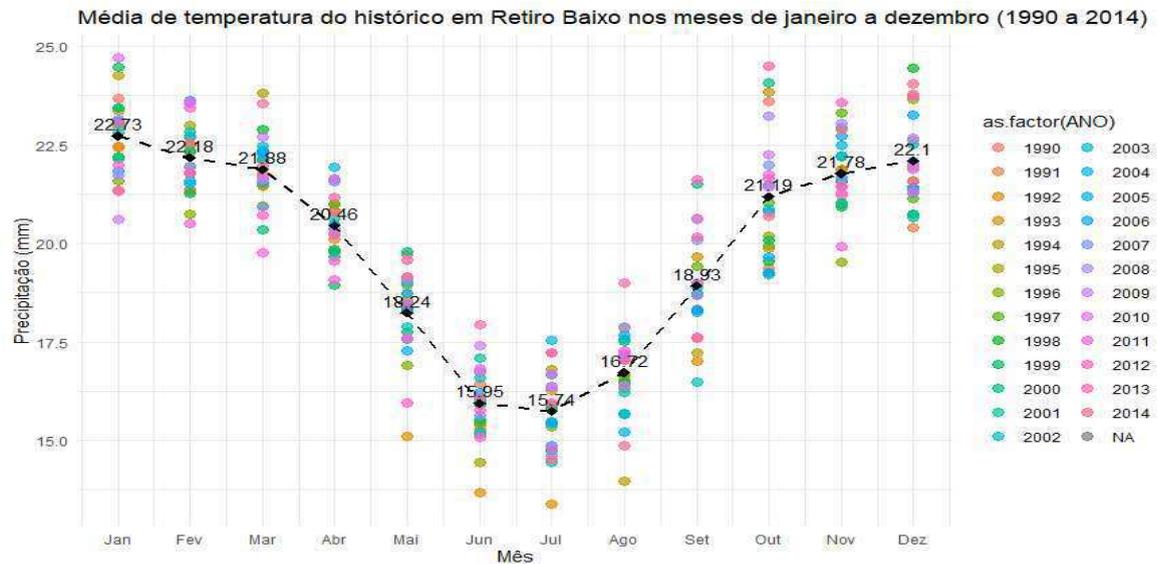
Durante o período analisado, foram obtidos resultados significativamente diferentes para a temperatura média e a precipitação anual em Retiro Baixo, considerando diferentes cenários e períodos dos quatros modelos.

No histórico de temperatura média, entre os anos de 1990 a 2014, de acordo com as médias dos modelos, apresentados na figura 4, a temperatura variou entre 22,73°C a 15,74°C, tendo suas maiores temperaturas entre o período de outubro a abril. Com a maior temperatura no mês de janeiro (22,73°C) e menor em julho (15,74°C).

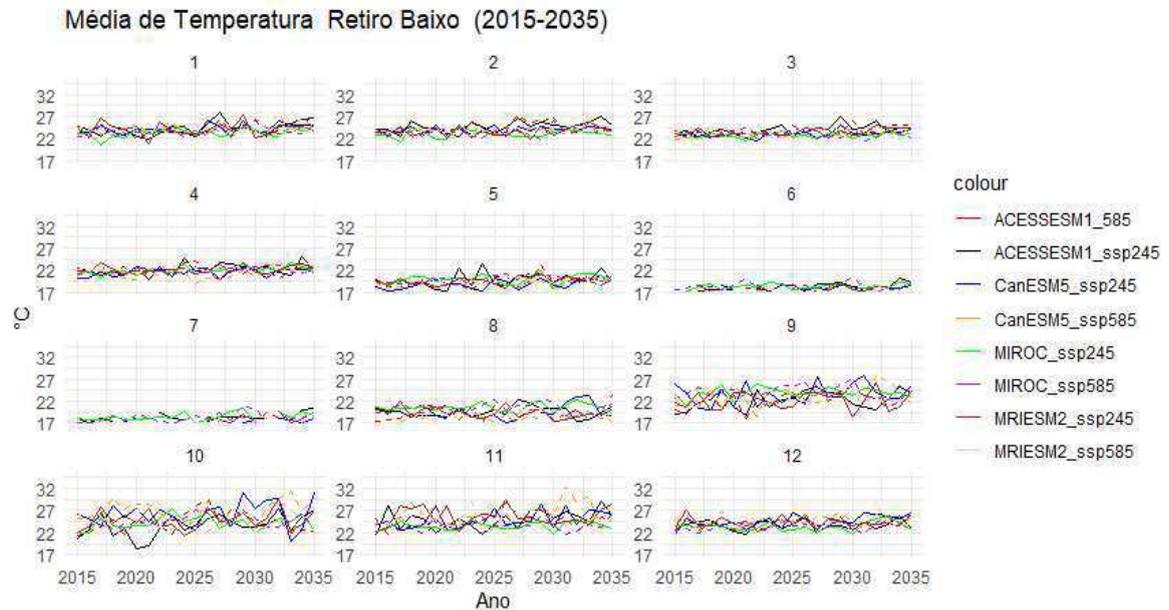
Em relação à temperatura média na sub-bacia de Retiro Baixo, durante o período de 2015 a 2035, os cenários de altas emissões (SSP5-8.5) evidenciaram temperaturas superiores em comparação aos de médias emissões (SSP2-4.5). Nesse intervalo de tempo, as temperaturas médias oscilaram entre 17°C e 30°C, sendo mais elevadas nos meses de setembro a março. A maior parte dos modelos revelou uma tendência positiva no aumento das temperaturas ao longo dos anos, e um aumento substancial em relação ao histórico.

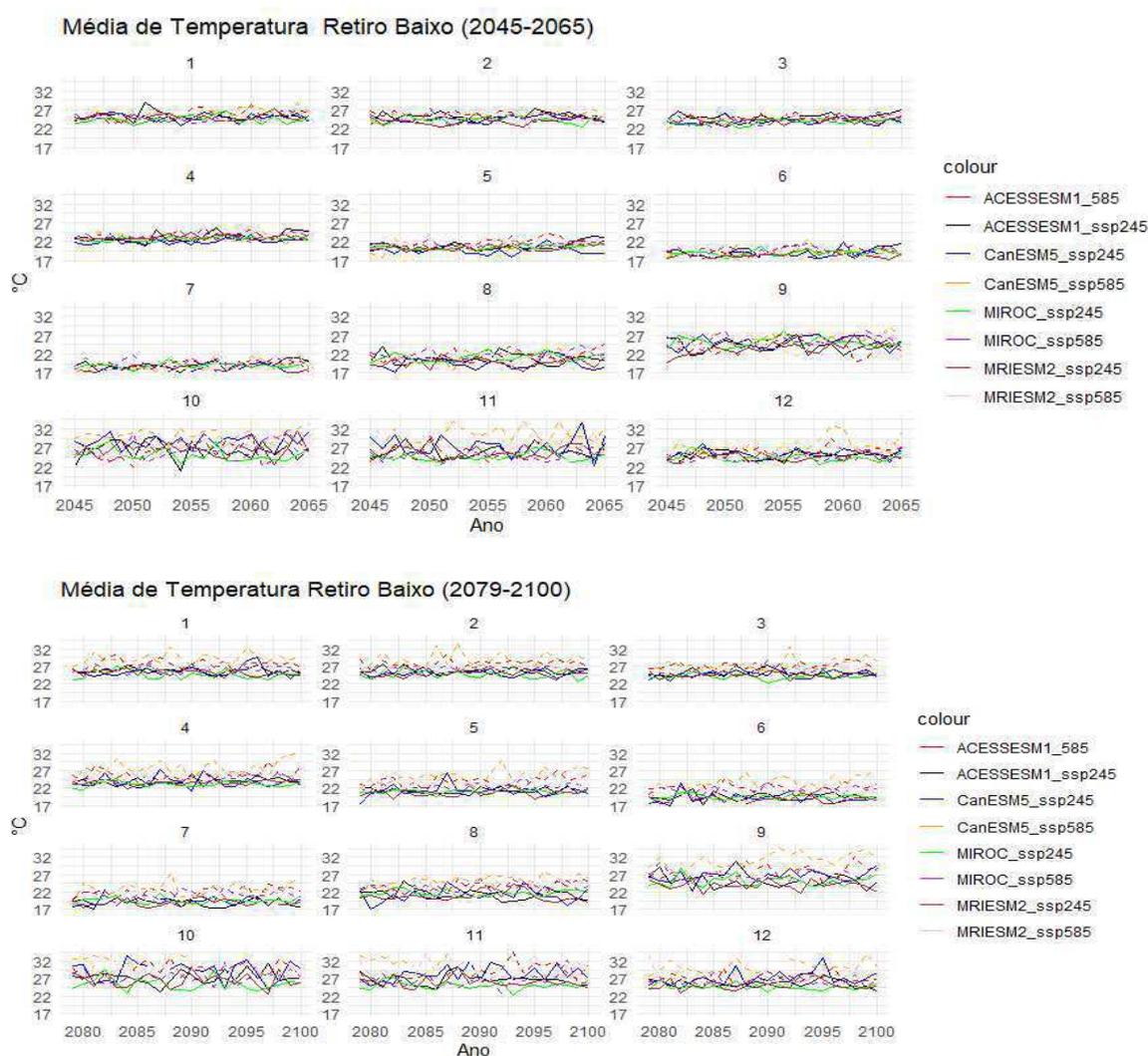
No período subsequente, de 2045 a 2065, os cenários de altas emissões atmosféricas também registraram valores elevados de temperatura. Esta fase apresentou médias de temperatura mais altas do que a anterior, com destaque para temperaturas ainda mais elevadas nos meses de setembro a março. As temperaturas médias mensais variaram entre 17°C e 31°C. No último intervalo de tempo analisado, entre 2079 e 2100, os modelos projetam cenários com temperaturas ainda mais elevadas, com médias variando de 17°C a 32°C. Essa etapa

revelou uma maior variação nos extremos de temperatura e uma tendência ainda mais positiva de aumento ao longo do tempo.



**Figura 4** - Média de temperatura do histórico dos modelos em Retiro Baixo nos meses de janeiro a dezembro (1990 a 2014).



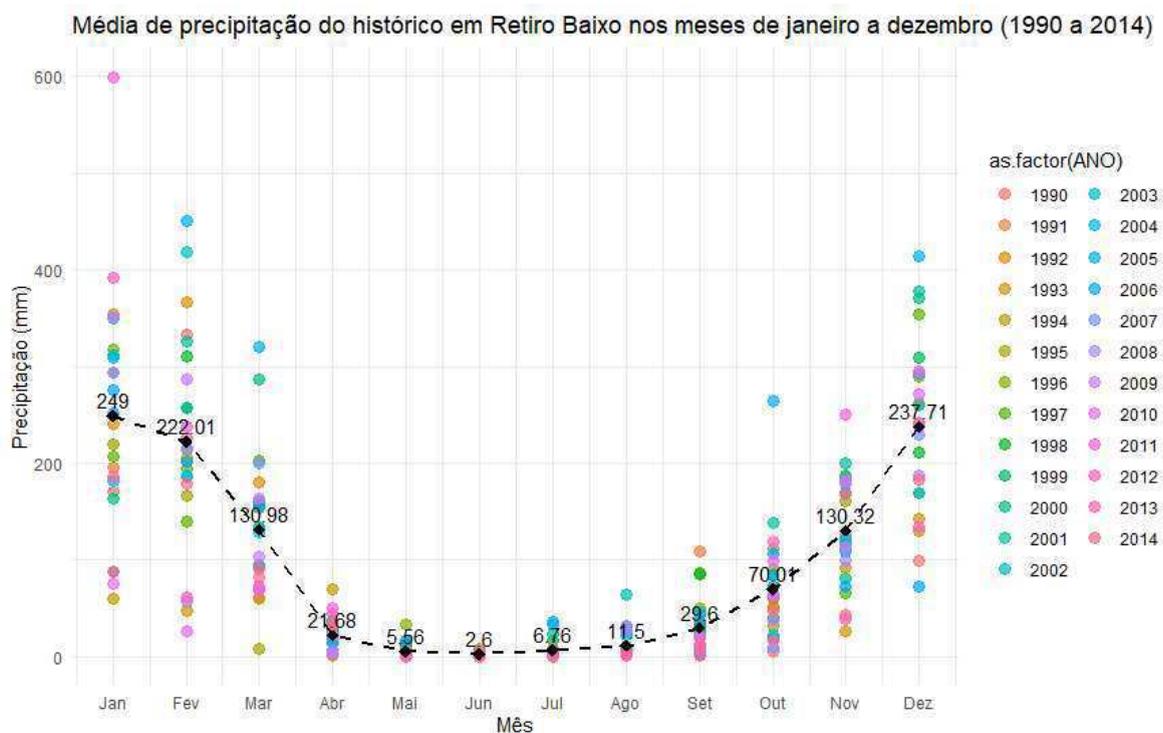


**Figura 5** - Temperatura média dos cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 para os modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 na sub-bacia de Retiro Baixo, para as faixas temporais de 2015-2035, 2045-2065 e 2079-2100.

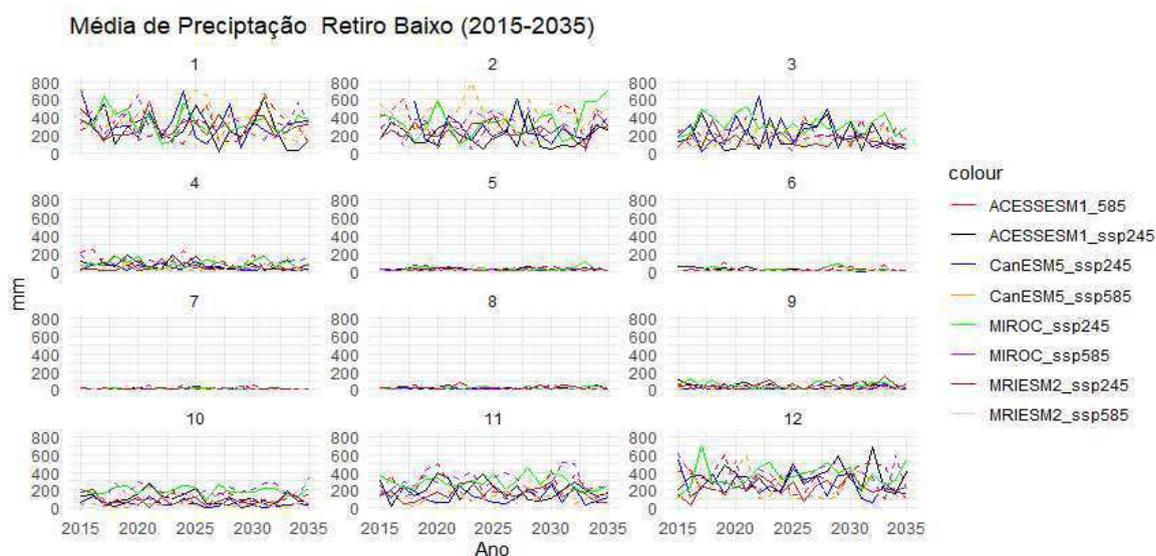
Quanto à precipitação, os registros dos modelos referentes aos anos de 1990 a 2014 indicam um período chuvoso de novembro a março e um período seco de abril a outubro. As variações observadas incluem 249 mm no mês de janeiro, representando a maior precipitação, e 2,6 mm em junho, que registra a menor precipitação em comparação com os demais meses.

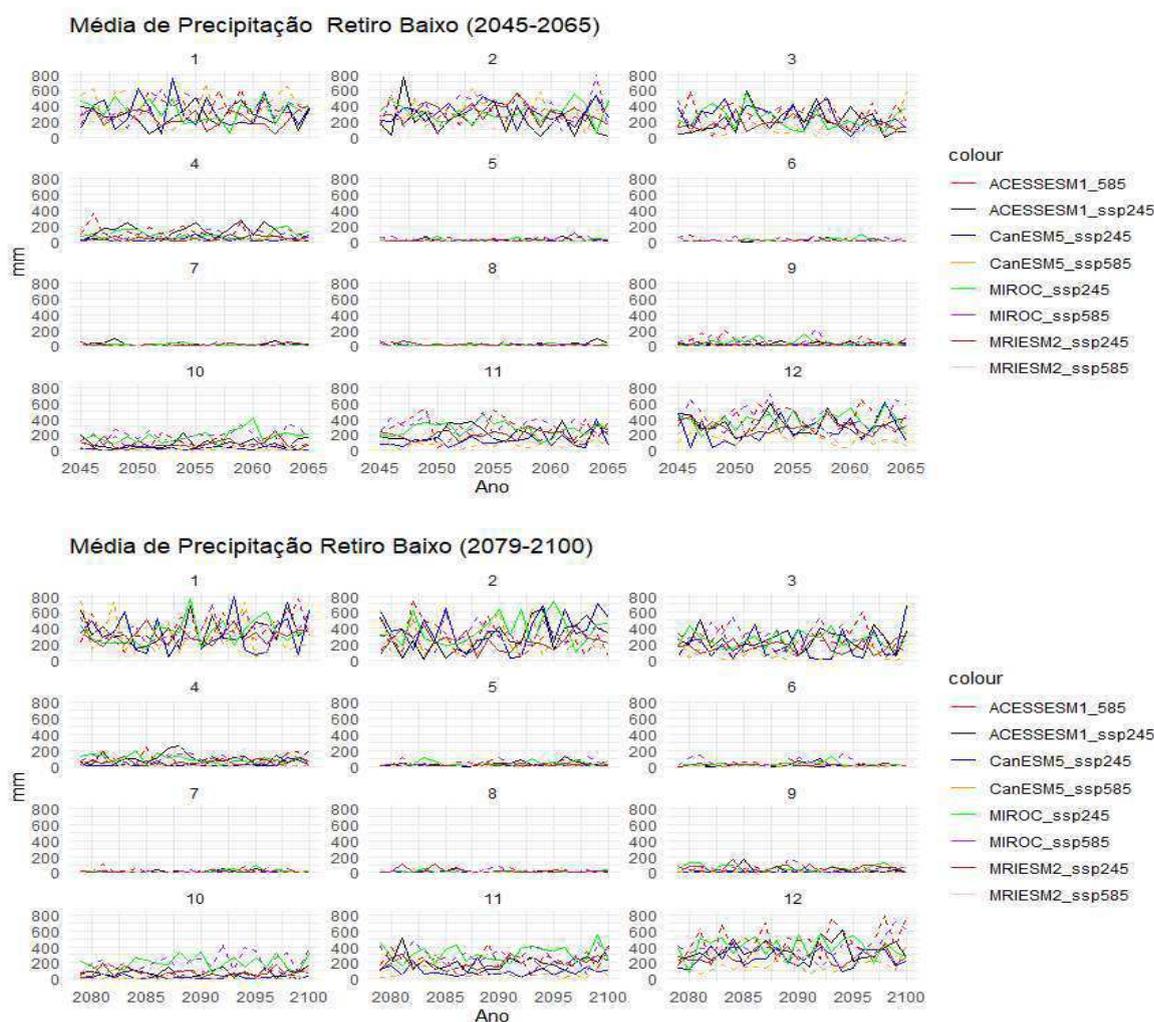
Já em relação ao período de 2015-2035; 2045-2065 e 2079-2100 os modelos apresentaram precipitações acima da média histórica de precipitação, especialmente nos meses de novembro a março. O cenário de emissão ssp5-8.5 projetam maiores valores de precipitação na região, pois as altas emissões pressupõem um aumento significativo na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, levando ao aquecimento global,

resultando em temperaturas mais altas, o aumento da temperatura aumenta também a evaporação da água, levando uma maior quantidade de vapor de água na atmosfera, que eventualmente se condensa e precipita.



**Figura 6** - Precipitação média dos históricos para os modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 na sub-bacia de Retiro Baixo, para a faixa temporal de 1990 a 2014.



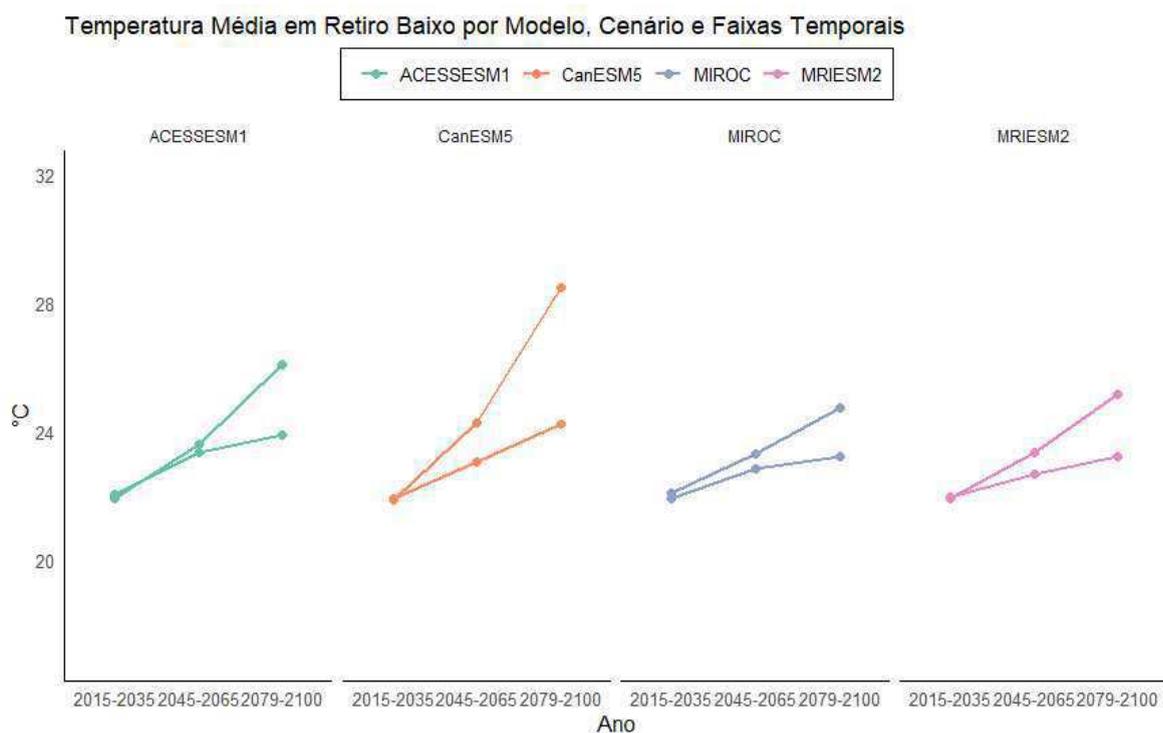


**Figura 7** - Precipitação média dos cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 para os modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 na sub-bacia de Retiro Baixo, para as faixas temporais de 2015-2035, 2045-2065 e 2079-2100.

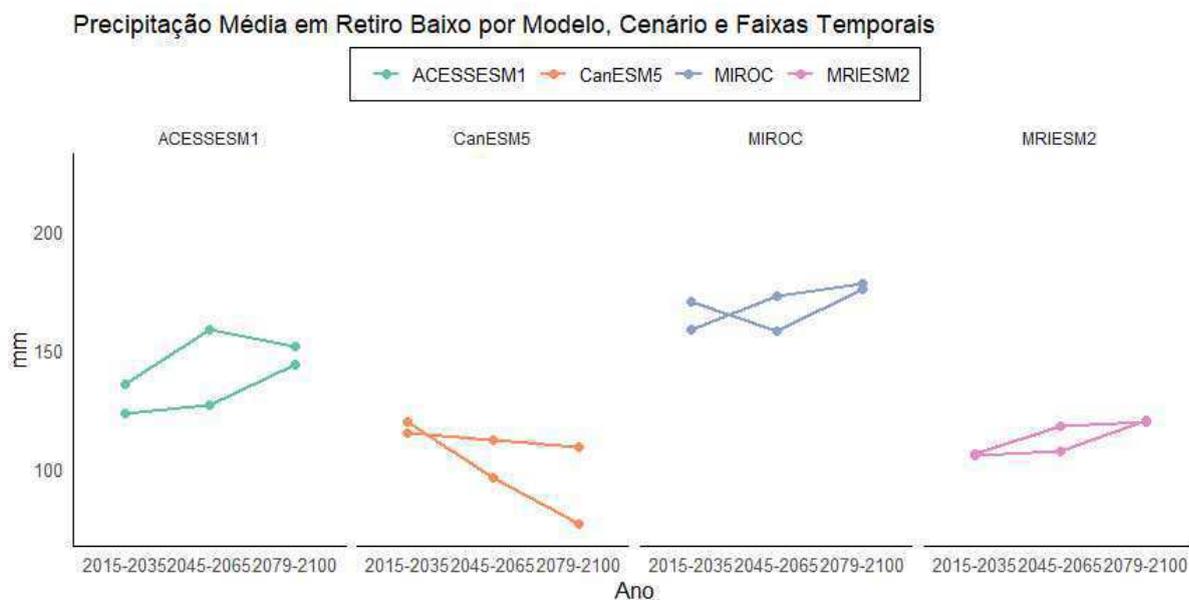
Na sub-bacia de Retiro Baixo, durante as faixas temporais de 2015-2035 e 2045-2065, observou-se um aumento na temperatura em todos os modelos climáticos, variando entre 1,5 a 2°C. No entanto, divergências foram identificadas em relação à precipitação: os modelos ACESSESM1 e MRIESM2 indicaram um aumento, enquanto os modelos MIROC6 e CanESM2 apontaram para uma redução de precipitação nesta região. As faixas temporais e modelos que analisam a evolução da temperatura média nos cenários de médias emissões (ssp2-4.5) e altas emissões (ssp5-8.5) revelam um panorama em que esses cenários têm um aumento notável nas temperaturas. Sob o SSP2-4.5, o crescimento térmico segue uma crescente. No cenário de altas emissões (SSP5-8.5), as temperaturas aumentam mais drasticamente, entre as faixas temporais de 2079-2100 são notados o maior pico de alta.

Entre as faixas temporais em (2015-2035; 2045-2065), o ACESSESM1 e o MRIESM2 apresentaram aumento nas precipitações em todos os cenários, em contrapartida, o MIROC apresentou elevação nas precipitações apenas em médias emissões e o CanESM5 ocorreu diminuição na precipitação em relação aos dois cenários.

A análise das faixas temporais e modelos em relação à precipitação média nos cenários de médias emissões (ssp2-4.5) e altas emissões (ssp5-8.5) destaca variações significativas nos volumes de precipitação. Entre 2079-2100, os modelos MIROC6 e MRIESM2 demonstraram um aumento notável nas quantidades de precipitação, especialmente sob condições de altas emissões. No entanto, os modelos CanESM5 e ACESSESM1 apresentaram uma tendência oposta, com uma diminuição nos volumes de precipitação durante o mesmo período nas altas emissões. Nas médias emissões, observou-se um aumento geral nos volumes de precipitação em todos os modelos durante a última faixa temporal, exceto no caso do CanESM5, que apresentou uma redução.



**Figura 8** - Faixas temporais e modelos de acordo com a temperatura média dos cenários de médias emissões (ssp2-4.5) e altas emissões (ssp5-8.5).



**Figura 9** - Faixas temporais e modelos de acordo com a precipitação média dos cenários de médias emissões (ssp2-4.5) e altas emissões (ssp5-8.5).

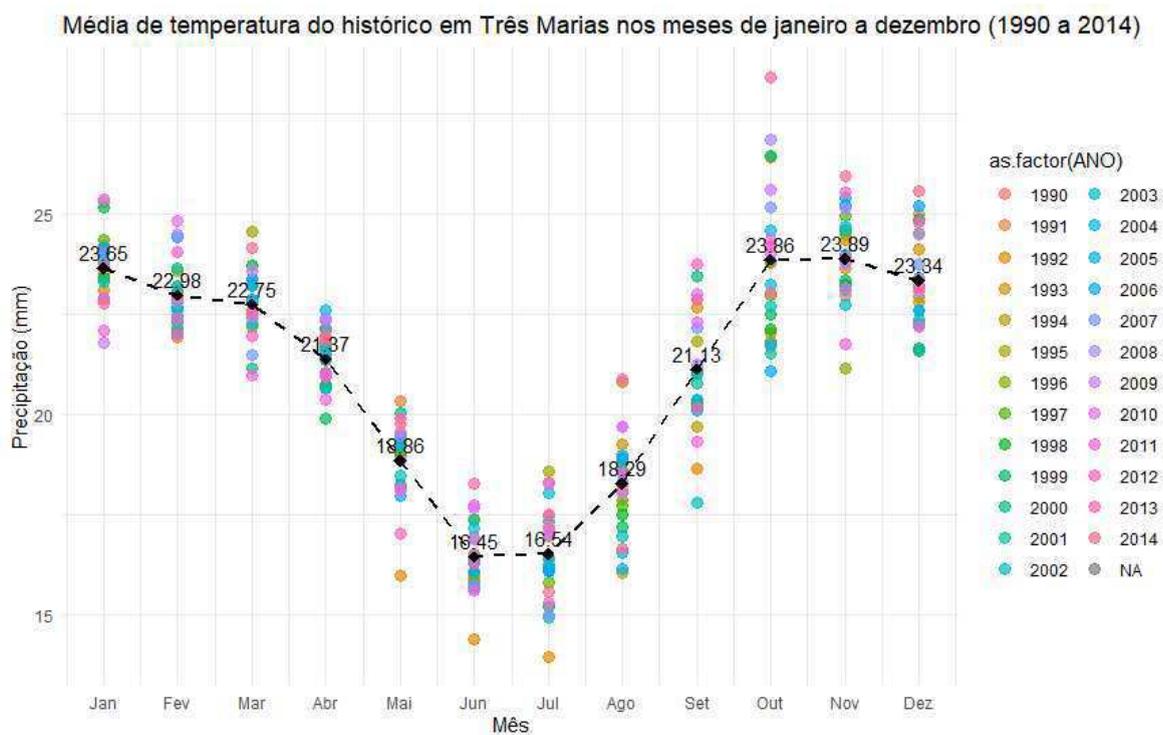
### 5.1.2 Climatologia na sub-bacia de Três Marias

No histórico (1990-2014), a temperatura média em Três Marias foi de 21,09°C, com um acumulado de precipitação anual de 1038,38 mm. Entretanto, ao compararmos esses valores com o cenário ssp2-4.5 para o período de 2015-2035, verificamos um aumento na temperatura média dos modelos para 21,97°C e um acréscimo na precipitação anual, totalizando 1193,56 mm, para o cenário ssp5-8.5 no período de 2015-2035 foi constatado a temperatura média de 21,95°C e 1176,82 mm de precipitação anual. No período de 2045-2065, sob o cenário ssp2-4.5, a temperatura média continuou subindo, atingindo 22,70°C.

Paralelamente, a precipitação anual também apresentou um significativo aumento, totalizando 1326,01 mm, em relação ao cenário ssp5-8.5, a temperatura média anual seguiu aumentando apresentando média de 23,16°C, a precipitação total anual foi de 1201,20 mm. Tais resultados apontam para um cenário futuro de aquecimento mais pronunciado e um aumento significativo na quantidade de chuvas em Três Marias.

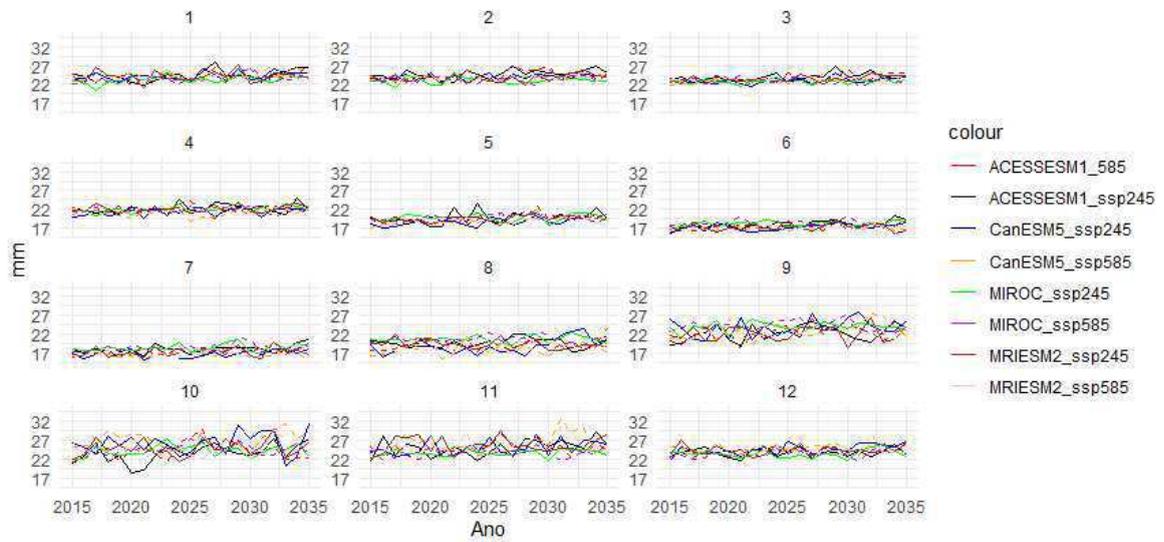
Ao projetarmos para o futuro distante, mais precisamente para o período de 2079-2100, no cenário ssp2-4.5, notamos uma temperatura média ainda mais elevada, alcançando 23,36°C. Além disso, a precipitação anual também experimentou um significativo aumento, totalizando 1339,61 mm, no cenário ssp5-8.5 para o mesmo período, obteve temperatura

média igual a 25,08°C e um aumento também na precipitação anual para 1382,40 mm. As diferenças observadas nesses resultados enfatizam a importância de considerar diversos cenários e períodos ao avaliar as mudanças climáticas na sub bacia de Três Marias.

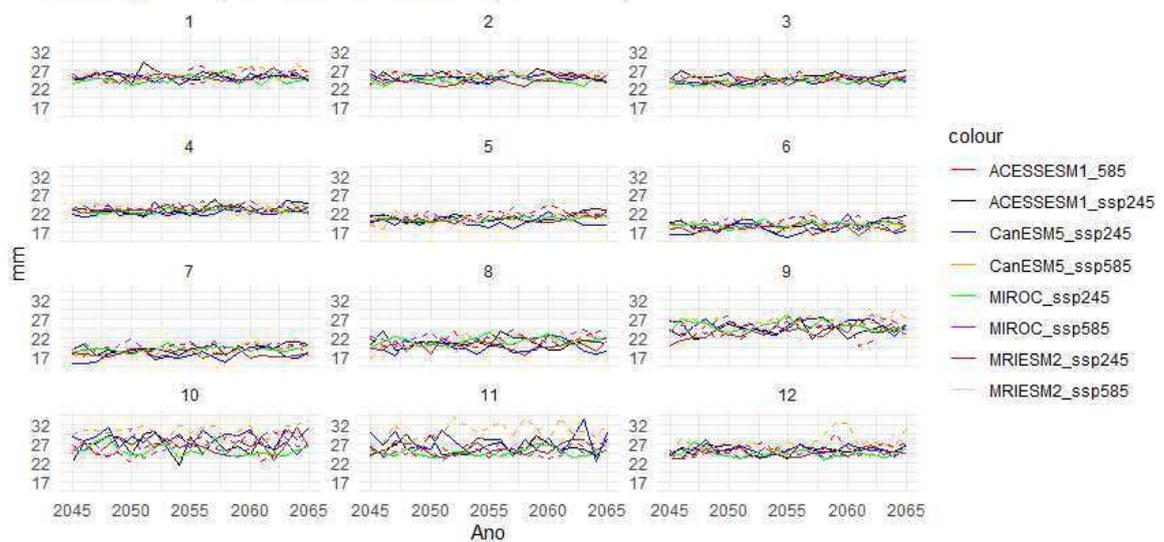


**Figura 10** - Média de temperatura do histórico dos modelos em Três Marias nos meses de janeiro a dezembro (1990 a 2014).

### Média de Temperatura em Três Marias (2015-2035)

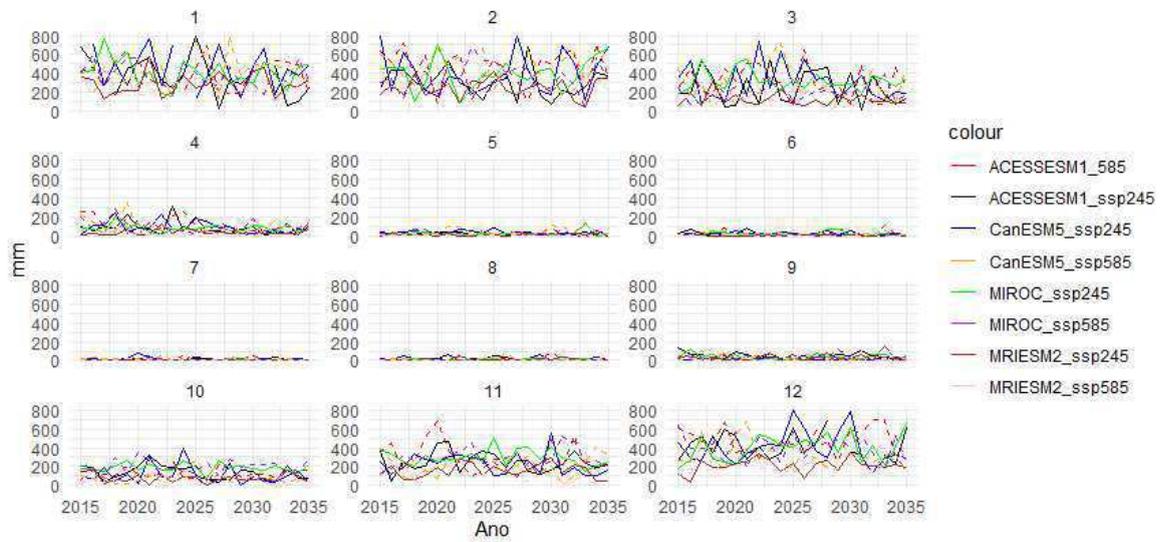


### Média de Temperatura em Três Marias (2045-2065)

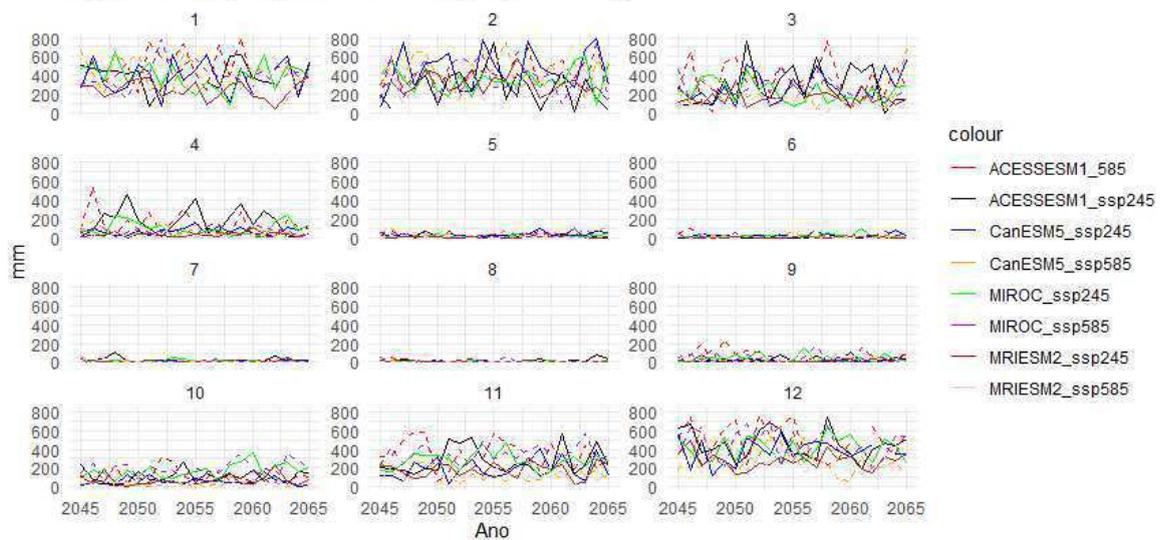


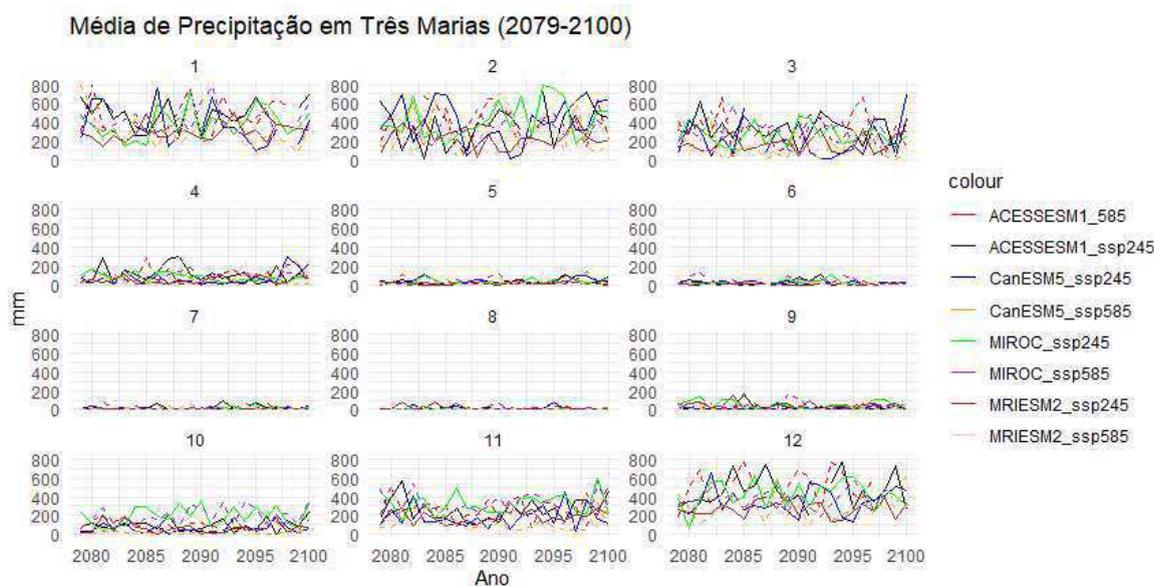


### Média de Precipitação em Três Marias (2015-2035)



### Média de Precipitação em Três Marias (2045-2065)





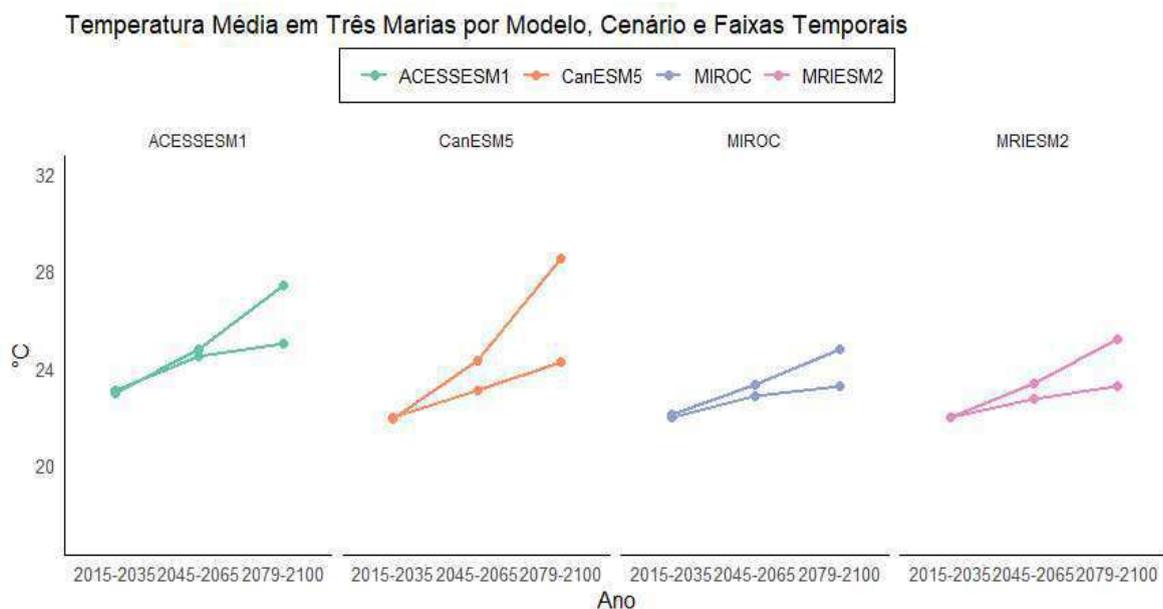
**Figura 13** - Precipitação média dos cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 para os modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 na sub-bacia de Retiro Baixo, para as faixas temporais de 2015-2035, 2045-2065 e 2079-2100.

Na região de Três Marias, entre os anos de 2015-2035 e 2045-2065, os modelos climáticos ACESSESM1 e MRIESM2 indicaram um aumento na precipitação. Por outro lado, os modelos MIROC6 e CanESM2 apontaram para uma redução de precipitação nessa sub-bacia, assim como em Retiro Baixo. Todos os modelos, no entanto, apresentaram um consenso em relação ao aumento da temperatura.

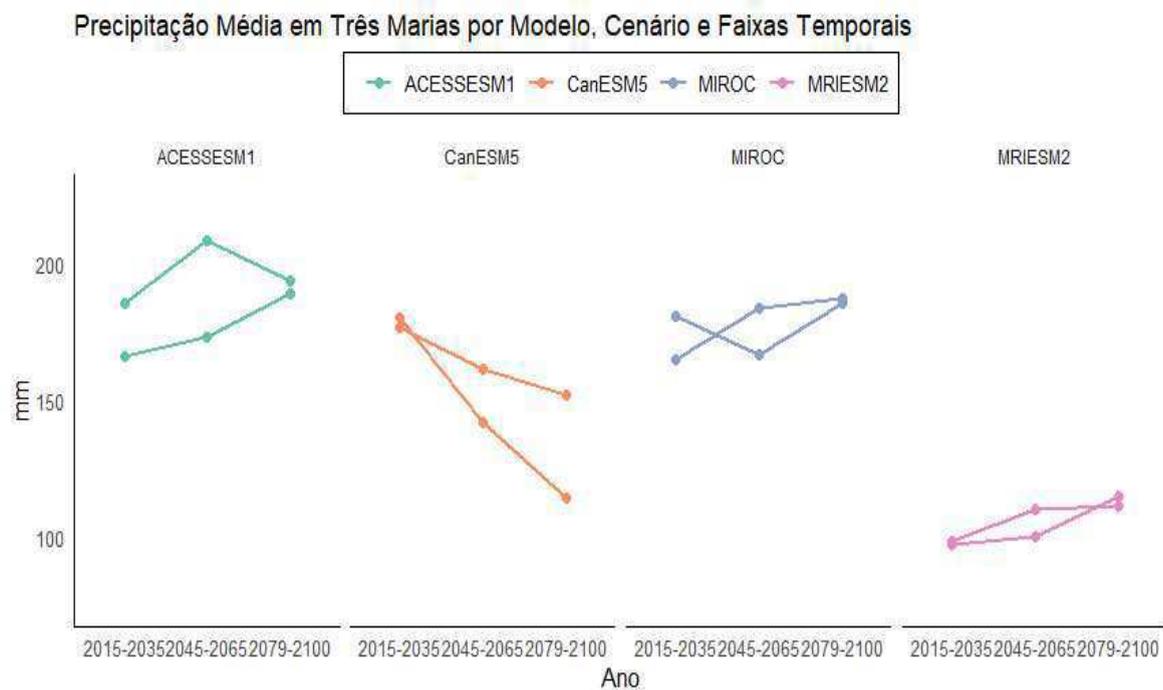
Na análise dos cenários de emissões SSP2-4.5 e SSP5-8.5 há aumento significativo nas temperaturas. Tanto no cenário de médias emissões (ssp2-4.5) quanto no cenário de altas emissões (ssp5-8.5).

Nas faixas temporais de 2079 a 2100, ao analisar a precipitação média nos cenários de médias emissões (ssp2-4.5) e altas emissões (ssp5-8.5), observa-se um padrão no qual em altas emissões, apenas o modelo MIROC6 demonstrou aumento na curva de precipitação, sugerindo comportamento específico nesse cenário.

Contrastando com isso, nos cenários de médias emissões, as precipitações foram consistentemente aumentando. No entanto, vale ressaltar uma exceção: o modelo CanESM5, que apresentou diminuição na precipitação.



**Figura 14** - Faixas temporais e modelos de acordo com a temperatura média dos cenários de médias emissões (ssp2-4.5) e altas emissões (ssp5-8.5).



**Figura 15** - Faixas temporais e modelos de acordo com a precipitação média dos cenários de médias emissões (ssp2-4.5) e altas emissões (ssp5-8.5).

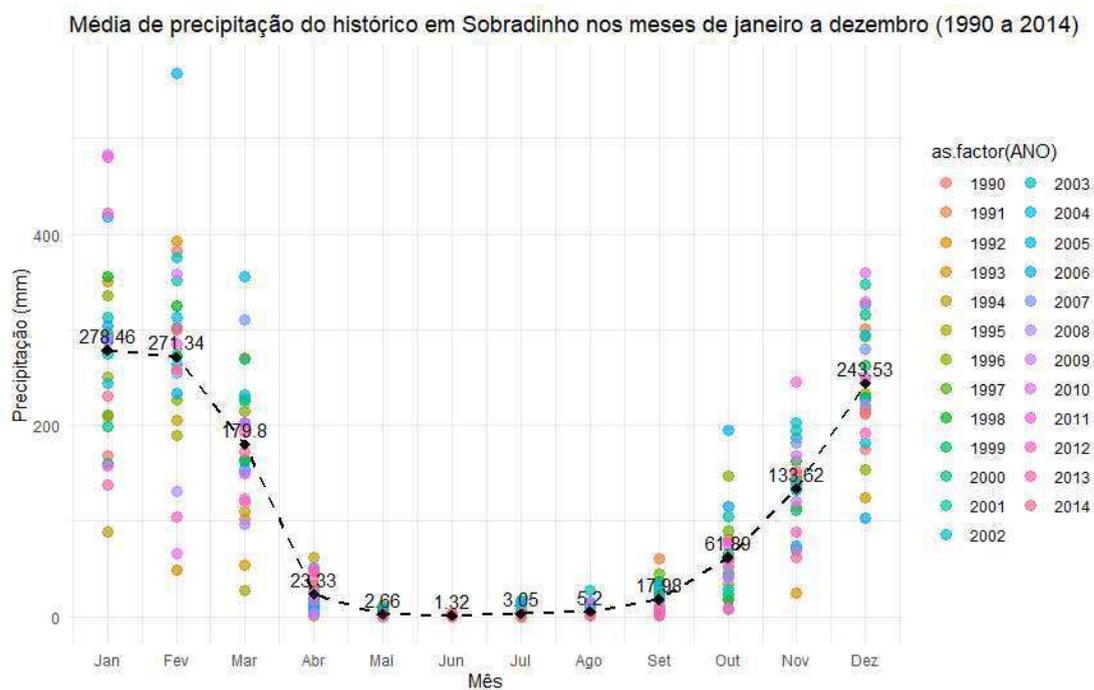
### 5.1.3 Climatologia na sub-bacia de Sobradinho

A análise do histórico e dos dois cenários climatológicos revela notáveis variações nos resultados da temperatura média e da precipitação anual na sub-bacia de Sobradinho. No histórico entre 1990-2014 dos modelos a temperatura média foi de 23,5°C e a precipitação anual foi de 1222,18 mm.

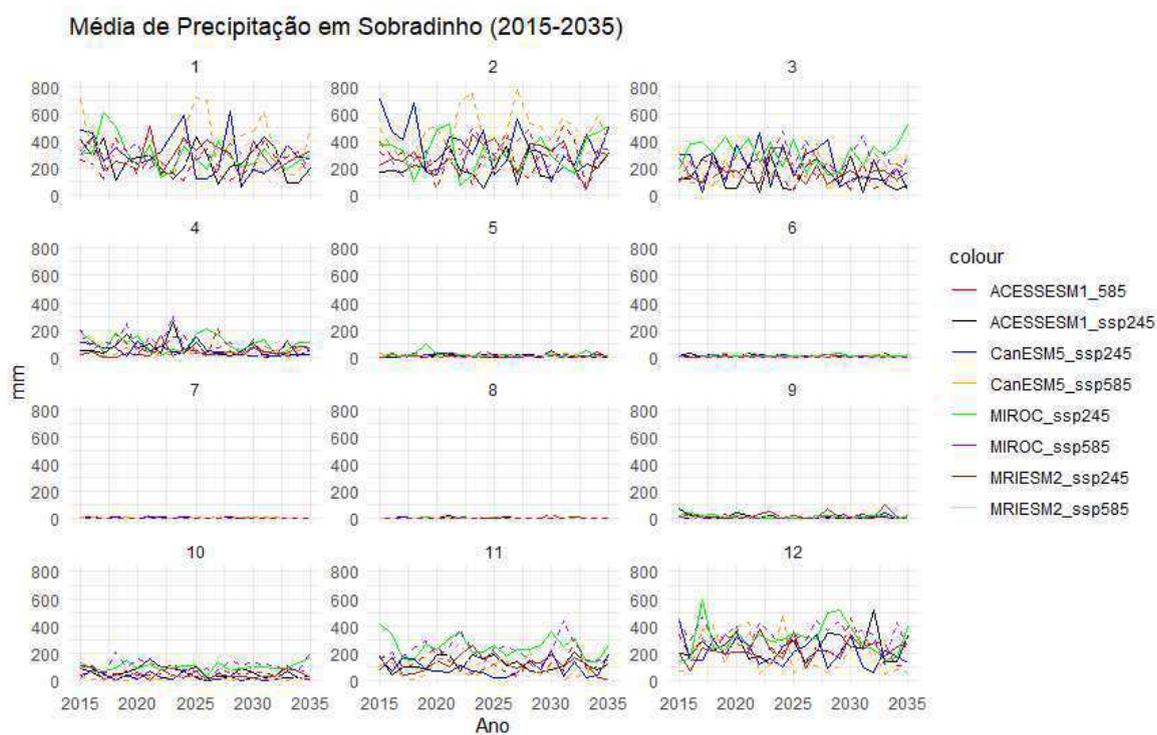
Ao considerarmos o cenário ssp2-4.5 para o período de 2015-2035, verificamos um aumento significativo na temperatura média, alcançando 26,17°C, enquanto a precipitação anual sofreu uma redução para 1070,66 mm. No mesmo período, no cenário ssp5-8.5, a temperatura média também registrou um aumento para 26,21°C, e a precipitação anual apresentou uma diminuição para 1038,62 mm, essas médias foram de todos os quatro modelos (ACESSES1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2).

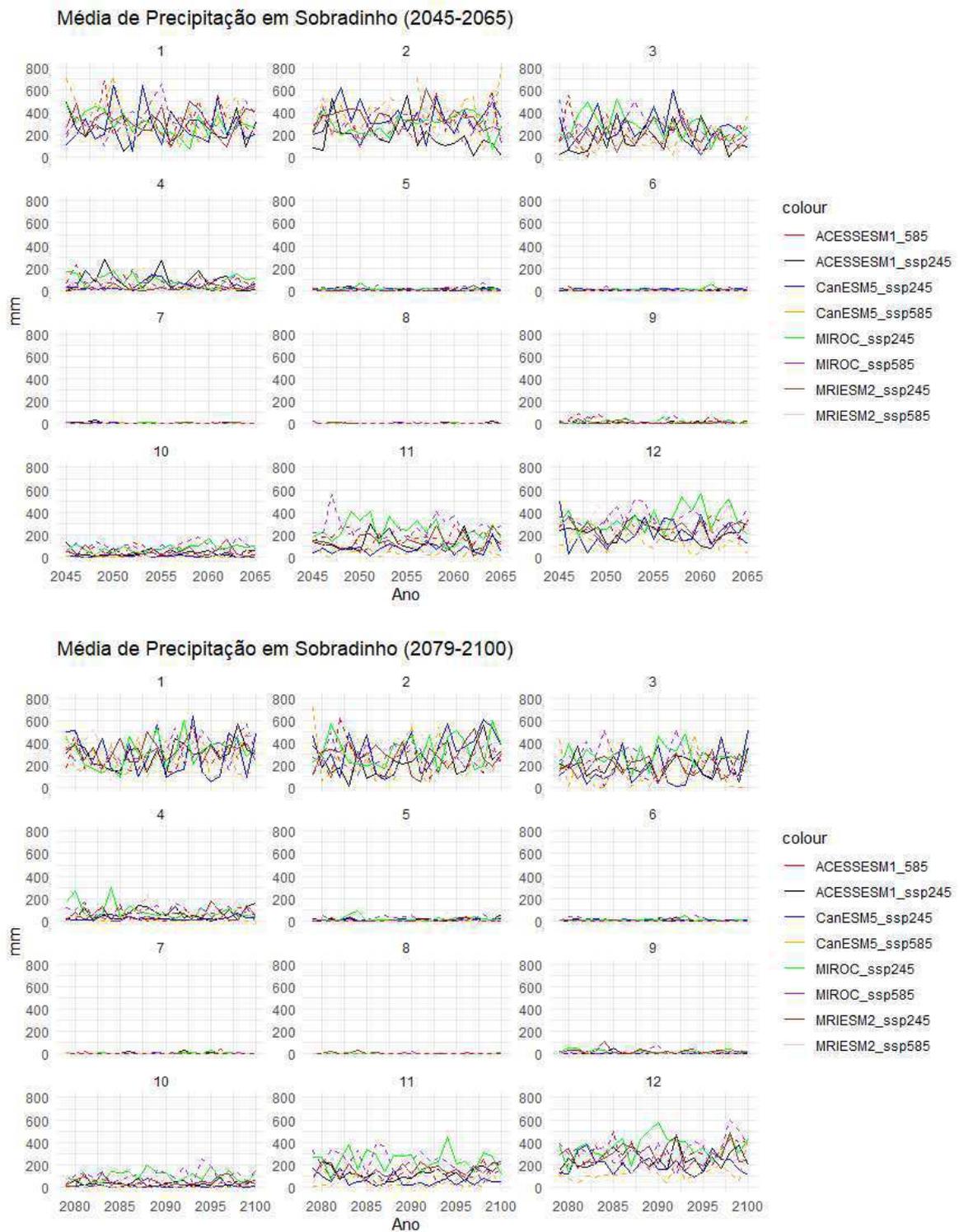
Prosseguindo com as análises de precipitação e temperatura, no cenário de médias emissões de CO<sub>2</sub>, representado pelo ssp2-4.5 para o período de 2045-2065, a temperatura média continuou subindo, atingindo 26,96°C, e a precipitação anual aumentou em relação à faixa de 2015-2035, totalizando 1202,18 mm. Enquanto isso, no cenário de maior emissão de CO<sub>2</sub>, ssp5-8.5, houve um aumento na temperatura média, chegando a 27,43°C, com uma precipitação anual de 1156,72 mm.

No período de 2079-2100, foi apresentado um aumento ainda mais expressivo na temperatura média para ambos os cenários. O cenário ssp2-4.5 revelou uma temperatura média de 27,46°C, enquanto o spp5-8.5 mostrou uma temperatura média de 29,08°C. Em relação à precipitação anual, o ssp2-4.5 registrou 1262,03 mm, e o ssp5-8.5 apresentou um valor ligeiramente superior, com 1284,01 mm. Esses resultados destacam um cenário de aquecimento contínuo ao longo do tempo, acompanhado de alterações na precipitação anual.

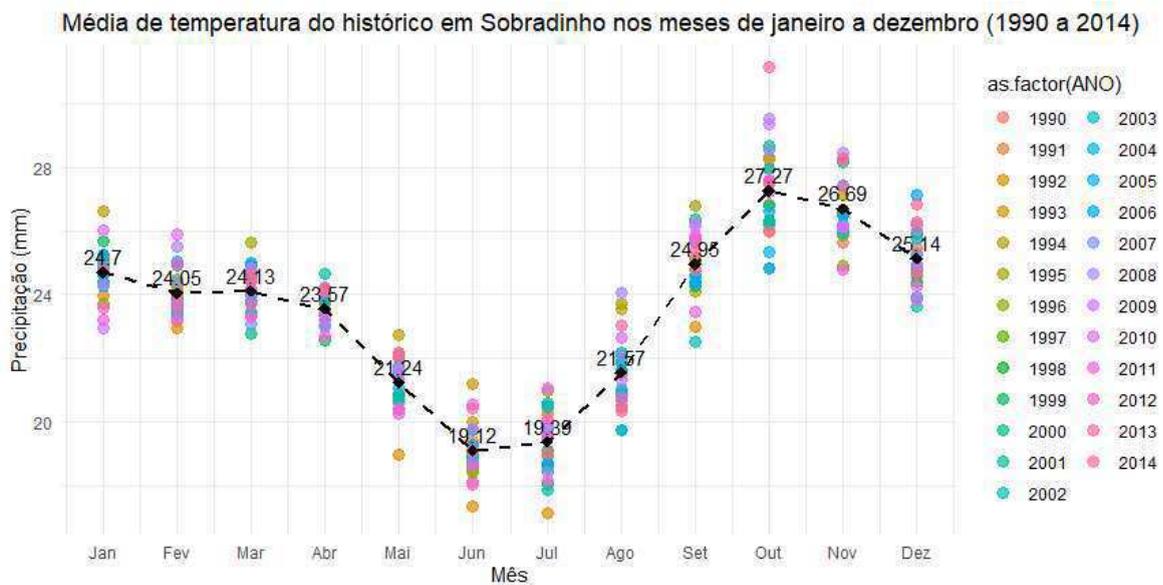


**Figura 16** - Média de precipitação do histórico dos modelos em Sobradinho nos meses de janeiro a dezembro (1990 a 2014).



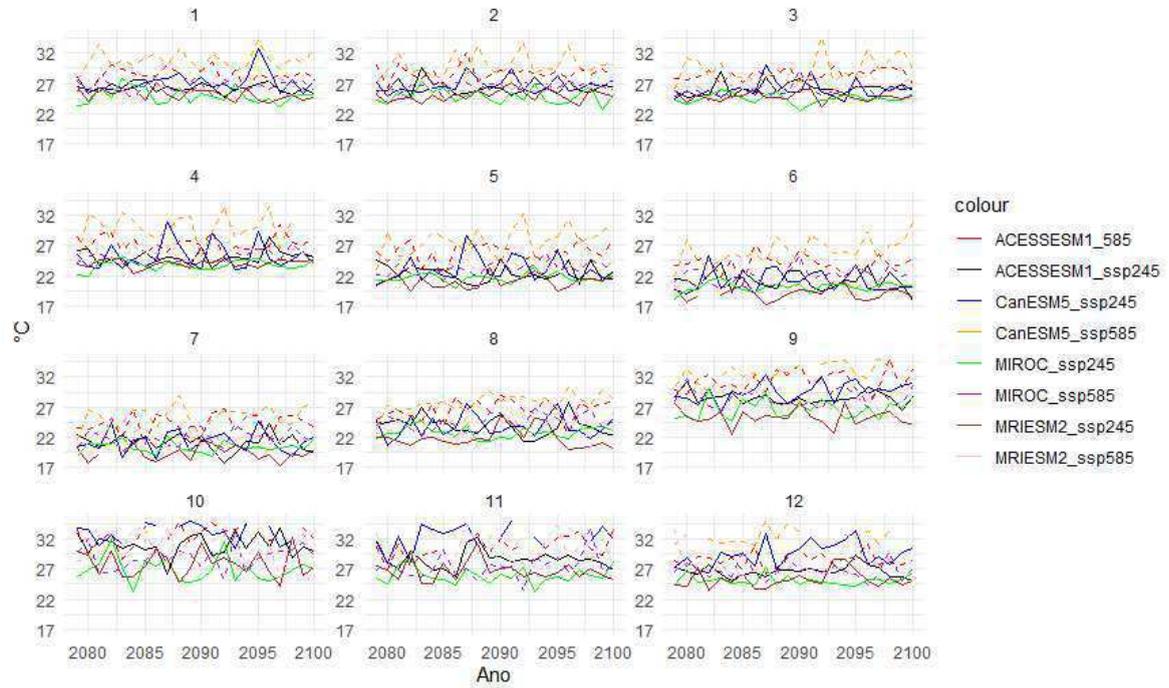


**Figura 17** - Precipitação média dos cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 para os modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 na sub-bacia de Sobradinho, para as faixas temporais de 2015-2035, 2045-2065 e 2079-2100.

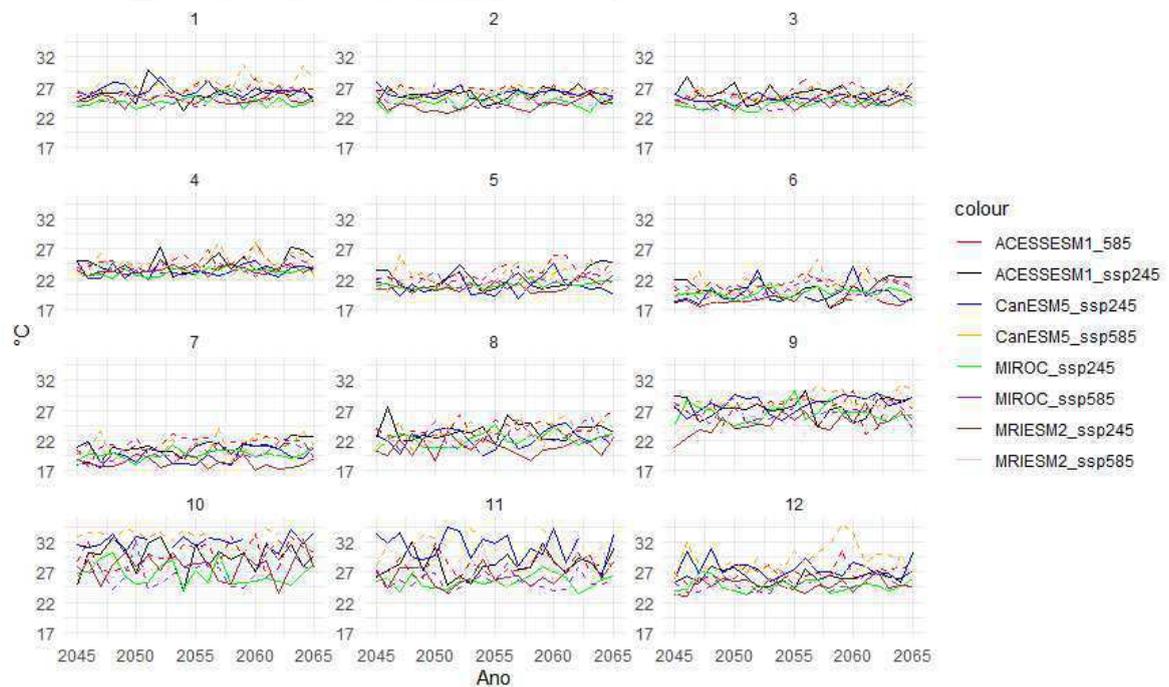


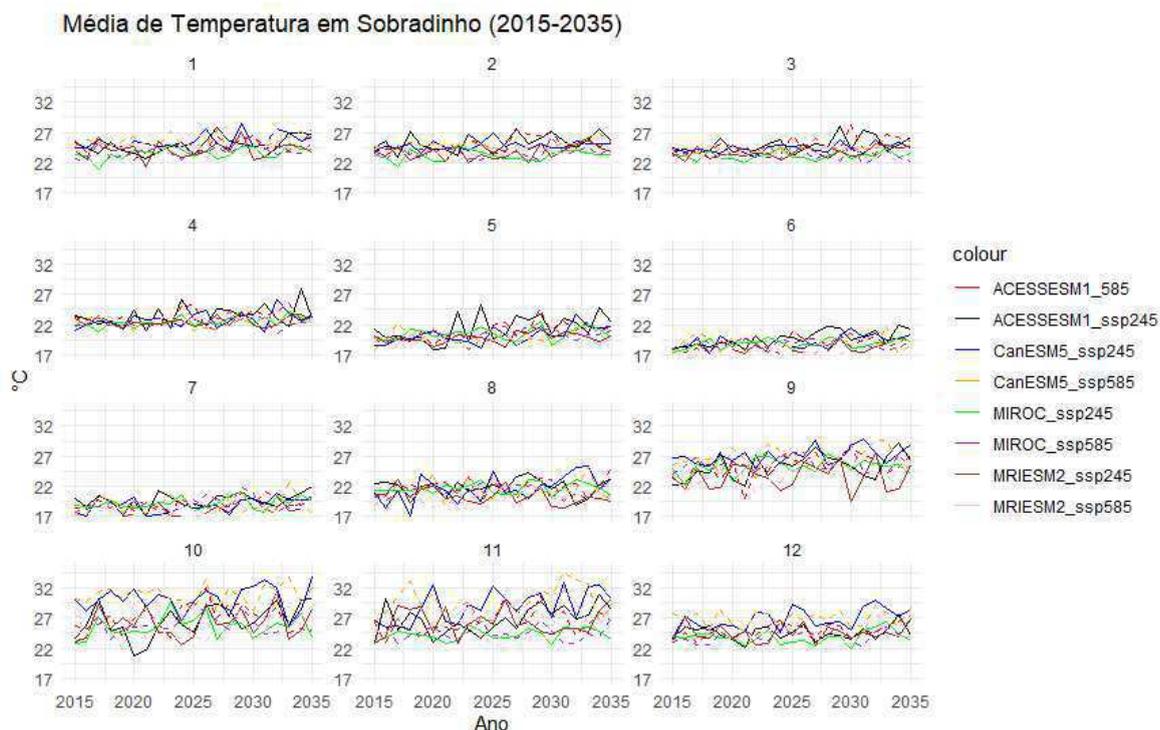
**Figura 18-** Média de temperatura do histórico dos modelos em Sobradinho nos meses de janeiro a dezembro (1990 a 2014).

Média de Temperatura em Sobradinho (2079-2100)



Média de Temperatura em Sobradinho (2045-2065)



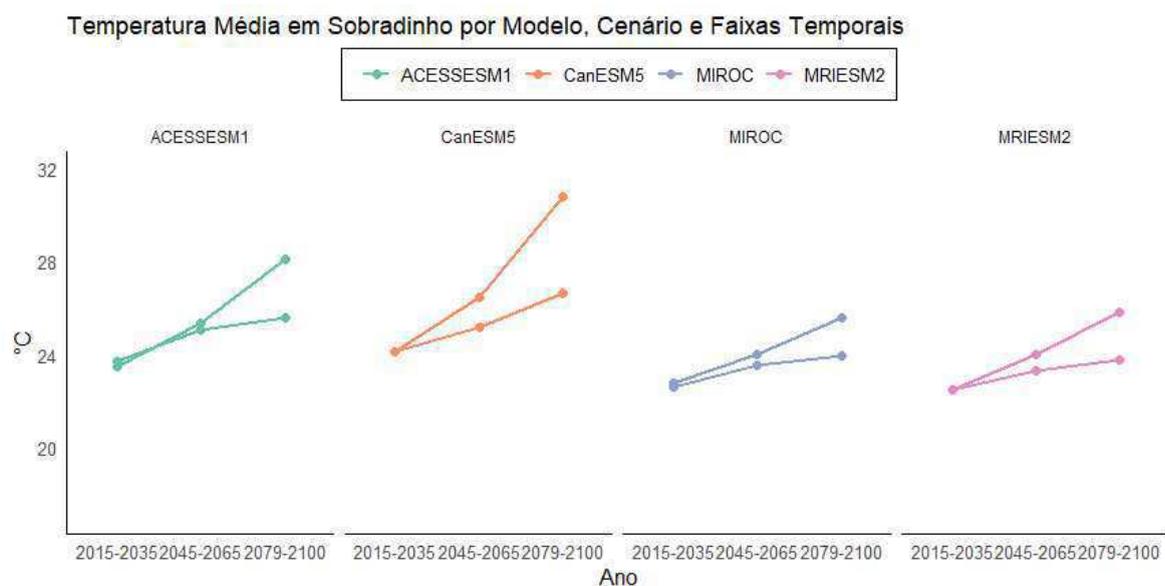


**Figura 19** - Temperatura média dos cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 para os modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 na sub-bacia de Sobradinho, para as faixas temporais de 2015-2035, 2045-2065 e 2079-2100.

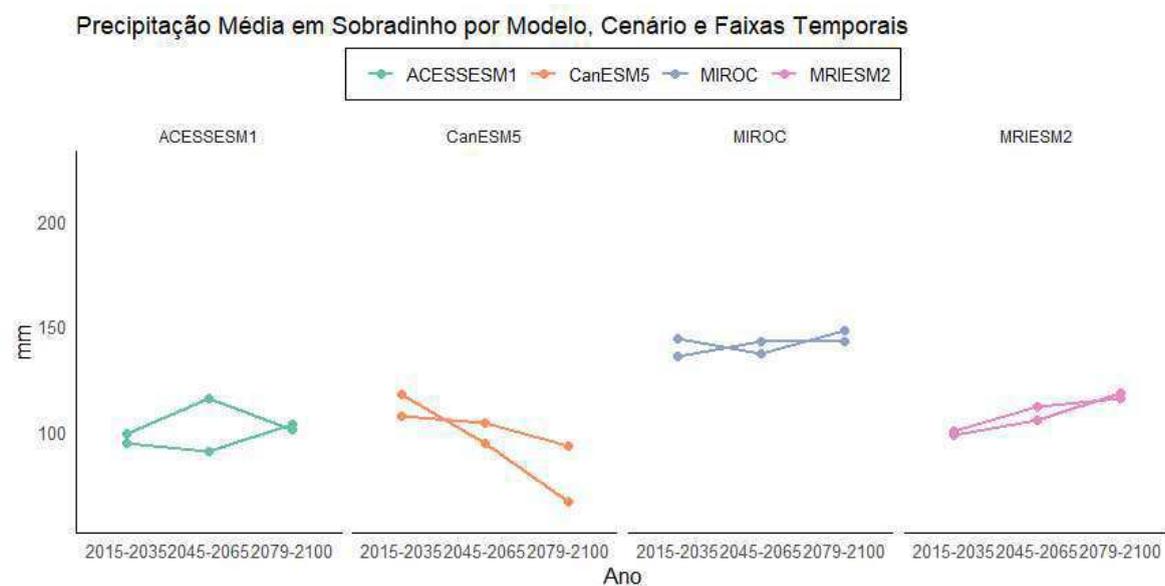
Nas faixas temporais e modelos nos cenários (ssp2-4.5) e (ssp5-8.5) em relação à temperatura média, observa-se que as maiores temperaturas ocorreram em ambos os cenários. Esse resultado sublinha a preocupação com o aumento das temperaturas em cenários futuros na sub-bacia de sobradinho, tendo um aumento entre os cenários de 2015-2035 e 2045-2065, assim como aconteceu em Retiro Baixo e Três Marias, entretanto Sobradinho têm temperaturas mais elevadas, com o regime de precipitação menor que Retiro Baixo e Três Marias, variando entre 0 a 150 mm pelas médias mensais anuais.

No contexto das médias emissões (ssp2-4.5), todos os modelos analisados mostraram um aumento na precipitação na faixa temporal entre 2079-2100, com uma única exceção: o modelo CanESM5, que apresentou uma diminuição.

Em divergência, nos cenários de altas emissões (ssp5-8.5), observou-se um padrão oposto. Todos os modelos indicaram uma diminuição nas precipitações durante o mesmo período, ressaltando a divergência nas projeções climáticas em condições de altas emissões.



**Figura 20** - Faixas temporais e modelos de acordo com a temperatura média dos cenários de médias emissões (ssp2-4.5) e altas emissões (ssp5-8.5).



**Figura 21** - Faixas temporais e modelos de acordo com a precipitação média dos cenários de médias emissões (ssp2-4.5) e altas emissões (ssp5-8.5).

## 5.2 BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO

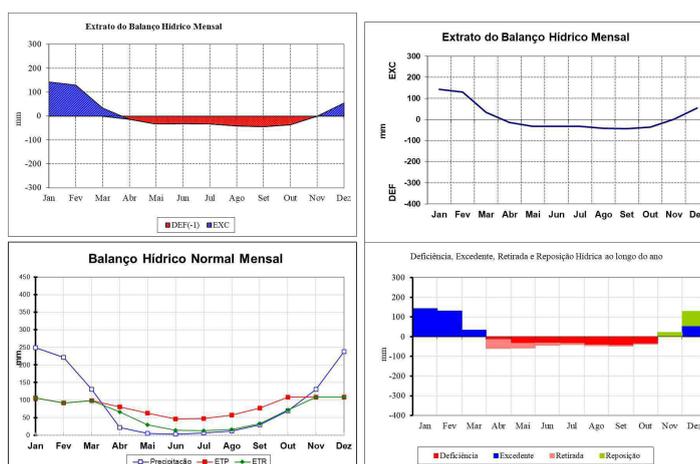
### 5.2.1 Balanço hídrico climatológico na sub-bacia de Retiro Baixo

A evapotranspiração da sub-bacia de Retiro Baixo no histórico de 1990-2014 foi de 974 mm, obtendo o menor valor em relação aos cenários “ssp2-4.5” e “ssp5-8.5”. No cenário “ssp2-4.5” no período entre 2015-2035 a evapotranspiração foi de 1077,04 mm, compensatoriamente na faixa temporal seguintes a evapotranspiração aumentou para 1126,55 mm, entre 2045-2065, e diminuiu para o período de 2079-2100 obtendo o valor de 1073 mm. Já no cenário “ssp5-8.5” a evapotranspiração foi de: 1072 mm, 1216 mm e 1451 mm para as faixas temporais de 2015-2035, 2045-2065 e 2079-2100, com isso, ocorre maiores excedentes hídricos pois quanto maior a evapotranspiração na área maior é o saldo de excedente hídrico na região.

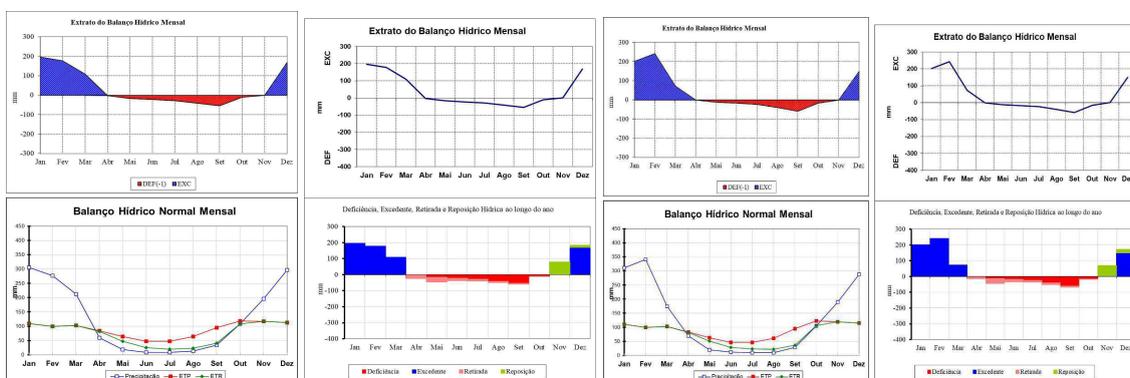
Ao comparar os cenários de déficits e excedentes hídricos na sub-bacia de Retiro Baixo, observamos que o cenário ssp5-8.5 apresenta excedente hídrico menor que o cenário “histórico” é o cenário ssp2-4.5. Enquanto o histórico registrou um déficit de 136,59 mm, o ssp2-4.5 para para o período de 2015-2035 registrou 176,49 mm, o ssp2-4.5 entre 2045-2065 registrou 232,40 mm e o ssp2-4.5 para o período 2079-2100 teve 166,87 mm. Em contraste, o ssp5-8.5 para o período de 2015-2035 teve 166,55 mm, o ssp5-8.5 na faixa temporal 2045-2065 teve 283,12 mm e o último cenário e a projeção futura (2079-2100) obteve 328,64 mm. Os cenários ssp2-4.5 tem o déficit hídrico total maior que o “histórico”, o cenário ssp5-8.5 apresenta déficit hídrico total aumentando ao longo dos anos, com o cenário ssp5-8.5 obtendo valores de 283,12 mm e 328,64 mm, entre as faixas temporais de “2045-2065” e “2079-2100”, entretanto, em um cenário mais recente o ssp2-4.5 apresenta um déficit maior que o ssp5-8.5, com o valor de 176,49 mm, por outro lado o ssp5-8.5 foi de 166,55 mm. Os períodos em que ocorrem déficits e excedentes são semelhantes entre os cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5, com déficits geralmente ocorrendo entre abril a outubro e excedentes entre novembro e março.

Conforme Melo (2022), no Alto São Francisco, onde está localizada a sub-bacia de Retiro Baixo, no qual foi observado por dados meteorológicos de temperatura e precipitação mensais de Xavier et al. (2015) em um período analisado de janeiro de 1980 até dezembro de 2016, observando a deficiência hídrica com início em abril e final em outubro, ocorreram

excedentes entre os meses de novembro a março. Assim como os modelos estão retratando, com um destaque para maiores excedentes hídricos ao decorrer dos anos no período chuvoso e maiores deficiências hídricas na estiagem.



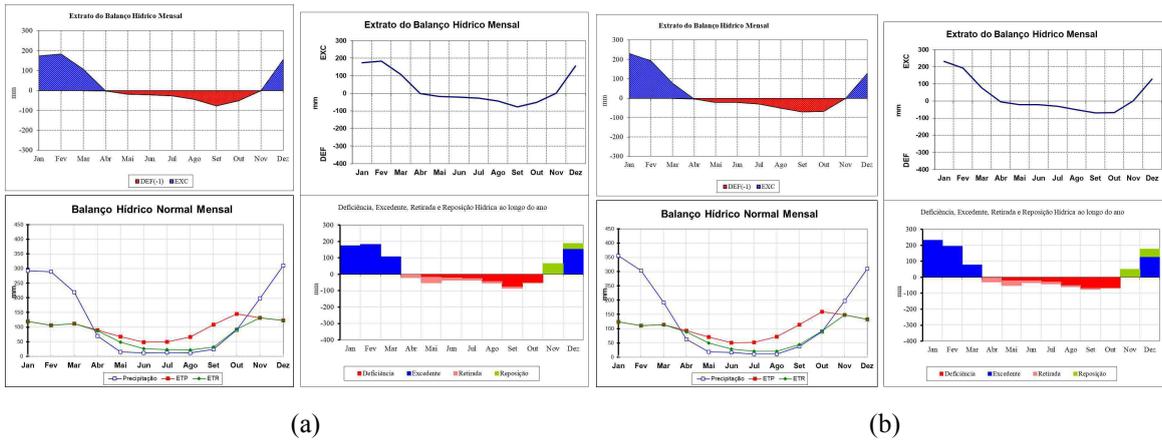
**Figura 22** - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Retiro Baixo, entre os anos de 1990 a 2014, da média dos modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2.



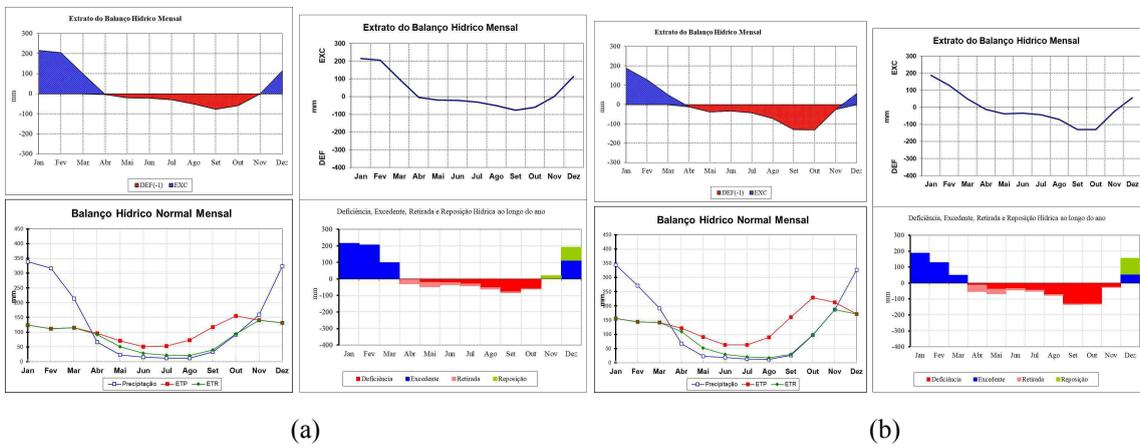
(a)

(b)

**Figura 23** - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Retiro Baixo, entre os anos de 2015 a 2035, da média dos modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 pelo cenário ssp2-4.5(a) e ssp5-8.5 (b).



**Figura 24** - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Retiro Baixo, entre os anos de 2045 a 2065 , da média dos modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2.



**Figura 25** - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Retiro Baixo, entre os anos de 2079 a 2100 , da média dos modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2.

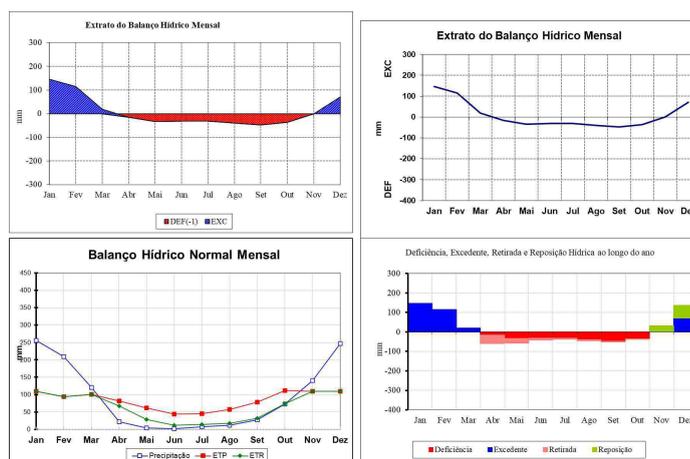
### 5.2.2 Balanço hídrico climatológico na sub-bacia de Três Marias

Analisando a evapotranspiração anual na sub-bacia de Três Marias durante o período histórico compreendido entre os anos de 1990 a 2014, destaca-se um valor significativo de 1026,91 mm. Em oposição, os cenários futuros ssp2-4.5 e ssp5-8.5 revelaram valores superiores ao histórico, destacando-se o cenário ssp5-8.5 no intervalo temporal entre 2079 e 2100, atingindo a marca de 1491 mm.

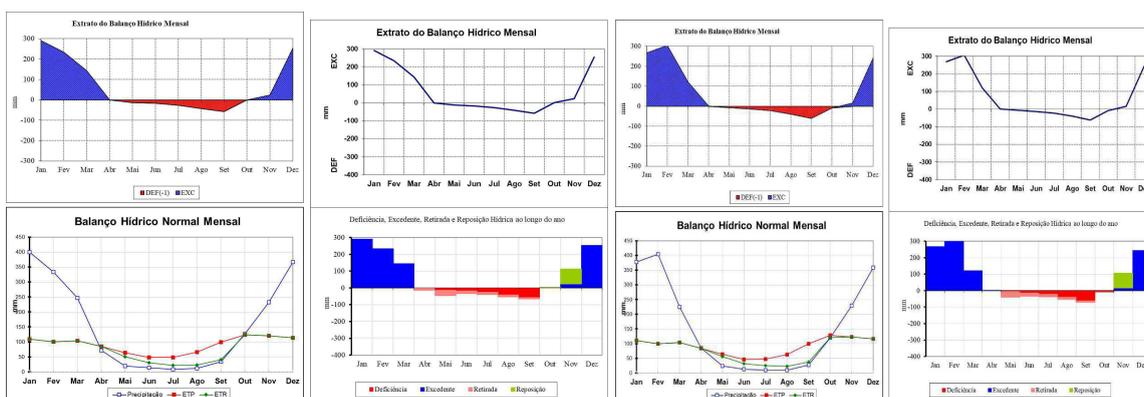
Ao examinar o balanço hídrico climatológico na sub-bacia, observa-se que o excedente hídrico no cenário ssp2-4.5 supera o histórico em todos os períodos avaliados. O excedente hídrico do histórico foi de 245,76 mm, enquanto nos períodos do ssp2-4.5, entre 2015 e 2035, registou um valor de 335,53 mm. Nas faixas de médio e longo prazo, os valores foram de 462,72 mm e 396,13 mm, respectivamente. Em contrapartida, o cenário ssp5-8.5 apresenta um excedente hídrico total maior que o histórico, mas menor que o cenário ssp2-4.5, com valores de 324,43 mm, 416,40 mm e 313,63 mm para os períodos de 2015-2035, 2045-2065 e 2079-2100, respectivamente.

No que diz respeito ao déficit hídrico, o total histórico foi de 234,29 mm. O cenário ssp5-8.5 revela um déficit hídrico total superior ao histórico e ao cenário ssp2-4.5 nos períodos de 2015-2035 e 2079-2100, com valores de 236,90 mm e 422,60 mm, respectivamente. Na faixa temporal de 2045-2065, o cenário ssp2-4.5 apresentou um déficit hídrico maior, com 298,35 mm, enquanto o ssp5-8.5 registrou 229,34 mm.

Assim como em Retiro Baixo, a sub-bacia de Três Marias apresentou aumento nos excedentes hídricos em comparação com o histórico (1990-2014), destacando a última faixa temporal (2079-2100) apresentando um aumento considerável no excedente hídrico da região (em torno de 200 mm a 300 mm) no período chuvoso da sub-bacia.



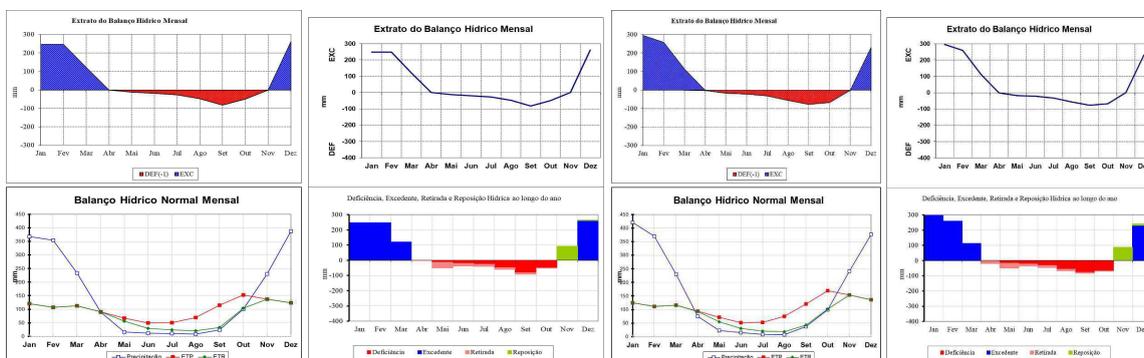
**Figura 26** - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Três Marias, entre os anos de 1990 a 2014, da média dos modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2.



(a)

(b)

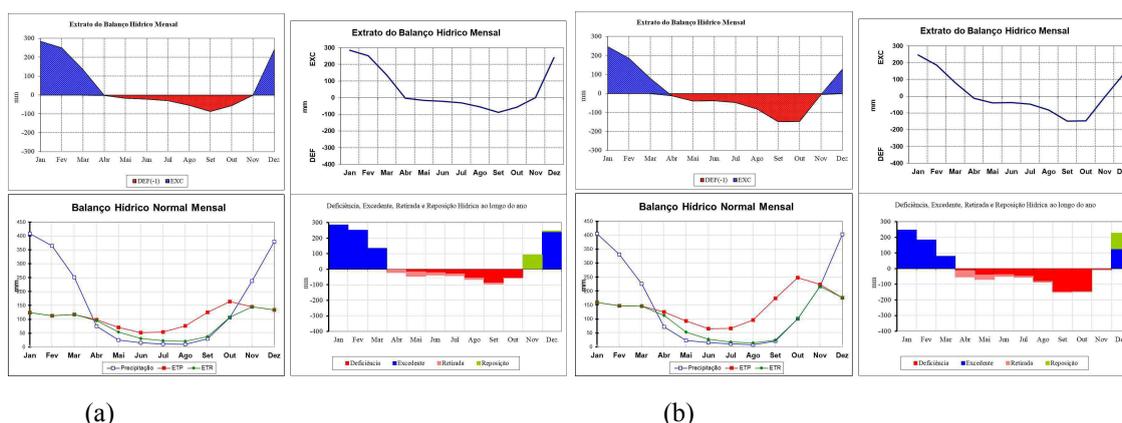
**Figura 27** - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Três Marias, entre os anos de 2015 a 2035, da média dos modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 pelo cenário ssp2-4.5(a) e ssp5-8.5 (b).



(a)

(b)

**Figura 28** - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Três Marias, entre os anos de 2045 a 2065, da média dos modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 pelo cenário ssp2-4.5(a) e ssp5-8.5 (b).



**Figura 29** - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de três marias, entre os anos de 2079 a 2100, da média dos modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 pelo cenário ssp2-4.5(a) e ssp5-8.5 (b).

### 5.2.3 Balanço hídrico climatológico na sub-bacia de Sobradinho

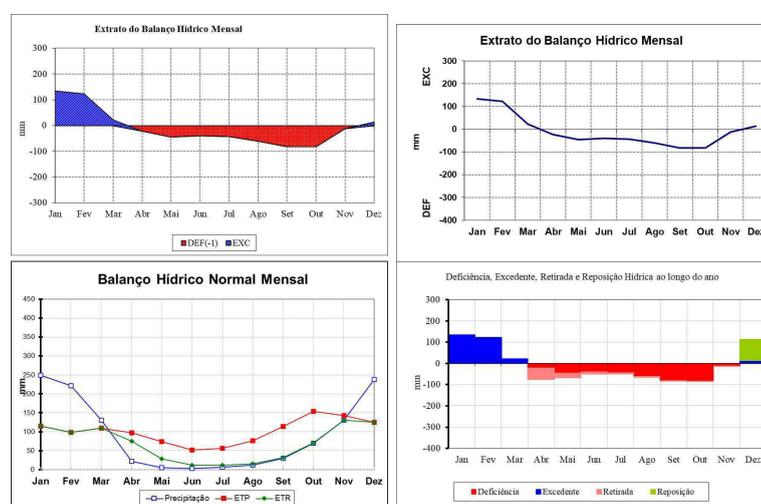
Analisando a sub-bacia de Sobradinho, considerando a média dos modelos, apresentou as mais expressivas taxas de evapotranspiração anual durante o período histórico de 1990 a 2014, atingindo a notável marca de 1309,39 mm. Em contraste, os cenários futuros ssp2-4.5 e ssp5-8.5, também derivados da média dos modelos, exibem variações notáveis nessas taxas em diferentes períodos. O cenário ssp2-4.5 revela valores de 1654,54 mm, 1840,54 mm e 1973,11 mm para as faixas temporais de 2015-2035, 2045-2065 e 2079-2100, respectivamente. Enquanto isso, o cenário ssp5-8.5 registra as taxas mais elevadas, atingindo 1656 mm, 1962 mm e 2604 mm nos mesmos períodos, evidenciando um déficit hídrico mais pronunciado em comparação com outras sub-bacias.

Ao realizar uma análise mais aprofundada das métricas de déficit e excedente hídrico nos cenários "histórico", "ssp2-4.5" e "ssp5-8.5" dos modelos, destacam-se variações significativas. Correlacionando os cenários em relação ao déficit hídrico dos cenários do ssp5-8.5 entre os anos de 2079-2100 superando todos as margens de déficits das outras regiões, projetando um período ainda mais seco na região.

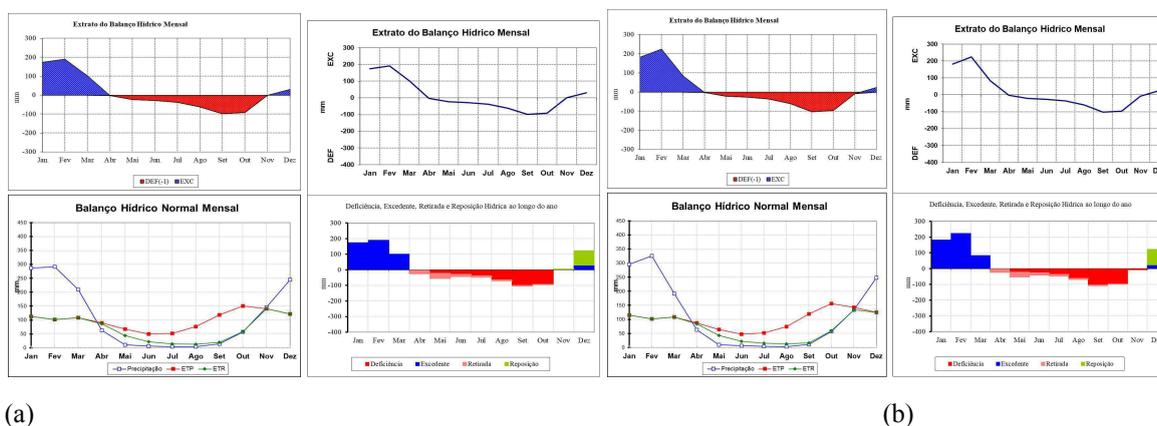
Em resumo, as disparidades entre os cenários são evidentes, e o cenário ssp5-8.5 se destaca com um déficit hídrico mais acentuado e um excedente hídrico menor em comparação com todos os cenários analisados, indicando desafios significativos em termos de disponibilidade hídrica para o futuro. Essa análise minuciosa sublinha a complexidade das projeções climáticas e destaca a necessidade de estratégias adaptativas diante das variações

nas condições hidrológicas na sub-bacia de Sobradinho, ressaltando a importância de uma abordagem sustentável e resiliente.

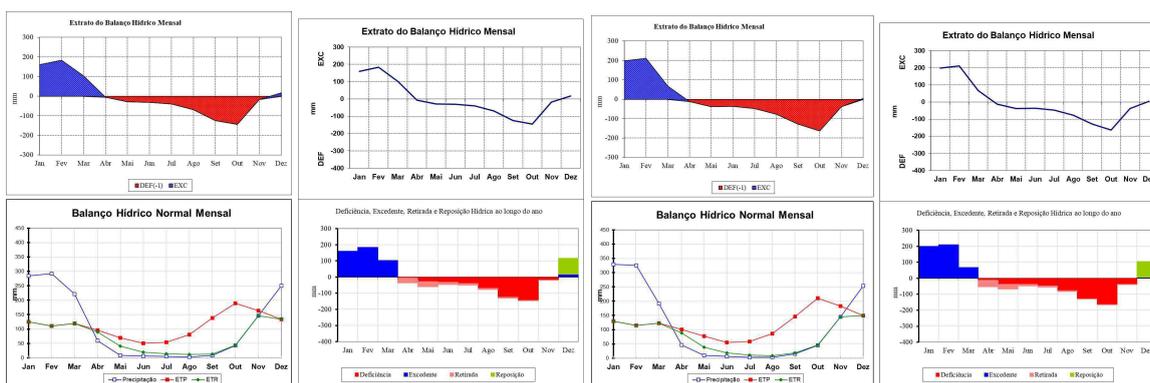
Nesse sentido, de acordo com Mutti et al. (2022), com os dados observados de extremos de temperatura e precipitação no Nordeste Brasileiro (Regoto et al.,2021), onde está situada boa parte da sub-bacia de Sobradinho, em que há um aumento nos extremos de precipitação e temperatura, com isso, há uma necessidade de um melhor monitoramento hidroclimático, dessa forma os dados de projeção estão em conformidade com os dados observados, ocorrendo um maior déficit hídrico na sub-bacia de Sobradinho.



**Figura 30** - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de sobradinho, entre os anos de 1990 a 2014, da média dos modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2.



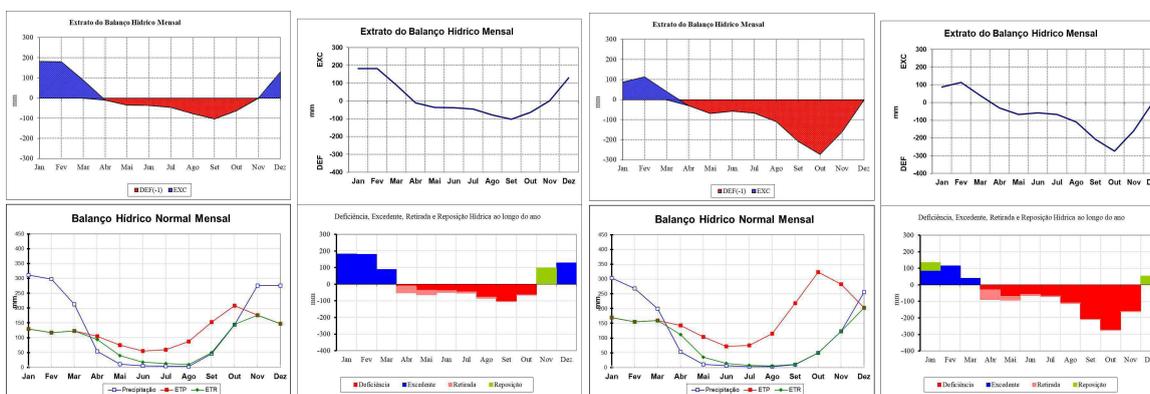
**Figura 31** - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Sobradinho, entre os anos de 2015 a 2035, da média dos modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 pelo cenário ssp2-4.5(a) e ssp5-8.5 (b).



(a)

(b)

**Figura 32** - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Sobradinho, entre os anos de 2045 a 2065, da média dos modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 pelo cenário ssp2-4.5(a) e ssp5-8.5 (b).



(a)

(b)

**Figura 33** - Histórico do balanço mensal na sub-bacia de Sobradinho, entre os anos de 2079 a 2100, da média dos modelos ACESSESM1, CanESM5, MIROC e o MRIESM2 pelo cenário ssp2-4.5(a) e ssp5-8.5 (b).

### 5.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA VIA SMAP

Para a realização de projeções de vazão, é imperativo que se disponha de uma bacia hidrográfica associada na qual a precipitação resultará no escoamento observado em seu exutório. Nesse contexto, a aplicação do Soil Moisture Accounting Program (SMAP) para tal propósito demanda séries temporais de vazão, bem como dados correspondentes de precipitação e evapotranspiração. Os dados observados desempenham um papel crucial ao serem empregados na calibração e validação dos parâmetros do modelo, preparando o terreno para as projeções de vazão que se seguirão, utilizando as estimativas projetadas de precipitação média na bacia hidrográfica e Evapotranspiração Potencial (ETP).

Além disso, os registros observados de precipitação e ETP para a bacia são essenciais para mitigar viés nos modelos de projeções climáticas. No caso específico da bacia do São Francisco, o Operador Nacional do Setor Elétrico (ONS) disponibiliza dados de vazão naturalizada para as principais hidrelétricas da região. Estas vazões refletem o fluxo natural do curso d'água, isento de intervenções humanas, tais como retirada de água e operação de reservatórios.

Este fato justifica a escolha das regiões em questão, uma vez que o SMAP foi concebido para modelar vazões naturalizadas. Diante da disponibilidade de dados, a decisão foi tomada de realizar projeções de vazão com o SMAP para as bacias hidrográficas dos reservatórios de Sobradinho, Três Marias e Retiro Baixo. Por outro lado, os reservatórios de Paulo Afonso e Xingó foram excluídos devido a inconsistências identificadas na série de vazão naturalizada. Essas incongruências dificultavam a representação precisa do processo de chuva-vazão pelo SMAP, sendo uma das hipóteses para tais discrepâncias a possível omissão de algumas retiradas de água ou intervenções antrópicas no processo de naturalização da vazão.

### 5.3.1 Modelagem hidrológica via SMAP na sub-bacia de Retiro Baixo

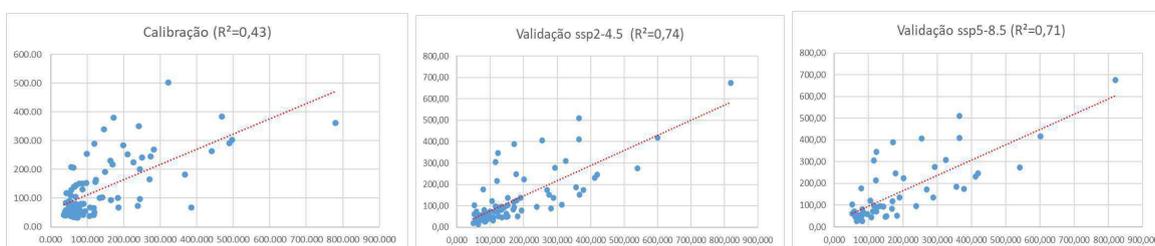
Na sub-bacia de Retiro Baixo, a taxa de deplecionamento ( $K$ ), gera o escoamento de base, variando de 1 a 6; e a taxa de umidade inicial do solo ( $TU_{in}$ ). Os parâmetros do modelo a serem calibrados são:  $Pes$ : resultado da precipitação subtraída da parcela transferida ao escoamento superficial, variando entre 400 e 5000;  $Sat$  – capacidade de saturação do solo, variando entre 0,1 e 10;  $Crec$  – coeficiente de recarga, parâmetro relacionado com a permeabilidade na zona não saturada do solo, variando de 0 a 70.

Na tabela 2 mostra os índices de desempenho que foram obtidos os parâmetros de calibração e validação do modelo SMAP na sub-bacia de Retiro Baixo, de acordo com o histórico e os cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 dos modelos:

**Tabela 2** – Parâmetros calibráveis do modelo SMAP para a sub-bacia de Retiro Baixo.

Parâmetros	
<i>Sat</i>	4899
<i>Pes</i>	9
<i>Crec</i>	0,65
<i>K</i>	1

Foi calculado o  $R^2$  para a calibração segundo o histórico dos modelos e de acordo com dois cenários da média dos modelos: os cenários foram ssp2-4.5 e ssp5-8.5.



**Figura 34** - Coeficientes de correlação linear para os períodos de calibração, validação (ssp2-4.5; ssp5-8.5) e período total, para a sub-bacia do Retiro Baixo utilizando o SMAP.

O modelo SMAP demonstra um bom desempenho em suas simulações. Em uma investigação liderada por Silva et al. (2021), o modelo SMAP foi empregado para prever as vazões naturalizadas dos quatro principais reservatórios da BHSF, fazendo uso dos modelos climáticos do CMIP6. A avaliação do desempenho do modelo hidrológico utilizou o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE). Durante o período de calibração, o modelo exibiu valores aceitáveis para esse coeficiente em todos os reservatórios.

Segundo Nash (1970), os valores de referência para o coeficiente NASH, são aceitáveis os valores entre 0,36 e 0,75 e excelente acima de 0,8, o ajuste perfeito é igual a 1, a análise do NSE da sub-bacia de Retiro Baixo em relação ao histórico e dos cenários dos modelos (ssp2-4.5 e ssp5-8.5) representou também resultados aceitáveis, segundo a tabela 3.

**Tabela 3** – Coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) para a sub-bacia de Retiro Baixo.

Cenários	<i>NSE</i>
Histórico (calibração)	0,72
ssp2-4.5 (validação )	0,71
ssp5-8.5 ( validação )	0,75

No período do histórico (período de calibração), o NSE de 0,72 sugere que o desempenho do modelo aceitável nesse cenário específico, durante o período de validação com os dados do cenário ssp2-4.5 indica uma certa estabilidade no desempenho do modelo

em relação ao cenário histórico, assim como o NSE para o cenário ssp5-8.5 no qual sugere um desempenho relativamente bom.

Durante o período compreendido entre os anos de 2008 a 2014 do histórico e dos cenários dos modelos MRI-ESM2-0, MIROC6, ACCESSES 1-5 e CanESM5, revela padrões distintos e sugere implicações importantes para a gestão hídrica na bacia. Ao longo desse intervalo temporal, foi observado que a vazão calculada superou a sub-bacia do histórico dos modelos em apenas dois meses (outubro e novembro) supera a vazão observada, o histórico dos modelos apresenta uma subestimação em relação aos valores observados no restante dos meses.

A análise mais detalhada revela variações sazonais significativas. Nos meses de abril a outubro, caracterizados como parte do período seco, tanto a vazão observada quanto a calculada apresentam valores abaixo de 150 m<sup>3</sup>/s, indicando uma concordância nesse período. Contudo, nos meses de dezembro a abril, a vazão calculada permanece consistentemente inferior à observada.

A dinâmica muda nos meses chuvosos, compreendidos entre novembro a março. Durante esse período, a vazão observada ultrapassa os 150 m<sup>3</sup>/s, indicando um aumento substancial do fluxo hídrico. Notavelmente, em fevereiro e março, esse valor atinge picos excepcionais, em torno de 200 m<sup>3</sup>/s na vazão calculada e na observada. Esses resultados sugerem que os modelos utilizados na sub-bacia de Retiro Baixo têm um desempenho relativamente melhor na reprodução da vazão durante o período seco, mas enfrentam desafios na representação precisa das variações durante os meses chuvosos, especialmente em janeiro, quando ocorrem os maiores índices de discrepância entre a vazão calculada e observada.

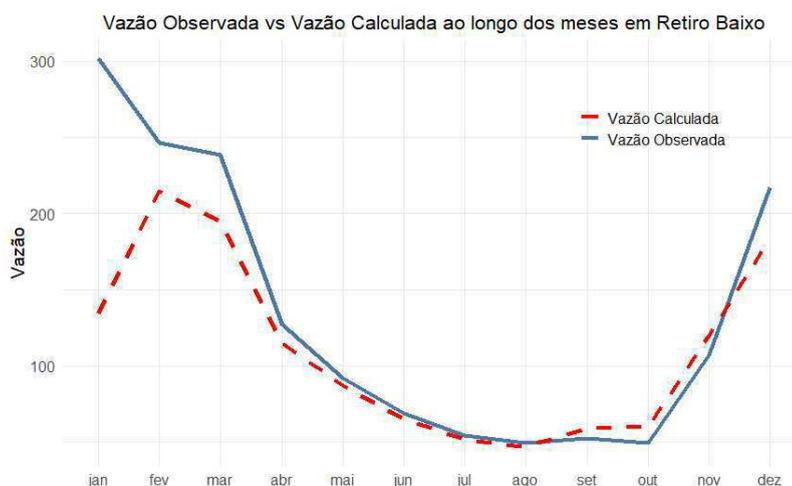
A análise da vazão calculada em comparação com a vazão observada na sub-bacia de Retiro Baixo para o período abrangido entre 2015 e 2021 revela tendências distintas, especialmente quando consideramos dois cenários diferentes: (a) ssp2-4.5 (médias emissões) e (b) ssp5-8.5 (altas emissões). Estes cenários refletem diferentes trajetórias de emissões e, por consequência, diferentes impactos nas condições hidrológicas da região.

No cenário ssp2-4.5, que representa um caminho moderado de emissões, a análise da vazão calculada em comparação com a vazão observada na sub-bacia de Retiro Baixo para o período de 2015 a 2021 indica uma variação sazonal. Durante o período chuvoso, observa-se uma tendência de vazões mais elevadas, em conformidade com as características hidrológicas

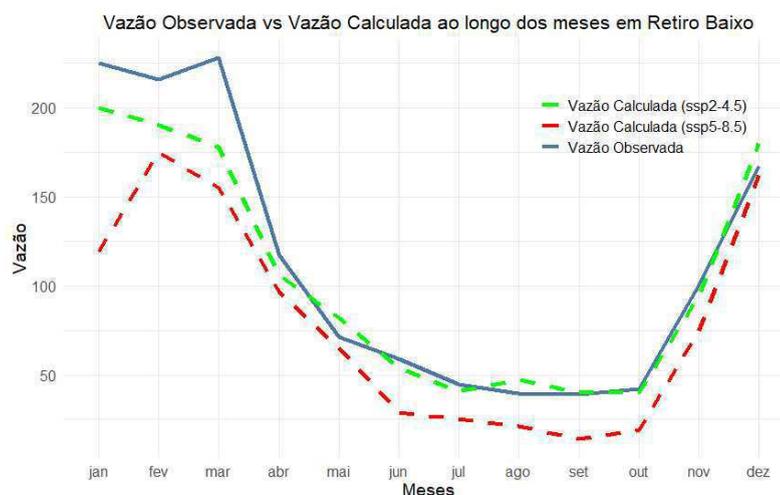
típicas, durante o período seco, as vazões apresentam uma redução significativa, sugerindo certa estabilidade ao longo do ano.

No cenário ssp5-8.5, caracterizado por altas emissões, as vazões exibem uma dinâmica parecida. Durante o período chuvoso, as vazões são notavelmente maiores, indicando possíveis impactos das mudanças climáticas associadas a cenários de altas emissões. No período seco, observa-se uma redução nas vazões, assim como no ssp2-4.5. É crucial salientar que, em ambos os cenários, as altas emissões (ssp5-8.5) demonstraram vazões calculadas inferiores às do período de médias emissões (ssp2-4.5) e das vazões observadas.

De acordo com Da Silva (2021), na série histórica de vazões naturais afluentes observados entre 1931 a 2016, em Retiro Baixo existe uma tendência de diminuição de vazões, como consequência dessa estiagem a ANA reduziu a vazão do Rio São Francisco em 100 m<sup>3</sup>/s, assim como os modelos analisados neste estudo no qual indicam um aumento na temperatura no decorrer das faixas temporais, e um aumento no déficit hídrico na sub-bacia.



**Figura 35** - Vazão calculada vs vazão observada entre os anos de 2008 a 2014 de acordo com o histórico dos modelos na sub-bacia de Retiro Baixo no período de calibração.



**Figura 36** - Vazão calculada vs vazão observada ao longo do período entre 2015 a 2021 segundo a média dos modelos e de acordo com dois cenários: (a) ssp2-4.5 e (b) ssp5-8.5 em Retiro Baixo no período de validação.

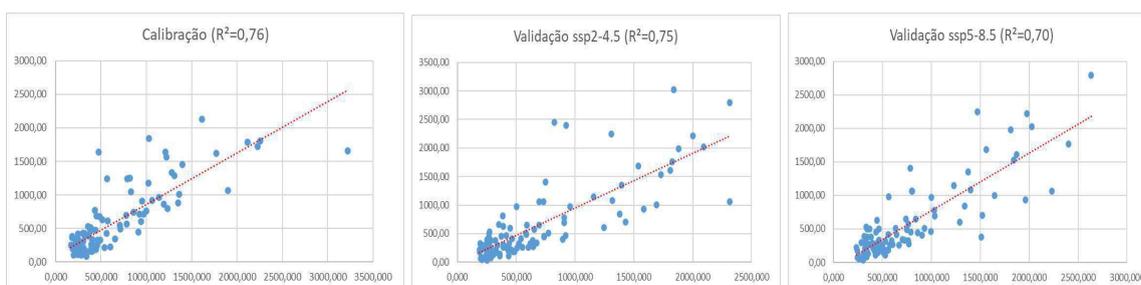
### 5.3.2 Modelagem hidrológica via SMAP na sub-bacia de Três Marias

A tabela 4 exibe os índices de desempenho de calibração e validação do modelo SMAP na sub-bacia de Três Marias. Isso foi feito considerando tanto o histórico quanto os cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5.

**Tabela 4** – Parâmetros calibráveis do modelo SMAP para a sub-bacia de Três Marias.

Parâmetros	
<i>Sat</i>	4100
<i>Pes</i>	10
<i>Crec</i>	0,7
<i>K</i>	6

O  $R^2$  foi computado para a fase de calibração e validação com base no histórico dos modelos, conforme dois cenários de média dos modelos: os cenários considerados foram ssp2-4.5 e ssp5-8.5 da sub-bacia de Três Marias.



**Figura 37** - Coeficientes de correlação linear para os períodos de calibração, validação (ssp2-4.5; ssp5-8.5) e período total, para a sub-bacia de Três Marias utilizando o SMAP.

**Tabela 5** – Coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) para a sub-bacia de Três Marias.

Cenários	<i>NSE</i>
Histórico (calibração)	0,69
ssp2-4.5 (validação )	0,67
ssp5-8.5 ( validação )	0,60

Os valores apresentados na tabela 4, foi de 0,69 para o "Histórico (calibração)", 0,67 para "ssp2-4.5 (validação)", e 0,60 para "ssp5-8.5 (validação)", representam coeficientes ou métricas associadas a processos de calibração e validação.

No cenário de "Histórico (calibração)", o valor (0,69) sugere uma bom desempenho em relação aos dados históricos, Na fase de validação, o valor positivo de 0,67 para "ssp2-4.5" sugere que o modelo apresentou um desempenho mais próximo dos dados esperados nesse cenário específico, indicando uma boa capacidade de ajuste aos dados de validação para essa configuração. Da mesma forma, o valor de 0,60 para "ssp5-8.5" na fase de validação indica um desempenho razoável do modelo nesse contexto específico.

A análise na sub-bacia de Três Marias, no período de 2008 a 2014 (Figura 38), concentrou-se na comparação entre a vazão calculada e a vazão observada, usando dados dos

modelos climáticos MRI-ESM2-0, MIROC6, ACCESSES1-5 e CanESM5. Os meses de maio a outubro, caracterizados como o período seco, e de novembro a abril, abrangendo o período chuvoso. Durante o período seco, as vazões se mantiveram relativamente estáveis, inferiores a 500 m<sup>3</sup>/s. Isso sugere uma consistência nas condições de baixa precipitação e menor entrada de água na sub-bacia durante essa fase do ano.

No entanto, durante o período chuvoso (novembro a abril), as vazões mostraram variações significativas. Elas ultrapassaram os 500 m<sup>3</sup>/s, alcançando um pico notável nos meses de fevereiro e março, onde os valores chegaram a superar os 1000 m<sup>3</sup>/s. Essa elevação acentuada das vazões durante os meses chuvosos indica uma resposta significativa à sazonalidade das chuvas na região, especialmente nos meses de maior intensidade de precipitação.

Durante a calibração dos modelos, a vazão calculada com base nos dados do histórico apresentou valores mais elevados nos meses de janeiro, maio, junho, julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro, em comparação com os dados observados. Nos demais meses, a vazão observada foi superior.

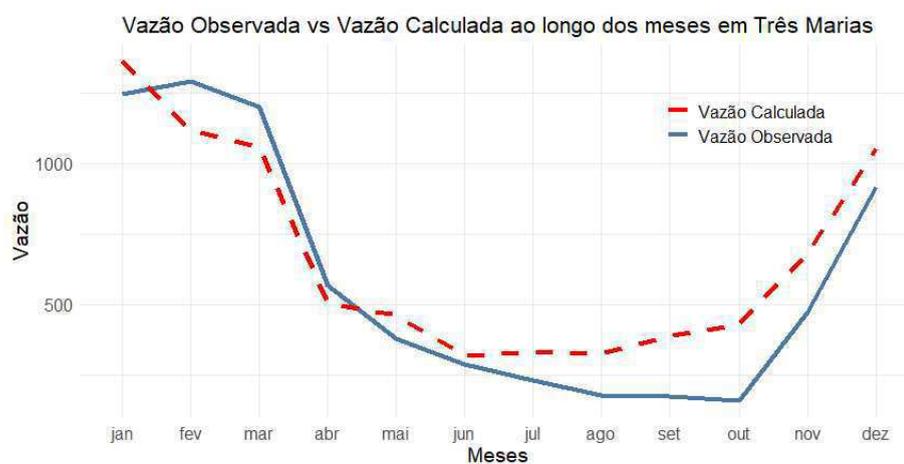
A comparação entre vazão calculada e vazão observada na sub-bacia de Três Marias para o período de 2015 a 2021 considerou a média dos modelos climáticos para dois cenários de emissões: (a) ssp2-4.5 e (b) ssp5-8.5.

Durante o período seco, ambas as simulações dos cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 indicaram vazões variando abaixo de 400 m<sup>3</sup>/s. Esses valores sugerem uma consistência em relação aos anos anteriores (2008-2014) mencionados anteriormente. No entanto, é importante observar que as vazões do cenário ssp5-8.5 foram menores do que as do cenário ssp2-4.5, indicando uma influência significativa das diferentes trajetórias de emissões na disponibilidade de água durante o período seco.

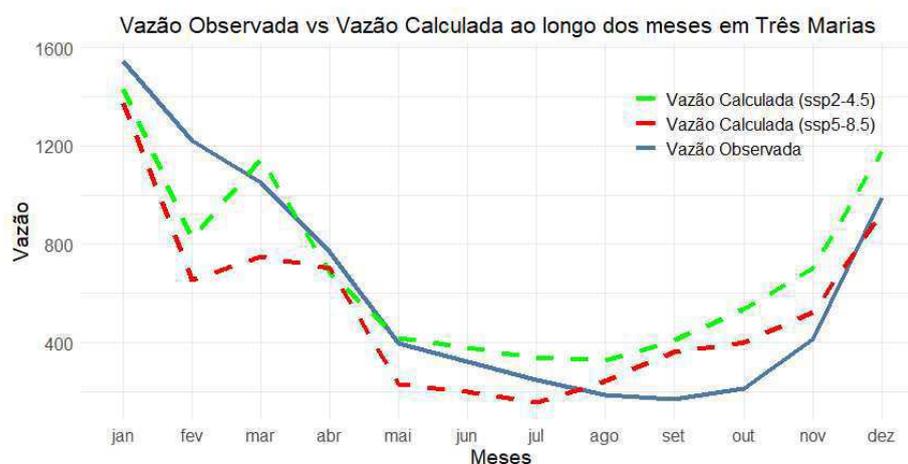
Já no período chuvoso, as vazões do cenário ssp2-4.5 foram notavelmente mais altas, atingindo valores de até 1500 m<sup>3</sup>/s. Essa diferença sugere que o cenário ssp2-4.5, que representa um futuro com médias emissões, está associado a um aumento mais pronunciado nas vazões durante os meses chuvosos em comparação com o cenário ssp5-8.5. Esses resultados destacam a importância de considerar cenários de emissões diferentes ao avaliar as projeções de vazão, pois eles podem influenciar significativamente os padrões futuros de disponibilidade de água na região.

Conforme os dados observados no estudo de De Paiva (2020), os dados entre janeiro de 1987 a abril de 2011, foram usados para a calibração do modelo, em contrapartida, o período de maio de 2011 a dezembro de 2016 foi utilizado para validação, pelo modelo CFS, a vazão média calculada na sub-bacia foi de 645 m<sup>3</sup>/s e a vazão observada foi de 652 m<sup>3</sup>/s, assim, esses dados estão de acordo com o previsto na sub-bacia de Retiro Baixo de acordo com os modelos do CMIP, em que a média dos modelos na vazão observada foi de 591 m<sup>3</sup>/s na vazão observada e 669 m<sup>3</sup>/s na observação do histórico dos modelos para o período de 2008 a 2014.

Em relação ao período de 2015 a 2021, entre a vazão observada e a calculada no período de validação, a vazão observada apresentou o valor de 617 m<sup>3</sup>/s, a calculada pelo cenário ssp2-4.5 a vazão foi de 550 m<sup>3</sup>/s e em altas emissões a média da vazão obteve o valor de 479 m<sup>3</sup>/s, assim, os modelos subestimaram as vazões nesse período, e em altas emissões os valores foram os menores da série, principalmente no período de seca.



**Figura 38** - Vazão calculada vs vazão observada entre os anos de 2008 a 2014 de acordo com o histórico dos modelos na sub-bacia de Três Marias na calibração.



**Figura 39** - Vazão calculada vs vazão observada ao longo do período entre 2015 a 2021 segundo a média dos modelos e de acordo com dois cenários: (a) ssp2-4.5 e (b) ssp5-8.5 em Três Marias na validação.

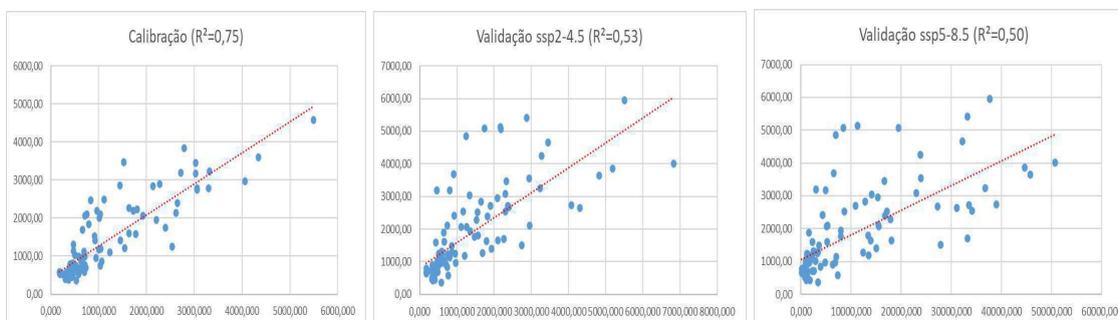
### 5.3.3 Modelagem hidrológica via SMAP na sub-bacia de Sobradinho

A tabela 5 exibe as métricas de calibração e validação do modelo SMAP na sub-bacia de Sobradinho, abrangendo tanto o histórico quanto os cenários ssp2-4.5 e ssp5-8.5 dos modelos.

**Tabela 6** – Parâmetros calibráveis do modelo SMAP para a sub-bacia de Sobradinho.

Parâmetros	
<i>Sat</i>	3100
<i>Pes</i>	10
<i>Crec</i>	0,3
<i>K</i>	2

Na sub-bacia de Sobradinho, o  $R^2$  foi calculado durante a etapa de calibração e validação utilizando o histórico dos modelos, nos cenários médios dos modelos ssp2-4.5 e ssp5-8.5.



**Figura 40** - Coeficientes de correlação linear para os períodos de calibração, validação (ssp2-4.5; ssp5-8.5) e período total, para a sub-bacia de Sobradinho utilizando o SMAP.

**Tabela 6** – Coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) para a sub-bacia de Sobradinho.

Cenários	<i>NSE</i>
Histórico (calibração)	0,52
ssp2-4.5 (validação )	0,41
ssp5-8.5 ( validação )	0,37

Os resultados do NSE apontam para um pior desempenho do modelo em diferentes contextos. Durante a calibração com dados históricos, o modelo obteve um NSE de 0,52, indicando um ajuste mediano para reproduzir as variações ao longo do tempo. Na validação do modelo no cenário ssp2-4.5, o NSE foi de 0,41, sugerindo um desempenho insatisfatório nesse cenário específico. Na validação do modelo no cenário ssp5-8.5, relacionado a uma trajetória de emissões mais alta, o NSE foi de 0,37, indicando um ajuste fraco do modelo aos dados observados. Esses resultados sugerem uma tendência de diminuição do NSE, no sentido da região onde o clima é mais árido, caso da sub-bacia de Sobradinho.

A análise da vazão calculada em comparação com a vazão observada na sub-bacia de Sobradinho, considerando o período entre os anos de 2008 a 2014, revela padrões distintos das outras duas sub-bacias (Retiro Baixo e Três Marias).

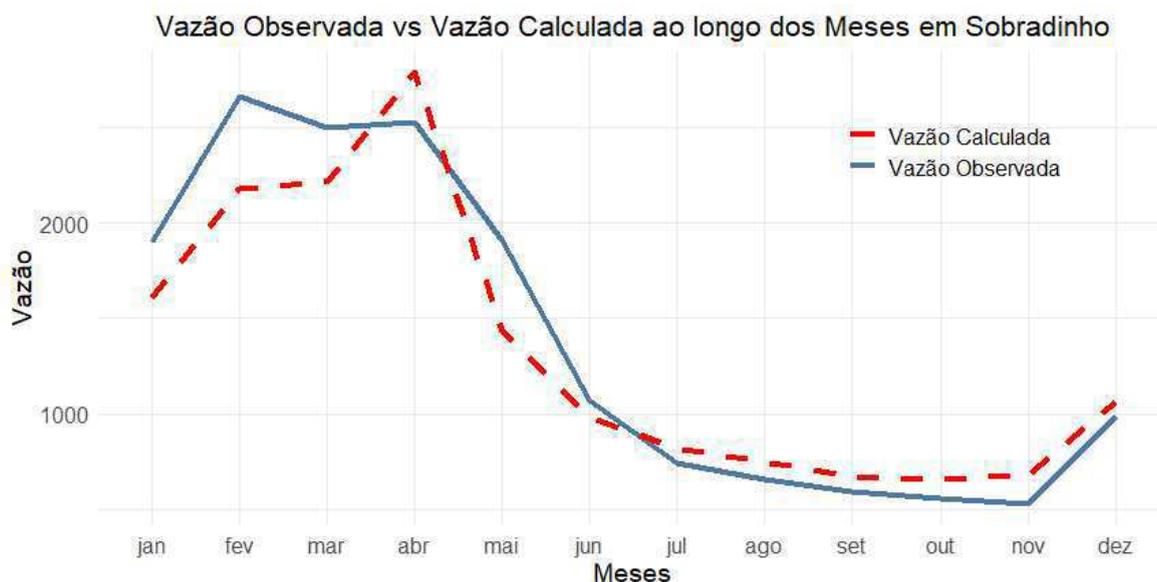
Durante esse período, Sobradinho testemunhou as maiores vazões, atingindo aproximadamente 3500 m<sup>3</sup>/s. O histórico indica uma sazonalidade pronunciada, com o

período seco estendendo-se de junho a novembro e o período chuvoso ocorrendo de janeiro a maio.

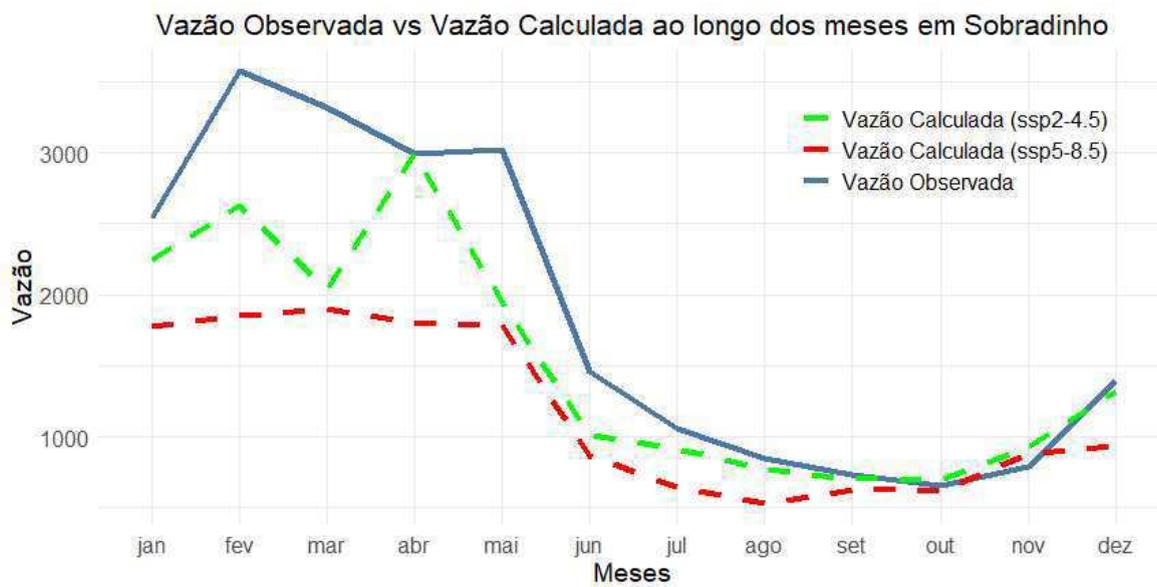
Notavelmente, mostrado na figura 41, as vazões observadas foram superiores nos meses de janeiro, fevereiro, março, maio e junho, julho e março, enquanto as vazões calculadas predominaram de abril, julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro. Esses resultados sugerem que os modelos utilizados historicamente têm uma tendência a superestimar as vazões durante a estação seca, mas subestimar as vazões durante a estação chuvosa.

Ao considerar a figura 42, observa-se que no cenário de altas emissões, as vazões calculadas são menores do que as de médias emissões, indicando uma possível subestimação do modelo.

Essa análise reforça a importância de uma revisão cuidadosa dos modelos utilizados na sub-bacia de Sobradinho. A tendência negativa na precipitação indicada pelos cenários de altas emissões destaca a necessidade de considerar e mitigar os impactos potenciais das mudanças climáticas na gestão hídrica da região. A avaliação contínua e ajustes nos modelos são essenciais para melhorar a precisão das projeções e garantir uma base sólida para o planejamento sustentável dos recursos hídricos na sub-bacia.



**Figura 41** - Vazão calculada vs vazão observada entre os anos de 2008 a 2014 de acordo com o histórico dos modelos na sub-bacia de Sobradinho.



**Figura 42** - Vazão calculada vs vazão observada ao longo do período entre 2015 a 2021 segundo a média dos modelos e de acordo com dois cenários: (a) ssp2-4.5 e (b) ssp5-8.5 em Sobradinho.

## 6. CONCLUSÃO

Em relação à climatologia, balanço hídrico climatológico e ao SMAP, os resultados foram satisfatórios, no histórico e nos cenários das faixas temporais propostas. Em relação a climatologia no período de 1990 a 2014, em Retiro Baixo, observou-se variações significativas na temperatura média, oscilando entre 22,73°C e 15,74°C, com os picos mais altos ocorrendo de outubro a abril, especialmente em janeiro (22,73°C), e as mínimas em julho (15,74°C).

Quanto à precipitação, os modelos indicaram um período chuvoso de novembro a março e uma estação seca de abril a outubro, destacando a máxima de 249 mm em janeiro e a mínima de 2,6 mm em junho. Em Três Marias, durante o mesmo período, a temperatura média foi a mais baixa, atingindo 21,09°C, e a precipitação anual registrou o mínimo de 1038,38 mm. Na sub-bacia de Sobradinho, a análise do histórico de 1990 a 2014 revelou as temperaturas médias mais baixas, chegando a 23,5°C, enquanto a precipitação anual atingiu seu ápice, alcançando 1222,18 mm, representando as maiores precipitações da série. Esses dados destacam as variabilidades climáticas distintas ao longo do tempo em cada região.

As projeções climáticas para as sub-bacias, durante os períodos de 2015-2035 e 2045-2065, apontam para um consenso entre os modelos ACESSESM1, MRIESM2, MIROC6 e CanESM2 em relação ao aumento da temperatura, variando entre 1,5 a 2°C. No entanto, divergências são observadas nas projeções de precipitação. Em Retiro Baixo, ACESSESM1 e MRIESM2 preveem um aumento na precipitação, enquanto MIROC6 e CanESM2 indicam uma redução.

A climatologia nas sub-bacias de Retiro Baixo, Três Marias e Sobradinho, sob os cenários de emissões SSP2-4.5 e SSP5-8.5, há uma tendência de aumento significativo nas temperaturas entre 2079 e 2100. Em Retiro Baixo, notam-se variações na precipitação média entre modelos, destacando-se aumentos em MIROC6 e MRIESM2 e diminuições em CanESM5 e ACESSESM1, especialmente em altas emissões. Três Marias apresenta aumento consistente na precipitação nos cenários de médias emissões, com exceção do modelo CanESM5, enquanto em altas emissões, o modelo MIROC6 demonstra um comportamento específico, elevando a curva de precipitação. Já em Sobradinho, as maiores temperaturas são registradas, as projeções de precipitação divergem, com aumento na média de emissões, exceto para o CanESM5, e diminuição nas altas emissões, indicando complexidades nas projeções climáticas sob diferentes condições de emissões.

Em relação ao balanço hídrico climatológico. Em Retiro Baixo, no SSP2-4.5, a evapotranspiração aumenta para 1077,04 mm (2015-2035), 1126,55 mm (2045-2065), e

diminui para 1073 mm (2079-2100). No SSP5-8.5, os valores são 1072 mm, 1216 mm e 1451 mm, indicando déficits hídricos mais acentuados. Em Três Marias, a evapotranspiração aumenta significativamente no SSP5-8.5, atingindo 1491 mm entre 2079-2100, resultando em déficit hídrico. Em Sobradinho, as médias dos modelos mostram variações notáveis, com o SSP5-8.5 apresentando as taxas mais elevadas, indicando um déficit hídrico mais pronunciado.

O uso do Soil Moisture Accounting Program (SMAP) para projetar vazão em bacias hidrográficas requer séries temporais de vazão, dados de precipitação e evapotranspiração, além de observações para calibração e validação. A bacia do São Francisco utiliza dados de vazão naturalizada pelo Operador Nacional do Setor Elétrico (ONS) para refletir o fluxo natural do rio. As projeções nas bacias de Sobradinho, Três Marias e Retiro Baixo com o SMAP mostraram bom desempenho, com coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) aceitáveis, exceto alguns cenários na Sub-bacia de Sobradinho. A análise revelou padrões distintos na vazão calculada e observada na sub-bacia de Retiro Baixo, especialmente durante períodos chuvosos. Em Três Marias, estabilidade nas vazões no período seco e variações notáveis no chuvoso foram observadas, com cenários ssp5-8.5 indicando maior disponibilidade de água.

Na sub-bacia de Sobradinho, o modelo apresentou tendência a superestimar vazões na estação seca e subestimar na chuvosa (exceto no mês de abril), com diferenças notáveis nos cenários de emissões.

Os resultados do NSE nas sub-bacias indicam bom desempenho do modelo na calibração histórica e validação em diferentes cenários, exceto em Sobradinho. A análise em Sobradinho destaca a necessidade de revisão contínua dos modelo diante das tendências climáticas indicadas pelos cenários de emissões para garantir projeções mais precisas.

A análise climatológica nas sub-bacias de Retiro Baixo, Três Marias e Sobradinho sob os cenários de emissões SSP2-4.5 e SSP5-8.5 em todas as faixas temporais, revela aumento nas temperaturas e variações na precipitação. O balanço hídrico climatológico destaca déficits hídricos acentuados, especialmente em Três Marias e Sobradinho sob SSP5-8.5. O uso do Soil Moisture Accounting Program (SMAP) para projetar vazão mostrou bom desempenho, com coeficientes aceitáveis.

No entanto, observaram-se padrões distintos na vazão calculada e observada, destacando desafios na representação precisa, especialmente na sub-bacia de Retiro Baixo durante períodos chuvosos.

Em conclusão, a revisão contínua do modelo é crucial para projeções mais precisas diante das tendências climáticas. A compreensão das complexidades climáticas e melhorias

constantes no modelo são essenciais para enfrentar os desafios futuros decorrentes das mudanças climáticas e apoiar o planejamento sustentável dos recursos hídricos na região. Em uma análise mais aprofundada, usando o tipo de cobertura de solo, ajudará na avaliação dos impactos destas alterações nas sub-bacias, analisando tipos específicos de vegetação.

## REFERÊNCIAS

- ANA. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020: informe anual. Brasília - DF: Agência Nacional de Águas, 2020. Available at: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura-2020>.
- ARNELL, Nigel W. et al. Global and regional impacts of climate change at different levels of global temperature increase. *Climatic Change*, v. 155, p. 377-391, 2019.
- CASTANHARO, G. et al. Previsão de Vazões na Bacia do Rio Iguaçu Baseada no Modelo SMAP e com Incorporação de Informações de Precipitação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Curitiba, v. 12, n. 3, p.57-68, 09 ago. 2007.
- CBHSF. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco 2016-2025. Comitê da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco (CBHSF), 2016. Available at: [https://2017.cbhsaofrancisco.org.br/wp-content/uploads/2016/08/PRHSF\\_Apresentacao\\_26\\_ago16.pdf](https://2017.cbhsaofrancisco.org.br/wp-content/uploads/2016/08/PRHSF_Apresentacao_26_ago16.pdf).
- CGEE; ANA. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos; Agência Nacional de Águas. A Questão da Água no Nordeste. Brasília: CGEE, 2012.
- CHESF Companhia Hidro Elétrica de São Francisco (Chesf).
- DA SILVA, D.F.; GALVÍNCIO, J.D.; NÓBREGA, R.S. Influência da variabilidade climática e da associação de fenômenos climáticos sobre sub-bacias do rio São Francisco. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)*, n. 19, p. 46-56, 2011. doi:10.1017/CBO9781107415324.
- DA SILVA, M. V. M. et al. Vasconcelos Júnior, FdC Projection of Climate Change and Consumptive Demands Projections Impacts on Hydropower Generation in the São Francisco River Basin, Brazil. *Water* 2021, 13, 332. 2021.
- DE PAIVA, Luana Ferreira Gomes; MONTENEGRO, Suzana Maria; CATALDI, Marcio. Prediction of monthly flows for Três Marias reservoir (São Francisco river basin) using the CFS climate forecast model. **RBRH**, v. 25, p. e16, 2020.
- FEDOROVA N., LEVIT V., CRUZ C. D. On Frontal Zone Analysis in the Tropical Region of the Northeast Brazil. *Pure Appl. Geophys.* 2016, 173 p 1403-1421, DOI 10.1007/s00024-015-1166-y.
- FERREIRA, Y, B. Uso do balanço hídrico climatológico como ferramenta de gestão dos recursos hídricos em Canindé - CE / Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Geografia, Fortaleza, 2018. Orientação: Profa. Dra. Marta Celina Linhares Sales.
- FLATO, G.J.; MAROTZKE, J.; ABIODUN, B.; BRACONNOT, P., CHOU, S.C.; et al. Evaluation of Climate Models, in: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by: STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.;

HAJIMA, Tomohiro et al. Modeling in Earth system science up to and beyond IPCC AR5. *Progress in Earth and Planetary Science*, v. 1, n. 1, p. 1-25, 2014.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability*. In: MCCARTHY, J.J. *Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 1032, 2001.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change: *Climate Change 2007: The physical science basis*. Cambridge: IPCC, p.18, 2007.

IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[Stocker, T.F., D.Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M.Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, 2013.

JONG, P.; TANAJURA, C. A. S.; SÁNCHEZ, A. S.; DARGAVILLE, R.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A. Hydroelectric production from Brazil's São Francisco River could cease due to climate change and inter-annual variability. *Science of The Total Environment*, Amsterdam, v. 634, p. 1540-1553.

KELLY, Sara A. et al. Human amplified changes in precipitation–runoff patterns in large river basins of the Midwestern United States. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 21, n. 10, p. 5065-5088, 2017.

LOPES, J. E. G.; *Apostila Modelo SMAP*. 1999.

MARQUES, E. A. T. et al. *Impacts of extreme events in the submedium of the São Francisco river basin*. Seven Editora, 2023.

MATTOS, Beatriz Rodrigues Bessa. *Mudanças climáticas e os desafios para a segurança global*. CEP, v. 71, p. 50, 2023.

MELO, Matheus Henrique Bezerra de. *Análise do Balanço Hídrico Climatológico para a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

MING, Alison et al. *Key messages from the IPCC AR6 climate science report*. 2021.

Mutti P. R., Dubreuil V., Bezerra B. G., Arvor D., Funatsu B. M., & Santos e Silva C. M., 2022: Long-term meteorological drought characterization in the São Francisco watershed, Brazil: A climatic water balance approach. *International Journal of Climatology*, 42(16), 8162-8183. <https://doi.org/10.1002/joc.7701>.

Nash, E.; Sutcliffe, V. Previsão de vazão de rios por meio de modelos conceituais Parte I - Uma discussão de princípios. *J. Hidrol.* 1970, 10, 282–290.

O'NEILL, Brian C. et al. IPCC reasons for concern regarding climate change risks. *Nature Climate Change*, v. 7, n. 1, p. 28-37, 2017.

ONS. Plano de Operação Energética 2019–2023; ONS: London, UK, 2019; Volume 36.

ONS. Plano de Operação Energética 2020/2024 - PEN, 2020. Available at:

[http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/REVISTA\\_PEN2020\\_versao2\\_0201112.pdf](http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/REVISTA_PEN2020_versao2_0201112.pdf).

PBMC. Sumário Executivo do Volume 1 - Base Científica das Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 para o 1o Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Brasil, Volume Especial para a Rio+20, 34p, 2012.

PEDERSEN, Jiesper Tristan Strandsbjerg et al. IPCC emission scenarios: How did critiques affect their quality and relevance 1990–2022?. *Global Environmental Change*, v. 75, p. 102538, 2022.

PEREIRA, A. R. et al. *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PÖRTNER, Hans-Otto et al. IPCC, 2022: Summary for policymakers. 2022.

Regoto P, Dereczynski C, Chou SC, Bazzanela AC. 2021: Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. *Int J Climatol*. 41, 5125–5142.

<https://doi.org/10.1002/joc.7119>.

REICHERT, J. M., RODRIGUES, M. F., PELÁEZ, J.J.Z., LANZA, R., MINELLA, J.P.G., ARNOLD, J.G., CAVALCANTE, R.B.L., 2017. Water balance in paired watersheds with eucalyptus and degraded grassland in Pampa biome. *Agric. For. Meteorol.* 237–238, 282–295.

SALATI, E; SALATI, E; CAMPANHOL, T.; VILLA NOVA, N. Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Relatório 4. Tendências de Variações Climáticas para o Brasil no Século XX e Balanços Hídricos para Cenários Climáticos para o Século XXI. 182p. 2007.

SHIOGAMA, H.; ABE, M.; TATEBE, H. MIROC MIROC6 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. Earth System Grid Federation, 2019a.

SHIOGAMA, H.; ABE, M.; TATEBE, H. MIROC MIROC6 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585. Earth System Grid Federation, 2019b.

SILVA, M. V. M.; SILVEIRA, C. da S.; COSTA, J. M. F. da; MARTINS, E. S. P. R.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. das C. Projection of Climate Change and Consumptive Demands Projections Impacts on Hydropower Generation in the São Francisco River Basin, Brazil. *Water*, vol. 13, no. 3, p. 332, 29 Jan. 2021. DOI 10.3390/w13030332.

SILVEIRA, C. S., SOUZA FILHO, F. A. , LOPES, J. E. G., BARBOSA, P. S. F., TIEZZI, R. O. Análise das projeções de vazões nas bacias do setor elétrico brasileiro usando dados do IPCC-AR4 para o século XXI. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 4, p. 59-71, 2014.

SWART, N. C. et al. CCCma CanESM5 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Earth System Grid Federation, 2019a.

SWART, N. C. et al. CCCma CanESM5 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. Earth System Grid Federation, 2019b.

SWART, N. C. et al. CCCma CanESM5 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585. Earth System Grid Federation, 2019c.

TATEBE, H.; WATANABE, M. MIROC MIROC6 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Earth System Grid Federation, 2018.

TAYLOR, K.E.; STOUFFER, R.J.; MEEHL, G.A. An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 93, n. 4, p. 485-498, 2012.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geography Review*, Nova Iorque, v. 38, n. 1, p. 54-101, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, vol. VIII, n.1).

TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; et al. Cambridge and New York: Cambridge University Press, p. 741-866, 2013.

Utida G, Cruz FW, Etourneau J, Bouloubassi I, Schefuß E, Vuille M, Novello VF, Prado LF, Sifeddine A, Klein V, Zular A, Viana JCC, Turcq B. Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years.

VAN VUUREN, D.P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; et al. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, v. 109, n. 1-2, p. 5-11, 2011.

XAVIER, Alexandre C.; KING, Carey W.; SCANLON, Bridget R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). *International Journal of Climatology*, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2016.

YUKIMOTO, S. et al. MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Earth System Grid Federation, 2019a.

YUKIMOTO, S. et al. MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. Earth System Grid Federation, 2019b.

YUKIMOTO, S. et al. MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585. Earth System Grid Federation, 2019c.

ZHOU, Tianjun. New physical science behind climate change: What does IPCC AR6 tell us?. *The Innovation*, v. 2, n. 4, 2021.

ZIEHN, T. et al. CSIRO ACCESS-ESM1.5 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Earth System Grid Federation, 2019a.

ZIEHN, T. et al. CSIRO ACCESS-ESM1.5 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. Earth System Grid Federation, 2019b.

ZIEHN, T. et al. CSIRO ACCESS-ESM1.5 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp585. Earth System Grid Federation, 2019c.

ZILLI, Marcia T.; CARVALHO, Leila M.V.; LINTNER, Benjamin R. The poleward shift of South Atlantic Convergence Zone in recent decades. *Climate Dynamics* 2018 52:5, [s. l.], v. 52, n. 5, p. 2545–2563, 2019.