



UFRJ

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

**PROJEÇÕES DE RECARGA HÍDRICA PARA O SISTEMA AQUÍFERO
URUCUIA (BAHIA) NO PERÍODO 2041-2060**

Barbara Hanna Fernandes Pereira

Rio de Janeiro
2021

PROJEÇÕES DE RECARGA HÍDRICA PARA O SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA
(BAHIA) NO PERÍODO 2041-2060

BARBARA HANNA FERNANDES PEREIRA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (área: Meteorologia).

Orientadores: D. Sc. Gerson Cardoso da Silva
Júnior e D. Sc. Claudine Pereira Dereczynski


Rio de Janeiro
Novembro de 2021




PROJEÇÕES DE RECARGA HÍDRICA PARA O SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA (BAHIA) NO PERÍODO 2041-2060

BARBARA HANNA FERNANDES PEREIRA


DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA).

Documento assinado digitalmente
 GERSON CARDOSO DA SILVA JUNIOR
 Data: 04/02/2022 19:44:54-0300
 Verifique em <https://verificador.iti.br>

PROF. DR. GERSON CARDOSO DA SILVA JÚNIOR (PPGM-IGEO-UFRJ)

Documento assinado digitalmente
 CLAUDINE PEREIRA DEREZYNSKI
 Data: 21/11/2021 16:17:55-0300
 Verifique em <https://verificador.iti.br>

PROFA. DRA. CLAUDINE PEREIRA DEREZYNSKI (PPGM-IGEO-UFRJ)

Documento assinado digitalmente
 Chou Sin Chan
 Data: 13/01/2022 12:11:22-0300
 Verifique em <https://verificador.iti.br>

PROFA. DRA. CHOU SIN CHAN (PPGM-IGEO-UFRJ)

Programa de Pós-Graduação em Meteorologia (PPGM), Instituto de Geociências (IGEO),
 Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza (CCMN), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).
 Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Bloco G, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, CEP:
 21941-916.

Tel.: 55 (21) 3938-9540. E-mail: "Programa de Pós-graduação em Meteorologia - PPGM"
 <pos_meteoro@igeo.ufrj.br>



Documento assinado digitalmente
 gov.br Renata Libonati dos Santos
 Data: 03/02/2022 12:01:50-0300
 Verifique em <https://verificador.itl.br>

PROFA. DRA. **RENATA LIBONATI DOS SANTOS** (PPGM-IGEO-UFRJ)

Documento assinado digitalmente
 gov.br KÁTIA LEITE MANSUR
 Data: 07/01/2022 09:01:22-0300
 Verifique em <https://verificador.itl.br>

PROFA. DRA. **KÁTIA LEITE MANSUR** (GEOLOGIA UFRJ)

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

NOVEMBRO DE 2021

Programa de Pós-Graduação em Meteorologia (PPGM), Instituto de Geociências (IGEO),
 Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza (CCMN), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ),
 Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Bloco G, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, CEP:
 21941-916.

Tel.: 55 (21) 3938-9540. E-mail: "Programa de Pós-graduação em Meteorologia - PPGM"
 <pos_meteoro@igeo.ufrj.br>

CIP - Catalogação na Publicação

P229p Pereira, Barbara Hanna Fernandes
 Projeções de Recarga Hídrica para o Sistema
Aquífero Urucuia (Bahia) no período 2041-2060 /
Barbara Hanna Fernandes Pereira. -- Rio de Janeiro,
2021.
 105 f.

 Orientador: Gerson Cardoso da Silva Júnior.
 Coorientadora: Claudine Pereira Dereczynski.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Meteorologia, 2021.

 1. Mudanças Climáticas . 2. Recarga de Aquíferos .
3. Sistema Aquífero Urucuia. I. Júnior, Gerson
Cardoso da Silva, orient. II. Dereczynski, Claudine
Pereira , coorient. III. Título.

“Não temos o poder para destruir o planeta, nem para salvá-lo. Mas talvez tenhamos o poder para salvar a nós mesmos.”

Jurassic Park – Michael Crichton

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por me dar a oportunidade de viver todos os dias, de seguir em frente, mesmo com todos os obstáculos, de me dar forças, e me ensinar que algumas coisas em nossas vidas acontecem sempre na hora certa.

Aos meus pais, e em memória aos meus avós, que fizeram tudo que podiam para eu ser o que sou hoje, por me ajudarem de todas as formas possíveis e impossíveis, por me ensinarem a ter o gosto pela leitura e estarem sempre ao meu lado.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Gerson Cardoso da Silva Jr. e Prof. Dra. Claudine Pereira Dereczynski, pela orientação, pela paciência, pela disponibilidade, pelos conselhos e por me entenderem quando passei por uma das situações mais difíceis em minha vida. Muito obrigada, por estarem presentes nessa etapa da minha vida acadêmica.

As minhas amigas Erica Cardozo, Michelle Salgado, Judith Rodrigues, Yasmin Uchoa e Louise Aguiar, que me empurraram, me ajudaram e deram forças as vezes apenas com as palavras certas.

Ao colega Pedro Regoto, que me ajudou muito com os modelos, e teve uma paciência infinita.

E ao colega Gabriel Eloy, que eu nem conheço pessoalmente, mas que teve a disponibilidade de me ensinar, por email, uma parte muito importante dessa dissertação.

Ao PPGM (Programa de Pós-Graduação em Meteorologia) - UFRJ por proporcionar a elaboração desse estudo e a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de pesquisa.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

PROJEÇÕES DE RECARGA HÍDRICA PARA O SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA
(BAHIA) NO PERÍODO 2041-2060

Barbara Hanna Fernandes Pereira

Novembro/2021

Orientadores: Gerson Cardoso da Silva Júnior e Claudine Pereira Dereczynski

Programa de Pós-graduação em Meteorologia

O objetivo deste trabalho é analisar os efeitos das mudanças climáticas na recarga e no fluxo do Sistema Aquífero Urucuia no oeste da Bahia (SAU-BA) no período 2041-2060. Para isso foram utilizados dois modelos climáticos da sexta fase do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6): o CanESM5 e o MIROC6, sob os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 (*Shared Socioeconomic Pathways - SSP*). Os resultados indicam, para as projeções de mudança relativa na precipitação com CanESM5, no cenário SSP1-2.6, uma diminuição de 20%, enquanto para o cenário SSP5-8.5 uma diminuição ainda maior, entre 25% e 35%. Porém, com o modelo MIROC6 projeta-se o oposto, um aumento de até 10% na precipitação no SAU-BA, ambos os cenários. Com relação às mudanças na temperatura média anual, os dois modelos concordaram que no futuro haverá aquecimento. O CanESM5 (MIROC6) projeta um aumento de temperatura na região do SAU-BA de 3 e 4 °C (1 e 2 °C). As projeções de recarga calculadas através do *Software Visual Balan 2.0*, indicaram uma redução entre 27% e 43% com o CanESM5 e variando entre um modesto aumento de 1,4% e uma diminuição de aproximadamente 8% com o MIROC6. Os cálculos da recarga e do fluxo de água subterrânea do SAU-BA foram realizados também com o modelo MODFLOW. Seus resultados mostram para ambos os modelos climáticos uma redução da recarga ao aquífero, sendo entre 32 e 45% no CanESM5 e entre 5 e 9% no MIROC6. Ademais, as projeções indicam uma tendência de rebaixamento de nível freático no norte do SAU-BA, atingindo um máximo de até 12 m de descenso com o CanESM5, no cenário SSP5-8.5. Porém na maior parte da área sul do SAU-BA, ambos os modelos indicam estabilidade no nível freático.

Palavras chave: Mudanças Climáticas; Recarga de Aquíferos.

Abstract of Dissertation presented to PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

GROUNDWATER RECHARGE PROJECTIONS FOR THE URUCUIA AQUIFER
SYSTEM (BAHIA) IN THE YEARS 2041-2060

Barbara Hanna Fernandes Pereira

Novembro/2021

Advisors: Gerson Cardoso da Silva Júnior e Claudine Pereira Dereczynski

Department: Meteorology

The objective of this work is to analyze the effects of climate change on the recharge and flow of the Urucuia Aquifer System in western Bahia (SAU-BA) in the period 2041-2060. For this, two climate models from the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) were used: CanESM5 and MIROC6, under scenarios SSP1-2.6 and SSP5-8.5 (Shared Socioeconomic Pathways - SSP). The results indicate, for the relative change projections in precipitation with CanESM5, in the SSP1-2.6 scenario, a 20% decrease, while for the SSP5-8.5 scenario an even greater decrease, between 25% and 35%. However, with the MIROC6 model, the opposite is projected, an increase of up to 10% in precipitation in the SAU-BA, both scenarios. About changes in average annual temperature, both models agreed that in the future there will be warming. The CanESM5 (MIROC6) projects a temperature increase in the SAU-BA region of 3 and 4 °C (1 and 2 °C). Recharge projections calculated using the Visual Balan 2.0 Software indicated a reduction of between 27% and 43% with CanESM5 and ranging from a modest 1.4% increase to a decrease of approximately 8% with MIROC6. The SAU-BA groundwater recharge and flow calculations were also performed with the MODFLOW model. Their results show for both climate models a reduction in aquifer recharge, being between 32 and 45% in CanESM5 and between 5 and 9% in MIROC6. Furthermore, projections indicate a downward trend in the water table in the north of the SAU-BA, reaching a maximum drop of up to 12 m with the CanESM5, in the SSP5-8.5 scenario. However, in most of the southern area of the SAU-BA, both models indicate stability in the water table.

Key words: Climate changes; Aquifer recharge.

Lista de Figuras

Figura 1 - Mapa da área de estudo (Fonte: Google Earth).	4
Figura 2 - Cinco caminhos socioeconômicos compartilhados (SSPs) que representam diferentes combinações de desafios para mitigação e adaptação. Fonte: Traduzido de O'NEILL et al., 2016.....	8
Figura 3 - Mudanças na precipitação total média sazonal de três meses (variação%, 2071–2100 versus 1851–1880) na média do conjunto multimodelo nos SSPs. As áreas onde as mudanças não são robustas são indicadas por hachuras. Fonte: Traduzido de Cook <i>et al.</i> (2020).	10
Figura 4 - Mudanças projetadas na média e variabilidade da precipitação mensal. (a) Mudança média multimodelo projetada na precipitação média mensal e (b) desvio padrão para nove modelos CMIP6 no cenário SSP5-8.5 com o período 1950-2014. O pontilhado indica onde a magnitude da mudança futura média entre os modelos excedeu o desvio padrão entre os modelos da mudança. (c-e) mostram uma série de tempo de precipitação média mensal para as regiões do Mediterrâneo, Europa central e Amazônia, respectivamente. (f-h) mostram uma série de tempo de 10 anos consecutivos de desvio padrão da precipitação mensal para as mesmas regiões. Em (c-f), o sombreado mostra a gama completa do modelo e as linhas sólidas mostra o multimodelo. Fonte: Traduzido de Ukkola et al. (2020).....	11
Figura 5 – Padrões de precipitação nos dados instrumentais de 1950-2014 (esquerda), simulações históricas do modelo climático de 1950-2014 (centro esquerdo), cenário de aquecimento SSP1-2.6 para 2015–2100 (centro à direita) e cenário de aquecimento SSP3-7.0 para 2015–2100 (extrema direita). A caixa cinza delimitam a região da Amazônia Oriental, a linha preta/vermelha delimitam a bacia amazônica e as linhas cinza claro mostram as fronteiras dos países. O pontilhado mostra onde todos os dados instrumentais concordam com o sinal de tendência (esquerda) ou onde mais de 17 das 22 simulações do modelo (> 75%) concordam com o sinal da tendência (centro, direita). Fonte: Extraído de Parsons, (2020). ...	14
Figura 6 - Distribuição espacial do viés (°C) da temperatura média anual dos 16 MCGs e observações sobre a superfície global da Terra durante 1901–2014. Fonte: Extraído de Fan et al. (2020).....	16

- Figura 7 - Distribuição espacial das mudanças na temperatura média anual (°C) sobre o globo em períodos de curto prazo (2025-2049), médio prazo (2050-2074) e longo prazo (2075-2099) do século 21, em relação a 1970- 1999, sob os cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5. Fonte: Traduzido de Fan et al. (2020). 17
- Figura 8 – Tendências para a temperatura (°C/ano) nos dados instrumentais de 1950-2014 (esquerda), simulações históricas do modelo climático de 1950-2014 (centro esquerdo), cenário de aquecimento SSP1-2.6 para 2015–2100 (centro à direita) e cenário de aquecimento SSP3-7.0 para 2015–2100 (extrema direita). A caixa cinza delimita a região da Amazônia Oriental, a linha preta/vermelha delimita a bacia amazônica e as linhas cinza claro mostram as fronteiras dos países. O pontilhado mostra onde todos os dados instrumentais concordam com o sinal de tendência (esquerda) ou onde mais de 17 das 22 simulações do modelo (> 75%) concordam com o sinal da tendência (centro, direita). Fonte: Extraído de Parsons (2020). 18
- Figura 9 - Esquema hidrológico adotado pelo Visual Balan (Traduzido de SAMPER et al., 1999). 20
- Figura 10 - Grades de diferença finita. A- Centrada na malha. B- Centrada na célula (Extraído de Araujo, 2018). 22
- Figura 11 - Discretização espacial de um aquífero hipotético (Traduzido de McDonald e Harbaugh, 1988). 23
- Figura 12 - Mapas de distribuição dos rebaixamentos do nível freático (NF) do SAU; no período entre 2020 -2040 no cenário RCP8.5 (esquerda); período de 2050 - 2070 para o RCP 2.6 (meio), e; período de 2050 - 2070 para o RCP 8.5 (direita). Os tons avermelhados indicam tendência de diminuição do NF, enquanto os azuis uma tendência de manutenção do NF atual (sem ter em conta eventual bombeamento). Fonte: Extraído de Mantovani et al. (2019). 32
- Figura 13 – Mapa de localização da área de estudo (em azul), com o Sistema Aquífero Urucuiua-Areado (em laranja) e as estrelas representam as localizações das Estações do INMET: em preto a Estação de Barreiras e em vermelho a Estação de Correntina. 33
- Figura 14 - Climatologias mensais (2001-2020) da precipitação e da temperatura do ar para as Estações do INMET na Bahia: (a) Barreiras e (b) Correntina. 35

Figura 15 - Mapa das três bacias hidrográficas principais da área de estudo: Grande (ao norte, em vermelho e verde), Corrente (ao centro, em rosa) e Carinhanha (ao sul, em laranja); com seus principais rios e afluentes.	36
Figura 16 – Fluxograma da metodologia utilizada no estudo, envolvendo as duas etapas da pesquisa: meteorológica (em azul) e hidrológica (em verde).....	41
Figura 17 - Precipitação Total (mm/dia) e Temperatura Média (°C) da Região Nordeste da América do Sul (NES) – Brasil (Fonte: IPCC 2021 - https://interactive-atlas.ipcc.ch/). [P] Fontes de dados para precipitação e [T] fontes de dados para temperatura.	43
Figura 18 - Perfil (N-S) da porção central do SAU-BA, com as duas camadas do modelo, e a representação das três diferentes áreas de recarga nas cores: branca, verde e azul escuro. As células das extremidades, na cor verde claro, não são usadas no cálculo do modelo.	48
Figura 19 - Climatologia (1995-2014) da precipitação anual (mm/ano): (a) Modelo CanESM5, (b) Reanálise ERA5 e (c) Diferença entre CanESM5 e ERA5.....	50
Figura 20 - Climatologia (1995-2014) da precipitação anual (mm/ano): (a) Modelo MIROC6, (b) Reanálise ERA5 e (c) Diferença entre MIROC6 e ERA5.	51
Figura 21 – Climatologia Sazonal (1995-2014) da precipitação anual (mm/ano): (a,d,g,j) Modelo CanESM5, (b,e,h,k) Reanálise ERA5 e a (c,f,i,l) Diferença entre CanESM5 e ERA5.	53
Figura 22 - Climatologia Sazonal (1995-2014) da precipitação anual (mm/ano): (a,d,g,j) Modelo MIROC6, (b,e,h,k) Reanálise ERA5 e a (c,f,i,l) Diferença entre MIROC6 e ERA5.	54
Figura 23 - Climatologia (1995 – 2014) da Temperatura Média no Clima Referência (°C): (a) Modelo CanESM5, (b) Reanálise ERA5 e (c) Diferença entre CanESM5 e ERA5.	56
Figura 24 - Climatologia (1995 – 2014) da Temperatura Média no Clima Referência (°C): (a) Modelo MIROC6, (b) Reanálise ERA5 e (c) Diferença entre MIROC6 e ERA5.....	57
Figura 25 – Climatologia Sazonal (1995 – 2014) da Temperatura Média no Clima Referência (°C): (a,d,g,j) Modelo CanESM5, (b,e,h,k) Reanálise ERA5 e (c,f,i,l) Diferença entre CanESM5 e ERA5.....	59

- Figura 26 - Climatologia Sazonal (1995 – 2014) da Temperatura Média no Clima Referência (°C): (a,d,g,j) Modelo MIROC6, (b,e,h,k) Reanálise ERA5 e (c,f,i,l) Diferença entre MIROC6 e ERA5. 60
- Figura 27 – Mudança relativa (%) na precipitação anual entre o clima futuro (2041 – 2060) e clima de referência (1995 – 2014): (a) Modelo CanESM5 – SSP1-2.6, (b) Modelo CanESM5 – SSP5-8.5, (c) Modelo MIROC6 – SSP1-2.6 e (d) Modelo MIROC6 – SSP5-8.5. 62
- Figura 28 – Mudança na temperatura média anual (°C) entre o clima futuro (2041 – 2060) e clima de referência (1995 – 2014): (a) Modelo CanESM5 – SSP1-2.6, (b) Modelo CanESM5 – SSP5-8.5, (c) Modelo MIROC6 – SSP1-2.6 e (d) Modelo MIROC6 – SSP5-8.5. 63
- Figura 29 - Gráficos das Estações INMET (a) Correntina e (b) Barreiras – (BA) relacionando recarga (mm/ano) e precipitação (mm/ano) ao longo do tempo (1995-2014). As linhas pontilhadas representam as tendências na recarga (em verde) e na precipitação (laranja). 66
- Figura 30 - Gráfico da recarga média mensal (mm) dos modelos CanESM5 e MIROC6, para o clima de referência (1995-2014) e para o clima futuro (2041-2060) nos cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5. 68
- Figura 31 - Gráficos do Balanço Hídrico da região do SAU-BA do modelo CanESM5, para o clima de referência (1995-2014), e para os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 no clima futuro de médio prazo (2041-2060). 70
- Figura 32 - Gráficos do Balanço Hídrico da região do SAU-BA do modelo MIROC6, para o clima de referência (1995-2014), e para os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 no clima futuro de médio prazo (2041-2060). 71
- Figura 33 - Mapa de distribuição das variações do nível freático (NF) do SAU-BA para o modelo CanESM5, nos cenários (a) SSP1-2.6 e (b) SSP5-8.5. Os tons em vermelho indicam tendência de redução do NF, enquanto os tons azuis uma tendência de manutenção do NF em relação ao clima de referência. 72
- Figura 34 - Mapa de distribuição das variações do nível freático (NF) do SAU-BA para o modelo MIROC6, nos cenários (a) SSP1-2.6 e (b) SSP5-8.5. Os tons em vermelho indicam tendência de redução do NF, enquanto os tons azuis uma tendência de manutenção do NF em relação ao clima de referência. 73

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Informações sobre os modelos climáticos CMIP6 usados neste estudo.	42
Tabela 2 – Médias anuais dos principais resultados do Software Visual Balan 2.0.....	67
Tabela 3 – Tabela com as variações, absoluta e relativa, dos volumes de recarga do aquífero entre o clima de referência (1995-2014) e os cenários, SSP1-2.6 e SSP5-8.5, no clima futuro (2041-2060)	72

Lista de Siglas

ANA – Agência Nacional de Águas

ASAS - Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

ASPS - Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul

AR6 – *Sixth Assessment Report*

CanESM5 - *Canadian Earth System Model version 5*

CLASS3.6 - *Canadian Land Surface Scheme version 3.6*

CMIP - *Coupled Model Intercomparison Project*

CDS - *Climate Data Store*

COCO4.9 - *CCSR Ocean Component Model version 4.9*

CORDEX - *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

CRU - *Climate Research Unit*

CTEM1.2 - *Canadian Terrestrial Ecosystem Model version 1.2*

DJF - Dezembro, Janeiro e Fevereiro

ECHAM5 - *Global climate model developed by the Max Planck Institute for Meteorology in Germany 5*

ERA5 - *European Centre for Medium Range Weather Forecast ReAnalysis 5*

GPCC - *Global Precipitation Climatology Centre*

GPCP - *Global Precipitation Climatology Project*

HADCM3 - *Hadley Centre coupled atmosphere–ocean 3*

HadGEM2-ES – *Hadley Centre Global Environmental Model: Version 2*

HN - Hemisfério Norte

HS - Hemisfério Sul

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC – *Intergovernmental Panel of Climate Change*

JJA - Junho, Julho e Agosto

LIM2 - *Louvain-la-Neuve Ice Model Version 2*

MAM - Março, Abril e Maio

MATSIRO6.0 - *Sixth version of Minimal Advanced Treatments of Surface Interaction and RunOf*

MCG - Modelo de Circulação Geral

MIROC6 – *Model for Interdisciplinary Research on Climate: Version 6*

MMA - Ministério do Meio Ambiente

NEMO3.4.1 - *Nucleus for European Modelling of the Ocean version 3.4.1*

NICAN - *Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model*

RCPs - *Representative Concentration Pathways*

SAU - Sistema Aquífero Urucuia

SAU-BA - Sistema Aquífero Urucuia, no oeste da Bahia

SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

SRH - Superintendência de Recursos Hídricos

SON - Setembro, Outubro e Novembro

SSPs - *Shared Socioeconomic Pathways*

SRES - *Estimated greenhouse gas concentrations for the future Emission Scenarios*

ONU – Organização das Nações Unidas

USP - Universidade de São Paulo

USGS - *United States Geological Survey*

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Siglas	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	4
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 PROJEÇÕES CLIMÁTICAS COM CMIP6	7
2.1.1 Precipitação	9
2.1.2 Temperatura do Ar.....	14
2.2 MODELOS HIDROGEOLÓGICOS	18
2.2.1 Visual Balan	19
2.2.2 Modelo MODFLOW	21
2.3 MODELOS HIDROGEOLÓGICOS APLICADOS AOS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM AQUÍFEROS.....	23
2.3.1 Estimativa de Alterações na Recarga em função de mudanças no clima com <i>software Visual BALAN</i>	25
2.3.2 Estimativa de Alterações na Recarga e Fluxo subterrâneo em função de mudanças no clima com o <i>software MODFLOW</i>	28
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	33
3.1 LOCALIZAÇÃO	33
3.2 CLIMATOLOGIA.....	34
3.3 HIDROLOGIA	36
3.4 HIDROGEOLOGIA	38
4 METODOLOGIA E DADOS	40
4.1 ETAPA METEOROLÓGICA	41

4.1.1	Modelos CMIP6	41
4.1.2	Reanálise ERA5.....	44
4.2	ETAPA HIDROLÓGICA.....	44
4.2.1	Método do Balanço Hidrometeorológico	45
4.2.2	Método do Balanço de Massas e Fluxo	47
5	RESULTADOS.....	49
5.1	AVALIAÇÃO DOS MODELOS DO CMIP6 NO CLIMA DE REFERÊNCIA	49
5.1.1	Precipitação	49
5.1.2	Temperatura do Ar.....	55
5.2	PROJEÇÕES DOS MODELOS DO CMIP6 NO CLIMA FUTURO	61
5.2.1	Precipitação	61
5.2.2	Temperatura do Ar.....	63
5.3	BALANÇO HIDROMETEOROLÓGICO	64
5.3.1	Cálculo da Recarga no Clima de Referência.....	64
5.3.2	Projeções de Recarga para o Clima Futuro	67
5.4	ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES DA RECARGA E DO FLUXO PARA O CLIMA FUTURO	69
6	CONCLUSÕES.....	75
7	Referências Bibliográficas	78

1 INTRODUÇÃO

A maior parte da superfície da Terra (cerca de 70%), está coberta por água, totalizando um volume de 1,4 bilhão de km³ (SHIKLOMANOV, 1998). Desse volume total de água no planeta, 97,5% é salgada, dos mares e oceanos, imprópria para o consumo humano e apenas 2,5% é doce. No entanto, do total de 35 milhões de km³ de água doce existente na Terra, 68,9% estão retidos na Antártica, no Ártico e nas geleiras, não estando disponíveis para uso humano; 0,9% representam a umidade do solo e pântanos; 0,3% os rios e lagos; e os 29,9% restantes são águas subterrâneas. Dessa maneira, do total de água doce disponível para consumo, subtraindo-se aquela presente na Antártica, no Ártico e nas geleiras, as águas subterrâneas representam um total de 96%, aproximadamente 10 milhões de km³ (MMA, 2007).

Atualmente, de acordo com a *United Nations Educational Scientific and Cultural Organization* (UNESCO), a Europa conta com cerca de 75% de seu consumo diário de água proveniente de águas subterrâneas, sendo que em países como a Alemanha, Holanda e Suécia, esse índice está acima dos 90%. No Brasil, 68,5% dos recursos hídricos estão localizados na Região Norte, que possui densidade demográfica de 4,12 habitantes/km², enquanto na Região Sudeste, a densidade demográfica é de 48,58 habitantes/km² e a porcentagem de recursos hídricos é de apenas 6% (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2010). As águas subterrâneas representam cerca de 35% do consumo da população em termos de volume, e 50% dos municípios brasileiros utilizam majoritariamente água subterrânea para suas necessidades.

Diversos setores utilizam as águas subterrâneas, sendo os principais usos o abastecimento doméstico (30%), agropecuário (24%), abastecimento público urbano (18%) e abastecimento múltiplo (14%), industrial (10%) e outros (4%) como lazer, etc (CPRM, 2018 e HIRATA, 2019a). Dos municípios brasileiros, 52% utilizam águas subterrâneas para o abastecimento, sendo que 36% são abastecidos exclusivamente e 16% parcialmente por essas águas (ANA, 2010). Foi observado que a exploração desse recurso é inversamente proporcional ao tamanho do município. Por exemplo, em cidades com mais de 500 mil habitantes, apenas 2% utilizam as águas subterrâneas para abastecimento integral. Em termos populacionais, o estudo revela que 82,3% da população são abastecidas por fontes superficiais ao passo que apenas 17,7%

são atendidos pelas águas subterrâneas. Contudo, estima-se que o volume de água extraída dos aquíferos cheguem a 1.660 milhões de m³ ao ano (HIRATA *et al.* 2019).

Ao longo das décadas, além da contaminação, o uso crescente das águas subterrâneas para consumo humano, para consumo industrial e na irrigação da agricultura, resultou na diminuição da disponibilidade desse recurso em grande parte do mundo. Além disso, as projeções de mudanças climáticas indicam que haverá aquecimento em todo o planeta, com muitas regiões afetadas por redução da precipitação e aumento da taxa de evapotranspiração, causando uma diminuição da recarga dos aquíferos, enquanto em algumas outras ocorrerá o oposto (TREIDEL *et al.* 2012).

A mudança climática é uma alteração estatisticamente significativa das variáveis climáticas em termos de sua distribuição no tempo e no espaço, e afetam o ciclo da água principalmente por meio de mudanças na precipitação e na temperatura. OLIVEIRA *et al.* (2006) descrevem que as mudanças nos regimes de temperatura afetam a evapotranspiração, o esgotamento da água do solo, as perdas de água de lagos e outros reservatórios de água de superfície; enquanto as mudanças nos padrões, frequências e intensidades de precipitação afetam o escoamento, a infiltração, o conteúdo médio de umidade do solo e a recarga. Os seguintes impactos podem surgir nas águas subterrâneas devido às mudanças climáticas: diminuição da qualidade da água devido à intrusão salina, acréscimo do escoamento devido ao nível elevado do lençol freático, acréscimo na ocorrência de conflitos internacionais por causa da água, diminuição da qualidade da água devido ao aumento da concentração de nutrientes/contaminantes, diminuição da quantidade e qualidade da água devido ao escoamento e erosão, além da diminuição do desenvolvimento agrícola e dos lucros devido à seca. No entanto, um dos maiores impactos da mudança climática, devido ao efeito combinado da mudança nos regimes de temperatura e precipitação, é na recarga aos aquíferos.

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC - 2021) projeta um aumento da temperatura média do ar à superfície podendo variar entre 1,4 °C, cenário mais otimista, e 4,4 °C no cenário mais pessimista. Para a América do Sul (AS), o relatório projeta para o final do século um aumento das secas agrícolas e ecológicas com alta confiança no norte da AS e na região de monção da AS, e com média confiança no nordeste da AS, o que inclui o Nordeste e Centro-oeste do Brasil (SENEVIRATNE *et al.*, 2021).

Em razão da grande apreensão com os impactos das mudanças climáticas na recarga de aquíferos em todo o mundo, diversas pesquisas têm sido publicadas usando modelos hidrogeológicos, para estimar as mudanças na recarga de águas subterrâneas sob os efeitos dos cenários das mudanças climáticas (CANDELA *et al.*, 2012; PISANI VEIGA, SAMPER CALVETE e LI, 2013; CANDELA *et al.*, 2016; PISANI, SAMPER e MARQUES, 2019; TOURE, DIEKKRÜGER e MARIKO, 2016; GHAZAVI e EBRAHIMI, 2019; OSTAD-ALI-ASKARI *et al.*, 2019; KLAAS *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2020; PETPONGPAN, EKKAWATPANIT e KOSITGITTIWONG, 2020 e MANTOVANI *et al.*, 2019). Tais modelos utilizam dados históricos e de saída de modelos climáticos globais e regionais.

O Sistema Aquífero Urucuia (SAU), que é a região de interesse deste trabalho, é um dos principais sistemas aquíferos do Brasil. O SAU está situado em sua maior parte no oeste da Bahia (SAU-BA, Figura 1), e vem se transformando nas últimas décadas no principal polo agrícola baiano, localizado na nova fronteira agrícola do país, região conhecida como MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia). A região possui alguns dos maiores índices de produção do país, devido as suas características geológicas e geomorfológicas que apresentam extensas áreas planas que, em conjunto com a disponibilidade hídrica do SAU, têm promovido fortemente o desenvolvimento de agricultura irrigada intensiva. Assim, o estudo do comportamento da recarga desse aquífero frente aos possíveis cenários climáticos futuros é de suma importância para melhor planejamento da gestão dos recursos hídricos na região.

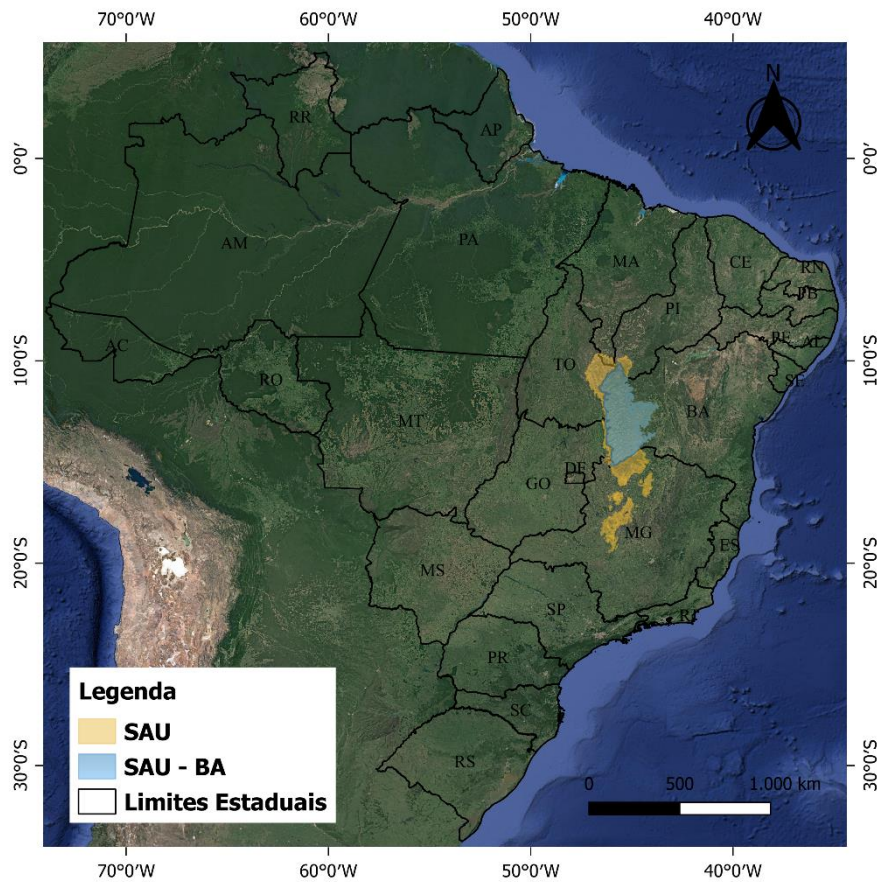


Figura 1 - Mapa da área de estudo (Fonte: Google Earth).

1.1 OBJETIVOS

A região oeste da Bahia, onde está situada a área de estudo desta dissertação, está em desenvolvimento econômico desde a década de 1980, quando o Cerrado, vegetação nativa da região, foi sendo desmatado, para o estabelecimento de lavouras. O objetivo principal deste trabalho é promover um melhor entendimento nos estudos dos futuros impactos das mudanças climáticas na recarga e no fluxo do SAU-BA, visto o papel fundamental das águas subterrâneas no abastecimento e atendimento da demanda hídrica na região.

Neste trabalho são utilizados os modelos hidrogeológicos o *Software Visual Balan 2.0* (SAMPER *et al.*, 1999) e MODFLOW (HARBAUGH *et al.*, 2017) para analisar as mudanças na recarga e no fluxo do SAU-BA. Dados de precipitação e temperatura projetados por dois modelos do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6), esses modelos climáticos foram escolhidos por melhor representarem o clima da Região Nordeste do Brasil

quando comparados aos dados observacionais de diferentes fontes, são utilizados para a estimativa de recarga futura do aquífero, para assim avaliar o seu comportamento no futuro a médio prazo (2041-2060). Tal período foi escolhido por ser tratar de um futuro não muito distante do atual, porém com mudanças significativas na temperatura entre os cenários adotados pelo CMIP6. Os cenários utilizados neste trabalho, são SSP1-2.6 e SSP5-8.5 (*Shared Socioeconomic Pathways*), por se tratarem de condições futuras consideradas otimistas e pessimistas, respectivamente, tendo em conta as fortes incertezas que envolvem os resultados e aplicação desses modelos.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- i) avaliar as simulações dos modelos climáticos *Canadian Earth System Model version 5* (CanESM5) e *Model for Interdisciplinary Research on Climate version 6* (MIROC6), no clima de referência (1995-2014);
- ii) analisar as projeções de temperatura média anual e precipitação anual dos modelos climáticos CanESM5 e MIROC6, sob os cenários futuros SSP1-2.6 e SSP5-8.5, no médio prazo (2041-2060) e;
- iii) acessar os efeitos de tais mudanças na recarga e do fluxo SAU-BA e,;
- iv) avaliar os resultados criticamente, propor e recomendar estudos complementares.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por sete capítulos, incluindo esta introdução. No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre as projeções de temperatura e precipitação obtidas a partir dos modelos do CMIP6. Ademais, ainda no Capítulo 2, elabora-se uma revisão da literatura sobre os modelos hidrogeológicos usados nesta dissertação e como eles podem ser utilizados nas projeções dos efeitos das mudanças climáticas nos aquíferos. No Capítulo 3 apresenta-se a caracterização da área de estudo que está subdividido em: localização, climatologia, hidrologia e hidrogeologia. A metodologia e os dados utilizados neste trabalho são apresentados no Capítulo 4. No Capítulo 5 estão expostos os resultados da avaliação do CanESM5 e MIROC6 para o período de referência (1995-2014), as projeções futuras de temperatura do ar e precipitação para a região do SAU-BA, o balanço hidrometeorológico e a avaliação das simulações do fluxo para o clima futuro. Finalmente as conclusões e considerações finais deste estudo são exibidas no Capítulo 6.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com IPCC (IPCC, 2012), a mudança climática é definida como uma mudança no estado do clima que pode ser identificado (por exemplo usando testes estatísticos) por mudanças na média e/ou na variabilidade de suas propriedades, e que persiste por um período de décadas ou mais. A mudança climática pode ser causada por processos internos naturais ou por forçantes externas, ou ainda por mudanças antropogênicas persistentes na composição da atmosfera ou uso da terra.

Segundo o Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC, a temperatura na superfície terrestre aumentou 1,59 °C em média, e 0,88 °C nos oceanos, no período 2011-2020, em relação ao período pré-industrial (1850-1900). Para as projeções de temperaturas futuras, no cenário SSP1-1.9, o aumento da temperatura no período de 2081-2100, ficarão entre 1 °C e 1,8 °C mais altas do que no período 1850-1900, e no cenário SSP5-8.5, esse aumento poderá ser de 3,3 °C a 5,7 °C. Segundo o Observatório do Clima (2021), a influência humana pode ter contribuído para o aumento da umidade na atmosfera, assim, a precipitação provavelmente aumentou desde os anos 1950, e de forma mais rápida a partir da década de 1980. Para a precipitação, o IPCC projeta aumento no total pluviométrico anual nas altas latitudes, e redução nas regiões do Mediterrâneo, da África, Amazônia, América Central, sudoeste da América do Sul, e na Austrália. Além disso, o relatório projeta que o número de dias secos poderá aumentar nas regiões subtropicais, Amazônia e América Central.

PANWAR; CHAKRAPANI (2013) argumentam que as mudanças climáticas irão influenciar todos os recursos naturais, incluindo as águas subterrâneas. Essas mudanças no clima não irão afetar apenas a quantidade de chuva e a evapotranspiração, que afetam a quantidade de recarga do aquífero de uma região, mas irão afetar também o grau com que as populações dependem dos recursos hídricos.

Para proporcionar um consumo sustentável da água subterrânea, com o objetivo de ajustar as necessidades humanas à preservação do meio ambiente, é necessário estudar e aprimorar os métodos de estimativa de recarga em diferentes condições climáticas e realizar o monitoramento contínuo dos impactos das mudanças climáticas no armazenamento dos aquíferos (LIU, 2011; OLIOSO *et al.*, 2013).

A seguir são apresentados resultados de projeções a partir de Modelos Climáticos Globais do CMIP6 (Seção 2.1), uma breve explicação sobre os modelos hidrogeológicos utilizados neste estudo (Seção 2.2) e trabalhos mostrando como a modelagem hidrogeológica pode ser utilizada na análise dos efeitos das mudanças climáticas nos aquíferos (Seção 2.3).

2.1 PROJEÇÕES CLIMÁTICAS COM CMIP6

Os modelos climáticos são as principais ferramentas disponíveis para investigar a resposta do sistema climático à diferentes forçantes, para fazer simulações do clima em escalas temporais que vão da sazonal à decadal e para fazer projeções de futuras alterações climáticas. As aplicações desses modelos incluem simulações paleoclimatológicas, históricas, estudos de sensibilidade e processo, simulação de curto prazo da variabilidade climática e mudança sazonal, projeções das mudanças climáticas futuras ao longo do próximo século ou mais (BERNARDINO; SANTO, 2015).

Modelos de Circulação Geral (MCG) são desenvolvidos por vários grupos de modelagem em todo o mundo e sob a égide do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP), são amplamente usados para estudar os impactos das mudanças climáticas passadas, presentes e futuras em escala global ou sinótica (EYRING *et al.*, 2016). Esses modelos climáticos de última geração evoluíram nas últimas duas décadas a fim de representar os complexos sistemas climáticos. Com o apoio de vários programas internacionais, simulações climáticas históricas e futuras de muitos grupos de modelagem de todo o mundo foram realizadas para apoiar os Relatórios de Avaliação do IPCC. Embora vários modelos do CMIP5 tenham incorporado novos componentes, como vegetação dinâmica, efeitos indiretos de aerossóis, etc. (TAYLOR *et al.*, 2012), suas resoluções espaciais grosseiras falham em capturar a influência de características de escala local (como topografia, retroalimentação da superfície da terra, mudanças no uso da terra, e outros) na reprodução das condições climáticas atuais (GUSAIN; GHOSH; KARMAKAR, 2020).

O CMIP6 lançou o mais recente conjunto de simulações de modelos climáticos coordenados para apoiar o AR6, e forneceu projeções climáticas multimodelo com base em cenários alternativos que são diretamente relevantes para as preocupações da sociedade em relação à mitigação, adaptação ou impactos das mudanças climáticas. Essas projeções climáticas foram impulsionadas por um novo conjunto de cenários de emissões e uso da terra produzidos com

modelos de avaliação integrados com base em novos caminhos futuros de desenvolvimento social, os Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSPs) (EYRING *et al.*, 2016). Os SSPs são combinações específicas de desafios socioeconômicos para mitigação e desafios socioeconômicos para adaptação (Figura 2). Os SSPs pretendem descrever mundos nos quais as tendências sociais resultam em tornar a mitigação ou adaptação às mudanças climáticas mais difícil ou mais fácil, sem considerar explicitamente as próprias mudanças climáticas (O'NEILL *et al.*, 2016). Os dois eixos principais da arquitetura da matriz dos cenários são: o nível de forçamento radiativo do clima futuro, caracterizado pelas vias de concentração representativas (RCPs) e o conjunto de trajetórias alternativas plausíveis de desenvolvimento global futuro (os SSPs). Os SSPs são baseados em cinco narrativas que descrevem caminhos alternativos para o desenvolvimento socioeconômico, incluindo desenvolvimento sustentável (SSP1), desenvolvimento intermediário (SSP2), rivalidade regional (SSP3), desigualdade (SSP4) e desenvolvimento movido a combustíveis fósseis (SSP5). Esta nova geração de cenários irá facilitar a compreensão da sociedade sobre o clima plausível e os futuros socioeconômicos (FAN *et al.* 2020).

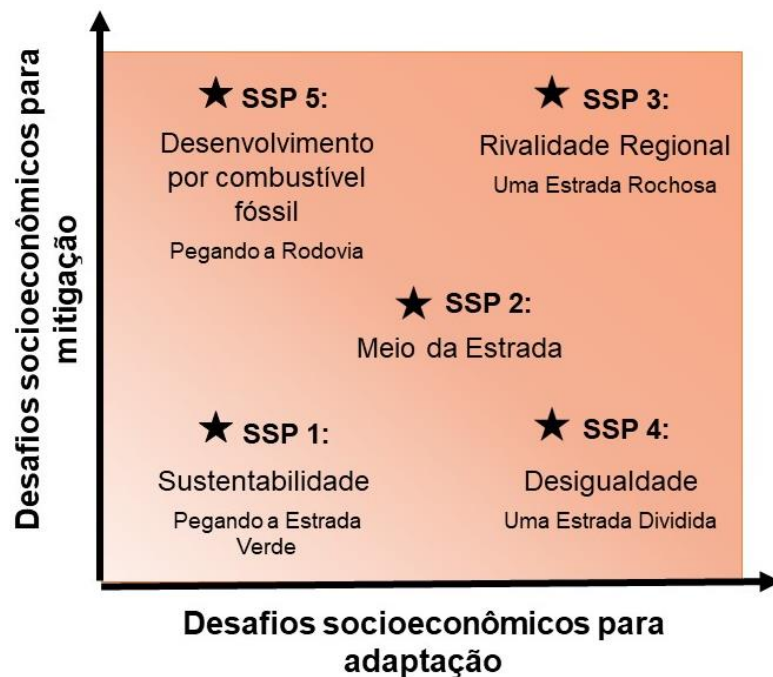


Figura 2 - Cinco caminhos socioeconômicos compartilhados (SSPs) que representam diferentes combinações de desafios para mitigação e adaptação. Fonte: Traduzido de O'NEILL *et al.*, 2016.

Como já foi citado, o CMIP6 foi lançado recentemente, logo pesquisas sobre o desempenho de seus modelos e cenários, nas simulações históricas e nas projeções climáticas usando os novos cenários (SSPs), ainda estão em produção ou sendo lançadas.

2.1.1 Precipitação

No ciclo hidrológico, as componentes afetadas por mudanças climáticas incluem o conteúdo de vapor de água atmosférico, padrões de precipitação, evapotranspiração, cobertura de neve, derretimento de gelo e geleiras, temperatura do solo, umidade do solo, escoamento superficial e vazão (BATES *et al.* 2008). Há fortes evidências de que a mudança climática aumentará o risco e a gravidade das secas, mas essas conclusões dependem das regiões, estações do ano e métricas de seca consideradas (COOK *et al.*, (2020). Logo, compreender como as mudanças climáticas afetam a disponibilidade de precipitação e assim as secas, orienta o planejamento para a adaptação da agricultura, a segurança hídrica e a gestão de ecossistemas.

COOK *et al.*, (2020) analisaram além da temperatura do ar, mudanças de outras variáveis que envolvem o ciclo hidrológico, como: precipitação, umidade do solo e escoamento, através das projeções de 13 modelos do CMIP6 em quatro cenários (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Os autores, usaram como período de referência 1850-1880, e fizeram projeções para 2071-2100, concluindo que, como mostrado na Figura 3, ocorrem aumentos na precipitação na América do Sul extratropical a leste da Cordilheira dos Andes. Os padrões de redução na precipitação não são robustos e são muito mais localizados, sendo que os maiores declínios ocorrem ao longo das costas ocidentais da América do Sul e da África do Sul, incluindo também a Amazônia.

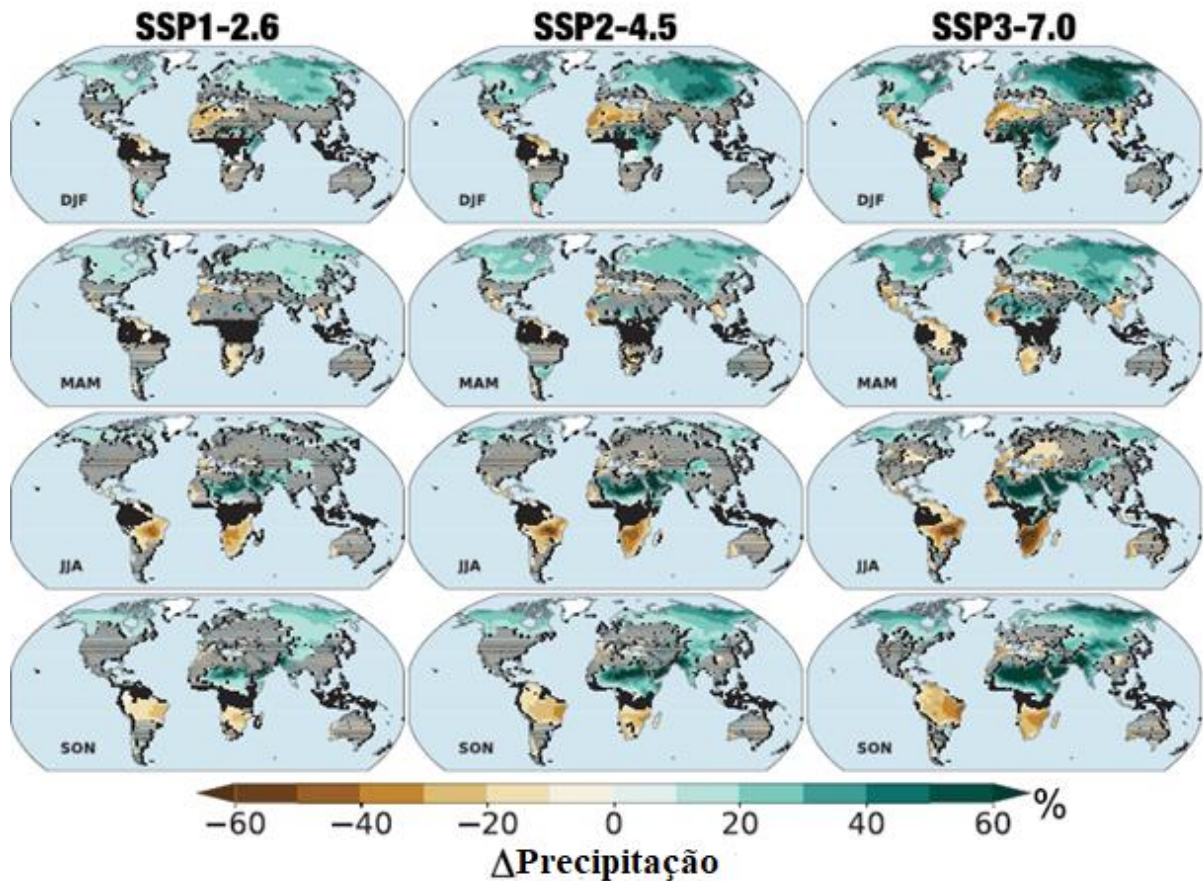


Figura 3 - Mudanças na precipitação total média sazonal de três meses (variação%, 2071–2100 versus 1851–1880) na média do conjunto multimodelo nos SSPs. As áreas onde as mudanças não são robustas são indicadas por hachuras. Fonte: Traduzido de Cook *et al.* (2020).

UKKOLA *et al.* (2020) estudaram as mudanças na seca global através do déficit da precipitação mensal de nove Modelos do CMIP6, em dois cenários futuros (SSP2-4.5 e SSP5-8.5), usando o período histórico de 1950-2014, para as projeções de longo prazo (2071-2100). Os pesquisadores analisaram as mudanças médias de variabilidade como impulsionadores da seca futura, através das mudanças na média e no desvio padrão da precipitação mensal no cenário SSP5-8.5 (Figura 4). Eles concluíram que a precipitação média mostra aumentos e diminuições, enquanto a variabilidade da precipitação está aumentando amplamente. A Figura 4c, projeta que no Mediterrâneo ocorra uma diminuição na precipitação média de 14% sob o cenário de emissões mais altas, outra região que poderá acontecer algo semelhante é o Chile. A Amazônia apresenta um exemplo interessante em que as projeções de seca são parcialmente impulsionadas por mudanças na média e na variabilidade. A projeção é que precipitação média diminua em 7% e o desvio padrão aumente 11% (Figura 4e, h). Logo, as mudanças na duração, intensidade e frequência da seca sazonal são robustas em 45%, 26% e 57% da área global (excluindo a Antártica) no CMIP6, respectivamente, e o nível de concordância do

modelo é maior em comparação com CMIP5. Porém, o estudo mostra projeções mais robustas de seca do que de precipitação média, indicando que a abordagem comum de usar a precipitação média para quantificar mudanças na seca leva a uma menor confiança nas projeções de secas futuras.

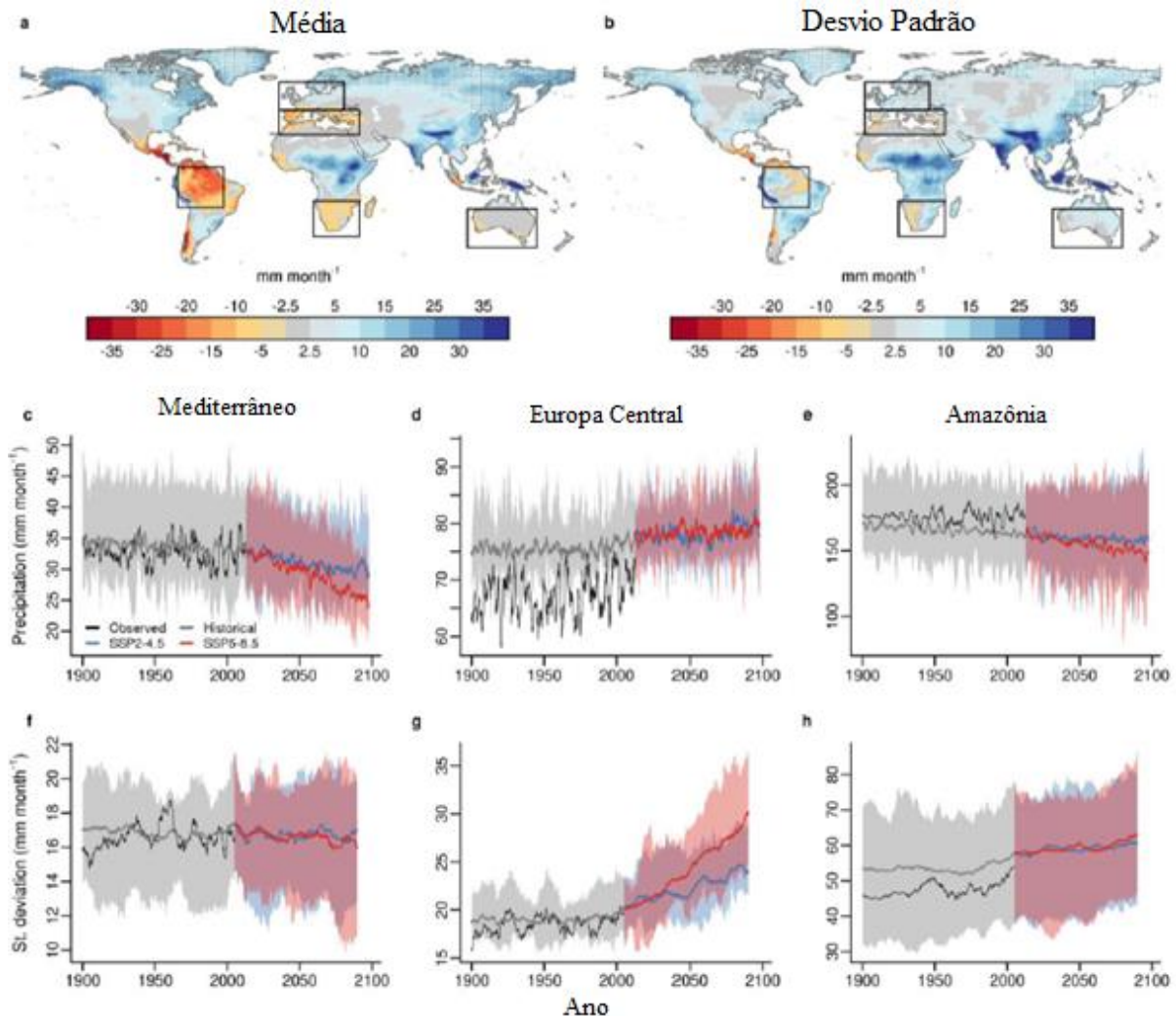


Figura 4 - Mudanças projetadas na média e variabilidade da precipitação mensal. (a) Mudança média multimodelo projetada na precipitação média mensal e (b) desvio padrão para nove modelos CMIP6 no cenário SSP5-8.5 com o período 1950-2014. O pontilhado indica onde a magnitude da mudança futura média entre os modelos excedeu o desvio padrão entre os modelos da mudança. (c-e) mostram uma série de tempo de precipitação média mensal para as regiões do Mediterrâneo, Europa central e Amazônia, respectivamente. (f-h) mostram uma série de tempo de 10 anos consecutivos de desvio padrão da precipitação mensal para as mesmas regiões. Em (c-f), o sombreado mostra a gama completa do modelo e as linhas sólidas mostra o multimodelo. Fonte: Traduzido de Ukkola *et al.* (2020).

NA; FU; KODAMA(2020) compararam os resultados do modelo NICAN (*Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model* - SATOH *et al.* 2014), com quatro modelos do CMIP6, para a precipitação diária, no período histórico de 1979-2008. Além disso analisaram também suas projeções futuras para o período de 2071-2100. Os pesquisadores deduziram que para o

período histórico, o NICAN tende a simular mais precipitação sobre a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) do que os modelos do CMIP6. Para as projeções futuras, os aumentos da probabilidade de precipitação intensa previstos pelos modelos CMIP6 são maiores do que o NICAM em suas resoluções nativas, enquanto os resultados do NICAM caem na faixa dos modelos CMIP6 após interpolação para a mesma resolução. Tal resultado indica que o futuro aumento (diminuição) na probabilidade de precipitação intensa (leve) é robusto, independentemente da representação subjacente dos processos de precipitação com ou sem parametrização de convecção. Em termos de distribuições espaciais, as diferenças entre os modelos ocorrem principalmente em latitudes baixas, o que pode ser causado pelas grandes incertezas na projeção de forte precipitação a partir de modelos climáticos. Dessa forma, os pesquisadores destacam que a distribuição de probabilidade de precipitação diária e sua mudança percentual futura depende da resolução da grade horizontal dos modelos.

Um dos estudos mais recentes que investiga as mudanças futuras na duração das monções e da precipitação, em 14 modelos do CMIP6, em todo o globo é o de MOON; HA (2020). Os pesquisadores utilizaram dados da precipitação e da temperatura superficial mensal e diária, considerando o período histórico como 1995-2014, e para os seguintes períodos futuros: curto (2021-2040), médio (2041-2060) e longo (2081-2100) prazo, em quatro cenários SSP (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Os pesquisadores indicam que a precipitação na área das monções aumentará sob um clima quente. As mudanças na precipitação no verão mostram diferenças muito grandes entre a monção do hemisfério norte (HN) e a monção do hemisfério sul (HS); projetando-se que a precipitação sobre o HN aumente à medida que a temperatura aumenta em todos os cenários e períodos futuros. Enquanto a precipitação de HN deve aumentar em 6,7%, a precipitação de HS deve aumentar apenas 2,8% sob um aquecimento global de 3,8 °C, a longo prazo de acordo, sob o cenário SSP5-8.5. Quando é considerada a mudança relativa na precipitação sobre a mudança de temperatura para o HN, observa-se uma tendência mais acentuada para o SSP1-2,6 (4%/°C) do que para o SSP2-4,5 (2,1%/°C) e SSP5-8.5 (1,8%/°C), embora a mudança relativa total em SSP1-2.6 seja a mais baixa entre os cenários. No HS, não há relação significativa entre a precipitação e a temperatura em SSP1-2.6. No entanto, as taxas crescentes de precipitação no verão com o aumento da temperatura global são semelhantes no SSP2-4.5 e no SSP5-8.5, com 0,8%/°C. Assim, para os pesquisadores, as mudanças projetadas para a precipitação são amplamente incertas no HS.

Em RIVERA; ARNOULD(2020) foi avaliado o desempenho da precipitação simulada utilizando as simulações históricas do período 1901-2014 na região do sudoeste da AS, de 14 modelos CMIP6, incluindo o CanESM5 e o MIROC6, comparando-os com os conjuntos de dados de observações do CRU (*Climate Research Unit – HARRIS et al. 2014*), usando um conjunto de métricas estatísticas, com foco particular na quantificação do declínio da precipitação de longo prazo que desencadeou condições de seca recorrentes recentes sobre a região de estudo. Os autores destacaram que o desempenho dos modelos é dependente da região. As principais características da precipitação regional foram capturadas adequadamente pela maioria dos modelos CMIP6, embora com um viés ao sul de 35° S, especialmente ao longo da cordilheira dos Andes e no sul do Chile, superestimando a precipitação em 100 mm/mês durante a estação chuvosa de inverno. A magnitude do declínio da precipitação de longo prazo, foi razoavelmente capturada pelos diferentes modelos CMIP6, mas os resultados dos modelos tendem a localizar o máximo na diminuição da precipitação ao sul da posição das tendências observadas. No entanto, apenas cinco dos modelos foram capazes de reproduzir melhor as características climatológicas da precipitação e suas mudanças temporais e espaciais na área de estudo.

No Brasil, semelhante ao estudo de COOK *et al.* (2020), PARSONS, (2020) também avaliou as mudanças da seca na Amazônia, através de parâmetros presentes no ciclo hidrológico, a precipitação e a umidade superficial do solo, de 22 modelos CMIP6. A Figura 5 indica que os dados de precipitação instrumental do GPCC (*Global Precipitation Climatology Centre – SCHNEIDER et al. 2011*) exibem uma tendência de clima mais seco em grande parte do leste da Amazônia e norte da América do Sul tropical, e uma tendência de aumento da precipitação em grande parte do oeste e noroeste da Amazônia para o período histórico de 1950-2014. As simulações históricas do CMIP6 apresentaram uma orientação decrescente de precipitação sobre o norte da América do Sul e grande parte do sul da Amazônia e uma tendência ligeiramente positiva de precipitação sobre o noroeste da Amazônia na média do período ONDJFM. Para o cenário futuro SSP3-7.0, mais de 75% dos modelos projetaram uma seca em grande parte do sudoeste, leste e norte da América do Sul tropical. A extensão geográfica desta seca futura é diminuída no cenário SSP1-2.6, com uma tendência mais fraca de um clima mais seco no leste e sul da Amazônia na média multimodelo. As simulações do CMIP6 para os dois cenários mostraram uma tendência de aumento da precipitação no futuro no Nordeste do Brasil. Todas as projeções dos modelos CMIP6 para o cenário SSP3-7.0 mostraram uma futura diminuição de precipitação para grande parte da Amazônia.

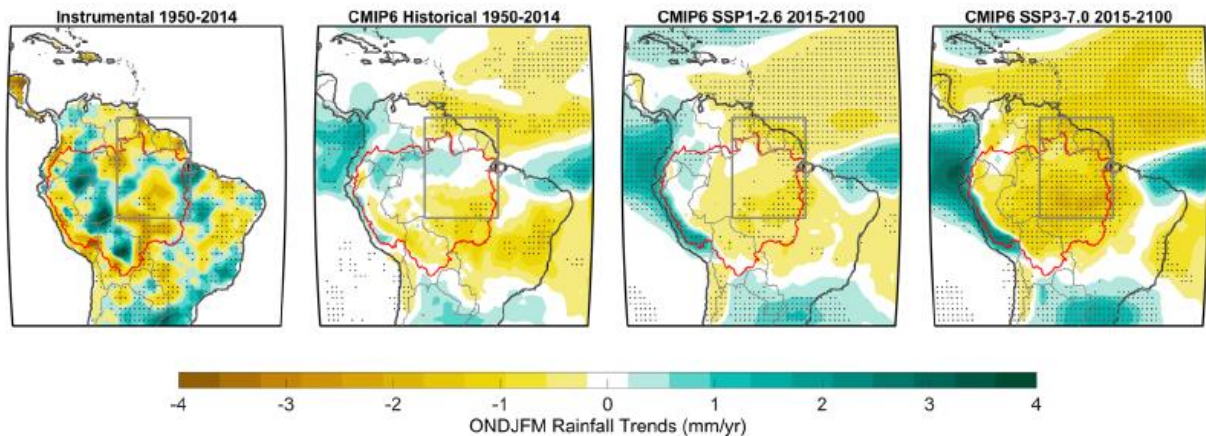


Figura 5 – Padrões de precipitação nos dados instrumentais de 1950-2014 (esquerda), simulações históricas do modelo climático de 1950-2014 (centro esquerdo), cenário de aquecimento SSP1-2.6 para 2015–2100 (centro à direita) e cenário de aquecimento SSP3-7.0 para 2015–2100 (extrema direita). A caixa cinza delimitam a região da Amazônia Oriental, a linha preta/vermelha delimitam a bacia amazônica e as linhas cinza claro mostram as fronteiras dos países. O pontilhado mostra onde todos os dados instrumentais concordam com o sinal de tendência (esquerda) ou onde mais de 17 das 22 simulações do modelo (> 75%) concordam com o sinal da tendência (centro, direita). Fonte: Extraído de Parsons, (2020).

2.1.2 Temperatura do Ar

O aquecimento do sistema climático é inequívoco e, de acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC, a temperatura sobre os continentes subiu 1,59 °C no período de 2011–2020, com cada uma das últimas quatro décadas sendo mais quente que a anterior desde 1850 (IPCC 2021). O aumento das temperaturas globais tem suscitado grande preocupação quanto à relação entre a natureza e a sociedade (FAN *et al.*, 2020).

COOK *et al.*, (2020) também estudou a temperatura, em 13 modelos do CMIP6, em quatro cenários SSPs e todos mostraram forte aquecimento global durante todo o período de simulação de 1850 a 2100. Para 2071–2100, o aquecimento médio em todo o conjunto para cada SSP é: +2,1 K (SSP1-2.6), +3,0 K (SSP2-4.5), +3,9 K (SSP3-7.0) e +4,9 K (SSP5-8.5). Os autores comentam que mesmo dentro de cada SSP, no entanto, a propagação do aquecimento entre os modelos pode ser grande, resultando em alguma sobreposição significativa entre cenários adjacentes.

FAN *et al.*, (2020) avaliaram o desempenho de 16 modelos do CMIP6 na simulação da temperatura histórica sobre a superfície global durante o período de 1901-2014, incluindo os dois modelos utilizados neste trabalho, CanESM5 e MIROC6 (Figura 6). A pesquisa mostra

que a maioria dos modelos reproduziu bem o padrão espacial da temperatura média anual climatológica sobre a superfície global, mas com variabilidade entre os modelos e regiões, porém o MIROC6 e CanESM5 apresentaram um desempenho relativamente baixo em comparação com outros modelos globais para cada continente. Segundo os autores, esse desempenho pode ser explicado pelo fato de o MIROC6 superestimar a temperatura na maioria das regiões da superfície global, e o CanESM5 por subestimar amplamente a temperatura na Groenlândia, Platô Tibetano, Andes e Saara. Ademais, a média do CMIP6 capturou bem as tendências das temperaturas globais da superfície mostradas pelos dados observacionais durante os períodos 1901-1940 (aquecimento), 1941-1971 (resfriamento) e 1971-2014 (aquecimento rápido). Para o século 21, que está representado na Figura 7, o estudo projeta que a temperatura global aumentará em todos os quatro cenários analisados (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). As temperaturas médias anuais mostram um aquecimento forte (moderado) nas latitudes altas (médias) do hemisfério norte e um aquecimento mais fraco nos trópicos e no hemisfério sul. Nota-se que para o curto prazo (2025–2049), todos os cenários exibem aumentos significativos sobre a superfície da Terra. Para o final do século 21 (2075–2099), o aquecimento na Europa, América do Norte e centro-norte da Ásia será entre 2 °C e 4 °C, enquanto na maior parte da América do Sul, África, Austrália e Sudeste Asiático é menor que 2 °C para o cenário SSP1-2.6. Comparado com esse cenário, os aumentos de temperatura globais entre 1 °C e 1,5 °C são aparentes nas projeções de SSP2-4.5. Os cenários SSP3-7.0 e SSP5-8.5 exibem um aumento constante na temperatura anual durante o século 21, mas para SSP5-8.5 o aquecimento na maioria das regiões aumenta entre 4 °C e 12 °C. Para os autores, o período de médio prazo (2050–2074) do século 21 pode ser visto como um período de transição durante o qual as diferentes respostas de temperatura sob cenários forçantes fortes e mais fortes se tornam cada vez mais perceptíveis.

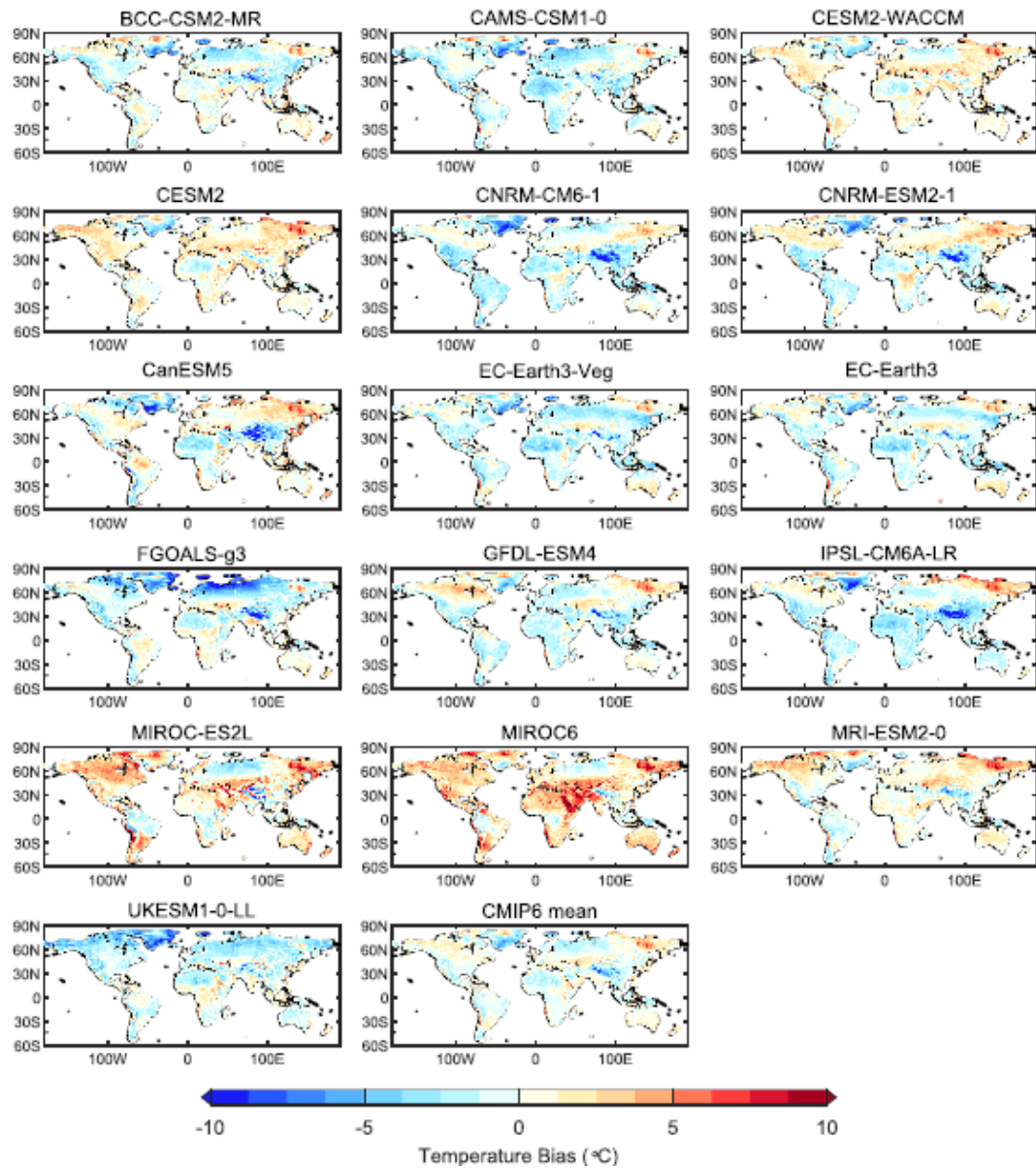


Figura 6 - Distribuição espacial do viés (°C) da temperatura média anual dos 16 MCGs e observações sobre a superfície global da Terra durante 1901–2014. Fonte: Extraído de Fan *et al.* (2020).

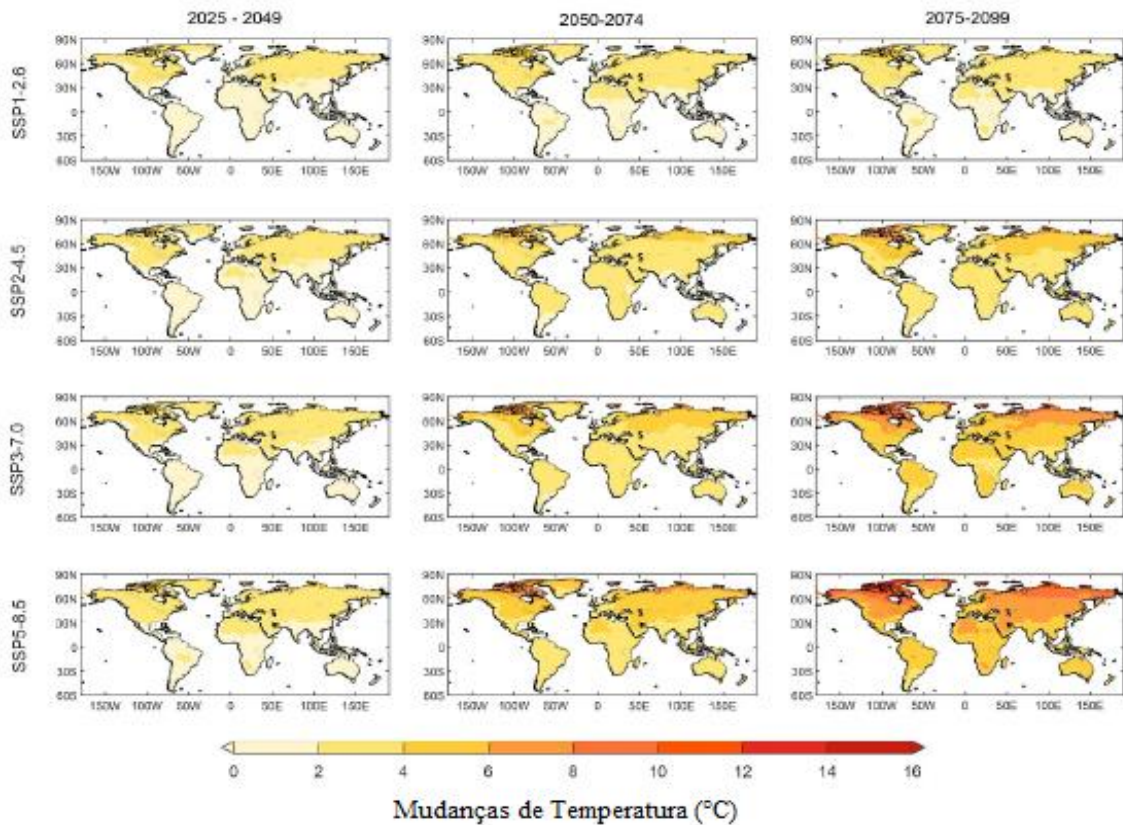


Figura 7 - Distribuição espacial das mudanças na temperatura média anual (°C) sobre o globo em períodos de curto prazo (2025-2049), médio prazo (2050-2074) e longo prazo (2075-2099) do século 21, em relação a 1970-1999, sob os cenários SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5. Fonte: Traduzido de Fan *et al.* (2020).

No Brasil, PARSONS, (2020) mostra que as simulações do CMIP6 exibem tendências de aquecimento semelhantes aos dados instrumentais do GPCP (*Global Precipitation Climatology Centre* – SCHNEIDER et al., 2011) para o período histórico 1950–2014 sobre o norte da Amazônia e grande parte do sudeste do Brasil (Figura 8). No entanto, a média do multimodelo CMIP6 mostra um padrão de aquecimento homogêneo mais disseminado do que os dados instrumentais, porém esse resultado não é surpreendente, pois a média do conjunto das simulações do modelo climático tende a maximizar a variabilidade forçada, enquanto os dados instrumentais representam uma combinação da variabilidade interna e da mudança forçada. Além disso, todos os modelos CMIP6 mostram uma tendência de aquecimento contínuo em toda a região nas projeções SSP3-7.0, com uma diminuição no aquecimento em SSP1-2.6.

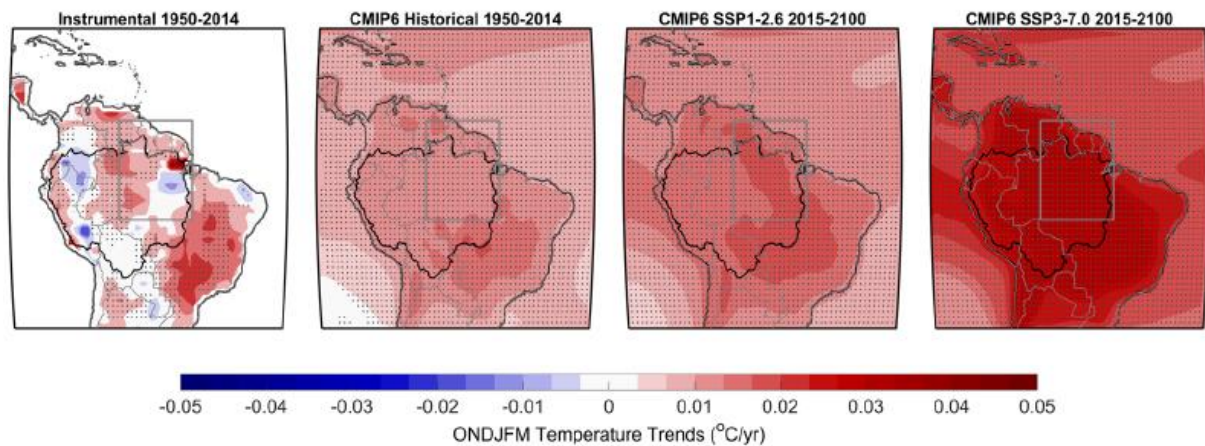


Figura 8 – Tendências para a temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{ano}$) nos dados instrumentais de 1950-2014 (esquerda), simulações históricas do modelo climático de 1950-2014 (centro esquerdo), cenário de aquecimento SSP1-2.6 para 2015–2100 (centro à direita) e cenário de aquecimento SSP3-7.0 para 2015–2100 (extrema direita). A caixa cinza delimita a região da Amazônia Oriental, a linha preta/vermelha delimita a bacia amazônica e as linhas cinza claro mostram as fronteiras dos países. O pontilhado mostra onde todos os dados instrumentais concordam com o sinal de tendência (esquerda) ou onde mais de 17 das 22 simulações do modelo ($> 75\%$) concordam com o sinal da tendência (centro, direita). Fonte: Extraído de Parsons (2020).

Em resumo, analisando a Figura 5 e a Figura 8 é possível perceber que para a região de interesse deste trabalho (SAU-BA), com o aumento das médias de temperatura e a diminuição do total pluviométrico anual nos últimos anos, poderá ser uma das regiões mais afetadas com as mudanças climáticas, causando longos períodos com clima mais seco, o que irá afetar de forma acentuada a recarga do aquífero, podendo ocasionar déficits hídricos e assim longos períodos de seca.

2.2 MODELOS HIDROGEOLÓGICOS

A modelagem de água subterrânea é uma ferramenta que ajuda a analisar muitos problemas importantes da água subterrânea. Muitos programas de computador têm sido usados para modelagem de águas subterrâneas. Um modelo é uma versão simplificada de um sistema do mundo real e a primeira etapa na sua construção é construir um modelo conceitual, que consiste em conjuntos de premissas que representam as composições do sistema do mundo real, os processos de transporte, os processos principais que os regem e as propriedades do meio inerentes. Depois disso, os modelos conceituais são traduzidos em modelos matemáticos em termos de equações que regem o fluxo associadas às condições de contorno e primárias. Uma solução pode ser obtida traduzindo-a em modelos numéricos e escrevendo programas de computador (códigos) e resolvendo-os (CHAKRABORTY; MAITY; DAS, 2020).

Segundo KRESIC (2020), os modelos hidrogeológicos simulam, matematicamente ou fisicamente, propriedades temporais e espaciais de um sistema aquífero ou de parte dele. Para AMANAMBU *et al.* (2020), a modelagem numérica de aquíferos é uma das ferramentas mais úteis e que fornece as informações necessárias para a expansão contínua da compreensão dos processos que envolvem tais sistemas. De fato, a modelagem é indispensável para compreender as condições passadas e presentes e para prever e, em última análise, controlar os estados futuros dos sistemas geofísicos e terrestres, incluindo os processos de água subterrânea. Os citados autores salientam que a relativa inacessibilidade dos aquíferos e a complexidade dos processos de subsuperfície também tornam a modelagem indispensável. Porém, a eficácia desses modelos depende de quão completamente as equações se aproximam do sistema físico que está sendo modelado, o que, por sua vez, depende de uma compreensão e caracterização completas das condições hidrogeológicas relevantes. Isso não é fácil de atingir e vem sendo objeto de contínuos estudos nas últimas décadas.

Os modelos de água subterrânea são utilizados frequentemente para três objetivos: prever mudanças artificiais ou naturais futuras no aquífero; descrever o sistema com o objetivo de analisar vários pressupostos quanto a sua natureza e dinâmica; e gerar um sistema hipotético que será usado para estudar vários problemas gerais e específicos (KRESIC, 2020). Neste estudo serão utilizados os modelos *Visual Balan* e o MODFLOW para prever o comportamento da recarga e do fluxo do SAU-BA. Tais modelos têm concepções distintas, sendo o primeiro dedicado a calcular o balanço hídrico subterrâneo e superficial, a partir de variáveis hidrometeorológicas, utilizando várias formulações e equações; e o segundo é um modelo numérico discreto que resolve a equação de fluxo subterrâneo, como se verá a seguir.

2.2.1 Visual Balan

O *Software Visual Balan 2.0* (SAMPER *et al.*, 1999), foi desenvolvido para a avaliação dos recursos hídricos, a partir de um código hidrológico de parâmetros agregados, e realiza balanços hídricos no solo, na zona insaturada e no aquífero, utilizando um ambiente interativo de entrada de dados e de processamento de resultados (Figura 9).



Figura 9 - Esquema hidrológico adotado pelo *Visual Balan* (Traduzido de SAMPER *et al.*, 1999).

O balanço hídrico consiste em efetuar a contabilidade hídrica do solo até a profundidade explorada pelas raízes, computando-se todas as entradas e saídas de água (MENDES EILERS, 2004).

No esquema conceitual adotado pelo *Visual Balan*, o volume de água que penetra no solo é distribuída entre interceptação, escoamento superficial e infiltração. A água infiltrada então se retira do solo através da evapotranspiração real (ETR), e outra parcela é adicionada à água armazenada no solo, contribuindo assim com o restante, sendo denominada como recarga em trânsito. Os valores de evapotranspiração potencial (ETP) podem ser calculados com vários métodos, dentre eles, o método de Thornthwaite, que será usado nesta dissertação. O método de Thornthwaite foi proposto em 1948, e constitui em um modelo simples fundamentado na relação entre a evapotranspiração potencial e a temperatura média diária do ar, que representa à energia disponível no ambiente. Através dessa metodologia é possível determinar a evapotranspiração real (ETR), a deficiência hídrica, o excedente hídrico, e o armazenamento de água no solo (CAMARGO, 1971). Obtém-se assim o volume de recarga referente ao aquífero pelo processamento de dados climatológicos da área (precipitação e temperatura do ar) por meio da estimativa da evapotranspiração real. Como dito, o método é considerado simples, em razão da singeleza dos conceitos implicados, e sua precisão é classificada como baixa (MALDANER, 2010).

O *Software Visual Balan 2.0* pode avaliar a recarga em trânsito em duas parcelas: a primeira por fluxo preferencial ou recarga em trânsito direta, onde a água atravessa o solo sem sofrer evapotranspiração; e segunda por recarga em trânsito retardado, que obedece à lei de Darcy sendo mais lento que o fluxo preferente, e dependente da reserva útil e da condutividade hidráulica do solo.

O balanço na zona não saturada, utiliza uma entrada e duas saídas, que podem ser: o escoamento subsuperficial ou a recarga do aquífero consequente da percolação. O *Software Visual Balan 2.0*, para o cálculo do balanço hídrico, admite empregar modelos uni e multicelulares interligados. Para o cálculo do escoamento total de saída da bacia, o cálculo ocorre através da soma do escoamento superficial, do escoamento subsuperficial e da descarga subterrânea.

2.2.2 Modelo MODFLOW

O MODFLOW é o software de modelagem hidrogeológico mais usado atualmente, tendo sido desenvolvido na década de 1980, por Michael McDonald e Arlen Harbaugh (MCDONALD; HARBAUGH, 1988), e é frequentemente atualizado pelo *United States Geological Survey* (USGS). Reconhecido como um padrão da indústria para simulação de água subterrânea, o MODFLOW é um modelo que simula o fluxo tridimensional da água subterrânea usando uma técnica de diferenças finitas para a solução das equações de fluxo governantes. Esse modelo resolve equações de fluxo confinado e não confinado para simular o comportamento de sistemas de fluxo de água subterrânea sob vários tipos de tensões naturais e artificiais. O modelo básico é capaz de representar variações nas propriedades hidráulicas de meios porosos, recarga natural e artificial, descarga (por exemplo, infiltração de chuva, infiltração de ou descarga para riachos, retiradas de poços ou injeção) e diferentes condições de contorno (CDM, 2001).

O MODFLOW é um modelo de diferenças finitas, método numérico que divide o volume de estudo em células retangulares, substituindo todo o domínio físico por um conjunto de pontos discretos estruturados em grades. Essa discretização do espaço possibilita substituir as derivadas parciais por aproximações, baseadas em expansões das séries de Taylor, que permitam resolver o problema, através da aplicação de equações algébricas e de condições de contorno (CRUZ, 2003; ARAUJO, 2018).

Relacionada à grade está uma série de pontos (ou nós), nos quais se considera que as propriedades e as variáveis do aquífero são constantes, as equações de fluxo são resolvidas para cada um deles. Como ilustrado na Figura 10, dependendo da localização desses nós nas células, as grades podem ser divididas em dois tipos: centrada na malha ou centrada na célula. Nas grades centradas na malha (Figura 10A), os pontos ficam situados nas interseções das linhas da grade, enquanto que nas grades centradas nas células (Figura 10B), os nós ficam situados no meio das células (ARAUJO, 2018).

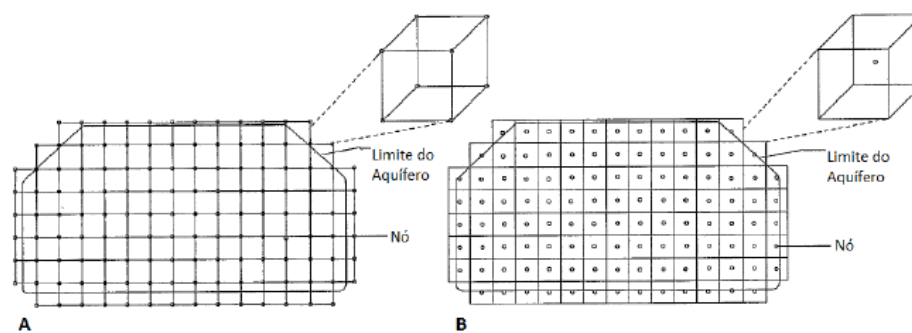


Figura 10 - Grades de diferença finita. A- Centrada na malha. B- Centrada na célula (Extraído de Araujo, 2018).

Assim, o MODFLOW divide o aquífero em vários blocos retangulares. A grade de blocos também é organizada em linhas (i), colunas (j) e camadas (k), como está na Figura 11. Cada bloco é comumente chamado de “célula”. Para cada célula, várias entradas, incluindo propriedades do aquífero e informações de poços, rios e outras entradas e saídas de recursos da célula são especificadas (GHAZAVI; EBRAHIMI, 2019). As células fora do limite do aquífero ou região a ser modelada são inativadas, só sendo simulados os fluxos para as células ativas, que estão internas ao limite da área de estudo.

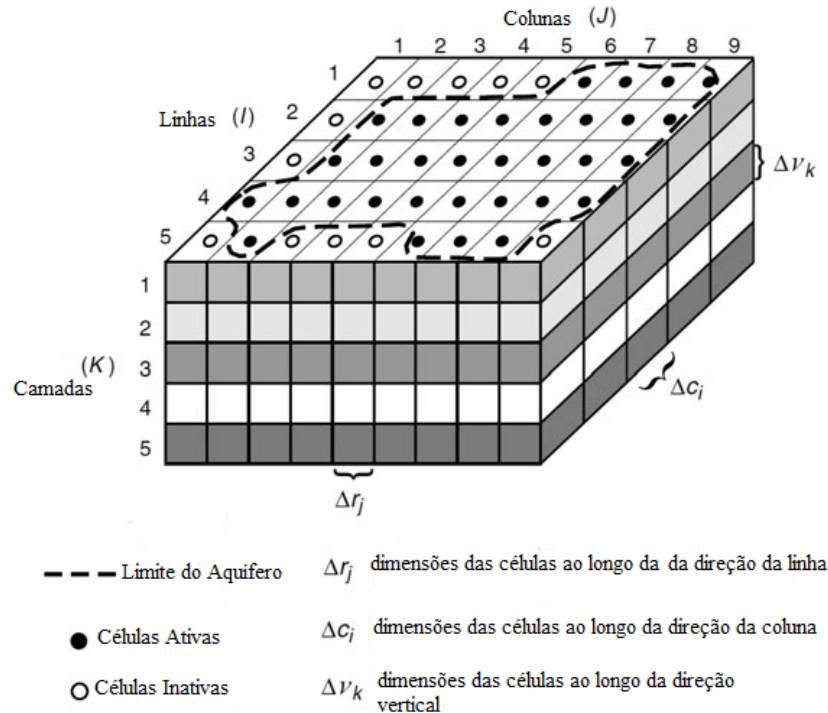


Figura 11 - Discretização espacial de um aquífero hipotético (Traduzido de McDonald e Harbaugh, 1988).

2.3 MODELOS HIDROGEOLÓGICOS APLICADOS AOS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM AQUÍFEROS

Os estudos sobre o tempo passado e as projeções futuras relacionadas ao clima global apontam que os padrões da precipitação e de temperatura estão mudando. A chuva é um fator chave na recarga das águas subterrâneas e as mudanças em sua quantidade, frequência, duração e intensidade terão um impacto significativo sobre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos. A temperatura é outro fator chave, pois condiciona a evaporação e evapotranspiração. Assim, o clima possui grande influência na recarga aos aquíferos de uma região, de forma que alterações nas condições climáticas são capazes de causar impactos no armazenamento e provocar grandes problemas, como crises no abastecimento em regiões de maior vulnerabilidade que utilizam intensivamente águas subterrâneas.

O impacto das mudanças climáticas no sistema hídrico subterrâneo só recentemente recebeu a devida atenção, em que pese alguns trabalhos pioneiros realizados ainda nos anos 1990 (YOUNGER *et al.*, 1997). Isso se deve à falta da adequada compreensão de que a água subterrânea é um recurso vital de água doce, crucial para a segurança alimentar e hídrica global, essencial para sustentar os ecossistemas e a adaptação humana à variabilidade e

mudanças climáticas (AMANAMBU *et al.*, 2020). Devido à grande preocupação recente com o tema, diversos autores vêm pesquisando esse impacto na recarga e no armazenamento de aquíferos em todo o mundo, como observado nos trabalhos de LIU (2011), OLIOSO *et al.* (2013), OLIVEIRA *et al.* (2006), AMANAMBU *et al.* (2020), HANSON *et al.* (2012) entre outros.

Os estudos sobre o impacto potencial das mudanças climáticas nas águas subterrâneas podem ser realizados através de análises de nível global ou de bacia/aquíferos. Análises em escala global avaliam o padrão mundial das tendências projetadas da recarga e as mudanças nas águas subterrâneas, e embora forneçam um resultado rápido das condições prevaletentes, são geralmente muito genéricos para orientar uma política hídrica, conforme salientado nos trabalhos de GREEN; ALLEN, (2011) e TAYLOR *et al.* (2013).

Os estudos específicos de bacia ou aquíferos fornecem uma compreensão mais profunda dos impactos das mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica ou sistema de aquífero em particular, e conectam o clima e os modelos de fluxo de águas subterrâneas, como nos trabalhos desenvolvidos por HANSON *et al.* (2012) e MEIXNER *et al.* (2016). Segundo MEIXNER *et al.* (2016), estudos regionais são um compromisso útil entre as duas escalas, pois avaliam um grupo de aquíferos dentro de uma região, com mecanismos de recarga semelhantes ou diferentes proporcionando uma visão que pode ser útil para a gestão de longo prazo dos aquíferos.

Em resumo, avaliação das vulnerabilidades das águas subterrâneas em face das mudanças climáticas, bem como sua gestão para uso sustentável é essencial para que o conhecimento dos sistemas de águas subterrâneas continue a se aprimorar.

Como os Modelos do CMIP6 foram disponibilizados há pouco tempo, pesquisas utilizando esses modelos climáticos na estimativa da recarga em aquíferos ainda estão em andamento e são, portanto, inéditos. Logo, todos os trabalhos expostos nas seções (2.3.1) e (2.3.2) utilizam outros modelos climáticos para estudar os impactos das mudanças climáticas na recarga de aquíferos ao redor do mundo. Sendo assim, é possível observar que todos os trabalhos mostrados indicam para as projeções futuras um aumento da temperatura e uma possível redução da precipitação, decorrentes das mudanças climáticas, em todas as diferentes áreas de estudo. Desta forma, as pesquisas que utilizaram o *Software Visual Balan 2.0* apontaram uma

possível redução da recarga das águas subterrâneas em todos os lugares estudados. Um resultado similar é mostrado nas pesquisas que utilizaram o modelo hidrogeológico MODFLOW, com exceção dos trabalhos de LIU *et al.*, (2020) e PETPONGPAN; EKKAWATPANIT; KOSITGITTIWONG, (2020) que encontraram um possível aumento da recarga dos aquíferos em um dos cenários analisados. Evidentemente, isso depende da área em questão. Embora a tendência geral seja de aumento da temperatura, o aumento da precipitação pluviométrica prevista pode superar a ação evapotranspirativa desse aumento e proporcionar um aumento de recarga.

2.3.1 Estimativa de Alterações na Recarga em função de mudanças no clima com software *Visual BALAN*

Como salientado no item anterior, a crescente evidência das mudanças climáticas motiva a necessidade de quantificar seus impactos sobre os recursos hídricos subterrâneos e seus ecossistemas associados para minimizar seus efeitos negativos. As alterações climáticas deverão produzir um aumento da temperatura e uma diminuição da precipitação em muitos locais, essas mudanças irão reduzir os volumes armazenados dos recursos hídricos subterrâneos (SAMPER; LI; PISANI, 2015).

Apesar das mudanças climáticas afetarem os recursos hídricos superficiais diretamente por meio de alterações nas principais variáveis climáticas de longo prazo, como temperatura do ar, precipitação e evapotranspiração, tanto quanto as águas subterrâneas, a relação entre a mudança dessas variáveis climáticas e a recarga aos aquíferos é mais complexa, menos compreendida e não suficientemente avaliada. Os recursos hídricos subterrâneos estão sujeitos às mudanças climáticas por meio da interação com os recursos hídricos superficiais, como lagos, pântanos, rios e pelo processo de recarga. Assim, quantificar o impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos requer não apenas a projeção confiável de mudanças nas principais variáveis climáticas, mas também a estimativa precisa da recarga da água subterrânea e a avaliação do fluxo de água (CANDELA *et al.*, 2016). Um método usado para estimar a recarga de um aquífero utiliza o *Software Visual Balan 2.0* (SAMPER *et al.*, 1999) que realiza balanços hídricos no solo (com ou sem vegetação), na zona não saturada e no aquífero, utilizando um ambiente interativo de entrada e processamento e dados.

Como exemplo do emprego desses códigos e modelagens, um estudo realizado por CANDELA *et al.*, (2012) teve como objetivo avaliar o regime de fluxo e investigar os impactos dos cenários futuros de mudança climática na recarga das águas subterrâneas, com base no acoplamento de MCGs e modelos hidrológicos, na bacia hidrográfica de Siurana, Espanha. Para isso, os pesquisadores analisaram as projeções do MCG ECHAM5, nos cenários futuros A2 (pessimista) e B1 (otimista) nos intervalos de tempo de 2013–2037 (2025) e 2038–2062 (2050), desenvolvidos pelo IPCC - 2001. A recarga foi estimada através do *Software Visual Balan*, e mostra que as mudanças climáticas projetadas na bacia hidrográfica afetarão todo o sistema hidrológico com redução máxima de 56% dos recursos hídricos. Mudanças sutis foram observadas para o intervalo de tempo de 2025, enquanto que para 2050, a projeção para a temperatura indicou um aumento máximo de 2,2 °C e uma projeção de diminuição do volume de precipitação de 11,3% em relação aos valores históricos. Dessa forma, com relação aos valores históricos, a saída do escoamento mostrou uma redução máxima de 20% e de 18% na recarga natural com um atraso em relação aos dados de escoamento e precipitação.

PISANI VEIGA; SAMPER CALVETE; LI, (2013) apresentam resultados da avaliação dos efeitos das alterações climáticas na recarga dos aquíferos Plana de La Galera e no Aluvial de Tortosa, próximos ao Delta do Ebro, na Espanha. Esta avaliação foi baseada nas projeções de temperatura e precipitação, para os períodos 2020-2050 e 2069-2099, obtidas através de 3 MCGs do Projeto ENSEMBLES (VAN DER LINDEN; MITCHELL, 2009) no cenário futuro A1B, que projeta o uso balanceado de todos os tipos de fontes de energia (fósseis e não fósseis), IPCC - 2007. Os efeitos das mudanças da temperatura e precipitação sobre os recursos hídricos foram avaliados com o modelo hidrológico de balanço hídrico resolvido com o *Software Visual Balan*. As projeções para a temperaturas indicam na Plana de La Galera, um aumento na temperatura média anual de 2 °C para o período 2020-2050 e de 4 °C no período 2069-2099, e no aluvial do Ebro os aumentos serão de 1,5 °C e 3,5 °C, respectivamente. As previsões da precipitação dos diferentes modelos apontam uma diminuição da precipitação anual que varia entre 2% (período 2020-2050) e 6% (período 2069-2099) na Plana de La Galera, e no Aluvial de Tortosa, uma diminuição entre 4 e 6%, respectivamente. Os resultados dos modelos hidrológicos para os períodos de simulação indicam que a recarga média anual diminuirá, em relação à recarga do período histórico de 1960-1990, 23% no período 2020-2050 e 27% no período 2069-2099 na Plana de La Galera, e no Aluvial de Tortosa, as reduções previstas são de 22% e 31%, nessa ordem. As previsões

têm incertezas associadas ao cenário de emissão, aos modelos climáticos, aos modelos hidrológicos e das suposições sobre o uso futuro da terra, práticas agrícolas e sistemas de irrigação.

CANDELA *et al.*, (2016) avaliaram os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos da bacia hidrográfica Fluvià, em Girona (Espanha), com base nos resultados em escala reduzida do modelo ECHAM5, para os cenários futuros A2 (pessimista) e B1 (otimista), desenvolvidos pelo IPCC – 2001, nos períodos de 2000-2024 e 2025–2050, e a recarga do aquífero foi calculada a partir *Software Visual Balan*. Os resultados obtidos pelos pesquisadores, indicaram um aumento na temperatura de 1,1 °C para as projeções futuras do cenário B1, e de 1,5 °C para o cenário A2; e um declínio na precipitação de 8,6% no cenário B1 e de 14,7% no cenário A2, para o intervalo de tempo de 2025-2050. Em resposta às mudanças no padrão de precipitação, os modelos hidrológicos projetaram uma redução na recarga, em relação ao período histórico de 1984-2008, que seria de 9,1% para o cenário B1, em ambos os períodos, e de 16,2% para o cenário A2 no intervalo 2025-2050. Assim, como a recarga da bacia é altamente sensível às mudanças sazonais, as projeções para 2050 no cenário futuro A2, mostraram que as mudanças climáticas afetarão todos os recursos do sistema hidrológico, bem como seus ecossistemas interconectados, que terão um aumento da demanda sazonal de água pela vegetação (incluindo áreas florestadas) ou culturas como uma resposta ao aumento da temperatura e evapotranspiração.

Na pesquisa de PISANI; SAMPER; MARQUES, (2019) foi feita uma avaliação dos impactos das alterações climáticas nos recursos hídricos subterrâneos da Serra da Estrela, em Portugal, usando o período histórico de 1975–2005. As projeções para o período de 2069–2099 foram feitas utilizando o modelo HadGEM2-ES, em dois cenários climáticos RCP4.5 (otimista) e RCP8.5 (pessimista). Os impactos das mudanças climáticas foram avaliados usando os valores de temperatura e precipitação diários simulados do modelo climático do CMIP5 e resolvendo o modelo de balanço hidrológico diário com o *Software Visual Balan*. As projeções para temperatura média anual apontam um aumento de 3,1 °C para o cenário futuro RCP4.5 e de 5,4 °C para RCP8.5, esse aumento da temperatura no inverno reduzirá a precipitação de neve e poderá favorecer o derretimento da cobertura de neve nas sub-bacias mais altas. Os resultados para as projeções de precipitação média anual mostram uma diminuição de 8% no cenário RCP4.5 e de 15% no RCP8.5, e para a projeção de precipitação média anual de neve uma redução de 54% (RCP4.5) e 84% (RCP8.5), em comparação ao

período histórico. O modelo hidrológico indicou que o fluxo médio anual e a recarga do aquífero irão diminuir 12% e 22%, para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente. Assim, os autores concluíram que os recursos hídricos da bacia da Serra da Estrela serão muito vulneráveis às alterações previstas de precipitação e temperatura.

2.3.2 Estimativa de Alterações na Recarga e Fluxo subterrâneo em função de mudanças no clima com o *software* MODFLOW

Um eficiente recurso científico para avaliar o presente e as dificuldades futuras causadas pelos efeitos das alterações climáticas na recarga de aquíferos é o modelo hidrológico MODFLOW, um dos modelos mais populares do mundo. Nos últimos anos, a aplicação do MODFLOW para descrever e prever o comportamento do sistema aquífero aumentou significativamente e tem sido usado por muitos pesquisadores em todo o mundo para simular a dinâmica das águas subterrâneas (TOURE; DIEKKRÜGER; MARIKO, 2016).

TOURE; DIEKKRÜGER; MARIKO, (2016) estudaram o comportamento das águas subterrâneas na bacia de Klela, no sul do Mali, no contexto das mudanças climáticas. O estudo foi realizado usando os dados de precipitação mensal do MCG ECHAN fornecidos pela iniciativa CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*), no cenário futuro RCP4.5, para o período temporal de 2010-2050, e aplicando o modelo de água subterrânea MODFLOW e o modelo EARTH (Modelo Estendido para Recarga de Aquífero e Transporte de Umidade do solo) (Van der Lee *et al.*, 1989) para recarga de água subterrânea. Os resultados indicam que para este cenário futuro, o armazenamento de água subterrânea diminuirá em aproximadamente 10,6 mm/ano. Além disso, as cargas hidráulicas geradas pelo modelo exibiram um nível de água subterrâneo reduzido, aumentando os estresses de disponibilidade de água subterrânea em áreas onde a agricultura é a atividade principal. Ao considerar a análise da situação em que a recarga de água subterrânea diminuiu significativamente em comparação com a recarga do período histórico 1970 - 2010, a redução do armazenamento de água subterrânea é importante, especialmente na década de 2030, quando eventos de seca severa são simulados devido aos efeitos das mudanças climáticas, o que ameaça o acesso à água subterrânea para irrigação, agricultura e uso doméstico. Os pesquisadores concluíram que um foco deveria ser colocado na determinação da situação hidrogeológica em estudos futuros, com mais piezômetros que deveriam ser implementados na bacia de Klela para permitir o monitoramento permanente dos recursos hídricos subterrâneos no contexto da mudança climática global. Também mostra que o MODFLOW

pode ser amplamente utilizado para modelar recursos hídricos subterrâneos, para quantificar a influência das mudanças climáticas nesses recursos e também para apoiar a gestão de recursos hídricos.

GAZAVI; EBRAHIMI, (2019) conduziram um estudo para avaliar o impacto das mudanças climáticas na recarga das águas subterrâneas em um ambiente árido na província de Ilam, oeste do Irã, com base nos resultados do MCG HADCM3, no cenário futuro A2 para o período de 2015 – 2030. Os resultados do MCG mostraram que a precipitação média anual na bacia diminuirá cerca de 3%, enquanto a temperatura média anual aumentará cerca de 0,5 °C. O MODFLOW foi usado para prever as condições futuras do aquífero frente às alterações climáticas. Assim, os autores puderam concluir que a recarga do aquífero diminuirá com essas alterações. Os resultados indicaram que o declínio do nível do lençol freático na área de estudo foi de 11,45 m durante o período de referência 1990-2014, ou seja, 0,48 m/ano, e esse esgotamento anual das águas subterrâneas deve aumentar para 0,75 m para o período de 2015-2030 por meio das mudanças climáticas e da extração excessiva. Os pesquisadores recomendaram que, como a água é a principal limitação da sustentabilidade nas regiões áridas e semiáridas, as políticas de adaptação às mudanças climáticas na bacia deveriam incluir a mudança do tipo de cultivo, o aumento da produtividade da água e da irrigação nas escalas agrícolas e regionais.

Na pesquisa de OSTAD-ALI-ASKARI *et al.*, (2019), as projeções das condições climáticas futuras de 2020-2044, por cinco MCG do CMIP5 nos cenários RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5, foram usados para investigar o efeito das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos subterrâneos em áreas semiáridas e áridas e mostrar os efeitos adversos na recarga e no nível da água, para o aquífero Isfahan – Borkhar, no Irã. Embora os autores tenham usado o período de base entre 1971 e 2005, os resultados mais significativos foram encontrados quando os dados de abril de 2012 foram comparados com os de dezembro de 2044. Dessa forma, as projeções para a precipitação indicaram uma diminuição da precipitação na região que seria de aproximadamente 5% para o cenário RCP2.6, 11,5% para o RCP4.5 e 26,1% para o RCP8.5, em comparação a 2012. As simulações dos efeitos dos cenários futuros no aquífero aplicando o modelo MODFLOW, indicaram que a recarga de água subterrânea na região de estudo reduziria cerca de 130, 144 e 159 milhões de m³ nos cenários RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente. Além disso, em 2044, em comparação com 2012, o nível médio de água subterrânea do aquífero diminuiria em cerca de 13 m para o cenário RCP2.6, 15 m para

RCP4.5 e 16 m para RCP8.5. Logo, os autores sugeriram nesse estudo, que uma redução de 50% nas taxas de bombeamento seria capaz de impulsionar consideravelmente os níveis regionais da água subterrânea para atingir o propósito de sustentabilidade do aquífero. Como a maior quantidade de extração de água subterrânea é consumida pela agricultura no Irã (cerca de 95%), a melhor solução para os gestores seria trocar o método de irrigação atual e o tipo de produto cultivado, pois considerando a situação atual do aquífero, o produto cultivado deve irrigar com baixa necessidade de água.

No estudo de KLAAS *et al.*, (2020) os impactos de longo prazo da variabilidade climática na recarga e descarga das águas subterrâneas na nascente Oemau, Ilha Rote, Indonésia foram investigados, com o auxílio do MODFLOW. O fluxo de água subterrânea foi simulado para o período de 2020-2090, sob as projeções dos cenários H3A2a e H3B2a, estabelecidos pelo Relatório Especial sobre Cenários de Emissão (SRES) (IPCC, 2007) no MGC HadCM3, usando dados de entrada de variáveis meteorológicas reduzidas pelo Modelo Estatístico de Redução de escala (SDSM). As análises sugeriram que a sustentabilidade dos recursos hídricos subterrâneos, avaliando a capacidade da nascente de suprir a demanda de água frente a necessidade de irrigação e consumo doméstico, variará ao longo do período e será adversamente afetada pelas mudanças climáticas durante os períodos de seca, quando a área foi projetada para experimentar escassez de abastecimento de cerca de 29 - 67 L/s como resultado de redução da precipitação de 5,24 - 23,63%, uma redução de recarga de 2,48 - 24,57%, e uma redução de descarga na primavera de 2,53 - 22,80%, nos cenários H3A2a e H3B2a, respectivamente. Os pesquisadores desse estudo propõem que as partes interessadas devem desenvolver e implementar um conjunto abrangente de estratégias de gestão para se adaptar às mudanças climáticas esperadas, e mitigar os impactos adversos das mudanças climáticas em termos de déficit hídrico durante os períodos de seca.

A pesquisa de LIU *et al.*, (2020), realizada em uma bacia hidrográfica dominada por águas subterrâneas na Dinamarca, teve como objetivo quantificar os impactos das mudanças climáticas no regime hidrológico e, subsequentemente, na biota do rio, e para isso, os pesquisadores associaram o modelo acoplado SWAT-MODFLOW (um modelo que acopla a Ferramenta de Avaliação de Solo e Água e o Modelo de Fluxo de Diferenças Finitas Modulares) com modelos biota-empíricos de fluxo que incluíam índices para três taxonômicos biológicos principais (peixes, macro invertebrados e macrófitas). Os efeitos da mudança climática prevista no final deste século (2080-2100) em relação ao período de

referência (1996-2005) foram testados para um conjunto de 23 MCGs, em dois cenários futuros o RCP 2.6 e o RCP 8.5. Os resultados projetam que a produção total de água na bacia não mudou significativamente, cerca de -1 ± 4 mm/ano, para o cenário RCP2.6, enquanto aumentou em 9 ± 11 mm/ano para o cenário RCP8.5, em relação ao período de referência. Todos os grandes e pequenos riachos foram impactados mais fortemente pelas mudanças climáticas, onde os índices de peixes e macrófitas reduziram 14,4% e 11,2%, respectivamente, enquanto esses índices aumentaram até 14,4% e 6,0%, respectivamente, no médio e em alguns pequenos riachos. Como esperado pelos autores, no cenário RCP8.5, as mudanças climáticas causaram alterações maiores no regime hidrológico e nos índices bióticos, em relação ao período de referência, do que no cenário RCP2.6. Apesar de todas as incertezas potenciais, essa pesquisa demonstrou uma nova abordagem para avaliar quantitativamente o impacto das mudanças climáticas no regime hidrológico e, subsequentemente, na biota de rios em bacias hidrográficas dominadas por águas subterrâneas.

PETPONGPAN; EKKAWATPANIT; KOSITGITTIWONG, (2020) avaliaram o impacto das mudanças climáticas nas águas superficiais e subterrâneas das bacias dos rios Yom e Nan, localizadas na Tailândia. Os regimes das águas superficiais e subterrâneas foram gerados por um modelo acoplado SWAT-MODFLOW, em conjunto com as projeções climáticas de 10 MCGs, nos cenários climáticos futuros RCP 2.6 e o RCP 8.5, apresentados pelo CMIP5, durante o período futuro próximo (2021–2045). As projeções para a temperatura média anual do ar indicam um aumento em aproximadamente $0,5 - 0,6$ °C e $0,9 - 1,0$ °C, para os cenários RCP 2.6 e o RCP 8.5, respectivamente. A projeção para a precipitação anual, obtida em ambos os cenários, indicam um aumento no mesmo intervalo de $20 - 200$ mm/ano, em média. Os resultados indicam para a soma das águas superficiais (produção de água) e para a recarga das águas subterrâneas na bacia do rio Yom uma redução em 443,98 e 316,77 milhões de m³/ano sob os cenários RCPs 2.6 e 8.5, respectivamente. Enquanto, na bacia do rio Nan, as projeções mostram um aumento de 355 milhões de m³/ano sob o RCP 2.6, mas uma redução em 20,79 milhões de m³/ano sob o RCP 8.5. Os pesquisadores concluem então que essas mudanças quantitativas podem impactar diretamente na disponibilidade de água ao se avaliar a demanda de água para consumo, indústria e agricultura.

Na região do Aquífero Urucuia, área de estudo da presente dissertação, MANTOVANI *et al.*, (2019) desenvolveram um Relatório Técnico sobre o Estudo do Potencial Hídrico da Região do Oeste da Bahia, e utilizaram o MODFLOW em conjunto com as projeções futuras

de precipitação do MCG HadGEM2, em dois cenários de projeção, um otimista (RCP 2.6) e um pessimista (RCP 8.5), para os períodos de 2020-2040 e 2050-2070, para estimar comportamento dos sistemas aquíferos por meio de projeções de alterações na demanda da água subterrânea e na recarga aos mananciais. Os resultados indicaram que as projeções de precipitação para o período de 2020-2040, sugerem uma tendência à estabilidade nas médias pluviométricas no cenário otimista, porém no cenário pessimista, há uma leve tendência decrescente nas médias da precipitação. Para o período de 2050-2070, as projeções indicam uma tendência à redução das médias pluviométricas no cenário otimista, enquanto no cenário pessimista, ocorre uma tendência de estabilização das médias da precipitação. A Figura 12 mostra os mapas de distribuição da variação da carga hidráulica do SAU, obtidos através do MODFLOW, nos diferentes períodos e cenários do estudo. Na Figura 12(esquerda) apresenta o mapa para o período de 2020-2040 no cenário RCP 8.5, e pode se observar que as bacias da porção norte apresentam uma maior possibilidade de decréscimo do nível freático (NF). Na Figura 12(meio) mostra a distribuição dos rebaixamentos no período de 2050-2070 para o RCP 2.6, e indica uma possível estabilização da carga hidráulica na porção central das bacias, exceto na bacia do Médio rio Grande na qual há uma tendência de rebaixamento do NF. A Figura 12(direita) mostra a distribuição das tendências de rebaixamentos da carga hidráulica para o mesmo período, mas para o RCP 8.5, e apresenta uma tendência ao rebaixamento do NF, este *trend* decrescente parece mais acentuado nas bacias do Alto e Médio rio Grande.

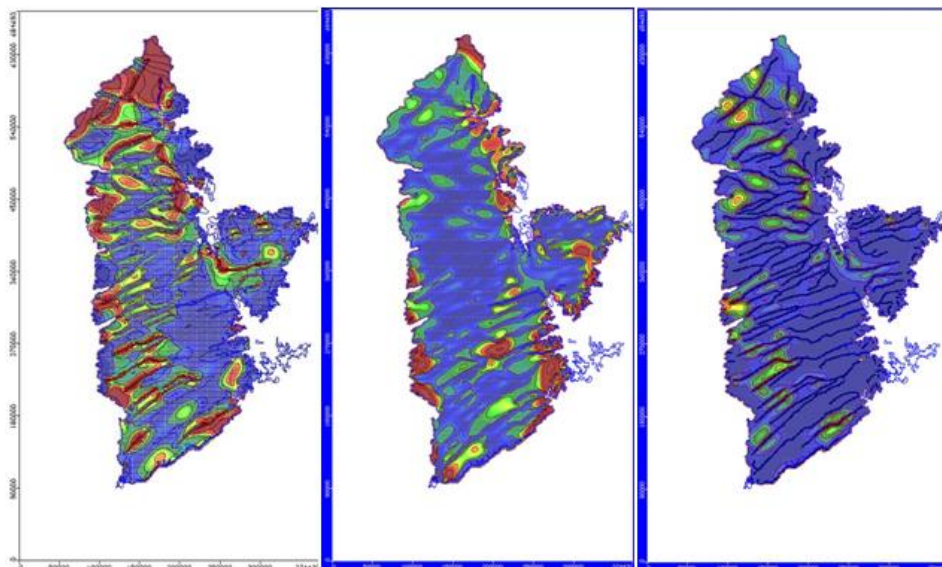


Figura 12 - Mapas de distribuição dos rebaixamentos do nível freático (NF) do SAU; no período entre 2020 - 2040 no cenário RCP8.5 (esquerda); período de 2050 - 2070 para o RCP 2.6 (meio), e; período de 2050 - 2070 para o RCP 8.5 (direita). Os tons avermelhados indicam tendência de diminuição do NF, enquanto os azuis uma tendência de manutenção do NF atual (sem ter em conta eventual bombeamento). Fonte: Extraído de Mantovani *et al.* (2019).

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo são descritas as principais características da região de estudo, o Sistema Aquífero Urucuiua, localizado no oeste do estado da Bahia (SAU-BA), abordando sua localização, e seus aspectos climatológicos, hidrológicos e hidrogeológicos.

3.1 LOCALIZAÇÃO

O aquífero SAU é um dos principais sistemas aquíferos do Brasil, compreendendo uma área total de cerca de 129.000 km² e que se estende por seis estados: Bahia, Tocantins, Minas Gerais, Piauí, Maranhão e Goiás. A área de pesquisa está situada na região oeste da Bahia (Figura 13), entre as latitudes 10° 06' e 15° 10' e longitudes 46° 40' e 43° 42', o que corresponde a cerca de 2/3 da área total do Sistema Aquífero Urucuiua-Areado, atingindo aproximadamente 82.000 km², dos quais 76.000 km², segundo GASPAR (2006), funcionam como unidade aquífera, desempenhando as funções armazenadora e reguladora.

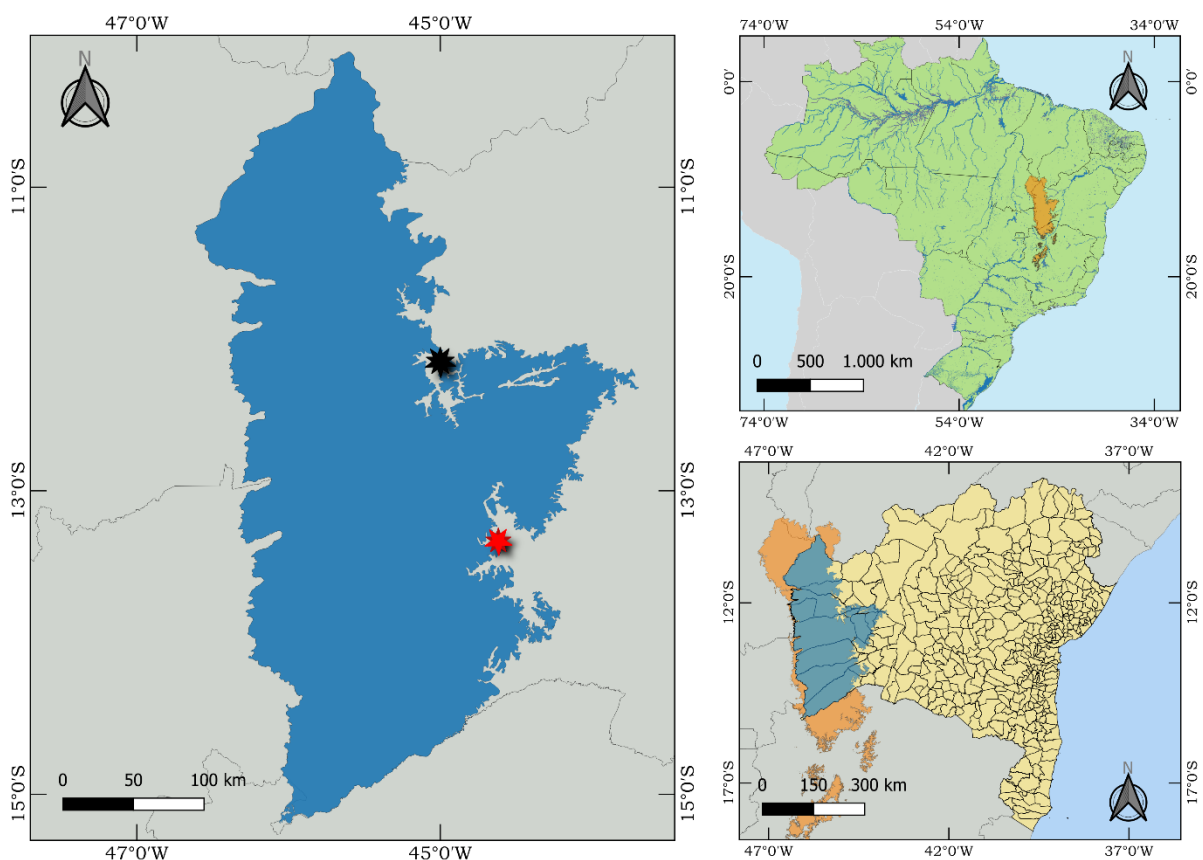


Figura 13 – Mapa de localização da área de estudo (em azul), com o Sistema Aquífero Urucuiua-Areado (em laranja) e as estrelas representam as localizações das Estações do INMET: em preto a Estação de Barreiras e em vermelho a Estação de Correntina.

O fluxo de base do SAU contribui com uma vazão média de 735 m³/s para o Rio São Francisco, 217 m³/s para o Rio Tocantins e 47 m³/s para o Rio Parnaíba (ANA, 2013). Representando o principal manancial subterrâneo do oeste baiano, tendo-se transformado nas últimas décadas no principal polo agrícola baiano, no qual se destacam os cultivos de soja, algodão, milho e café, com alguns dos maiores índices de produção e produtividade do país. Isso ocorre, pois, suas características geológicas e geomorfológicas produzem extensas áreas planas cultiváveis que, em conjunto com a disponibilidade hídrica do SAU, têm promovido fortemente o desenvolvimento de agricultura irrigada intensiva. Esse aquífero tem uma importância fundamental na manutenção do fluxo de base do sistema fluvial da bacia do rio São Francisco, e está suscetível as variações climáticas, que infligem períodos de seca, dos quais de acordo com estudos mais recentes, como o de AVILA-DIAZ *et al.*, (2020) indicam, que serão mais frequentes e intensos até o final deste século. Assim, as apreensões sobre os impactos potenciais dessas secas sobre os níveis de água dos aquíferos, nascentes e rios são cada vez mais crescentes.

3.2 CLIMATOLOGIA

De acordo com OLIVEIRA; SANTOS E SILVA; LIMA, (2017), o nordeste do Brasil (NEB) corresponde a cerca de 18% do território brasileiro, cobrindo uma área de 1.588.196 km². Cada uma das sub-regiões do NEB possui características climáticas diferentes (ALVARES *et al.*, 2013), devido à ação de diferentes sistemas atmosféricos como: a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), as Linhas de Instabilidade (LI), os Sistemas Frontais (SF) no sul do estado da Bahia, e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A região do SAU tem o clima classificado como tropical, apresentando duas estações bem definidas, um verão chuvoso e um inverno seco, do tipo Aw, segundo Köppen. As temperaturas médias anuais podem variar entre 20 °C e 26 °C; a umidade relativa do ar varia entre aproximadamente 50% em agosto e 80% em dezembro. A precipitação média mensal é irregular, com os maiores volumes de outubro a abril e o período seco sendo quase nulo.

Na Figura 14 é apresentada a climatologia da área de estudo, para o período dos últimos 20 anos (2001 – 2020) através das temperaturas máximas e mínimas médias e da precipitação acumulada mensal, observadas nas estações do INMET localizadas em Barreiras e Correntina – BA. Ambas as estações ilustram bem o clima na região, com o período mais chuvoso de

outubro a abril, e o período mais seco de maio a setembro, embora a Estação de Correntina apresente menores acumulados pluviométricos mensais do que a Estação de Barreiras. Com relação às temperaturas, a Estação de Barreiras possui a maior temperatura máxima média no mês de outubro de aproximadamente 36 °C, e a média da temperatura mínima em cerca de 15 °C, no mês de julho. Na Estação de Correntina também se observa a temperatura máxima em outubro e a mínima em julho, mas com valores de, respectivamente, 35 e 13 °C.

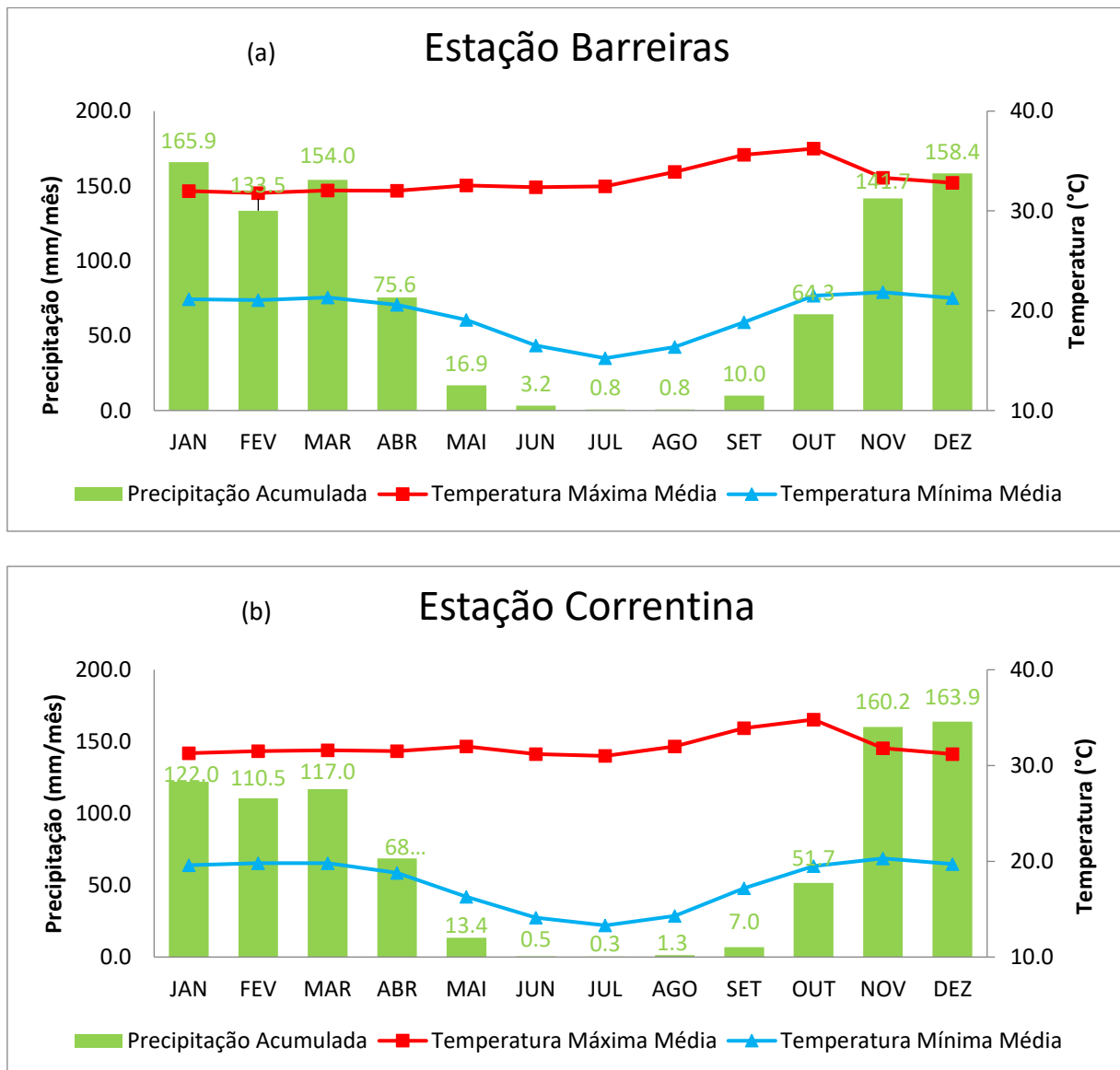


Figura 14 - Climatologias mensais (2001-2020) da precipitação e da temperatura do ar para as Estações do INMET na Bahia: (a) Barreiras e (b) Correntina.

3.3 HIDROLOGIA

A área do SAU está localizada em uma região de grande importância pois está situada em um divisor hidrográfico regional, que inclui as áreas drenadas pelas bacias hidrográficas do rio São Francisco, pela bacia do rio Tocantins e no alto curso da bacia do rio Parnaíba. A região do oeste baiano pode ser dividida em três bacias hidrográficas: do rio Grande, que está dividida em bacia do médio rio grande e alto rio grande; do rio Corrente e do rio Carinhanha (Figura 15). Os rios do oeste baiano, que drenam na água do SAU-BA, pertencem a região do Médio São Francisco, são em sua grande maioria, rios perenes, com ênfase aos rios Grande e Corrente, responsáveis por 37,5% de toda a água que chega ao rio São Francisco no período de estiagem (RAMOS E SILVA, 2002; GASPARG (2006)). Esses rios e seus afluentes são muito usados nas captações para a utilização na irrigação agrícola.

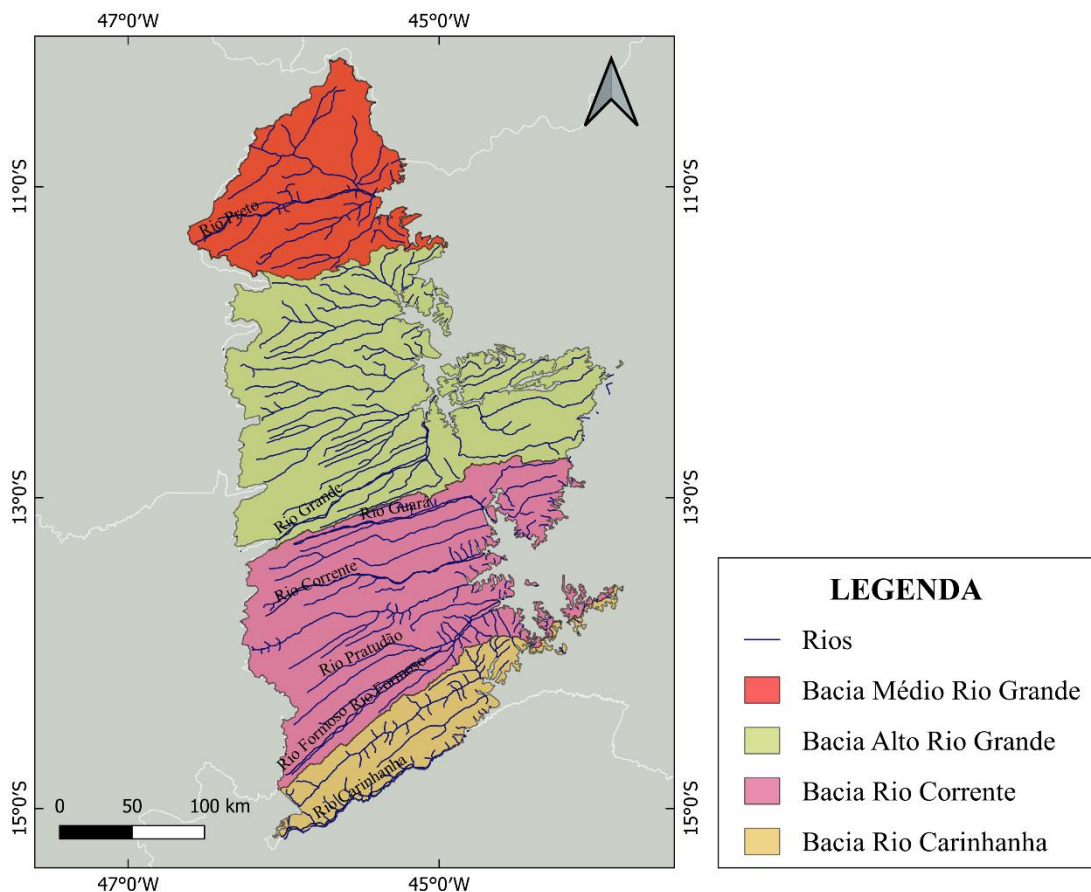


Figura 15 - Mapa das três bacias hidrográficas principais da área de estudo: Grande (ao norte, em vermelho e verde), Corrente (ao centro, em rosa) e Carinhanha (ao sul, em laranja); com seus principais rios e afluentes.

A bacia do rio Grande está localizada no oeste do estado da Bahia, representando 13,2% da área do estado, sendo limitada ao norte pelo estado do Piauí; ao sul, pela bacia do rio Corrente; a oeste, pelos estados de Goiás e Tocantins; e a leste, pelas bacias do médio São Francisco. O rio Grande é o principal afluente do rio São Francisco na Bahia e possui um regime hidrológico fortemente influenciado pela contribuição de água subterrânea, sendo a segunda em importância para a manutenção da vazão do rio São Francisco, que de acordo com trabalhos da SRH-Bahia, chega a 70% da vazão total do rio e apresenta sérios conflitos pelo uso da água (ENGELBRECHT; CHANG, 2016). A bacia apresenta uma ampla diversidade climática, com variação do tropical semiárido ao úmido, com um comportamento pluviométrico também bastante heterogêneo, com regiões onde as chuvas podem atingir até 2.000 mm por ano e outras em que esses índices não chegam a 800 mm, sendo característicos os períodos de seca, com a temperatura média anual da bacia de aproximadamente 24,3 °C (MOREIRA; DAVID, 2010).

A bacia do rio Corrente possui uma área total de aproximadamente 44.000 km², representando 8% da área do estado da Bahia e aproximadamente 5,4% da área total da bacia do rio São Francisco, está limitada ao norte pela bacia do rio Grande; ao sul, pela bacia do rio Carinhanha; a leste, pela bacia do Médio São Francisco; e a oeste, pela bacia do rio Tocantins, limite da divisa entre os estados da Bahia e de Goiás (MANTOVANI *et al.*, 2019). A bacia do rio Corrente tem clima predominantemente seco, subúmido e semiárido, com temperaturas que variam entre 16 e 36 °C, as regiões mais secas podem registrar uma precipitação entre 500 mm e 800 mm, já as mais chuvosas podem chegar até 1.100 mm, com precipitações concentradas entre a primavera e o verão (BAHIA, 2015). Por estar localizada em um ponto estratégico, essa bacia vem sofrendo grandes pressões de demanda da água, isso ocorre em razão do seu clima, de suas condições pedológicas e topográficas. Assim, a região proporcionou o desenvolvimento de lavouras irrigadas, sobressaindo-se economicamente no país pelo ponto de vista agrícola (BAHIA, 2015). Os afluentes dessa bacia apresentam grande disponibilidade hídrica devido à concentração de chuvas do lado oeste e por conta do aquífero Urucuia, que mantém os rios perenes durante todo ano (CAMPOS; OLIVEIRA, 2005).

A bacia do rio Carinhanha está localizada na margem esquerda do São Francisco com uma área de contribuição de aproximadamente 17.300 km², e está situada na divisa dos estados de Minas Gerais e Bahia e faz parte da região denominada Médio São Francisco. O percurso do rio Carinhanha ocorre em sua totalidade na zona rural, não passando por cidades de grande

porte. O clima é caracterizado, segundo a classificação de Thornthwaite, como subúmido seco para a maior parte da bacia, sendo a parte oeste mais úmida e a leste, próxima ao São Francisco, semiárida; a temperatura média anual varia de 22 °C, ao sul da região e 27 °C, ao norte (BORGES, 2009), já a precipitação anual média varia entre 800 e 1.200 mm. Essa bacia é caracterizada pelo bioma Cerrado que sofre uma intensa retirada da vegetação natural para uso agropecuário (SANO *et al.*, 2009).

3.4 HIDROGEOLOGIA

Segundo o estudo realizado por GASPAR; CAMPOS, (2007), o sistema aquífero Urucuia é um conjunto de aquíferos, tipicamente de natureza intergranular (porosidade primária), que ocorrem no domínio do Grupo Urucuia, com uma espessura saturada variando desde 80 a 460 metros e está situado na província hidrogeológica do São Francisco, seu processo de recarga ocorre por infiltração da água das chuvas nas áreas de chapada, com relevo plano e elevado, onde ocorrem espessos latossolos de textura média e arenosa e onde as alturas pluviométricas médias apresentam os maiores valores, assim essa morfologia do relevo é de fundamental importância para o reabastecimento do aquífero.

Como averiguado por GASPAR (2006), no limite oeste de sua área efetiva, o Sistema Aquífero Urucuia exibe um eixo longitudinal divisor do fluxo subterrâneo, que separa o sentido do fluxo regional do sistema para leste e para oeste. A presença desta estrutura, confere ao sistema aquífero uma assimetria entre as bacias hidrográfica e hidrogeológica. Assim sendo, a bacia hidrológica comporta duas bacias hidrogeológicas que constituem um mesmo sistema aquífero. A bacia hidrogeológica leste (oriental) contribui com fluxo de base para a alimentação da rede de drenagem pertencente à bacia hidrográfica do São Francisco, enquanto que a bacia hidrogeológica oeste (ocidental) contribui para os cursos superficiais que alimentam a bacia do rio Tocantins. Concluiu-se que esta divisão regional do fluxo subterrâneo é decorrente da rápida depleção da superfície potenciométrica vinculada à feição fisiográfica da serra Geral de Goiás, que determina intensa drenança por intermédio das nascentes, em geral, situadas na base da quebra de relevo (CPRM, 2012).

GASPAR (2006) considera que o SAU está dividido quatro subsistemas aquíferos, são eles: aquífero livre regional; aquífero suspenso local; aquífero confinado ou semiconfinado e aquífero livre profundo. O aquífero livre regional corresponde a um aquífero de grande

distribuição espacial na área, que normalmente se sobrepõe aos outros, e representa a maior unidade hidrogeológica, dentro do sistema aquífero Urucuia, apresenta um nível estático variável, sendo comumente explorado por meio de poços tubulares de cerca de 100 metros de profundidade utilizados, de forma geral, no abastecimento doméstico e como insumo na diluição e aplicação de agrotóxicos nas lavouras (CPRM, 2012). O aquífero suspenso local representa um subtipo de aquífero desenvolvido em função da presença de níveis silicificados rasos e de extensão limitada que atuam como aquitardes e formam uma zona saturada, provavelmente temporária, acima do nível d'água regional (BARBOSA, 2016).

A presença do aquífero confinado ou semiconfinado é controlada pela existência de níveis silicificados em maiores profundidades, a ocorrência desse subtipo de aquífero foi confirmada em poços localizados em um afluente do rio Grande (SCHUSTER *et al.*, 2002, *apud* GASPAR 2006), sendo que a maioria dos poços tubulares profundos utilizados para irrigação com uso de pivôs, na região de Luis Eduardo Magalhães (BA), nas bacias dos rios Grande e Arrojado, e na parte norte, no município de Formosa do Rio Preto, explora água desse subtipo (CPRM, 2012). O aquífero livre profundo é encontrado na bacia hidrogeológica oriental, a oeste do eixo divisor do fluxo do sistema aquífero Urucuia, sua superfície potenciométrica se mostra como não confinada, mais profunda que 100 metros, com aumento progressivo na direção do limite físico da serra Geral de Goiás. O elevado gradiente hidráulico determina um sistema de fluxo relativamente rápido que alimenta os rios da região cárstica de Goiás e Tocantins (CPRM, 2012).

4 METODOLOGIA E DADOS

O desenvolvimento deste trabalho compreendeu duas etapas principais (ver esquema na Figura 16). Na primeira meteorológica, foi elaborada uma avaliação de dois modelos do CMIP6 (EYRING *et al.*, 2016) no clima de referência (1995-2014) e, uma posterior investigação do clima futuro (2041-2060) com tais modelos sob os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 (O'NEILL *et al.*, 2017). A segunda etapa, hidrológica, teve como objetivo calcular a projeção de recarga do aquífero Urucuia - BA no clima futuro, usando os dados de chuva e temperatura gerados nas projeções futuras dos modelos do CMIP6. Como etapa prévia para essa projeção, foi feita uma comparação das médias de recarga anual de duas estações do INMET, Barreiras e Correntina, geradas pelo *Visual Balan* (SAMPER *et al.*, 1999), com os resultados de outros estudos. Uma outra parte desse trabalho envolveu a utilização do MODFLOW (MCDONALD; HARBAUGH, 1988), um modelo discreto de cálculo de fluxo de água subterrânea, que permitiu a visualização regional do impacto das mudanças climáticas no nível freático do Aquífero Urucuia - BA.

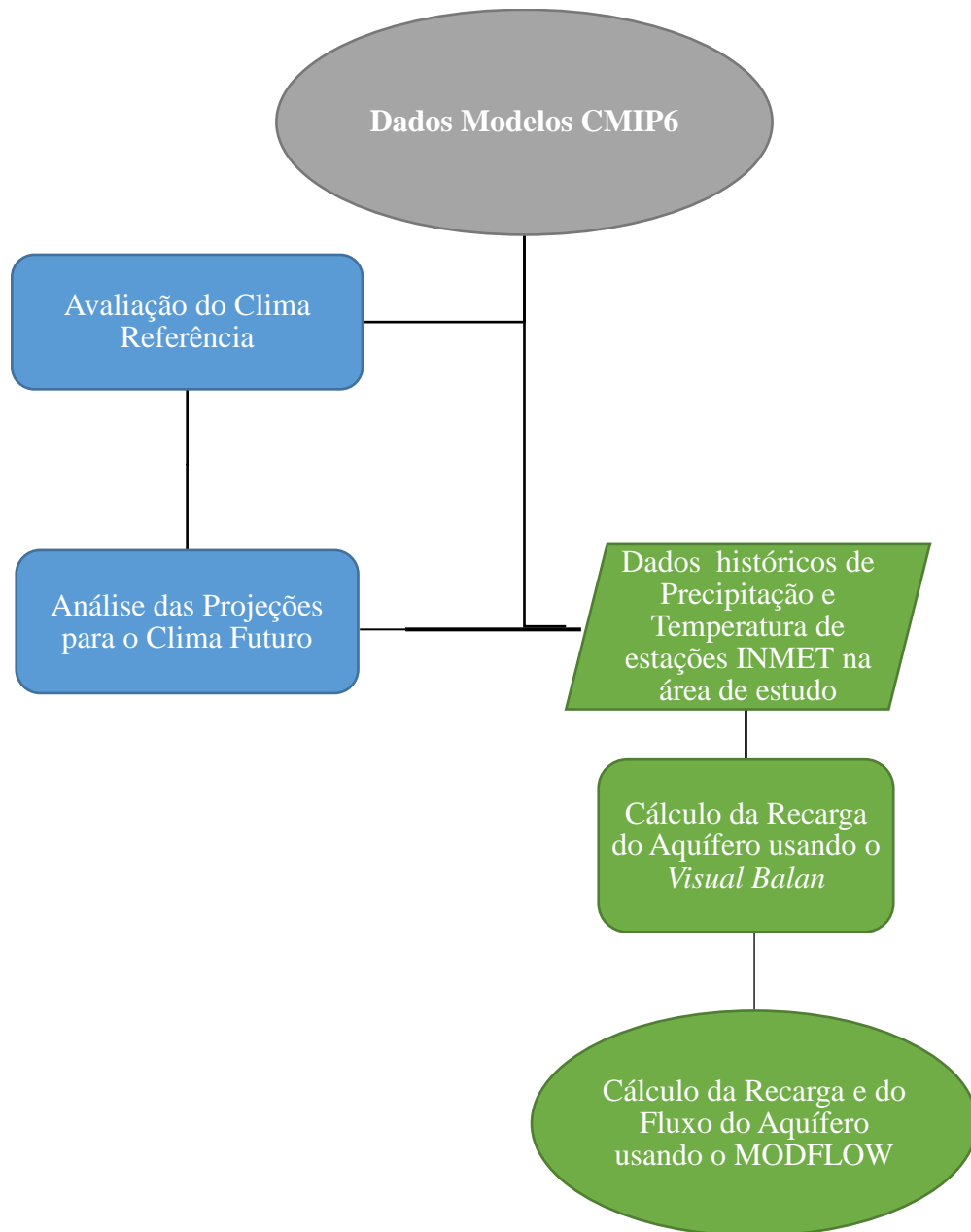


Figura 16 – Fluxograma da metodologia utilizada no estudo, envolvendo as duas etapas da pesquisa: meteorológica (em azul) e hidrológica (em verde).

A seguir são descritos a metodologia e os dados utilizados durante a etapa meteorológica (Seção 4.1) e durante a etapa hidrológica (Seção 4.2).

4.1 ETAPA METEOROLÓGICA

4.1.1 Modelos CMIP6

Para cada modelo pertencente aos experimentos CMIP6 listados na Tabela 1, foi utilizada a precipitação total diária (pr) e temperatura do ar à superfície diária (tas) da primeira realização ('r1i1p1f1') para os experimentos históricos e futuros. As simulações históricas desses modelos foram selecionadas, visto que servem como um importante referencial para avaliar o desempenho do modelo por meio da avaliação contra observações. As simulações históricas são forçadas com estimativas de forçantes climáticas naturais (por exemplo, erupções vulcânicas, variabilidade solar e orbital) e antropogênicas (por exemplo, emissões de gases de efeito estufa, aerossóis, mudanças no uso da terra), com o objetivo de simular as mudanças climáticas e a variabilidade ao longo do período coberto pelo registro observacional. Essas simulações históricas do CMIP6, para este estudo, cobrem o período 1995–2014.

Tabela 1 - Informações sobre os modelos climáticos do CMIP6 usados neste estudo. Fonte: Anexo II do IPCC (2021).

	CanESM5	MIROC6
Instituto	<i>Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis</i>	<i>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)</i>
País	Canadá	Japão
Resolução vertical	49 níveis	81 níveis
Topo do modelo	48 km	80 km
Resolução horizontal	250 km	120 km
Emissão de aerossóis	Variável, dependendo das emissões (<i>emission driven</i>)	Variável, dependendo das emissões (<i>emission driven</i>)
Química Atmosférica	Oxidantes especificados e enxofre interativo	Oxidantes prescritos
Componente oceânica	NEMO3.4.1	COCO4.9
Resolução Horizontal	70 km	80 km
Número de níveis	45 níveis	63 níveis
Criosfera	LIM2	COCO4.9
Solo	Física: CLASS3.6 Biogeoquímica: CTEM1.2	MATSIRO6.0
Vegetação Dinâmica	Não	Não
Ciclo do carbono	Carbono terrestre	Não
Referência Principal	SWART <i>et al.</i> (2019)	TATEBE <i>et al.</i> (2018)

A Figura 17 apresenta a precipitação total e temperatura média para a região do Nordeste da América do Sul (NES), e foi construída a partir dos dados dos modelos climáticos do CMIP6, e da Renálise ERA5, extraídos do Atlas Interativo do IPCC (IPCC 2021 - <https://interactive->

atlas.ipcc.ch/). Para a temperatura média, ambos os modelos estão em alinhamento com a reanálise, com algumas poucas diferenças nos últimos meses do ano. Para a precipitação total, os modelos apresentam um bias um pouco alto em relação à reanálise. No entanto, tanto o CanESM5 quanto o MIROC6, representam bem o clima da região. Para analisarmos as mudanças no clima futuro, foi escolhido o período de médio prazo de 2041-2060, em dois diferentes cenários futuros: um considerado “otimista” (SSP1-2.6) e o outro “pessimista” (SSP5-8.5). Neste trabalho foram usadas simulações do SSP1-2.6, que representa um cenário com desequilíbrio, mas com sustentabilidade de baixa forçante radiativa $+2.6 \text{ W/m}^2$; e do SSP5-8.5, que representa um cenário de desenvolvimento movido a combustível fóssil de altas emissões (O’NEILL *et al.* 2016), com uma alta forçante radiativa $+8.5 \text{ W/m}^2$.

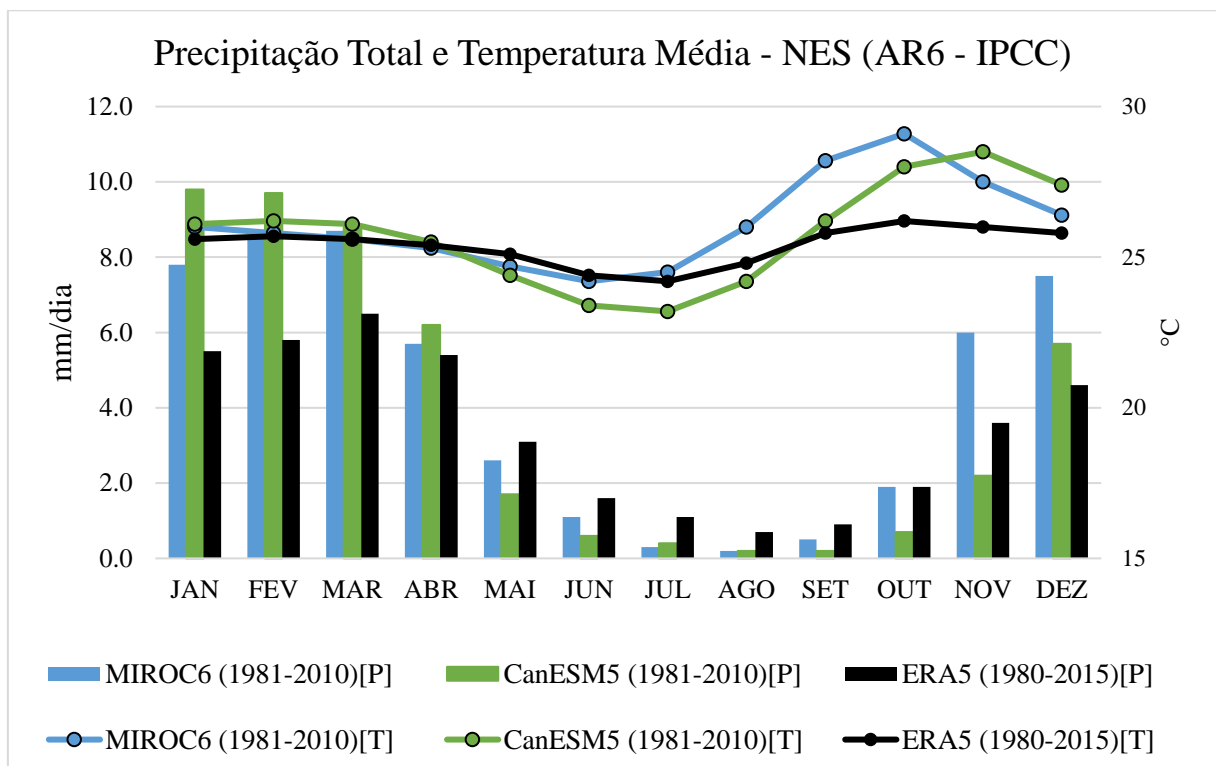


Figura 17 - Precipitação Total (mm/dia) e Temperatura Média (°C) da Região Nordeste da América do Sul (NES) – Brasil (Fonte: IPCC 2021 - <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>). [P] Fontes de dados para precipitação e [T] fontes de dados para temperatura.

As diferenças entre as projeções da precipitação anual, para cada modelo, foram calculadas através das mudanças relativas percentuais entre o clima futuro escolhido (2041-2060) e o clima de referência (1995-2014) e, as projeções futuras para as mudanças da temperatura média anual foram estimadas através da diferença entre o clima futuro e o clima de referência.

4.1.2 Reanálise ERA5

A *European Centre for Medium Range Weather Forecast ReAnalysis 5* (ERA5) (HERSBACH *et al.*, 2020) é a quinta geração de reanálise global produzida pelo ECMWF, e começou a ser produzida no início de 2016. Durante 2017 e 2018 alguns períodos de dados da ERA5 foram disponibilizados através do *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store* (CDS - RAOULT *et al.*, 2017). Finalmente em janeiro de 2019, o conjunto completo horário da ERA5 desde 1979 até o presente foi disponibilizado no CDS. A reanálise ERA5 é gerada em grade Gaussiana, ou seja, usando diferentes números de pontos de grade ao longo de diferentes latitudes. A reanálise do clima global oferece recursos críticos para o entendimento e monitoramento de processos associados às mudanças climáticas, e para a informação de cenários futuros dessas mudanças. A reanálise combina informações de observações meteorológicas passadas e presentes com modelos de projeções modernos, usando técnicas de assimilação de dados desenvolvidas para previsões numéricas do tempo.

Para investigar a capacidade dos modelos do CMIP6 de reproduzir de forma realista as características do clima de referência (1995-2014), foi calculada a média climatológica e a média climatológica sazonal para a precipitação anual e a temperatura média anual para cada modelo e para o ERA5. Como as resoluções dos modelos do CMIP6 e do ERA5 são diferentes e para facilitar a comparação entre eles, foi feita uma interpolação dos dados do ERA5 para a resolução dos modelos usando o *Climate Data Operators* (<https://code.zmaw.de/projects/cdo>), e depois foi calculada a diferença entre as duas fontes de dados.

4.2 ETAPA HIDROLÓGICA

As mudanças climáticas causam diversos impactos em aquíferos, entre eles estão o impacto direto no sistema hidrológico e indireto na qualidade da água, porém o mais importante, devido ao efeito em conjunto das mudanças na temperatura e precipitação é em sua recarga.

Segundo OLIVEIRA *et al.*, (2006), o método para a calcular a recarga é baseado no sistema físico, sua geometria, todas as entradas e saídas da água e suas localizações na área de estudo. O cálculo da recarga é baseado nos balanços de massa entre a água que entra, sai ou é armazenada no sistema hidrológico. Dessa forma, os modelos para calcular a recarga podem

ser agrupados em balanços de massa da zona não saturada e balanços de massa na zona saturada.

Na segunda etapa deste trabalho foram utilizados dois diferentes métodos de estimativa de recarga para visualização dos impactos hidrogeológicos futuros em cenários de mudança climática no Aquífero Urucuaia. O primeiro método usado foi o Balanço Hidrometeorológico de Thornthwaite-Mather (1955), que é um balanço de massas de água na zona não saturada, onde foi aplicado o *Software Visual Balan 2.0*. Já com o segundo método fez-se a quantificação do fluxo na zona saturada, utilizando a equação de Darcy, com o auxílio do modelo numérico MODFLOW, que calcula o balanço de massas em células discretas, e nos últimos anos tem sido muito utilizado em diversas pesquisas para prever e descrever o comportamento do sistema aquífero.

4.2.1 Método do Balanço Hidrometeorológico

A metodologia empregada para obtenção do balanço hidrometeorológico foi proposta por Thornthwaite-Mather (1955) e utiliza dados de precipitação e de temperatura do ar de uma região durante um definido espaço de tempo com a função de obter parâmetros como a disponibilidade hídrica do solo e a deficiência hídrica ou excedente hídrico.

A equação simplificada do balanço hídrico é dada por (Equação 1):

$$R = P - ESC - ETR - ARM \quad (1)$$

Onde P = Precipitação (mm);

ESC = Fluxos superficiais para fora da área de estudo (mm);

ETR = Evapotranspiração Real (mm);

ARM = Variação do armazenamento de água na zona não saturada (mm), e;

R = Recarga (mm).

Para aplicação do método, foi utilizado o *Software Visual Balan 2.0*, desenvolvido pelo Grupo de Hidrologia Subterrânea da Universidade de Coruña (SAMPER *et al.*, 1999). O *Software Visual Balan 2.0* também foi utilizado para o cálculo da evapotranspiração potencial

(ETP) que foi realizado através do método de Thornthwaite-Mather (1948), através da Equação 2:

$$ETP_m = F_c \times ETP_{NA} \quad (2)$$

Onde ETP_m = evapotranspiração potencial, em mm/mês,

F_c = fator de correção, que leva em consideração o comprimento médio do dia e o número de dias do mês em questão, e;

ETP_{NA} = evapotranspiração potencial não ajustada, em mm/mês, estimada para um mês-padrão de 30 dias e com duração do período diurno de 12 horas.

Para avaliar os impactos hidrogeológicos futuros em cenários de mudança climática, uma linha de base foi definida. O *Software Visual Balan 2.0* foi validado nas condições do clima de referência (1995-2014), utilizando os dados climatológicos dos registros diários de precipitação e temperaturas máxima e mínima obtidos junto as estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizadas nas cidades de Barreiras e Correntina – BA (Figura 13), e comparando-os com estudos anteriores da área do SAU-BA. As séries de dados estendem-se de 01/01/1995 até 31/12/2014, com algumas falhas. Na estação Barreiras foram usados dados das estações convencional e automática, pois não existia valores de precipitação e temperatura para os anos de 2009 e 2010, para a estação Correntina foram usados apenas dados da estação convencional. A altitude da estação convencional de Barreiras (nº 83236) é de 447,51 m e localiza-se nas coordenadas 45°0 O/12°9 S, a altitude da estação automática (nº A402) é de 474,17 m, está nas coordenadas 45°1 O/12°7 S, já a altitude da estação Correntina (nº 83286) é de 551,69 m e está localizada nas coordenadas 44°6 O/13°1 S. Posteriormente foram inseridos no *Software Visual Balan 2.0*, os dados de temperatura e precipitação dos modelos CanESM5 e MIROC6, para o clima de referência (1995-2014) e para os dois cenários climáticos, SSP1-2.6 e SSP5-8.5, no clima futuro (2041-2060), da área de todo o Aquífero Urucuia, para assim avaliar o comportamento de sua recarga.

Para estabelecer parâmetros como: porosidade, capacidade de campo, ponto de murcha, umidade do solo, espessura do solo, condutividade hidráulica, espessura radicular do solo, e valor da lâmina de água superficial, foram utilizados dados da bibliografia disponível em trabalhos realizados na região como de GASPAR (2006), e do próprio *software*.

4.2.2 Método do Balanço de Massas e Fluxo

Esse método utiliza fórmulas numéricas (equações de fluxo subterrâneo) baseadas na solução da equação de Darcy, combinado com a equação de conservação de massa, e permite a elaboração de modelos computacionais utilizados para simular o fluxo de água no meio não saturado em diferentes condições físicas.

A equação geral para o fluxo tridimensional da água subterrânea é expressa pela Equação 3:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

Onde K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} = os componentes do tensor da condutividade hidráulica nas dimensões x , y e z (m/s);

h = a carga hidráulica (m);

t = tempo (s);

S_s = o armazenamento específico no meio poroso (m^{-1}), e;

W = um ponto onde a água é retirada (sumidouro) ou introduzida (fonte) ao sistema por unidade de volume do meio, com valor positivo se for referente à introdução e negativo se for referente à retirada (s^{-1}).

Foi utilizado o modelo hidrológico MODFLOW que permite simular o escoamento em até três dimensões, em regime de fluxo transiente ou permanente, para aquíferos confinados ou não, reproduzindo o comportamento de sistemas de fluxo de água subterrânea sob vários tipos de estresses naturais e artificiais (CDM, 2001).

As simulações da recarga e do fluxo das projeções futuras foram então realizadas através do modelo MODFLOW, e se referem ao final do período 2041-2060 (clima futuro de médio prazo), em relação ao clima de referência (1995-2014), dessa forma foi possível avaliar os impactos no nível freático do Aquífero Urucuia sob o efeito dos cenários de mudança climática, utilizando os dados dos dois Modelos do CMIP6. Esses dados foram retirados da área do aquífero, que foi dividido em três partes iguais, e então inseridos no *Software Visual Balan 2.0*, com as saídas desse *software*, as recargas médias mensais são então introduzidas

no modelo MODFLOW conceitual do SAU-BA, em fluxo transiente, com um *grid* de 300 colunas x 500 linhas, em duas camadas (Figura 18), com condutividade hidráulica variando entre 10^{-5} m/s e 10^{-6} m/s. Esse modelo conceitual é o mesmo usado por MANTOVANI *et al.*, (2019) no Relatório técnico final - Estudo do Potencial Hídrico da Região Oeste da Bahia: Quantificação e Monitoramento da Disponibilidade dos Recursos do Aquífero Urucuia e Superficiais nas Bacias dos rios Grande, Corrente e Carinhanha, que usou dados hidráulicos e pluviométricos das estações da ANA (Agência Nacional de Águas) e dos poços do SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) localizados na área de estudo, para ser construído.

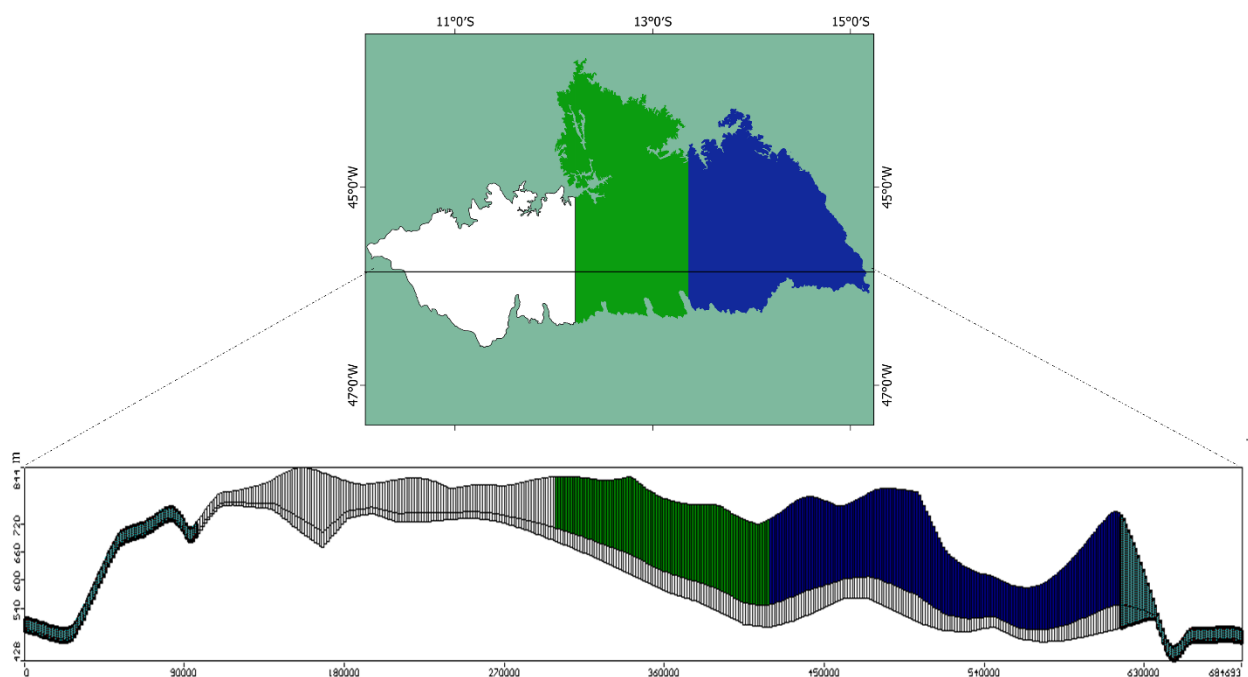


Figura 18 - Perfil (N-S) da porção central do SAU-BA, com as duas camadas do modelo, e a representação das três diferentes áreas de recarga nas cores: branca, verde e azul escuro. As células das extremidades, na cor verde claro, não são usadas no cálculo do modelo.

5 RESULTADOS

Este capítulo está dividido em quatro seções, duas abrangendo a Etapa Meteorológica do estudo, com a Avaliação dos Modelos do CMIP6 no clima de referência (Seção 5.1) e as Projeções dos Modelos do CMIP6 no clima futuro (Seção 5.2), e duas seções que contem a Etapa Hidrológica, com o Balanço Hidrometeorológico (Seção 5.3) e a Análise das Simulações da Recarga e do Fluxo para o Clima Futuro (Seção 5.4).

5.1 AVALIAÇÃO DOS MODELOS DO CMIP6 NO CLIMA DE REFERÊNCIA

Nesta seção são apresentados os campos de precipitação e temperatura do ar simulados por dois modelos do CMIP6, CanESM5 e MIROC6, comparando-os aos campos das mesmas variáveis da Reanálise ERA5 no clima de referência (1995-2014).

5.1.1 Precipitação

A Figura 19 apresenta a Climatologia (1995-2014) da precipitação anual simulada pelo CanESM5, pelo ERA5 e a diferença (CanESM5-ERA5). A Figura 20 apresenta os mesmos campos da Figura 19, porém para o MIROC6.

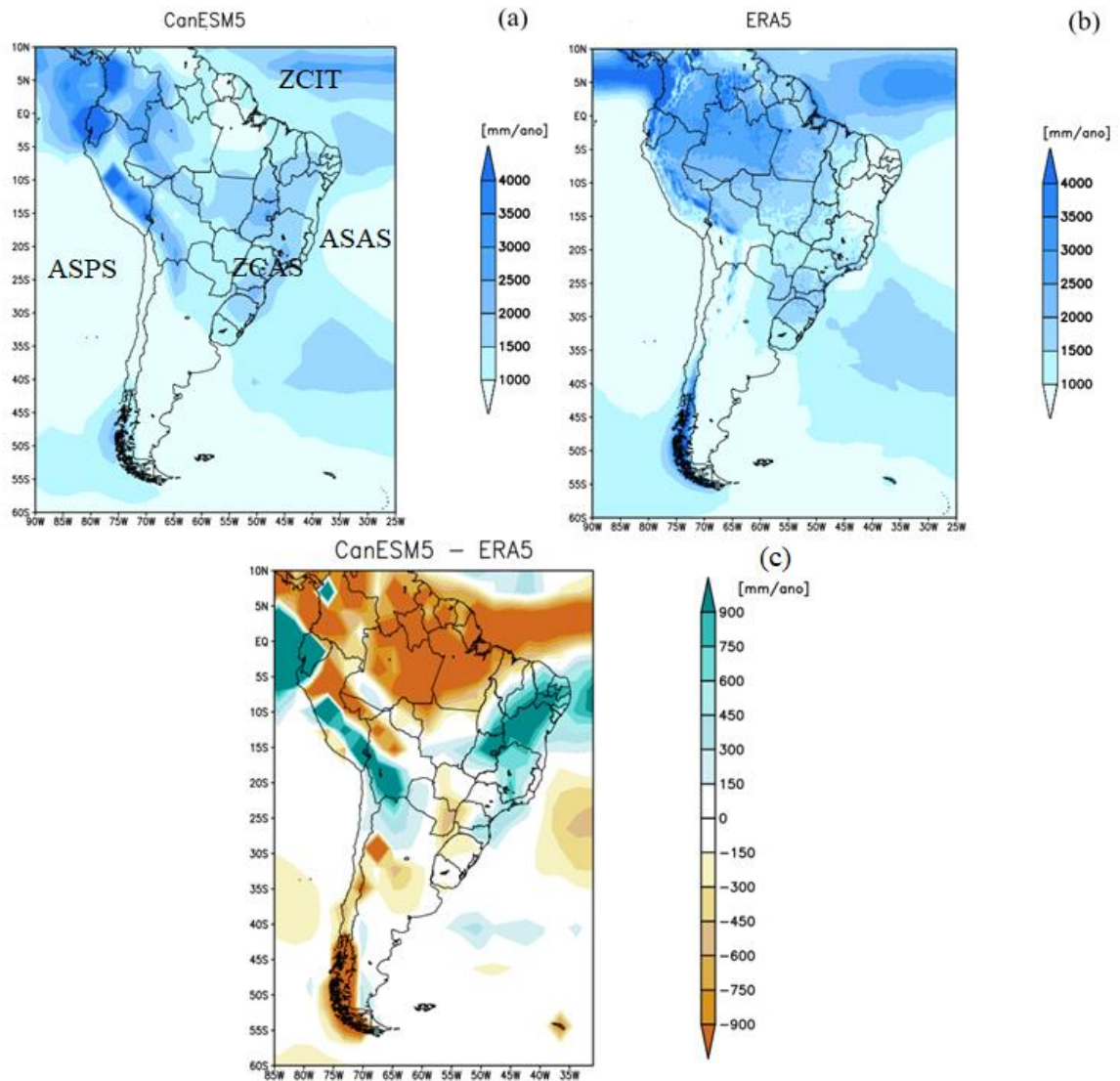


Figura 19 - Climatologia (1995-2014) da precipitação anual (mm/ano): (a) Modelo CanESM5, (b) Reanálise ERA5 e (c) Diferença entre CanESM5 e ERA5.

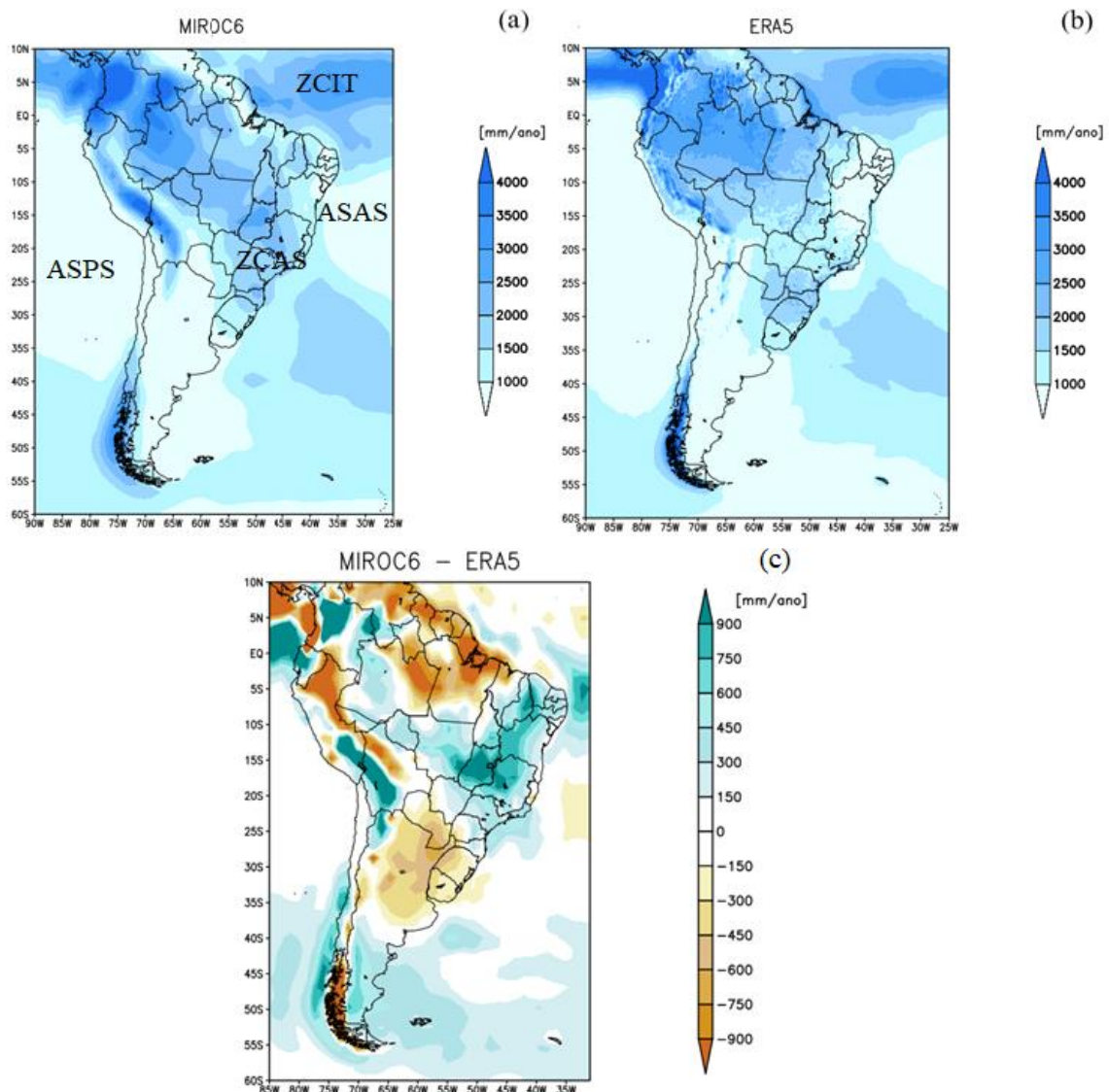


Figura 20 - Climatologia (1995-2014) da precipitação anual (mm/ano): (a) Modelo MIROC6, (b) Reanálise ERA5 e (c) Diferença entre MIROC6 e ERA5.

Nota-se na Figura 19a e na Figura 20a que o CanESM5 e o MIROC6 representam relativamente bem as posições da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), se estendendo da Amazônia até o Oceano Atlântico; da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o Atlântico Norte; e também do máximo de precipitação no sul do Chile. Ademais, os mínimos de precipitação associados ao Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e ao Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul (ASPS) também são bem-posicionados. Analisando a Figura 19c e a Figura 20c é possível identificar diferenças nas intensidades da chuva simuladas pelos modelos, respectivamente pelo CanESM5 e pelo MIROC6, associadas aos sistemas citados anteriormente. Verifica-se que ambos os modelos, mas principalmente o CanESM5 simula menos chuva na ZCIT sobre o Atlântico Norte e também dentro da região

continental, gerando diferenças negativas que chegam a -900 mm/ano na Região Norte do Brasil. Na região da ZCAS ambos os modelos superestimam a precipitação, principalmente em Goiás e em Minas Gerais. Na Região Sul do Brasil, Paraguai, Uruguai e norte da Argentina, os modelos simulam uma quantidade menor de chuva (entre -150 e -450 mm/ano), principalmente o MIROC6. Climatologicamente, essa é uma região que recebe chuva durante todo o ano, não apenas no período do verão, devido à passagem de sistemas frontais e a atuação de ciclones extratropicais. Os totais pluviométricos no sul do Chile também são subestimados (em torno de -900 mm/ano) por ambos os modelos. No Nordeste do Brasil, onde está a área de estudo, o SAU-BA, observa-se superestimativa da precipitação (entre 750 e 900 mm/ano), provavelmente associada com a posição do ASAS, que parece estar limitada ao Oceano Atlântico, sem penetração no interior do continente. Em seu estudo, MARENGO *et al.*, (2014) analisaram o clima presente de 1961-1990 para um conjunto de modelos do CMIP3, e obtiveram respostas semelhantes. Neste estudo, o modelo MIROC6 é o que melhor representa a precipitação do clima referência (1995-2014) quando comparado com a Reanálise ERA5.

A Figura 21 apresenta as climatologias sazonais de precipitação simuladas pelo CanESM5, pelo ERA5 e a diferença (CanESM5-ERA5). A Figura 22 apresenta os mesmos campos da Figura 21, porém para o MIROC6.

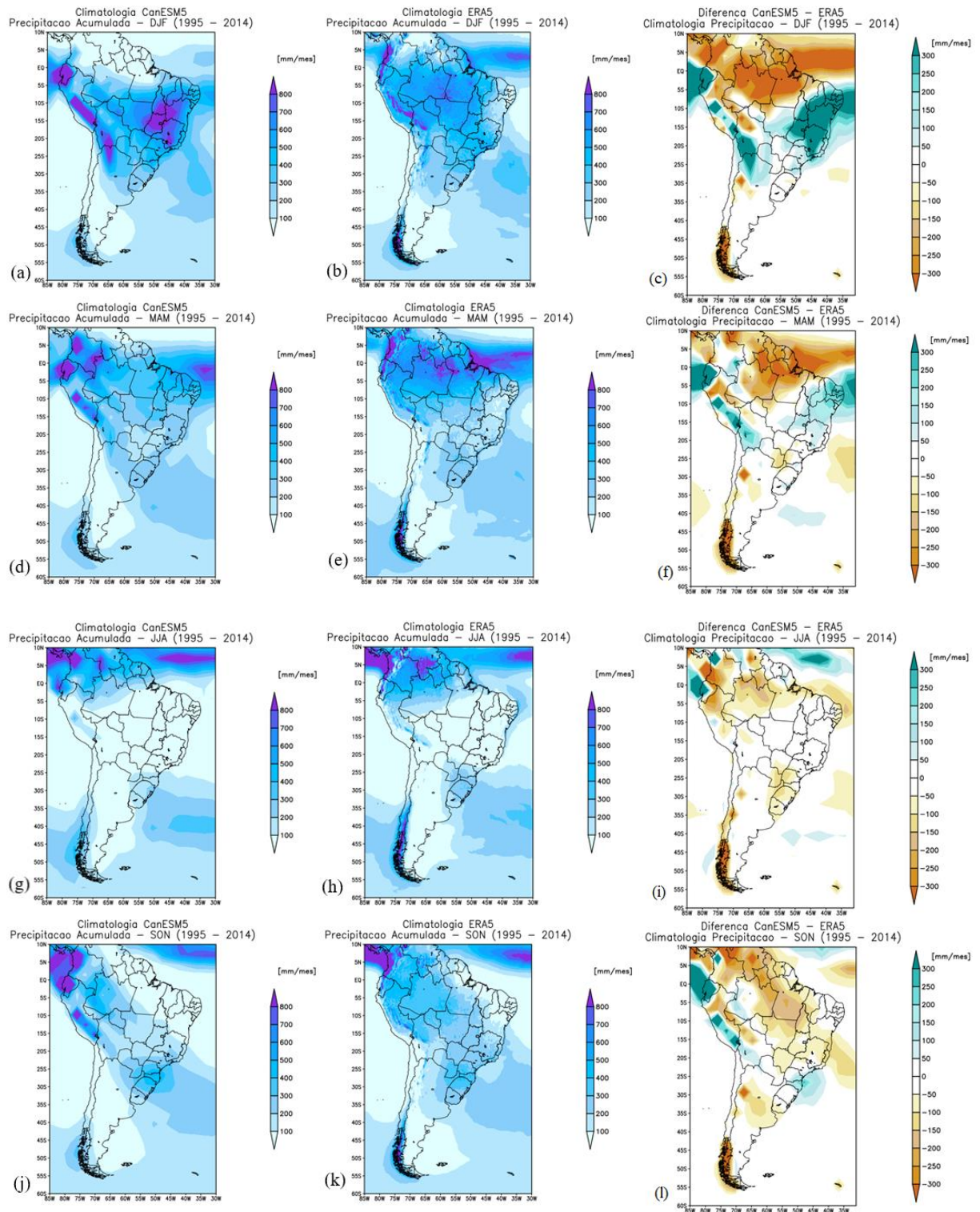


Figura 21 – Climatologia Sazonal (1995-2014) da precipitação anual (mm/ano): (a,d,g,j) Modelo CanESM5, (b,e,h,k) Reanálise ERA5 e a (c,f,i,l) Diferença entre CanESM5 e ERA5.

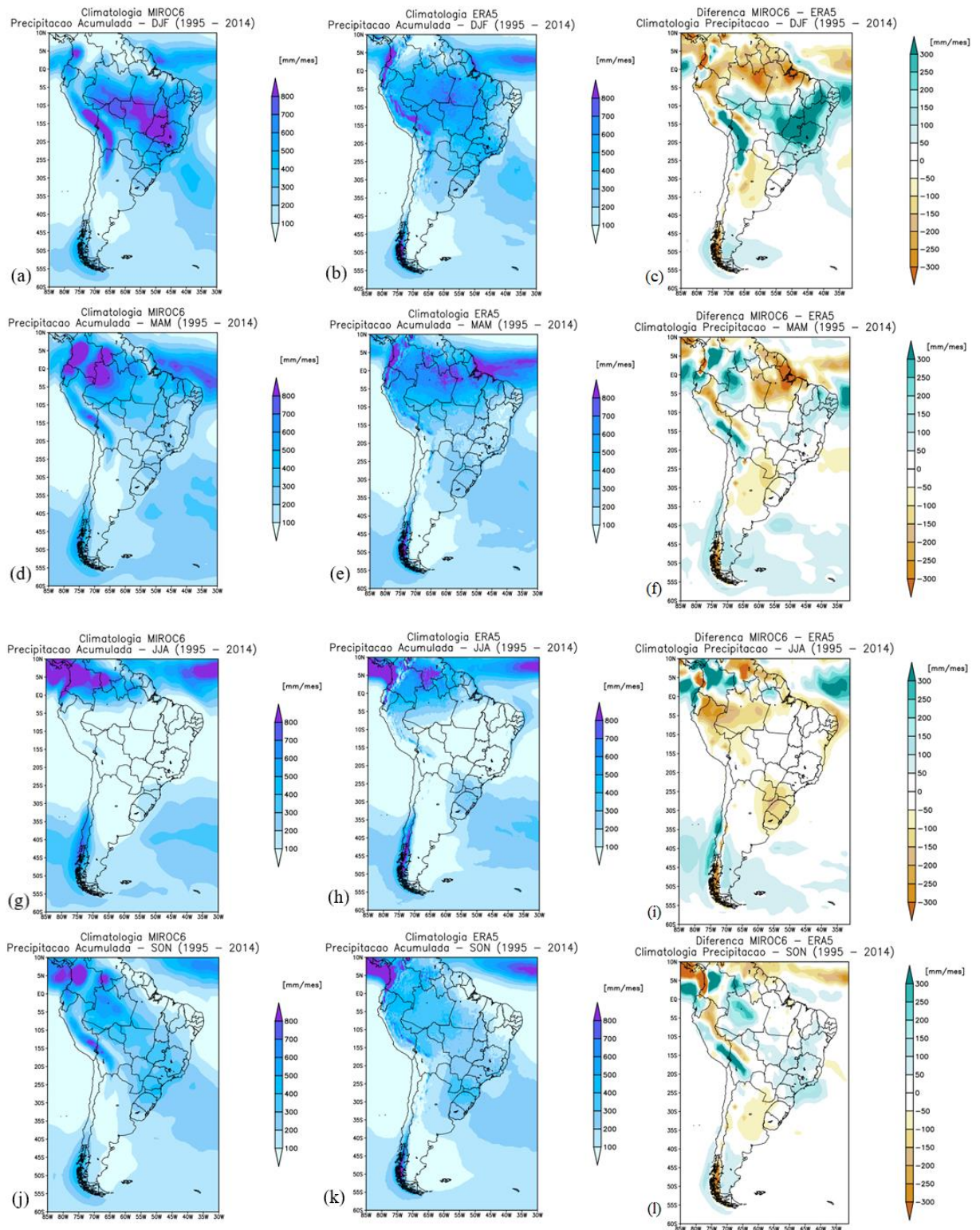


Figura 22 - Climatologia Sazonal (1995-2014) da precipitação anual (mm/ano): (a,d,g,j) Modelo MIROC6, (b,e,h,k) Reanálise ERA5 e a (c,f,i,l) Diferença entre MIROC6 e ERA5.

Nota-se no verão (DJF) que ambos os modelos apresentam corretamente a posição da ZCAS, contudo ambos superestimam a quantidade de chuva dentro da região continental, ocasionando uma superestimativa da chuva sobre as regiões Centro-Oeste e Sudeste do Brasil e subestimativa (no caso do CanESM5) ou leve superestimativa (no caso do MIROC6) sobre o Oceano Atlântico. No outono (MAM), os modelos apresentam de forma correta a posição da ZCIT sobre o Atlântico Norte, porém para o CanESM5 ocorre uma subestimativa de precipitação com diferenças negativas que chegam a -200 mm/ano. Para o inverno (JJA), os modelos são bem semelhantes e mostram menos precipitação do que a Reanálise ERA5. Na primavera (SON), verifica-se uma divergência entre os modelos, o CanESM5 (MIROC6) apresentando subestimativa (superestimativa) da precipitação.

5.1.2 Temperatura do Ar

A Figura 23 apresenta a climatologia (1995-2014) da temperatura média simulada pelo CanESM5, pelo ERA5 e a diferença (CanESM5-ERA5). A Figura 24 apresenta os mesmos campos da Figura 23, porém para o MIROC6.

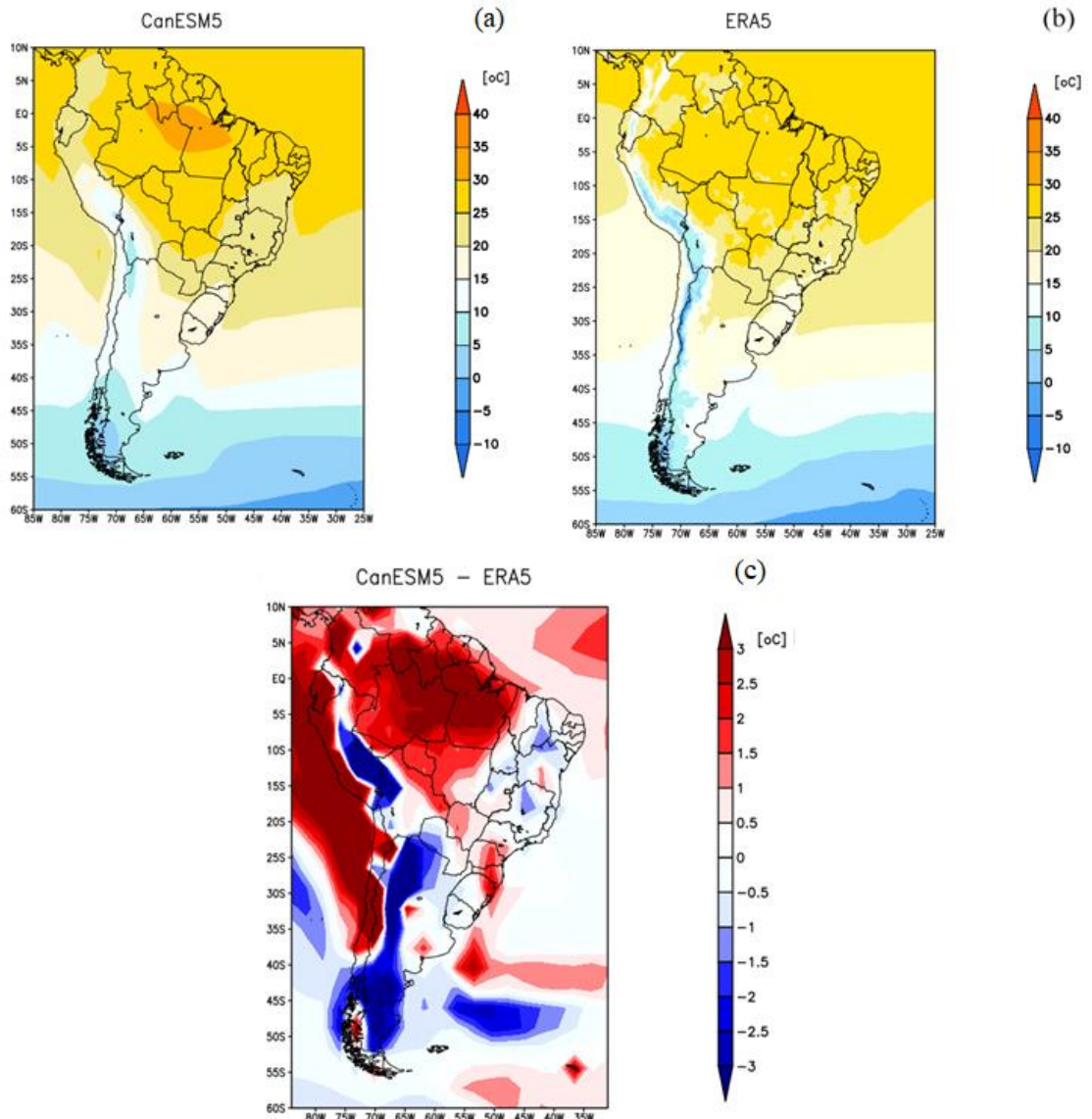


Figura 23 - Climatologia (1995 – 2014) da Temperatura Média no Clima Referência (°C): (a) Modelo CanESM5, (b) Reanálise ERA5 e (c) Diferença entre CanESM5 e ERA5.

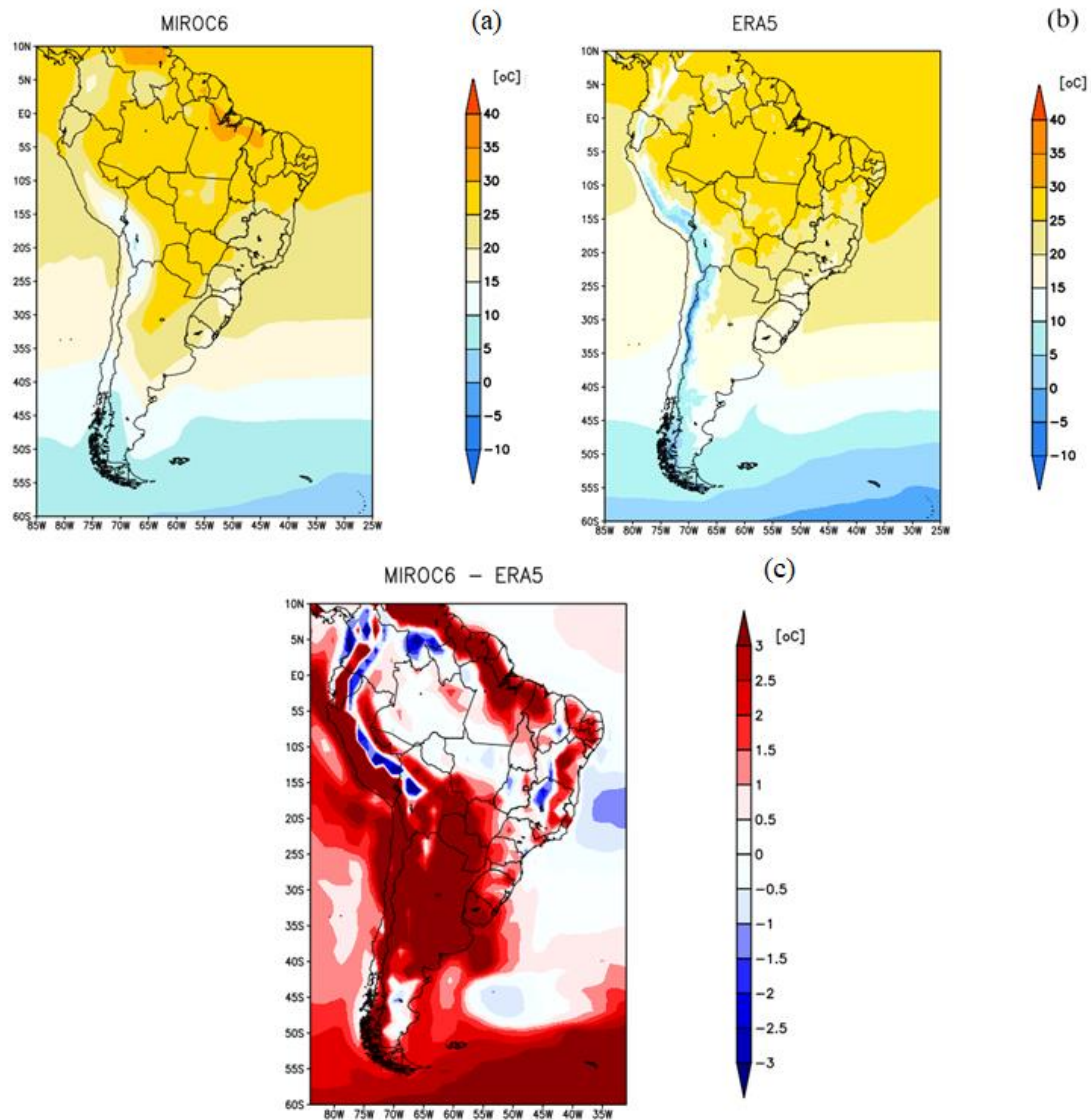


Figura 24 - Climatologia (1995 – 2014) da Temperatura Média no Clima Referência (°C): (a) Modelo MIROC6, (b) Reanálise ERA5 e (c) Diferença entre MIROC6 e ERA5.

Nota-se na Figura 23a e na Figura 24a que tanto o CanESM5 quanto o MIROC6 não conseguem reproduzir as baixas temperaturas observadas nos Andes, onde provavelmente a topografia não é bem detalhada, devido à baixa resolução espacial dos modelos atmosféricos (250 e 120 km, respectivamente). As diferenças encontradas na temperatura média do ar sobre os oceanos Atlântico e Pacífico, podem estar relacionadas com os diferentes campos de temperatura da superfície do mar (TSM) utilizados nos modelos e na Reanálise. Analisando a Figura 23c e a Figura 24c é possível identificar diferenças na magnitude da temperatura simulada, respectivamente pelo CanESM5 e pelo MIROC6. Nota-se que na América do Sul o modelo CanESM5 mostra áreas mais quentes no Equador, oeste do Peru, no centro do Chile e na Venezuela, enquanto o MIROC6 apresenta regiões com temperaturas mais elevadas

principalmente no Suriname, Guiana, norte da Venezuela, Equador, Bolívia, Paraguai, Uruguai, Chile e Argentina aonde a superestimativa da temperatura chega a aproximadamente +3 °C. O CanESM5 apresenta áreas mais frias no leste do Peru, em uma pequena área da Bolívia e na Argentina, diferentemente do MIROC6 que quase não apresenta regiões mais frias, exceto em pequenas áreas nos territórios do Peru, Venezuela, Bolívia e Colômbia.

Na Região Norte do Brasil, ambos os modelos exibem temperaturas mais altas, principalmente o CanESM5, que apresenta uma superestimativa de 3° C em relação ao ERA5. Nas regiões Nordeste e Sul, o MIROC6 apresenta áreas mais quentes. No SAU-BA, os modelos apresentam comportamentos diferentes, o CanESM5 exibe temperatura mais baixa do que a Reanálise de até - 1 °C, enquanto o MIROC6 apresenta uma temperatura levemente mais alta. Porém, em toda a América do Sul, o modelo CanESM5, representa melhor a temperatura do clima referência.

A Figura 25 apresenta as climatologias sazonais de temperatura simuladas pelo CanESM5, pelo ERA5 e a diferença (CanESM5-ERA5). A Figura 26 apresenta os mesmos campos da Figura 25, porém para o MIROC6.

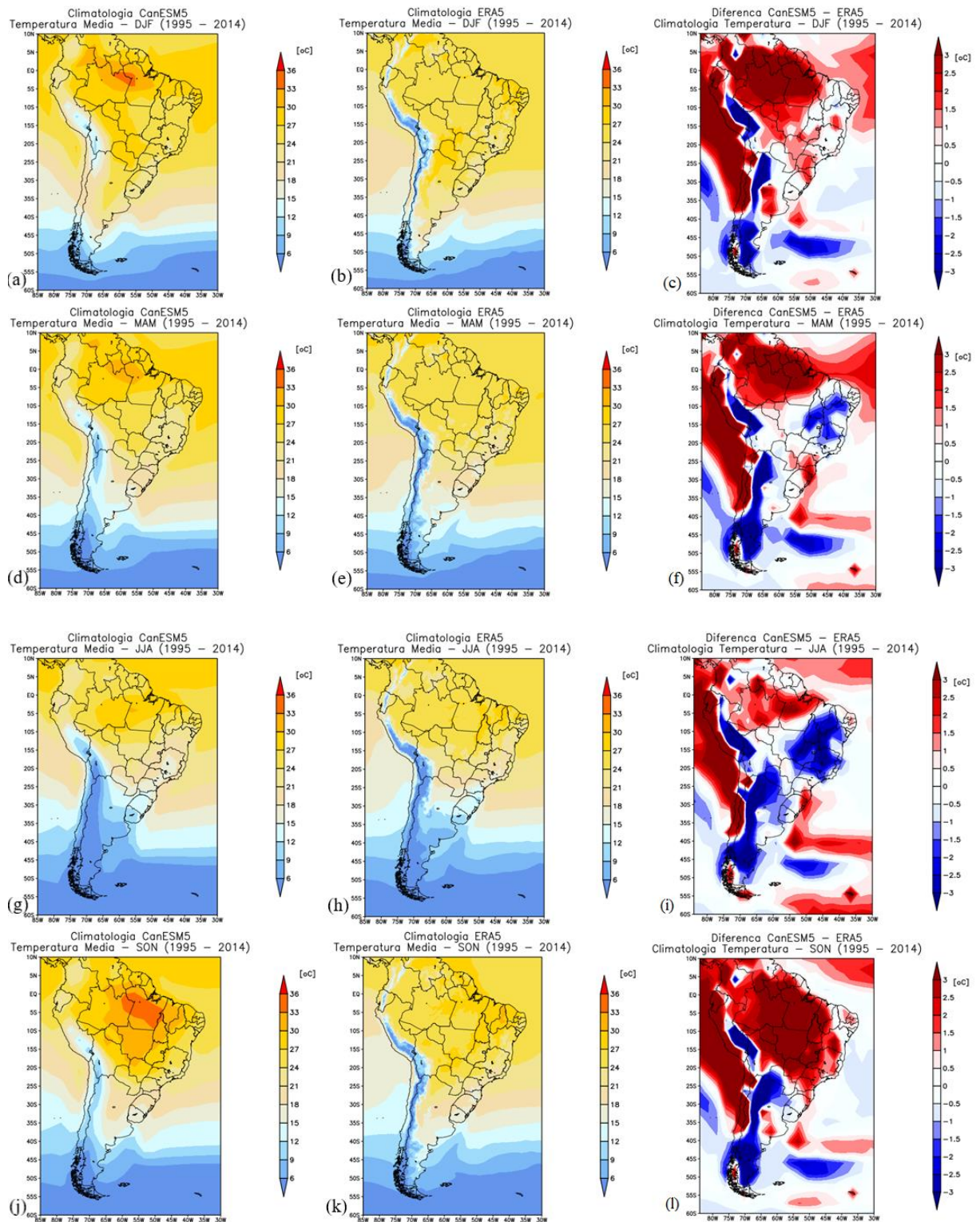


Figura 25 – Climatologia Sazonal (1995 – 2014) da Temperatura Média no Clima Referência (°C): (a,d,g,j) Modelo CanESM5, (b,e,h,k) Reanálise ERA5 e (c,f,i,l) Diferença entre CanESM5 e ERA5.

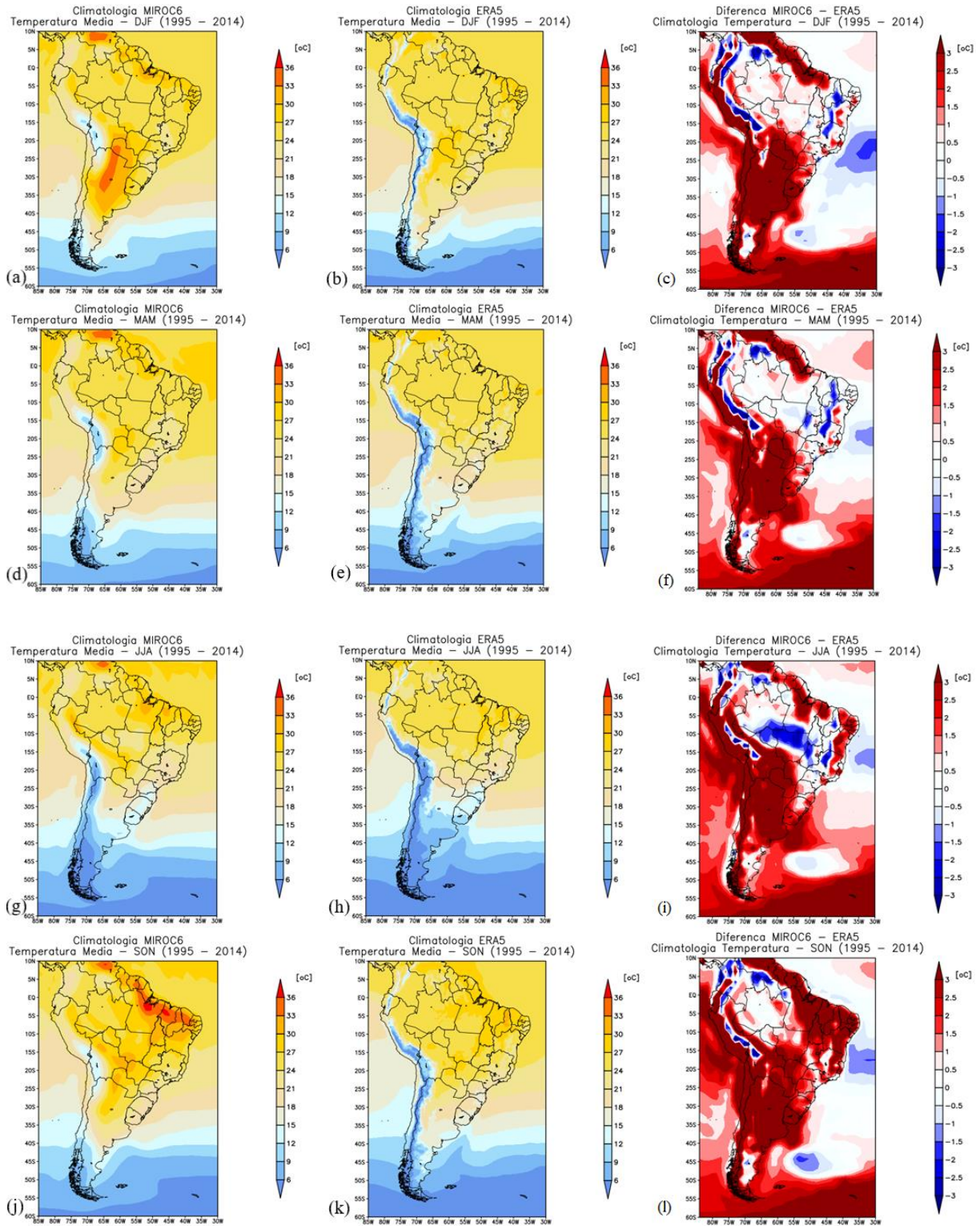


Figura 26 - Climatologia Sazonal (1995 – 2014) da Temperatura Média no Clima Referência (°C): (a,d,g,j) Modelo MIROC6, (b,e,h,k) Reanálise ERA5 e (c,f,i,l) Diferença entre MIROC6 e ERA5.

Analisando a Figura 25 e a Figura 26, é possível notar que ocorre um padrão similar ao longo do ano, com o modelo CanESM5 mostrando áreas mais quentes no Equador, oeste do Peru, no centro do Chile e no sul da Venezuela. Ao passo que, o MIROC6 mostra regiões com

temperaturas mais elevadas principalmente no Suriname, Guiana, Bolívia, Venezuela, Paraguai, Uruguai, Chile e na Argentina com uma superestimativa da temperatura de +3 °C.

No Brasil, o CanESM5 apresenta áreas mais quentes, principalmente na Região Norte, em especial nos meses DJF (Figura 25c) e SON (Figura 25l), onde ocorrem as diferenças mais altas em relação à Reanálise. O MIROC6 apresenta áreas mais quentes do que a reanálise principalmente nas regiões Norte e Nordeste nos meses SON (Figura 26l).

5.2 PROJEÇÕES DOS MODELOS DO CMIP6 NO CLIMA FUTURO

Nesta seção serão apresentadas as projeções da mudança relativa na precipitação anual e na temperatura média anual dos modelos CanESM5 e MIROC6 para SSP1-2.6 e SSP5-8.5. Tais mudanças se referem ao período 2041-2060 (médio prazo), em relação ao clima de referência (1995-2014).

5.2.1 Precipitação

A Figura 27 apresenta as diferenças entre as projeções futuras para a mudança relativa da precipitação do modelo CanESM5 para o SSP1-2.6 e SSP5-8.5. Na Figura 27, encontram-se os mesmos campos para o modelo MIROC6.

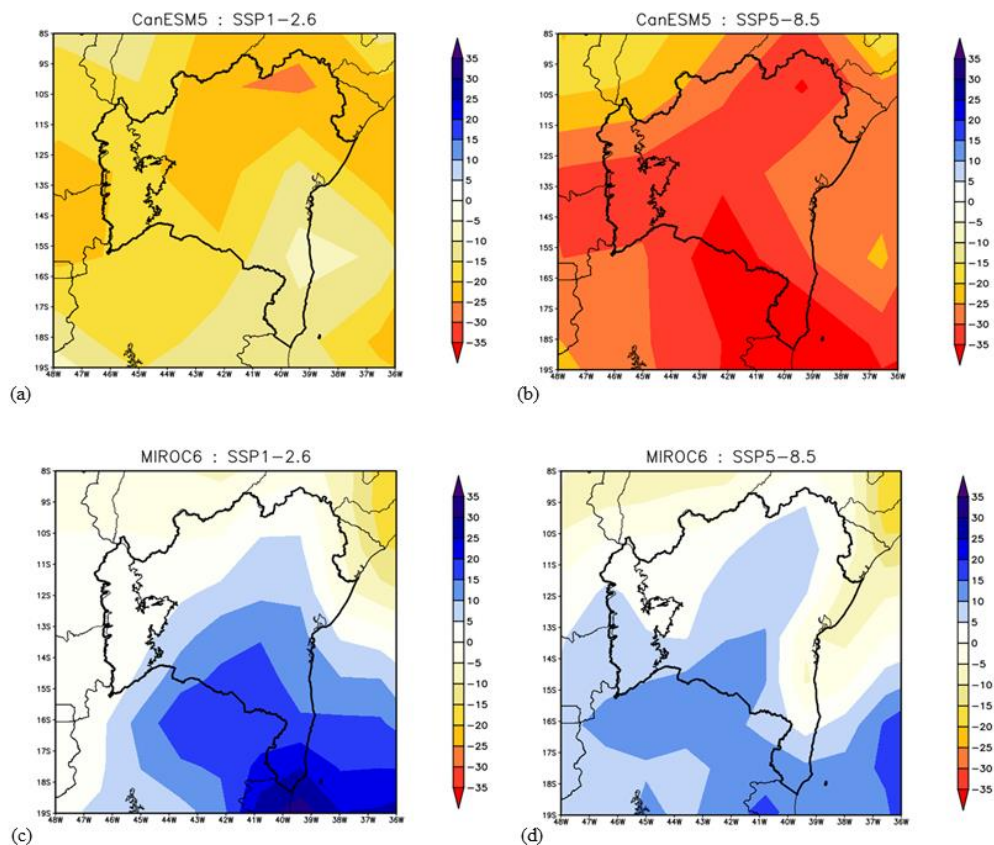


Figura 27 – Mudança relativa (%) na precipitação anual entre o clima futuro (2041 – 2060) e clima de referência (1995 – 2014): (a) Modelo CanESM5 – SSP1-2.6, (b) Modelo CanESM5 – SSP5-8.5, (c) Modelo MIROC6 – SSP1-2.6 e (d) Modelo MIROC6 – SSP5-8.5.

O modelo CanESM5 mostra para o clima futuro de 2041-2060 no cenário SSP1-2.6 que a precipitação na área do SAU-BA poderá ter uma diminuição de 20%, enquanto que para o SSP5-8.5 essa diminuição será ainda maior, entre 25% e 35%. No modelo MIROC6 o oposto acontece, projeta-se um aumento de até 10% na precipitação na área de estudo em ambos os cenários. Uma análise em maior detalhe, para o estado da Bahia revela que a precipitação projetada no cenário SSP1-2.6 poderá aumentar em uma grande área, de até 20% em comparação ao clima de referência, enquanto para o SSP5-8.5 a área desse mesmo aumento de precipitação é reduzida. Isso demonstra dois extremos, o modelo CanESM5 projetando um clima mais seco, enquanto o MIROC6 projeta um clima um pouco mais chuvoso. Essa divergência na projeção da precipitação entre os modelos do CMIP6 é mostrada em outros estudos como ALMAZROUI *et al.*, (2020), UKKOLA *et al.*, (2020), COOK *et al.*, (2020), AKINSANOLA *et al.*, (2020), NA; FU; KODAMA(2020) e GUSAIN; GHOSH; KARMAKAR(2020).

RIVERA; ARNOULD(2020) avaliaram o desempenho da precipitação simulada por 14 Modelos de Circulação Geral (MCGs) do CMIP6 na captura dos padrões espaciais e temporais observados no sudoeste da América do Sul, e apenas cinco deles melhor reproduziram as características climatológicas e suas mudanças temporais na área de estudo. A Sexta Fase do CMIP (CMIP6) foi um elemento essencial para a elaboração do AR6 (IPCC), porém é necessário avaliar previamente a capacidade dos modelos de representar realisticamente as características do sistema climático, uma fase imprescindível para que os modelos possam ser usados para projeções futuras regionais (ZAZULIE; RUSTICUCCI; RAGA, 2017).

5.2.2 Temperatura do Ar

A Figura 28 apresenta as diferenças entre as projeções futuras para as mudanças da temperatura média anual do modelo CanESM5 sob os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5. Na Figura 28, apresenta-se os mesmos campos para o modelo MIROC6.

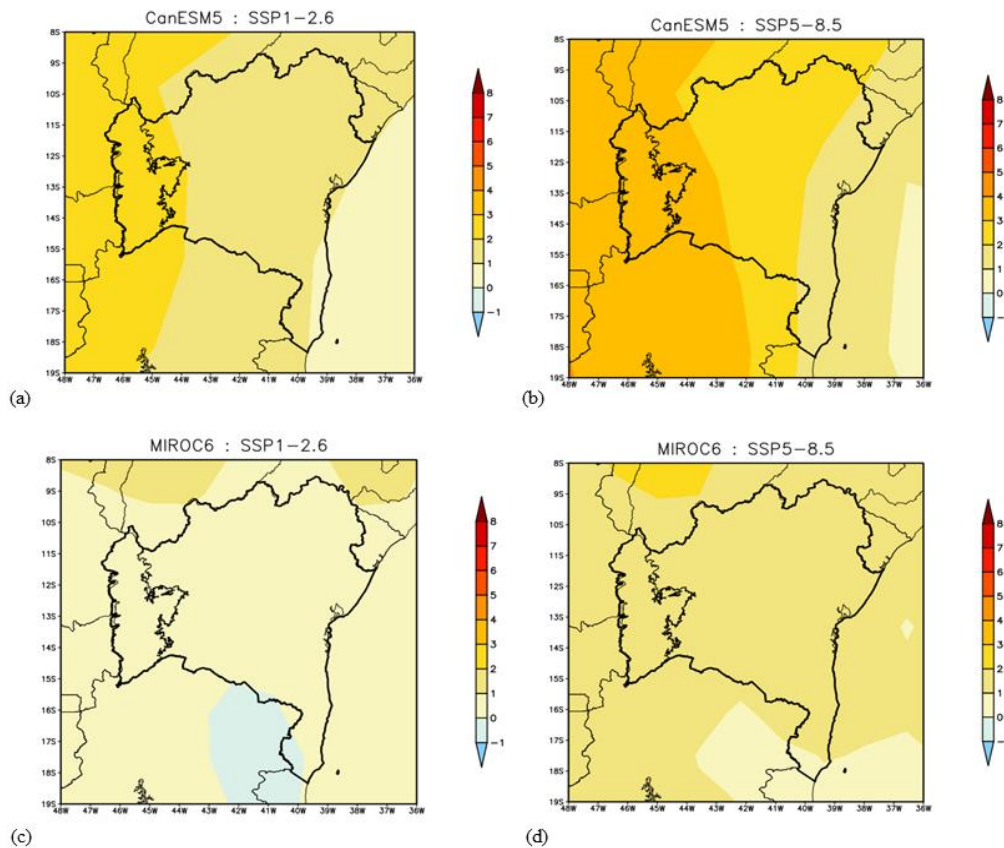


Figura 28 – Mudança na temperatura média anual (°C) entre o clima futuro (2041 – 2060) e clima de referência (1995 – 2014): (a) Modelo CanESM5 – SSP1-2.6, (b) Modelo CanESM5 – SSP5-8.5, (c) Modelo MIROC6 – SSP1-2.6 e (d) Modelo MIROC6 – SSP5-8.5.

Os dois modelos concordam que no futuro haverá aquecimento, embora diverjam na magnitude desse aumento de temperatura nos cenários SSPs. O modelo CanESM5 projeta um aumento de temperatura na área de estudo de 3 °C para o cenário SSP1-2.6 e de 4 °C para o SSP5-8.5. Já o MIROC6 projeta um aumento da temperatura para todo o estado da Bahia, de 1 °C para o cenário SSP1-2.6 e de 2 °C para SSP5-8.5. Ressalva-se no cenário SSP1-2.6 uma pequena área nos estados de Minas Gerais e do Espírito Santo onde a temperatura poderá diminuir. COOK *et al.*(2020) relatam que as trajetórias de temperatura entre os SSPs divergem mais fortemente após 2050, conforme as emissões começam a diminuir ou se estabilizar nos cenários de maior mitigação da mudança climática, contrariamente aos demais cenários mais pessimistas.

Tais resultados concordam com outros estudos COPPOLA *et al.*, (2020), GIDDEN *et al.*, (2019), ALMAZROUI *et al.*, (2020b), FAN *et al.*, (2020), TOKARSKA *et al.*, (2020), e WEHNER; GLECKLER; LEE (2020) de que haverá um aquecimento global projetado para o clima futuro pelos modelos do CMIP6 nos cenários SSPs com forçantes fraca (SSP1-2.6), média e forte (SSP5-8.5).

5.3 BALANÇO HIDROMETEOROLÓGICO

Nesta seção são apresentados os cálculos da recarga feitos através do *Software Visual Balan 2.0* para as estações do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), Barreiras e Correntina, no clima de referência (1995-2014) e suas comparações com os modelos do CMIP6 no mesmo período, e as projeções de recarga para o clima futuro dos modelos CanESM5 e MIROC6 para SSP1-2.6 e SSP5-8.5, essas projeções se referem ao período 2041-2060 (médio prazo), em relação ao clima de referência.

5.3.1 Cálculo da Recarga no Clima de Referência

O cálculo da recarga feito através do Balanço Hidrometeorológico utilizando o *Software Visual Balan 2.0*, para o clima de referência (1995-2014), forneceu resultados para as estações do IMNET, Barreiras e Correntina, e para os modelos do CMIP6, MIROC6 e CanESM5, para o mesmo período.

A Figura 29 apresenta os gráficos com os resultados da precipitação anual média e da recarga anual média das estações INMET Correntina e Barreiras, respectivamente. Em ambos os gráficos é possível observar que os níveis de precipitação ocorrem de forma bastante variável e diversa de ano para ano. Apesar disso, a linha de tendência da precipitação se mostra aparentemente constante para a estação de Correntina, enquanto na Estação Barreiras, a tendência dessa mesma linha é de declínio. Essas tendências de precipitação, para estas duas estações, também foram visualizadas no estudo de REGOTO *et al.*, (2021) em sua pesquisa sobre as mudanças observadas nos extremos de temperatura do ar e precipitação no Brasil, que utilizou os dados de estações do INMET em todo o país, para o período de 1961-2017. Neste estudo, o autor também indicou que o clima da Região Nordeste vem se tornando mais seco.

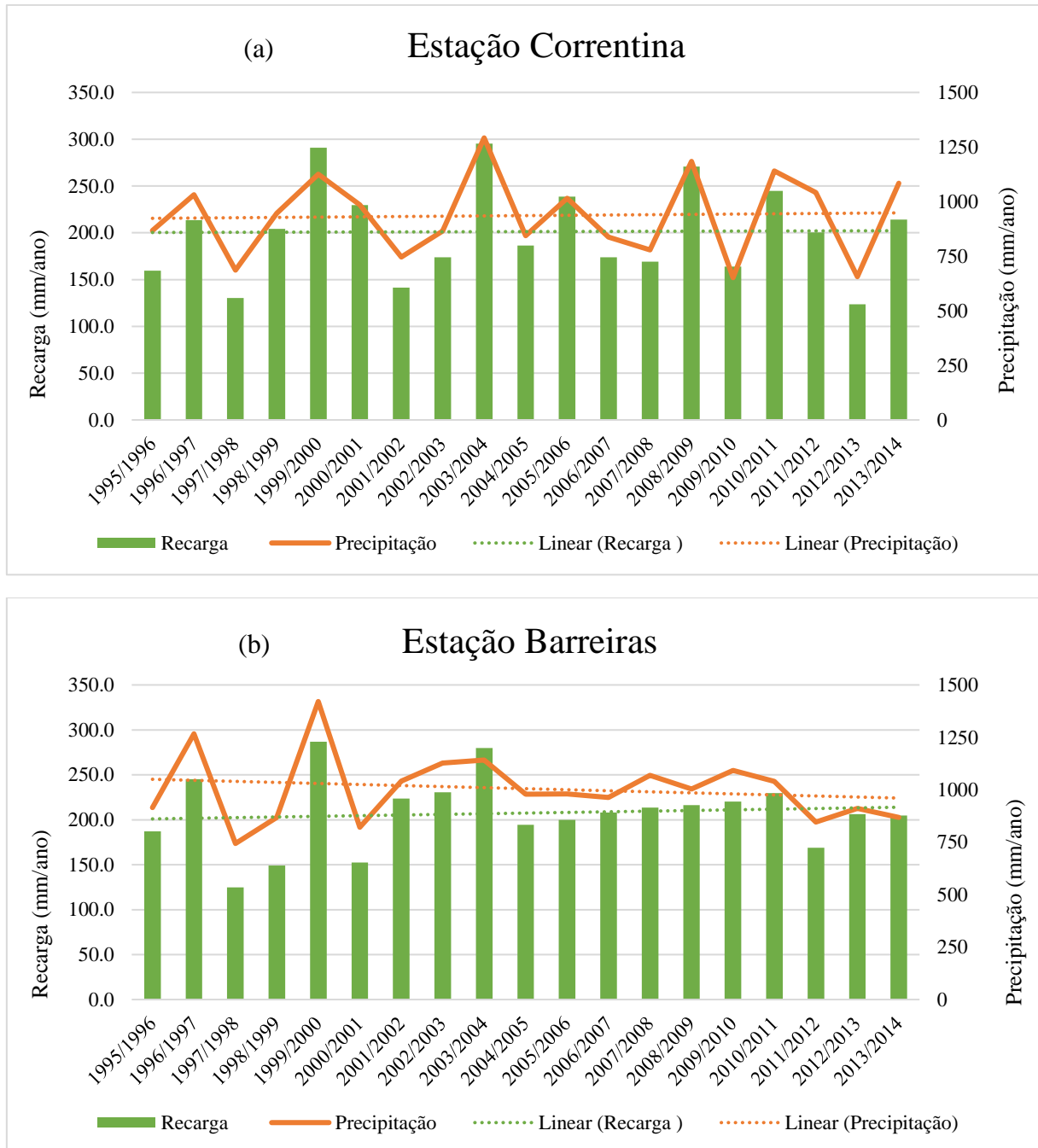


Figura 29 - Gráficos das Estações INMET (a) Correntina e (b) Barreiras – (BA) relacionando recarga (mm/ano) e precipitação (mm/ano) ao longo do tempo (1995-2014). As linhas pontilhadas representam as tendências na recarga (em verde) e na precipitação (laranja).

A Tabela 2 mostra as médias anuais dos principais resultados do balanço hidrometeorológico feitos através do *Software Visual Balan 2.0*. Para a estação de Barreiras, os resultados indicam que a média de recarga anual foi de 210 mm/ano, o que equivale a aproximadamente 21% da precipitação média, enquanto para Correntina a média da recarga de 214 mm/ano, o que corresponde a 23% da precipitação média. Esses resultados são similares aos de GASPARG (2006), que obteve uma recarga de 278 mm/ano, cerca de 24,10%

da precipitação média, para o período de 1982 e 2002, em Correntina, utilizando o método balanço hidrogeológico; de PIMENTEL *et al.*, (2000) que estimaram a recarga média em 257,02 mm/ano, cerca de 20% da precipitação média, utilizando o método de separação de hidrogramas entre 1984 e 1995 a partir de estudos na bacia do rio das Fêmeas, um dos principais afluentes do Rio Grande; e de, ALBUQUERQUE (2009) que estimou a recarga também na bacia do rio das Fêmeas de 256,53 mm/ano, correspondendo a 22,87% da precipitação média, pelo método automático de Rutledge & Daniel (1994), para o período de 1977 a 2007.

Ainda analisando a Tabela 2, podemos observar que a média de recarga do clima de referência para o MIROC6 é de aproximadamente 308 mm/ano, cerca de 18% da precipitação média para esse modelo, enquanto que para o CanESM5 tem o valor médio de recarga superestimado de 496 mm/ano, o que equivale a 26% de sua precipitação média. Embora, ambos modelos climáticos tenham superestimado os resultados do balanço hidrológico no clima referência quando comparados aos dados observados, os valores do modelo MIROC6 são os que melhor se aproximaram dos resultados para os dados das Estações de Correntina e Barreiras.

Tabela 2 – Médias anuais dos principais resultados do *Software Visual Balan 2.0*.

Médias Anuais	Dados INMET		Modelos CMIP6	
	(1995 - 2014)		(1995 - 2014)	
	Correntina	Barreiras	MIROC6	CanESM5
Precipitação (mm/ano)	934	1005	1728	1928
Recarga em Trânsito (mm/ano)	400	410	576	931
Evapotranspiração Potencial (mm/ano)	1165	1370	1393	1257
Evapotranspiração Real (mm/ano)	218	273	231	347
Fluxo (mm)	262	260	261	584
Fluxo Subsuperficial (mm/ano)	186	201	268	432
Vazão Subterrânea (m³/ano)	1,39E+10	1,43E+10	2,20E+10	3,50E+10
Vazão Total (m³/ano)	4,62E+10	4,93E+10	6,22E+10	1,12E+11
Recarga do aquífero (mm/ano)	214	210	308	496
Interceptação (mm/ano)	54	62	659	66

5.3.2 Projeções de Recarga para o Clima Futuro

A Figura 30 apresenta os resultados para recarga média mensal obtidos através do *Software Visual Balan 2.0*, para o clima de referência (1995-2014), para os cenários futuros SSP1-2.6 e SSP5-8.5, no período de médio prazo (2041-2060), para os modelos CanESM5 e MIROC6.

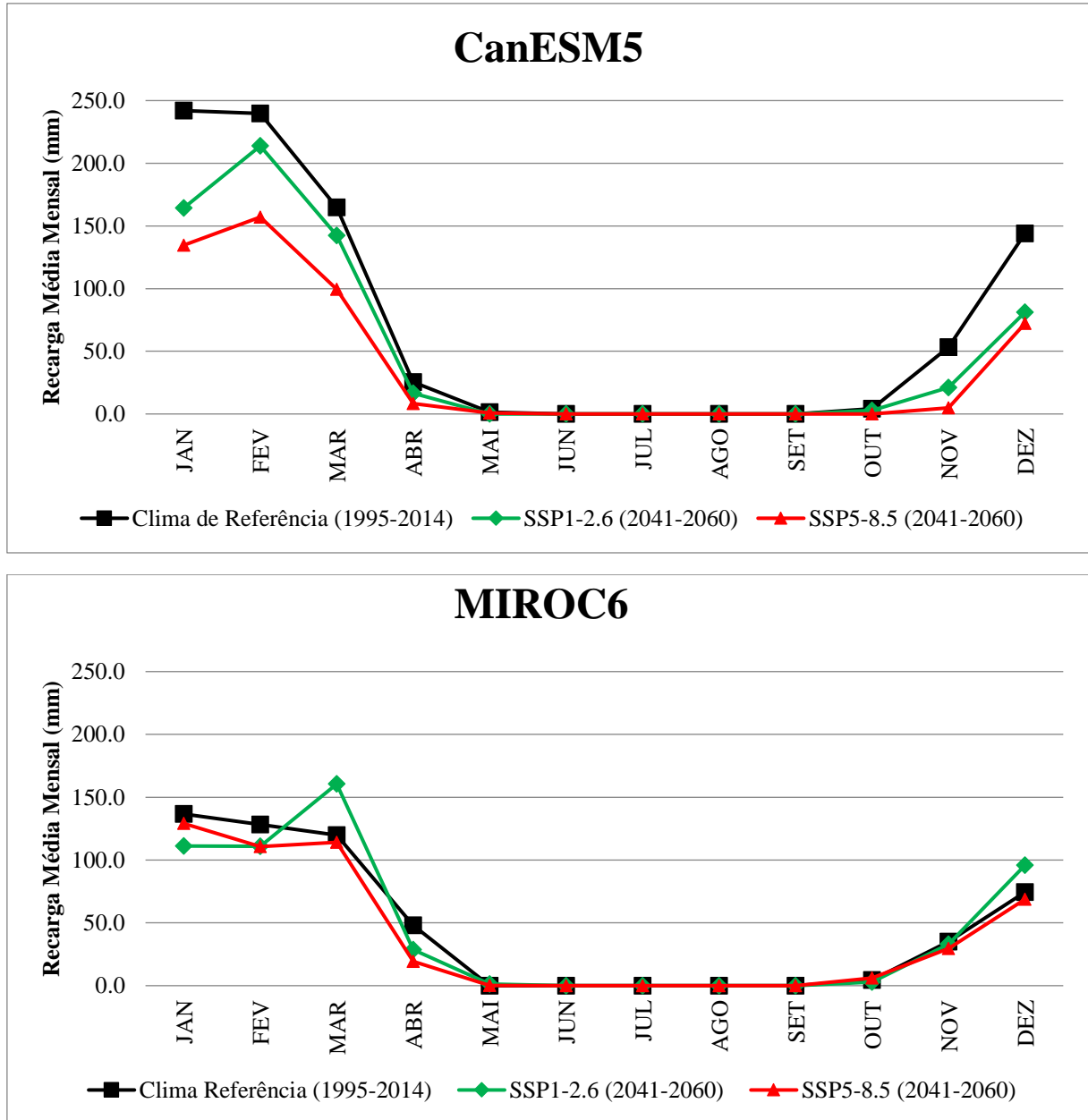


Figura 30 - Gráfico da recarga média mensal (mm) dos modelos CanESM5 e MIROC6, para o clima de referência (1995-2014) e para o clima futuro (2041-2060) nos cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5.

O modelo CanESM5 apresenta para o clima futuro de 2041-2060 em ambos os cenários médias muito menores que a do clima de referência, além da maior incidência de meses com menos recarga, de abril a novembro. Dessa forma, as projeções para o modelo CanESM5 mostram que para o clima futuro (2041-2060) no cenário SSP1-2.6, a recarga do aquífero na área do SAU-BA poderá ter uma redução de aproximadamente de 27%, enquanto que para o

SSP5-8.5 essa redução poderá ser ainda maior, de 43%. O modelo MIROC6, para o cenário SSP1-2.6, o oposto ocorre, apresentando médias de recarga maiores que o clima de referência, somente nos meses de março e dezembro. Assim, as projeções para o modelo MIROC6 indicam que, para o clima futuro no cenário SSP1-2.6 a recarga do aquífero na área do SAU-BA poderá ter um pequeno aumento de aproximadamente de 1,4%, porém para o cenário SSP5-8.5 poderá acontecer uma redução na recarga de quase 8%.

5.4 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES DA RECARGA E DO FLUXO PARA O CLIMA FUTURO

A Figura 31 e a Figura 32 apresentam os gráficos do balanço hídrico calculado pelo MODFLOW, mostrando diferenças significativas entre os volumes totais de entrada e saída de água na área do SAU-BA, e dos volumes de recarga entre o clima de referência (1995-2014) e os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 no clima futuro de médio prazo (2041-2060), para os modelos CanESM5 e MIROC6. Assim, foi possível organizar a Tabela 3 com as variações dos volumes de recarga, contendo os valores absolutos e relativo.

Na Tabela 3 nota-se que os valores relativos do balanço hídrico calculados pelo MODFLOW são semelhantes as projeções calculadas através do *Software Visual Balan*, exceto para o modelo MIROC6, no cenário SSP1-2.6. As simulações da recarga para ambos os modelos climáticos, CanESM5 e MIROC6, em todos os cenários futuros, apontam para a redução da recarga do aquífero na área do SAU-BA. Para o CanESM5 as variações de recarga mostram que para o clima futuro (2041-2060) no cenário SSP1-2.6, a recarga do aquífero poderá ter uma redução de aproximadamente 32%, e para o SSP5-8.5 essa redução poderá ser cerca de 45%. As variações para o modelo MIROC6 indicam que, para o clima futuro no cenário SSP1-2.6 a recarga do aquífero na área de estudo, terá uma diminuição perto de 5%, e para o SSP5-8.5, também uma redução na recarga, de aproximadamente 9%.

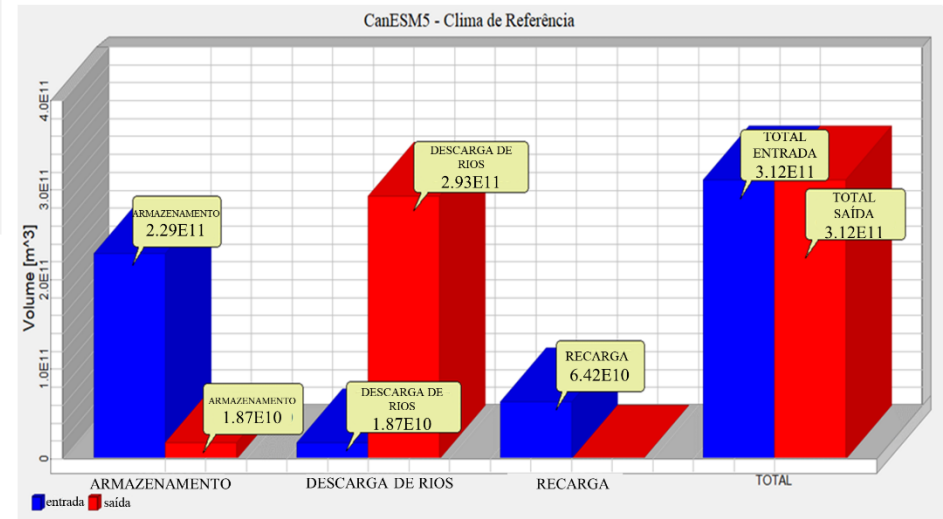
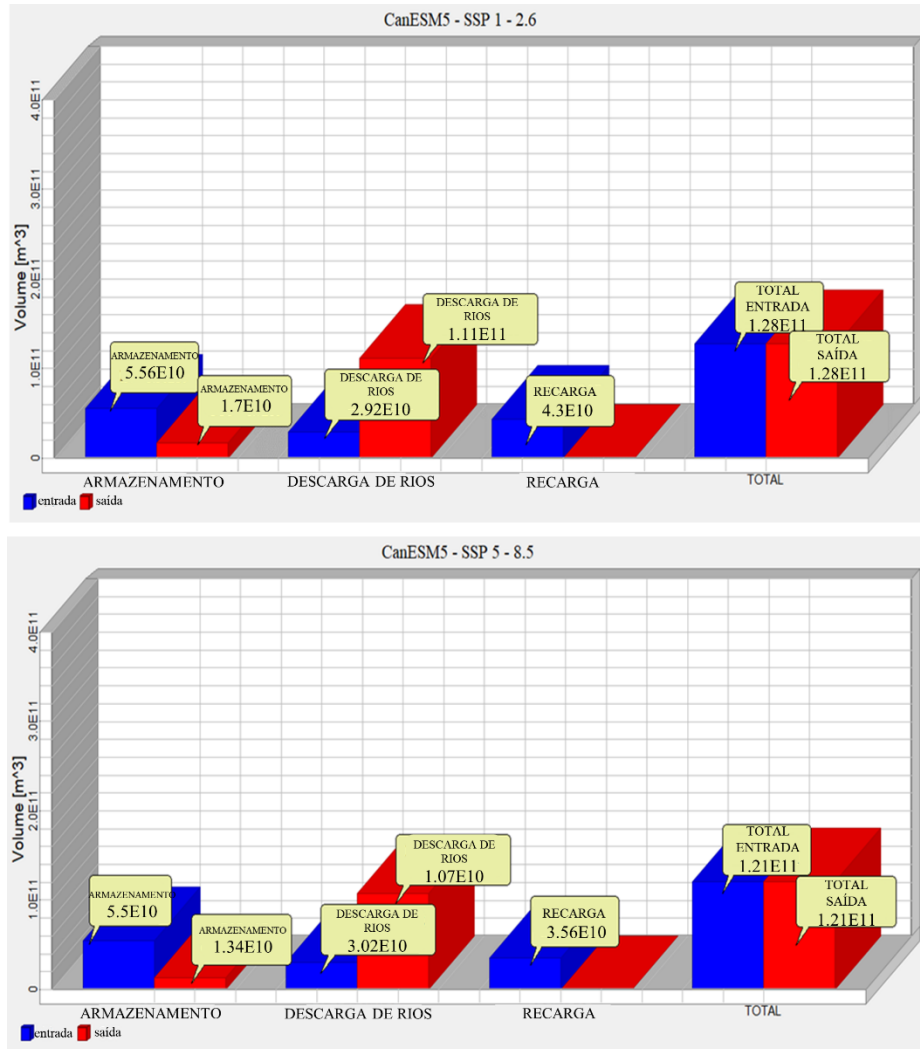


Figura 31 - Gráficos do Balanço Hídrico da região do SAU-BA do modelo CanESM5, para o clima de referência (1995-2014), e para os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 no clima futuro de médio prazo (2041-2060).

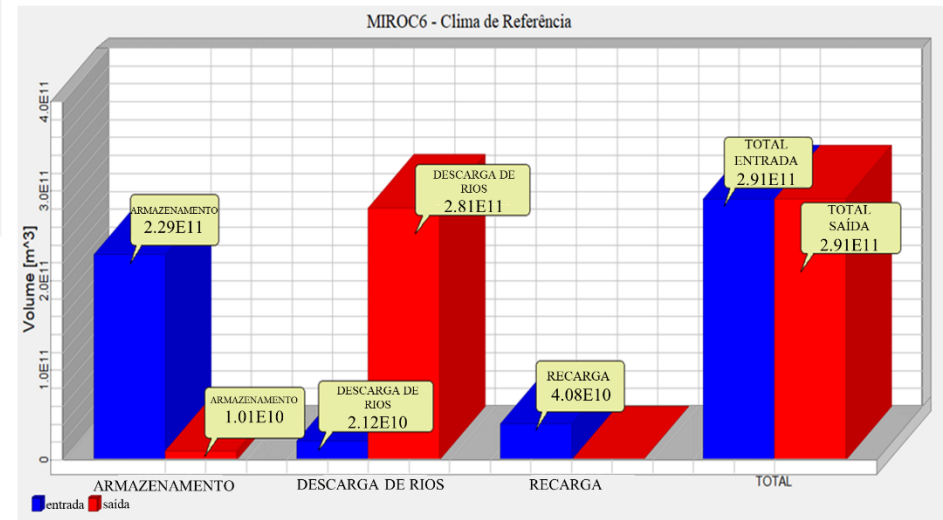
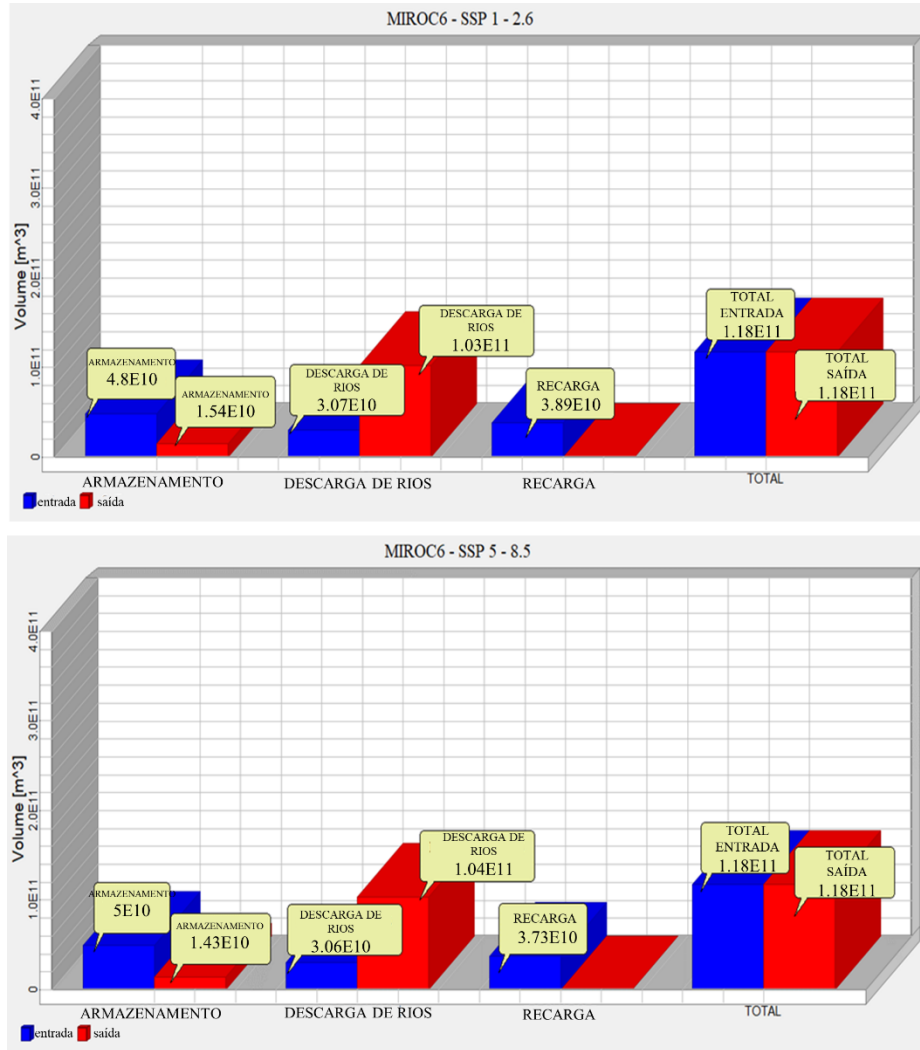


Figura 32 - Gráficos do Balanço Hídrico da região do SAU-BA do modelo MIROC6, para o clima de referência (1995-2014), e para os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 no clima futuro de médio prazo (2041-2060).

Tabela 3 – Tabela com as variações, absoluta e relativa, dos volumes de recarga do aquífero entre o clima de referência (1995-2014) e os cenários, SSP1-2.6 e SSP5-8.5, no clima futuro (2041-2060)

Variações de Recarga			
Modelos	Cenários	Valor Absoluto (m ³)	Valor Relativo (%)
CanESM5	SSP 1 - 2.6	-2,08E+10	-32
	SSP 5 - 8.5	-2,86E+10	-45
MIROC6	SSP 1 - 2.6	-1,91E+09	-5
	SSP 5 - 8.5	-3,50E+09	-9

Nas Figura 33 e Figura 34 são mostradas as variações de nível freático (subida e/ou rebaixamento) para os modelos CanESM5 e MIROC6, nos cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5, obtidas através das simulações do fluxo feitas pelo MODFLOW. Estas simulações se referem ao final do período 2041-2060 (clima futuro de médio prazo), em relação ao clima de referência (1995-2014).

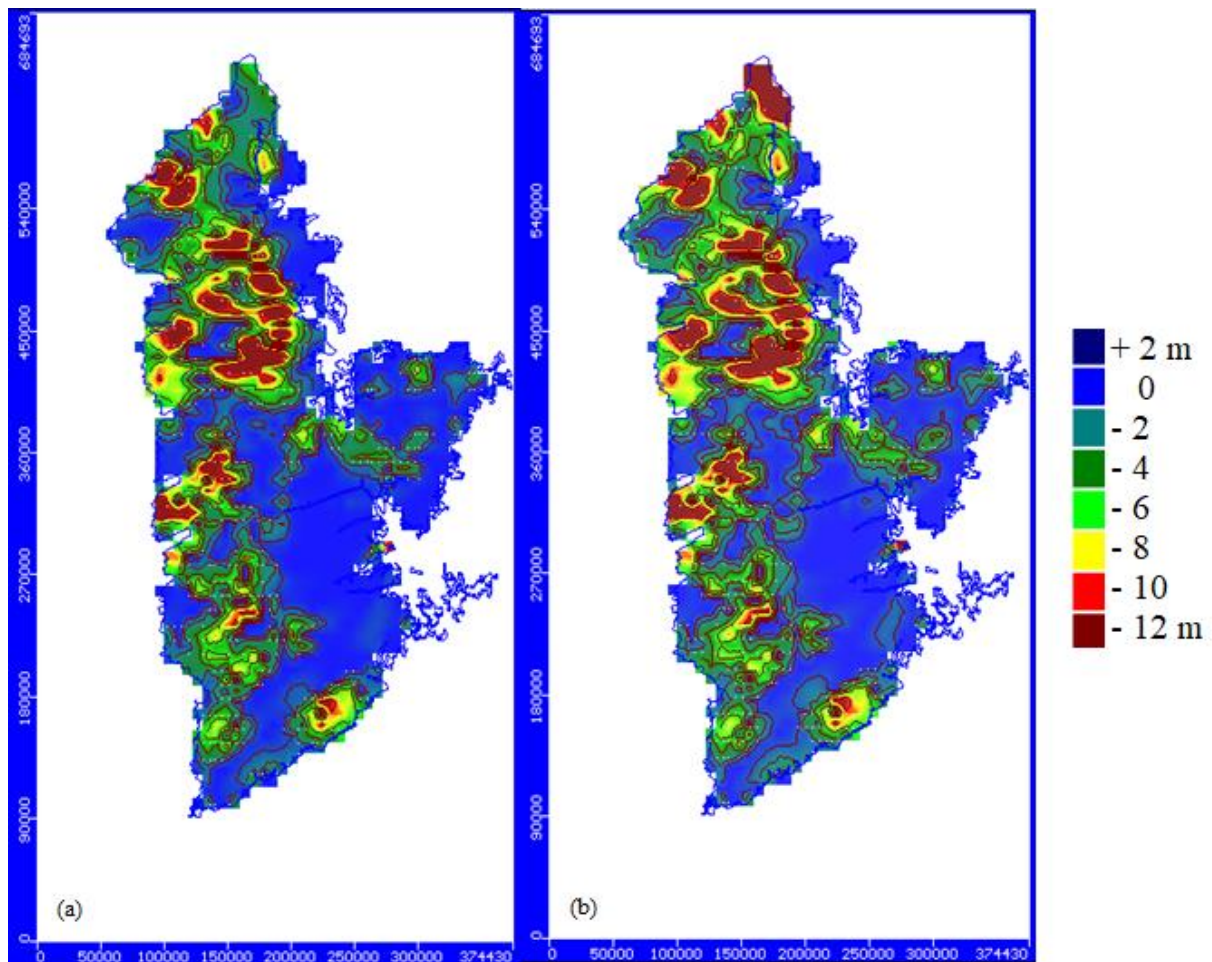


Figura 33 - Mapa de distribuição das variações do nível freático (NF) do SAU-BA para o modelo CanESM5, nos cenários (a) SSP1-2.6 e (b) SSP5-8.5. Os tons em vermelho indicam tendência de redução do NF, enquanto os tons azuis uma tendência de manutenção do NF em relação ao clima de referência.

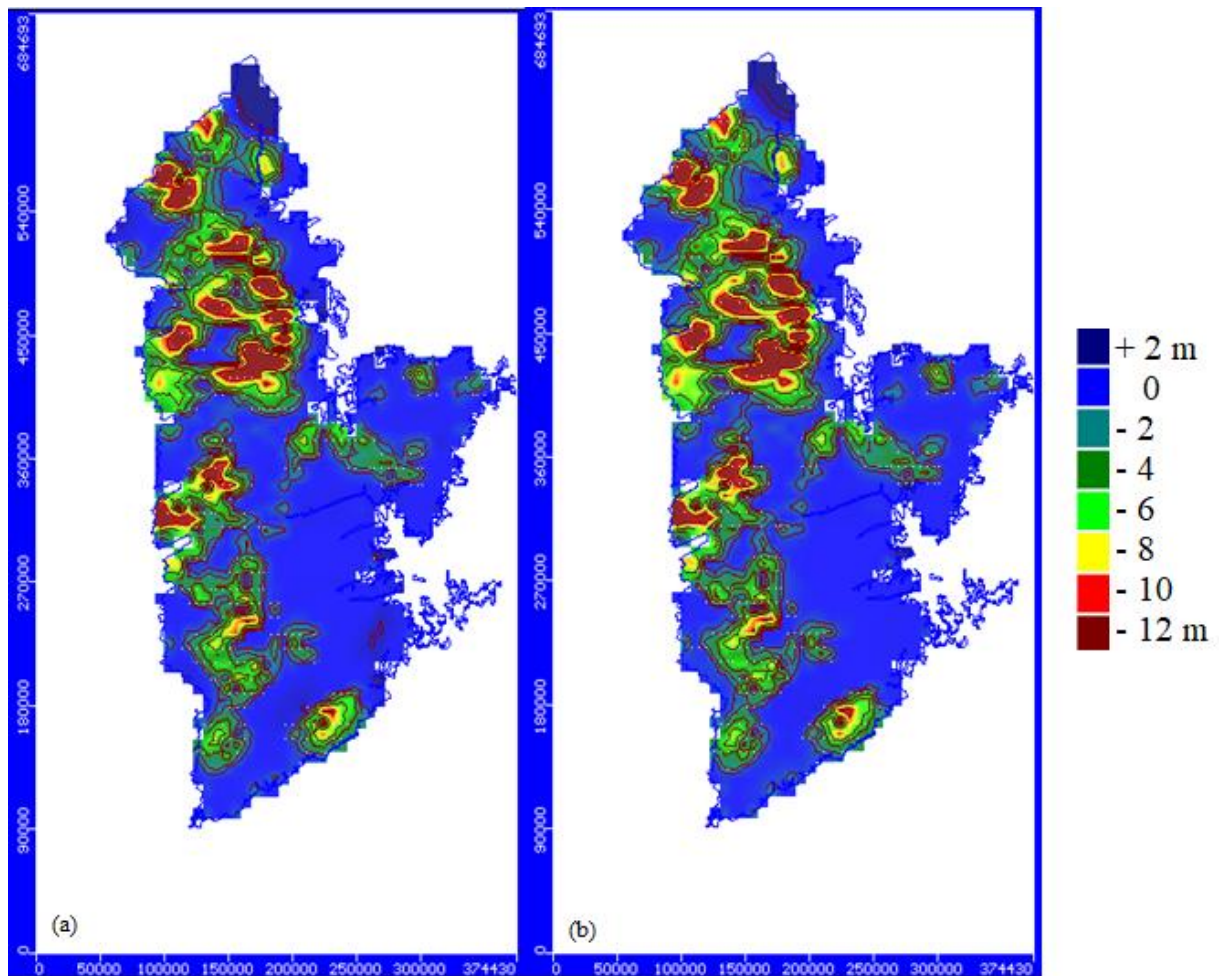


Figura 34 - Mapa de distribuição das variações do nível freático (NF) do SAU-BA para o modelo MIROC6, nos cenários (a) SSP1-2.6 e (b) SSP5-8.5. Os tons em vermelho indicam tendência de redução do NF, enquanto os tons azuis uma tendência de manutenção do NF em relação ao clima de referência.

Os dois modelos climáticos mostram regiões semelhantes que indicam uma tendência de rebaixamento de nível freático em grande parte da área do SAU-BA, porém em uma área ao sul do aquífero, ambos indicam estabilidade no nível freático. Essas diferenças entre as tendências de nível freático podem ser explicadas devido aos diferentes parâmetros geológicos da região do aquífero, como a porosidade. O modelo CanESM5 apresenta grandes áreas onde poderá ocorrer a redução do nível freático, em ambos os cenários, SSP1-2.6 e SSP5-8.5, embora seja possível perceber que para o cenário pessimista (SSP5-8.5) existe uma área no extremo norte do aquífero, em vermelho escuro, onde poderá ocorrer uma redução do nível de até 12 m. No centro e no oeste aquífero, o cenário pessimista apresenta ainda áreas maiores do que o cenário otimista (SSP1-2.6), onde poderá haver reduções do nível freático entre 2 e 12 m. Diferentemente do CanESM5, o modelo MIROC6 exibe uma área no extremo norte do

aquífero, em ambos os cenários, onde poderá ocorrer uma subida de nível freático, em azul escuro, de até 2 m, porém no cenário pessimista essa área está reduzida. Apesar de ocorrer locais semelhantes de rebaixamento nos dois cenários, na região oeste do aquífero, o cenário pessimista apresenta áreas sutilmente maiores do que o cenário otimista, onde poderá haver reduções do nível freático entre 2 e 8 m. Embora MANTOVANI *et al.*, (2019) tenha utilizado um modelo do CMIP5, e em períodos diferentes aos dessa pesquisa, é possível perceber áreas semelhantes onde poderá ocorrer rebaixamento do aquífero, principalmente ao norte do aquífero.

6 CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo é analisar os impactos das mudanças climáticas na recarga e no fluxo do Sistema Aquífero Urucuia no oeste da Bahia (SAU-BA) no clima futuro de médio prazo (2041-2060). Para isso são utilizadas projeções de precipitação e de temperatura do ar geradas por dois modelos climáticos do CMIP6, CanESM5 e MIROC6, sob os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5.

Inicialmente a performance dos modelos CanESM5 e MIROC6 para representar as climatologias sazonal e anual da temperatura média do ar e da precipitação anual sobre a América do Sul foi avaliada subjetivamente no clima de referência (1995-2014). Para isso, as simulações foram comparadas com a Reanálise ERA5. A seguir, as projeções de ambos os modelos para o período 2041-2060 foram analisadas a partir da mudança relativa da precipitação anual e da temperatura média anual sob os cenários futuros SSP1-2.6 e SSP5-8.5.

Os resultados da avaliação do clima de referência, indicam que no NEB, onde está a área de estudo, nota-se uma superestimativa da precipitação (entre 750 e 900 mm/ano), em ambos os modelos, porém o MIROC6 foi o que melhor representou o padrão espacial da precipitação em toda América do Sul. Para a temperatura do ar, o CanESM5 apresentou a melhor performance. No entanto, na Região Norte do Brasil, ambos os modelos exibiram temperaturas mais altas, principalmente o CanESM5, exibindo uma superestimativa de 3 °C em relação ao ERA5. No SAU-BA, os modelos apresentaram comportamentos diferentes, o CanESM5 mostrou uma temperatura mais baixa do que a Reanálise de até - 1 °C, enquanto o MIROC6 apresentou uma temperatura levemente mais alta. Apesar de tais diferenças, nota-se que os erros estão na faixa daqueles observados no conjunto total dos modelos do CMIP6 (verificado no Atlas Interativo - <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>) e dessa forma, decidiu-se utilizá-los para a investigação do clima no futuro.

As projeções para a mudança relativa na precipitação anual em 2041-2060 na área do SAU-BA indicam para o modelo CanESM5 no cenário SSP1-2.6, uma diminuição de 20%, enquanto para o SSP5-8.5 essa diminuição deverá ser ainda maior, entre 25% e 35%. No modelo MIROC6 o oposto acontece, projeta-se um aumento de até 10% na precipitação na área de estudo em ambos os cenários. Essa variação entre as projeções de precipitação nos modelos do CMIP6 também foi relatada em outras pesquisas (ALMAZROUI *et al.*, (2020),

UKKOLA *et al.*, (2020), COOK *et al.*, (2020), AKINSANOLA *et al.*, (2020), NA; FU; KODAMA(2020) e GUSAIN; GHOSH; KARMAKAR(2020)).

Para as projeções nas mudanças da temperatura média anual os dois modelos concordaram que no futuro poderá haver aquecimento, embora se oponham quanto à sua magnitude. Enquanto o CanESM5 projeta um aumento de temperatura na região do SAU-BA de 3 °C para o cenário SSP1-2.6 e de 4 °C para o SSP5-8.5, o MIROC6 projeta um aumento da temperatura para todo o estado da Bahia, de 1 °C para o cenário SSP1-2.6 e de 2 °C para o SSP5-8.5. Esses resultados concordam com outros trabalhos já publicados nos quais projeta-se um aquecimento global para o clima futuro pelos modelos do CMIP6 (COPPOLA *et al.*, (2020), GIDDEN *et al.*, (2019), ALMAZROUI *et al.*, (2020b), FAN *et al.*, (2020), TOKARSKA *et al.*, (2020), e WEHNER; GLECKLER; LEE (2020)).

Na segunda parte deste estudo, na etapa hidrológica, foram usados os dados de precipitação e de temperatura do ar gerados pelas projeções do CanESM5 e MIROC6 e os dados observados, das mesmas variáveis, de duas estações do INMET, Barreiras e Correntina, localizadas na região do SAU-BA. Dois métodos distintos de estimativa de recarga foram usados para visualização dos impactos hidrogeológicos futuros em cenários de mudança climática, os modelos hidrogeológicos *Software Visual Balan 2.0* e o MODFLOW.

Para o balanço hidrometeorológico aplicado através do *Software Visual Balan 2.0*, os resultados indicaram para a estação de Barreiras (Correntina) uma média de recarga anual de 210 (214) mm/ano, o que equivale a aproximadamente 21 (23%) da precipitação média. Usando os dados projetados com o CanESM5 (MIROC6) o *Software Visual Balan 2.0* projetou que no cenário SSP1-2.6, a recarga do aquífero na área do SAU-BA poderá ter uma redução (modesto aumento) de aproximadamente de 27 (1,4%), enquanto que sob o cenário SSP5-8.5 essa redução poderá ser de 43 (8%).

Os valores das simulações de recarga calculadas através do MODFLOW são próximos às projeções calculadas através do *Software Visual Balan*, porém diferentemente desse *software*, todas as simulações para ambos os modelos climáticos apontam para a redução da recarga do aquífero na área do SAU-BA. As variações de recarga do CanESM5 (MIROC6), mostram que para o clima futuro no cenário SSP1-2.6, a recarga do aquífero poderá ter uma redução de aproximadamente 32 (5%), e para o SSP5-8.5 essa redução poderá ser cerca de 45 (9%).

O cálculo de fluxo de água subterrânea do SAU-BA foi realizado com o auxílio do modelo MODFLOW, e mostrou para os dois modelos climáticos regiões semelhantes com tendência de rebaixamento de nível freático no norte e oeste do SAU-BA. Usando CanESM5, no cenário SSP5-8.5, projeta-se uma área no extremo norte do aquífero onde poderá ocorrer um rebaixamento do nível de até 12 m. Por outro lado, usando o MIROC6 projeta-se uma área também ao norte do aquífero, em ambos os cenários futuros, onde poderá ocorrer uma subida de nível freático de até 2 m.

O Sistema Aquífero Urucuia constitui um dos mais importantes sistemas aquíferos do país, e tem se transformado nas últimas décadas no principal polo agrícola baiano. Diante disso, pesquisas complementares sobre a disponibilidade dos recursos hídricos da região, e como serão afetados pelas mudanças climáticas futuras são de suma importância. Os resultados desta pesquisa, mostram que mesmo com o modelo MIROC6 apresentando aumentos de precipitação nos dois cenários climáticos, a região do SAU-BA poderá se tornar mais quente e mais seca, com reduções significativas da recarga e de fluxo do aquífero.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKINSANOLA, A. A.; KOOPERMAN, G. J.; REED, K. A.; PENDERGRASS, A. G.; HANNAH, W. M. Projected changes in seasonal precipitation extremes over the United States in CMIP6 simulations. *Environmental Research Letters*, [S. l.], v. 15, n. 10, p. 104078, 2020. DOI: 10.1088/1748-9326/abb397.

ALBUQUERQUE, A. C. L. S. Estimativa De Recarga Da Bacia Do Rio Das Fêmeas Através De Métodos Manuais E Albuquerque. [S. l.], p. 115, 2009.

ALMAZROUI, Mansour; SAEED, Fahad; SAEED, Sajjad; NAZRUL ISLAM, M.; ISMAIL, Muhammad; KLUTSE, Nana Ama Browne; SIDDIQUI, Muhammad Haroon. Projected Change in Temperature and Precipitation Over Africa from CMIP6. *Earth Systems and Environment*, [S. l.], v. 4, n. 3, p. 455–475, 2020. a. DOI: 10.1007/s41748-020-00161-x.

ALMAZROUI, Mansour; SAEED, Sajjad; SAEED, Fahad; ISLAM, M. Nazrul; ISMAIL, Muhammad. Projections of Precipitation and Temperature over the South Asian Countries in CMIP6. *Earth Systems and Environment*, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 297–320, 2020. b. DOI: 10.1007/s41748-020-00157-7.

ALVARES, Clayton Alcarde; STAPE, José Luiz; SENTELHAS, Paulo Cesar; DE MORAES GONÇALVES, José Leonardo; SPAROVEK, Gerd. Köppen’s climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, [S. l.], v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

AMANAMBU, Amobichukwu C.; OBAREIN, Omon A.; MOSSA, Joann; LI, Lanhai; AYENI, Shamusideen S.; BALOGUN, Olalekan; OYEBAMIJI, Abiola; OCHEGE, Friday U. Groundwater system and climate change: Present status and future considerations. *Journal of Hydrology*, [S. l.], v. 589, p. 125163, 2020. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125163.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). 2010. Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: panorama nacional/Agência Nacional de Águas; Engecorps/Cobrape - Brasília: ANA : Engecorps/Cobrape.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. (2013). Estudos Hidrogeológicos na Bacia Hidrográfica do São Francisco - Sistema Aquífero Urucuia/Areado e Sistema Aquífero Bambuí. http://cbhsaofrancisco.org.br/?wpfb_dl=1825. Acessado em 03 de setembro de 2021.

ARAÚJO, D. L. Avaliação dos Impactos da Exploração de Águas Subterrâneas na Bacia do Ribeirão Rodeador por Meio de Simulação Integrada entre os Modelos Swat e Modflow. Dissertação de mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasil, 2018.

AVILA-DIAZ, Alvaro; BENEZOLI, Victor; JUSTINO, Flavio; TORRES, Roger; WILSON, Aaron. Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. *Climate Dynamics*, [S. l.], v. 55, n. 5–6, p. 1403–1426, 2020. DOI: 10.1007/s00382-020-05333-z.

BAHIA. Ministério Público do Estado da Bahia. Manual de Apoio Jurídico ao Promotor de Justiça do Meio Ambiente MANUAL DAS ÁGUAS: CONSIDERAÇÕES SOBRE RECURSOS HÍDRICOS E A GESTÃO DAS ÁGUAS NO ESTADO DA BAHIA. Salvador. Bahia. 2014. Disponível em: <http://www.ceama.mp.ba.gov.br/biblioteca-virtual-ceama/doc_view/3706manual-das-aguas.html>. Acessado em 03 de setembro de 2021.

BATES, B. et al. IPCC Technical Paper on Climate Change and Water. Cambridge, United Kingdom and New York: IPCC, Cambridge University Press, 2008.

BERNARDINO, Mariana; SANTO, Fátima Espirito. Identificação de metodologias para a definição de cenários climáticos no contexto das alterações climáticas no sector do turismo. IPMA- Instituto Português do Mar e da Atmosfera. [S. l.], v. v0, n. 2015- 08–19, p. 1–12, 2015.

BORGES, Resende Maria Kelly. Avaliação Da Susceptibilidade Erosiva Da Bacia Do Rio Carinhanha (MG / BA) Por Meio Da Eups – Equação Universal De Perda De Solos Avaliação Da Susceptibilidade Erosiva Da Bacia Do Rio Carinhanha (MG / BA) Por Meio Da Eups –. [S. L.], 2009.

CAMARGO, A. P. Balanço Hídrico no Estado de São Paulo. Campinas: IAC, 1971.

CANDELA, Lucila; TAMOH, Karim; OLIVARES, Gonzalo; GOMEZ, Manuel. Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain). *Science of the Total Environment*, [S. l.], v. 440, p. 253–260, 2012. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.06.062.

CANDELA, Lucila; TAMOH, Karim; OLIVARES, Gonzalo; GÓMEZ, Manuel. Climate and land use changes on streamflow and subsurface recharge in the Fluvià Basin, Spain. *Water*

(Switzerland), *[S. l.]*, v. 8, n. 6, p. 1–16, 2016. DOI: 10.3390/w8060228.

CDM. Evaluation of Integrated Surface Water and Groundwater Modeling Tools. *Water Resources Research, [S. l.]*, n. February, p. 35, 2001.

CHAKRABORTY, Souvik; MAITY, Prabir Kumar; DAS, Subhasish. Investigation, simulation, identification and prediction of groundwater levels in coastal areas of Purba Midnapur, India, using MODFLOW. *[s.l.]* : Springer Netherlands, 2020. v. 22 DOI: 10.1007/s10668-019-00344-1.

COOK, B. I.; MANKIN, J. S.; MARVEL, K.; WILLIAMS, A. P.; SMERDON, J. E.; ANCHUKAITIS, K. J. Twenty-First Century Drought Projections in the CMIP6 Forcing Scenarios. *Earth's Future, [S. l.]*, v. 8, n. 6, p. 1–20, 2020. DOI: 10.1029/2019EF001461.

COPPOLA, Erika et al. Climate hazard indices projections based on CORDEX-CORE, CMIP5 and CMIP6 ensemble. *Climate Dynamics, [S. l.]*, v. Submitted, n. 1, p. 7–8, 9999.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Relatório diagnóstico Sistema Aquífero Urucuia – Bacia Sedimentar San Franciscana. *[S. l.]*, v. 10, p. 45, 2012.

CPRM. 2018. SIAGAS: Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>

CRUZ, P.K.S.G. Simulação do transporte e reabilitação de contaminações de hidrocarbonetos em solo. Dissertação de mestrado em Engenharia do Meio Ambiente, Ramo de Geoambiente, Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto, Portugal, 2003.

ENGELBRECHT, Bruno Zanon; CHANG, Hung Kiang. Análise hidrológica de séries históricas da bacia do rio grande (ba): contribuição do sistema aquífero urucuia hydrological analysis of rio grande basin (bahia state) time series: contribution of urucuia aquifer system. *[S. l.]*, v. 30, p. 190–208, 2016.

EYRING, Veronika; BONY, Sandrine; MEEHL, Gerald A.; SENIOR, Catherine A.; STEVENS, Bjorn; STOUFFER, Ronald J.; TAYLOR, Karl E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development, [S. l.]*, v. 9, n. 5, p. 1937–1958, 2016. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016.

FAN, Xuewei; DUAN, Qingyun; SHEN, Chenwei; WU, Yi; XING, Chang. Global surface air temperatures in CMIP6: historical performance and future changes. *Environmental Research*

Letters, *[S. l.]*, v. 15, n. 10, p. 104056, 2020. DOI: 10.1088/1748-9326/abb051.

GASPAR, Marcia Tereza Pantoja. Instituto De Geociências Sistema Aquífero Urucuia : Caracterização Regional E Propostas De Gestão Sistema Aquífero Urucuia : Caracterização. Universidade de Brasília, *[S. l.]*, p. 2004, 2006.

GASPAR, Márcia Tereza Pantoja; CAMPOS, José Eloi Guimarães. O Sistema Aquífero Urucuia. Revista Brasileira de Geociências, *[S. l.]*, v. 37, n. S4, p. 216–226, 2007. DOI: 10.25249/0375-7536.200737s4216226.

GHAZAVI, Reza; EBRAHIMI, Haidar. Predicting the impacts of climate change on groundwater recharge in an arid environment using modeling approach. International Journal of Climate Change Strategies and Management, *[S. l.]*, v. 11, n. 1, p. 88–99, 2019. DOI: 10.1108/IJCCSM-04-2017-0085.

GIDDEN, Matthew J. et al. Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: A dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. Geoscientific Model Development, *[S. l.]*, v. 12, n. 4, p. 1443–1475, 2019. DOI: 10.5194/gmd-12-1443-2019.

GREEN, Timothy R.; ALLEN, Diana M. DigitalCommons @ University of Nebraska - Lincoln Beneath the surface of global change : Impacts of climate change on groundwater. *[S. l.]*, 2011.

GUSAIN, A.; GHOSH, S.; KARMAKAR, S. Added value of CMIP6 over CMIP5 models in simulating Indian summer monsoon rainfall. Atmospheric Research, *[S. l.]*, v. 232, n. June 2019, p. 104680, 2020. DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.104680.

HANSON, R. T.; FLINT, L. E.; FLINT, A. L.; DETTINGER, M. D.; FAUNT, C. C.; CAYAN, Dan; SCHMID, Wolfgang. A method for physically based model analysis of conjunctive use in response to potential climate changes. Water Resources Research, *[S. l.]*, v. 48, n. 2, p. 1–23, 2012. DOI: 10.1029/2011WR010774.

HARBAUGH, A. W., LANGEVIN, C. D., HUGHES, J. D., NISWONGER, R. N., KONIKOW, L. F., 2017, MODFLOW-2005 version 1.12.00, the U.S. Geological Survey modular groundwater model: U.S. Geological Survey Software Release, 03 February 2017, <http://dx.doi.org/10.5066/F7RF5S7G>

HARRIS, I.; JONES, P. D.; OSBORN, T. J.; LISTER, D. H. Updated high-resolution grids of

monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, [S. l.], v. 34, n. 3, p. 623–642, 2014. DOI: 10.1002/joc.3711.

HERSBACH, Hans et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, [S. l.], v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 2020. DOI: 10.1002/qj.3803

HIRATA, Ricardo; Alexandra Vieira Suhogusoff; Silvana Susko Marcellini; Pilar Carolina Villar; Laura Marcellini. A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento. [S. l.], 2019. a.

HIRATA, Ricardo. As águas subterrâneas e sua importância ambiental e econômica para o Brasil. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.11606/9788563124074.

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.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; Allen, S.K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1535, 2013.

IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. The Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report addresses the most up-to-date physical understanding of the climate system and climate change, bringing together the latest advances in climate science, and combining multiple lines of evidence from paleoclimate, observations, process understanding, and global and regional climate simulations, 2021. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM>>. Acessado em: 06 de setembro de 2021.

KLAAS, Dua K. S. Y.; IMTEAZ, Monzur A.; SUDIAYEM, Ika; KLAAS, Elkan M. E.; KLAAS, Eldav C. M. Assessing climate changes impacts on tropical karst catchment: Implications on groundwater resource sustainability and management strategies. *Journal of Hydrology*, [S. l.], v. 582, p. 124426, 2020. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124426.

KRESIC, Neven. Hydrogeology and Groundwater Modeling. *Hydrogeology and Groundwater Modeling*, [S. l.], p. 23–120, 2020. DOI: 10.1201/9781420004991-5.

LA PASTA, M. Recarga ao Aquífero Fluviodeltaico na região Norte Fluminense - RJ: Comparação de metodologias e projeções para o período 2041-2070. Dissertação de Mestrado em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2018.

LIU, Hui Hai. Impact of climate change on groundwater recharge in dry areas: An ecohydrology approach. *Journal of Hydrology*, [S. l.], v. 407, n. 1–4, p. 175–183, 2011. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.07.024.

LIU, Wei et al. Quantifying the effects of climate change on hydrological regime and stream biota in a groundwater-dominated catchment: A modelling approach combining SWAT-MODFLOW with flow-biota empirical models. *Science of the Total Environment*, [S. l.], v. 745, p. 140933, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140933.

MALDANER, C. H. Recarga de aquífero em área urbana: Estudo de caso em Urânia (SP). 2010. 101f. Dissertação (Mestrado)– Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MANTOVANI, Everardo Chartuni; SILVA JÚNIOR, Aziz Galvão; COSTA, Marcos Heil; MARQUES, Eduardo Antonio Gomes; SILVA JÚNIOR, Gerson Cardoso; PRUSKI, Fernando Falco. RELATÓRIO TÉCNICO FINAL - Estudo do Potencial Hídrico da Região Oeste da Bahia: Quantificação e Monitoramento da Disponibilidade dos Recursos do Aquífero Urucua e Superficiais nas Bacias dos rios Grande, Corrente e Carinhanha. [S. l.], p. 359, 2019.

MARENGO, Jose A.; CHOU, Sin Chan; TORRES, Roger R.; GIAROLLA, Angelica; ALVES, Lincoln; LYRA, Andre. Working Paper Climate Change in Central and South. [S. l.], n. September, p. 1–93, 2014.

McDONALD, M. G.; HARBAUGH, A.W. A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, Book 6, Chapter A1, 586 p., 1988

MEIXNER, Thomas et al. Implications of projected climate change for groundwater recharge in the western United States. *Journal of Hydrology*, [S. l.], v. 534, p. 124–138, 2016. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.12.027.

MENDES EILERS, Victor Hugo. Estimativa De Recarga De Águas Subterrâneas Utilizando O Método Do Balanço Hídrico. [S. l.], p. 1–20, 2004.

MMA. Águas Subterrâneas: Um Recurso a Ser Conhecido E Protegido. Ministério do Meio ambiente, [S. l.], p. 40, 2007.

MOON, Suyeon; HA, Kyung Ja. Future changes in monsoon duration and precipitation using CMIP6. *npj Climate and Atmospheric Science*, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 1–7, 2020. DOI:

10.1038/s41612-020-00151-w.

MOREIRA, Michel Castro; DAVID, Demetrius. Atlas Hidrológico da Bacia Hidrográfica do Rio Grande Atlas Hidrológico da Bacia Hidrográfica do Rio Grande. [s.l.: s.n.].

NA, Ying; FU, Qiang; KODAMA, Chihiro. Precipitation Probability and Its Future Changes From a Global Cloud-Resolving Model and CMIP6 Simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, [S. l.], v. 125, n. 5, p. 0–1, 2020. DOI: 10.1029/2019JD031926.

O'NEILL, Brian C. et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, [S. l.], v. 9, n. 9, p. 3461–3482, 2016. DOI: 10.5194/gmd-9-3461-2016.

O'NEILL, Brian C. et al. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, [S. l.], v. 42, p. 169–180, 2017. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. IPCC AR6, WG1: Resumo Comentado. *Observatório do Clima*, [S. l.], v. 2, p. 10, 2021.

OLIOSO, Albert; LECERF, Rémi; BAILLIEUX, Antoine; CHANZY, André; RUGET, Françoise; BANTON, Olivier; LECHARPENTIER, Patrice; TROLARD, Fabienne; COGNARD-PLANCQ, Anne-Laure. Modelling of Drainage and Hay Production over the Crau Aquifer for Analysing Impact of Global Change on Aquifer Recharge. *Procedia Environmental Sciences*, [S. l.], v. 19, p. 691–700, 2013. DOI: 10.1016/j.proenv.2013.06.078.

OLIVEIRA, P. T.; SANTOS E SILVA, C. M.; LIMA, K. C. Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, [S. l.], v. 130, n. 1–2, p. 77–90, 2017. DOI: 10.1007/s00704-016-1865-z.

OSTAD-ALI-ASKARI, Kaveh; GHORBANIZADEH KHARAZI, Hossein; SHAYANNEJAD, Mohammad; ZAREIAN, Mohammad Javad. Effect of management strategies on reducing negative impacts of climate change on water resources of the Isfahan–Borkhar aquifer using MODFLOW. *River Research and Applications*, [S. l.], v. 35, n. 6, p. 611–631, 2019. DOI: 10.1002/rra.3463.

PANWAR, S.; CHAKRAPANI, G. J. Climate change and its influence on groundwater resources. *Current Science*, [S. l.], v. 105, n. 1, p. 37–46, 2013.

PARSONS, L. A. Implications of CMIP6 Projected Drying Trends for 21st Century

Amazonian Drought Risk. *Earth's Future*, [S. l.], v. 8, n. 10, 2020. DOI: 10.1029/2020ef001608.

PETPONGPAN, Chanchai; EKKAWATPANIT, Chaiwat; KOSITGITTIWONG, Duangrudee. Climate change impact on surface water and groundwater recharge in northern Thailand. *Water (Switzerland)*, [S. l.], v. 12, n. 4, 2020. DOI: 10.3390/W12041029.

PIMENTEL, A.L.; AQUINO, R.F. SILVA, R.C.A.; VIEIRA, C.M.B. Estimativa da recarga do aquífero Urucuia na sub- bacia do rio das Fêmeas – Oeste da Bahia, utilizando separação de hidrogramas. In: CONGRESSO SOBRE APROVEITAMENTOS E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS EM PAÍSES DE IDIOMA PORTUGUÊS, 2000. Livro de Atas...Porto. p. 27 – 37.

PISANI, Bruno; SAMPER, Javier; MARQUES, Jorge Espinha. Climate change impact on groundwater resources of a hard rock mountain region (Serra da Estrela, Central Portugal). *Sustainable Water Resources Management*, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 289–304, 2019. DOI: 10.1007/s40899-017-0129-0.

PISANI VEIGA, B.; SAMPER CALVETE, F. J.; LI, Yanmei. estimación de los efectos del cambio climático en la recarga de los acuíferos de la Plana de La Galera y del aluvial del Ebro en Tortosa mediante modelos hidrológicos de balance de agua. *Boletín Geológico y Minero*, [S. l.], v. 124, n. 4, p. 535–549, 2013.

RAMOS, A. M. & Silva, F. F. da. 2002. Contribuição dos Mananciais Superficiais do Estado da Bahia para o Rio São Francisco. In: ABRH, Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste.

RAOULT, B.; BERGERON, C.; LÓPEZ ALÓS, A.; THÉPAUT, J. N.; DEE, D. Climate service develops user-friendly data store, ECMWF newsletter, 151, 22--27. [S. l.], n. 151, 2017. DOI: 10.21957/p3c285.

REGOTO, Pedro; DEREZYNSKI, Claudine; CHOU, Sin Chan; BAZZANELA, Anna Carolina. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. *International Journal of Climatology*, [S. l.], n. March, p. 1–18, 2021. DOI: 10.1002/joc.7119.

RIVERA, Juan A.; ARNOULD, Gabriel. Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: Climatic features and long-term trends (1901–2014). *Atmospheric Research*, [S. l.], v. 241, p. 104953, 2020. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.104953.

SAMPER, J.; HUGUET, L.; ARES, J.; GARCÍA-VERA, M. A. Modelos interactivos de balance hidrológico. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo, [S. l.]*, p. 187–193, 1999.

SAMPER, Javier; LI, Yanmei; PISANI, Bruno. An evaluation of climate change impacts on groundwater flow in the Plana de La Galera and Tortosa alluvial aquifers (Spain). *Environmental Earth Sciences, [S. l.]*, v. 73, n. 6, p. 2595–2608, 2015. DOI: 10.1007/s12665-014-3734-3.

SANO, E.E.; ROSA, R.; BRITO, J.L.S.; FERREIRA, L.G. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 1, p. 1-12, 2009.

SATOH, Masaki et al. The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development. *Progress in Earth and Planetary Science, [S. l.]*, v. 1, n. 1, 2014. DOI: 10.1186/s40645-014-0018-1.

SCHNEIDER, U.; BECKER, A.; FINGER, P.; MEYER-CHRISTOFFER, A.; RUDOLF, B.; ZIESE, M. GPCP Full Data Reanalysis Version 6.0 at 0.5°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges Built on GTS-based and Historic Data, 2011. doi: 10.5676/DWD_GPCP/FD_M_V6_050.

SCHUSTER, Hans Dieter Max; SILVA, Fernando Fernandes Da; TEIXEIRA, Sérgio Luiz; BATISTA, Luiz Henrique Guimarães; FREITAS, Wayner Américo De. Estudos Hidrogeológicos do Aquífero Urucua no Oeste Baiano para Obtenção de Parâmetros nas Outorgas de Mananciais Subterrâneos. *Associação Brasileira de Águas Subterrâneas - XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, [S. l.]*, p. 1–15, 2002.

SENEVIRATNE, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, and B. Zhou, 2021: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

SHIKLOMANOV, I., "World fresh water resources", GLEICK, P. H. (Editor), *Water in Crisis. A Guide to the World's Fresh Water Resources*. Pacific Institute fo Studies in

- Development, Environment and Security, Stockholm Environmental Institute, p. 13-24, 1998.
- SWART, Neil C. et al. The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3). *Geoscientific Model Development*, [S. l.], v. 12, n. 11, p. 4823–4873, 2019. DOI: 10.5194/gmd-12-4823-2019.
- TATEBE, Hiroaki et al. Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geoscientific Model Development Discussions*, [S. l.], p. 1–92, 2018. DOI: 10.5194/gmd-2018-155.
- TAYLOR, Karl E.; STOUFFER, Ronald J.; MEEHL, Gerald A. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, [S. l.], v. 93, n. 4, p. 485–498, 2012. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- TAYLOR, Richard G. et al. Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, [S. l.], v. 3, n. 4, p. 322–329, 2013. DOI: 10.1038/nclimate1744.
- TOKARSKA, Katarzyna B.; STOLPE, Martin B.; SIPPEL, Sebastian; FISCHER, Erich M.; SMITH, Christopher J.; LEHNER, Flavio; KNUTTI, Reto. Past warming trend constrains future warming in CMIP6 models. *Science Advances*, [S. l.], v. 6, n. 12, p. 1–14, 2020. DOI: 10.1126/sciadv.aaz9549.
- TOURE, Adama; DIEKKRÜGER, Bernd; MARIKO, Adama. Impact of climate change on groundwater resources in the Klela basin, Southern Mali. *Hydrology*, [S. l.], v. 3, n. 2, 2016. DOI: 10.3390/hydrology3020017.
- TREIDEL, H., Martin-Bordes, J.J., Gurdak, J.J. (Eds.), 2012. *Climate Change Effects On Groundwater Resources: A Global Synthesis Of Findings And Recommendations*. International Association Of Hydrogeologists (Iah) – International Contributions To Hydrogeology. Taylor & Francis Publishing, 414p.
- UKKOLA, Anna M.; DE KAUWE, Martin G.; RODERICK, Michael L.; ABRAMOWITZ, Gab; PITMAN, Andrew J. Robust Future Changes in Meteorological Drought in CMIP6 Projections Despite Uncertainty in Precipitation. *Geophysical Research Letters*, [S. l.], v. 47, n. 11, p. 0–3, 2020. DOI: 10.1029/2020GL087820.
- VAN Der Linden, P. and Mitchell, J.F.B. 2009. *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK.2009.

WEHNER, Michael; GLECKLER, Peter; LEE, Jiwoo. Characterization of long period return values of extreme daily temperature and precipitation in the CMIP6 models: Part 1, model evaluation. *Weather and Climate Extremes*, [S. l.], v. 30, n. September, p. 100283, 2020. DOI: 10.1016/j.wace.2020.100283.

YOUNGER, P.L., Teutschg, G., Custodio, E., Elliot, T., Sauter, M., Manzano, M., Liedl, R., Clemens, T., Huckinghaus, D., Tore, C. S., Lamban, J. & Cardoso da Silva, G. 1997. *Groundwater Resources and Climate change Effects - GRACE: Final Report*. European Commission Third Framework RTD Programme (Environment and Climate), Project EV5V - CT94 - 0471.

ZAZULIE, Natalia; RUSTICUCCI, Matilde; RAGA, Graciela B. Regional climate of the subtropical central Andes using high-resolution CMIP5 models—part I: past performance (1980–2005). *Climate Dynamics*, [S. l.], v. 49, n. 11–12, p. 3937–3957, 2017. DOI: 10.1007/s00382-017-3560-x.