

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Projeção das mudanças climáticas na demanda de água para irrigação

Matheus Amorim Caliman
Doctor Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

MATHEUS AMORIM CALIMAN

Projeção das mudanças climáticas na demanda de água para irrigação

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientadora: Catariny C. Aleman Pina

Coorientadora: Gabrielle Ferreira Pires

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

Caliman, Matheus Amorim, 1994-
C153p Projeção das mudanças climáticas na demanda de água para
2024 irrigação / Matheus Amorim Caliman. – Viçosa, MG, 2024.
1 tese eletrônica (77 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Catariny Cabral Aleman.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2024.

Referências bibliográficas: f.60-69.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.221>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Irrigação agrícola - Efeito das mudanças climáticas.
2. Chuvas - Efeito das mudanças climáticas.
3. Evapotranspiração - Efeito das mudanças climáticas.
4. Plantas - Relações hídricas. I. Aleman, Catariny Cabral, 1988-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 631.587

MATHEUS AMORIM CALIMAN

Projeção das mudanças climáticas na demanda de água para irrigação

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 10 de outubro de 2024.

Assentimento:

Matheus Amorim Caliman
Autor

Catariny Cabral Aleman Pina
Orientadora

Essa tese foi assinada digitalmente pelo autor em 28/04/2025 às 09:59:38 e pela orientadora em 28/04/2025 às 10:03:14. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **5VD6.K38B.FWOG** e clique no botão 'Validar documento'.

*Aos meus pais e irmão e irmãs.
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

A toda a minha família.

Aos meus pais, Carla e Lúcio, pelo apoio, amor incondicional, por não medirem esforços e nunca deixarem de acreditar em mim.

Aos meus irmãos, Lúcio Flávio, Clara e Anna, a quem está depositado todo o meu amor e carinho.

Aos meus avós, Mario, Geraldo, Alzira (in memoriam) e Ângela, pelo amor e por sempre cuidarem de mim.

A professora Catariny Cabral Aleman, pela orientação, confiança e ensinamentos durante toda minha trajetória acadêmica. E a professora Gabrielle Ferreira Pires por todo ensinamento na condução desse trabalho.

A todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento desse trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*“In this world there is room for everyone. And the good earth is rich and can provide
for everyone. The way of life can be free and beautiful...”*
(Charlie Chaplin, The Great Dictator 1940)

RESUMO

CALIMAN, Matheus Amorim, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2024. **Projeção das mudanças climáticas na demanda de água para irrigação.** Orientadora: Catariny Cabral Aleman Pina. Coorientadora: Gabrielle Ferreira Pires.

As condições climáticas de uma região são um dos fatores de maior influência para o sucesso da atividade agrícola. Os objetivos deste estudo foram identificar o efeito das mudanças climáticas no padrão de precipitação, evapotranspiração, nos componentes do Balanço Hídrico Climatológico (BHC), necessidade hídrica e no manejo e irrigação das principais culturas de quatro polos de irrigação do Brasil. Foi utilizado a média das variáveis climáticas de dois modelos climáticos regionais (RCM), Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, considerando dois cenários de mudanças climáticas, intermediário (RCP 4.5) e pessimista (RCP 8.5) para determinar a tendência da precipitação e evapotranspiração de referência (ET_o), BHC anual e sequencial, manejo de irrigação e necessidade hídrica das culturas. Nos três polos que estão dentro do bioma do cerrado, Vale do Araguaia (AA), Oeste da Bahia (OB) e Planalto Central (PC), foi observado um aumento de ET_o nos dados históricos e nos dados futuros, para ambos os cenários. Para a precipitação, os testes estatísticos identificaram uma tendência de redução da variável no tempo, porém essa redução não foi significativa, tanto nos dados observados quanto nos dados futuros, com exceção do cenário mais pessimista para o polo OB. Nesses polos, o déficit hídrico (DEF) será predominante em todos os meses do ano, para ambos os cenários climáticos. No BHC sequencial, para os dados históricos, apenas os polos OB e PC mostraram tendências de aumento de DEF. Para os dados futuros simulados, é observado predominância e tendência de crescimento do DEF até 2098. Em ambas as situações, o cenário pessimista apresentou aumentos mais críticos. Para o polo de Santa Maria (SM), no bioma dos pampas, para os dados históricos é indicado uma tendência de aumento da precipitação e redução da ET_o nos dados históricos, mesmo que não significativos. Para os dados futuros, é observado uma tendência de aumento significativo de ambas as variáveis para os dois cenários, com exceção da ET_o no cenário intermediário, em que o aumento não é significativo. A projeção para os períodos futuros (2021 a 2098) sugere que haverá um aumento na demanda de água para irrigação, especialmente no cenário mais pessimistas e nas culturas que normalmente são cultivadas nos períodos de chuva (outubro a março). Neste polo, o período de excedente hídrico (EXC) se iniciará de 2 a 3 meses após o que foi observado no período

histórico, alterando os meses úmidos e secos na região. Não foi identificado tendências no DEF e EXC para o período histórico e futuro no BHC sequencial. As culturas de verão serão as mais afetadas pelas mudanças climáticas. A redução da precipitação e aumento da evapotranspiração nesses meses aumentaram a lâmina irrigada. Os demais cultivos, sofrerão alterações pequenas em relação ao período histórico.

Palavras-chave: Modelos climáticos; Polos de irrigação; Manejo de Irrigação; Déficit hídrico; Excedente hídrico

ABSTRACT

CALIMAN, Matheus Amorim, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2024. **Projection of climate change on irrigation water demand.** Adviser: Catariny Cabral Aleman Pina. Co-adviser: Gabrielle Ferreira Pires.

The climatic conditions of a region is one of the most influential factors for the success of agricultural activity. The aim of this study were to identify the effect of climate change on precipitation pattern, evapotranspiration, CWB components, water requirement and on the management and irrigation of the main crops of four irrigation poles in Brazil. The mean of the climatic variables of two regional climate models (RCM), Eta-HadGEM2-ES and Eta-MIROC5, was used, considering two climate change scenarios, intermediate (RCP 4.5) and pessimistic (RCP 8.5) to determine the trend of precipitation and reference evapotranspiration (ET_o), annual and sequential CWB, irrigation management and water requirement of crops. In the three poles that are within the Cerrado biome, Vale do Araguaia (AA), Oeste da Bahia (OB) and Planalto Central (PC), an increase in ET_o was observed in historical data and in future data, for both scenarios. For precipitation, the statistical tests identified a trend of reduction of the variable over time, but this reduction was not significant, both in the observed data and in the future data, with the exception of the most pessimistic scenario for the OB pole. In these poles, the water deficit (DEF) will be predominant in all months of the year, for both climate scenarios. In the sequential CWB, for the historical data, only the OB and PC poles showed trends of increase in DEF. For the simulated future data, a predominance and growth trend of the DEF until 2098 is observed. In both situations, the pessimistic scenario showed more critical increases. For the Santa Maria (SM) pole, in the pampas biome, for historical data, a trend of increased precipitation and reduction of ET_o in historical data is indicated, even if not significant. For future data, a significant upward trend is observed in both variables for both scenarios, except for ET_o in the intermediate scenario, in which the increase is not significant. The projection for future periods (2021 to 2098) for suggests that there will be an increase in the demand water for irrigation, especially in the most pessimistic scenarios and in crops that are normally grown in the rainy periods (October to March). In this pole, the period of water surplus (EXC) will begin 2 to 3 months after what was observed in the historical period, changing the wet and dry months in the region. No trends were identified in the DEF and EXC for the historical and future period in the sequential CWB. Summer crops will be the most affected by climate change. The

reduction in precipitation and increase in evapotranspiration in these months increased the irrigated depth. The other crops will undergo small changes in relation to the historical period.

Keywords: Climate models; Irrigation poles; Irrigation Management; Water deficit; Water surplus

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Polos de Agricultura Irrigado utilizados	21
Figura 2. Evapotranspiração (ETo) e Precipitação (Prec) anual (mm ano^{-1}) observada e simulada pelos Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES e média dos modelos de 1981 a 2005.....	28
Figura 3. Evapotranspiração (ETo) e Precipitação (Prec) anual (mm ano^{-1}) observada e simulada pelos Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES e média dos modelos de 1981 a 2098 para os polos AA, SM, OB e PC.....	32
Figura 4. Médias mensais diárias de ETo e Prec para os quatro polos analisados considerando os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5	35
Figura 5. ETC e Prec mensal das principais culturas dos polos analisados considerando os dois cenários de mudanças climáticas.....	37
Figura 6. Polos de Agricultura Irrigada utilizados	52
Figura 7. Fluxograma do Balanço Hídrico Climatológico pelo método de Thornthwaite & Mather (1955). Onde P é a precipitação (mm mês^{-1}), ETo é a evapotranspiração de referência (mm mês^{-1}), NC é o negativo acumulado (mm mês^{-1}), ARM é o armazenamento (mm mês^{-1}), CAD.....	56
Figura 8. BHC para os polos AA, SM, OB e PC com os dados observados (1981 a 2005) e futuros (2021 a 2047, 2048 a 2074 e 2074 a 2098) considerando o cenário de mudanças climáticas (RCP 4.5).....	60
Figura 9. BHC para os polos AA, SM, OB e PC com os dados observados (1981 a 2005) e futuros (2021 a 2047, 2048 a 2074 e 2074 a 2098) considerando o cenário de mudanças climáticas (RCP 8.5).....	61
Figura 10. Componentes do BHC sequencial para os polos AA, SM, OB e PC com os dados observados (1981 a 2005) e futuro (2021 a 2098) considerando os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análises estatísticas para o período histórico de 1981 a 2005, obtida da comparação entre os dados observados e os dados históricos gerados pelos modelos climáticos antes e após a correção de viés das variáveis meteorológicas.	26
Tabela 2. Tendências mensais do teste de Mann-Kendall representada pela curvatura de Sen para as variáveis meteorológicas do período observado e modelado.	27
Tabela 3. Valores máximos, mínimos e médios das variáveis meteorológicas do período observado para os quatro polos.	30
Tabela 4. Tendências mensais do teste de Mann-Kendall representada pela curvatura de Sen para as variáveis meteorológicas do período futuro dos cenários analisados.	31
Tabela 5. Médias mensais de ETo e Prec observada e simuladas pelas médias dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5.	33
Tabela 6. Coeficientes utilizados para cálculo do BHC e Manejo de Irrigação.	55
Tabela 7. Análises estatísticas para o período histórico de 1981 a 2005, obtida da comparação entre os dados observados e os dados históricos gerados pelos modelos climáticos antes e após a correção de viés das variáveis meteorológicas.	58
Tabela 8. Valores médios mensais do volume (mm) de déficit (DEF) e excedente hídrico (EXC) nos quatro polos, dados observados, dois cenários e futuros analisados.	62
Tabela 9. Valores anuais médios dos componentes do BHC para os dados observados (1981 a 2005) e futuro (2021 a 2098) considerando os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.	65
Tabela 10. Tendências mensais do teste de Mann-Kendall representada pela curvatura de Sen para a precipitação, ETo, DEF e EXC dos períodos históricos e futuros.	65
Tabela 11. Componentes do Manejo de Irrigação pelo método do balanço de água no solo com turno de rega variável para os dados observados (1981 a 2005) e futuro (2021 a 2098) considerando os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.	67

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL.....	14
1.1.	Referências bibliográficas	16
2.	ARTIGOS CIENTÍFICOS.....	18
2.1.	Artigo 1 – Impacto de mudanças climáticas na demanda de água para irrigação	18
2.1.1.	INTRODUÇÃO.....	20
2.1.2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	21
2.1.2.1.	Área de estudo e caracterização.....	21
2.1.2.2.	Dados meteorológicos	22
2.1.2.2.1.	Dados históricos	22
2.1.2.2.2.	Dados simulados.....	22
2.1.2.3.	Correção de Viés	23
2.1.2.4.	Evapotranspiração de referência.....	23
2.1.2.5.	Análise de Tendência.....	24
2.1.2.6.	Necessidade hídrica das culturas	24
2.1.3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
2.1.3.1.	Correção de viés das projeções de modelos climáticos.....	25
2.1.3.2.	Análise de tendência.....	27
2.1.3.3.	Análise de Tendência do período futuro.....	30
2.1.3.4.	Avaliação dos impactos das alterações climáticas na demanda de água para irrigação	33
2.1.3.5.	Necessidade hídrica	36
2.1.4.	CONCLUSÕES	40
2.1.5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
2.2.	Artigo 2 – Impacto das mudanças climáticas no balanço hídrico climatológico no cenário atual e futuro	48
2.2.1.	INTRODUÇÃO.....	50

2.2.2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	51
2.2.2.1.	Área de estudo	51
2.2.2.2.	Dados meteorológicos	52
2.2.2.2.1.	Dados observados	52
2.2.2.2.2.	Dados simulados.....	53
2.2.2.3.	Correção de Viés	53
2.2.2.4.	Evaporação de referência.....	54
2.2.2.5.	Balanço Hídrico Climatológico (BHC).....	54
2.2.2.6.	Análise de Tendência.....	56
2.2.2.7.	Manejo de Irrigação pelo BHC.....	57
2.2.3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
2.2.3.1.	Correção de viés das projeções de modelos climáticos.....	57
2.2.3.2.	Balanço Hídrico Climatológico	59
2.2.3.3.	Balanço Hídrico Climatológico Sequencial	63
2.2.3.4.	Manejo de irrigação	66
2.2.4.	CONCLUSÕES	69
2.2.5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
3.	CONCLUSÕES GERAIS.....	77

1. INTRODUÇÃO GERAL

Segundo o quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental sobre as Mudanças Climáticas (IPCC) as projeções climáticas futuras, o aumento esperado na duração e intensidade das ondas de calor, alteração no padrão de distribuição da precipitação e na disponibilidade de água para as culturas, poderão reduzir a produtividade agrícola, aumentando os desafios e o risco de insegurança alimentar (IPCC, 2014).

Estratégias de adaptação e mitigação as mudanças climáticas é um dos grandes desafios do mundo atualmente. A influência dessas alterações do clima no regime de precipitação e temperatura tem sido objeto de estudos recentes (ALMAZROUI et al., 2021, 2021; ALTHOFF; RODRIGUES; DA SILVA, 2020; ANDRADE et al., 2021; D'ANDREA et al., 2019) e seus impactos na agricultura (MALHI; KAUR; KAUSHIK, 2021; ROSA, 2022; THAYER et al., 2020).

O clima influencia diretamente na produtividade agrícola. A medida em que o aquecimento global agrava os eventos de estresse hídrico, reduz a precipitação média e aumenta a evapotranspiração (FITTON et al., 2019; VOGEL et al., 2019), a irrigação se destaca como uma solução em grande potencial de adaptação climática, reduzindo os impactos na produtividade agrícola (ROSA et al., 2018, 2020a, 2020b). Segundo o Banco Mundial (2022), a agricultura irrigada é pelo menos duas vezes mais produtiva do que a agricultura em sequeiro, sendo crucial na segurança alimentar.

Diante do grande potencial da irrigação frente as mudanças do clima, o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) estabeleceu na Portaria MDR nº 2.154, de 11 de agosto de 2020, os Polos de Agricultura Irrigada como parte integrante da Política Nacional de Irrigação (BRASIL, 2020). Em 2019, o MDR reconheceu os primeiros quatro Polos de Agricultura Irrigada do Brasil, sendo eles: Polo de Agricultura Irrigada da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria/RS; Polo de Irrigação Oeste da Bahia/BA; Polo de Irrigação Sustentável do Vale do Araguaia/GO; Polo de Irrigação do Planalto Central de Goiás/GO (BRASIL, 2019a, 2019b, 2019c, 2019d).

Os Polos de Agricultura Irrigada são definidos como grandes áreas de produção agrícola, onde a irrigação apresente grande potencial de expansão, considerando disponibilidade de água e solo da região. Com o desenvolvimento da agricultura irrigada entender as dinâmicas hidroclimáticas futura das regiões possibilitará gerar políticas mais assertivas podendo reduzir e/ou mitigar o impacto das mudanças climáticas nessas regiões.

Projeções climáticas derivadas de Modelos Climáticos Globais (GCM), que envolvem a física e dinâmica do sistema terrestre como um todo (IPCC, 2013), são ferramentas capazes de

disponibilizar informações a respeito das mudanças climáticas futuras diante de diferentes cenários de emissões de gases de efeito estufa (GEE) (CHOU et al., 2014a). Porém, devido ao tamanho das células desses modelos (200 – 100 km), a utilização em escalas menores, como em bacias hidrográficas, estados e polos de irrigação, não são suficientes para representar as particularidades dessas regiões.

Os Modelos Climáticos Regionais (RCM), se tornam opções viáveis, com a redução da escala (20 a 10km) nas áreas de interesse, onde esses estudos podem ser melhor conduzidos. Com a redução da escala, os RCMs são capazes de capturar com mais precisão a amplitude e padrão de um evento climático (LAPRISE et al., 2008). O modelo regional Eta, cobre grande parte da América do Sul, tem sido amplamente utilizado por autores para estudar os impactos das mudanças climáticas em diferentes áreas de estudo (ALMAGRO et al., 2020; ALMAZROUI et al., 2021; LYRA et al., 2018; MARENGO et al., 2012).

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desenvolveu quatro produtos do modelo Eta aninhado aos GCMs HadGEM2-ES e MIROC5, utilizando dois cenários de forçantes radiativas (*Representative Concentration Pathways, RCP*) nos valores de 4,5 e 8,5 $W m^{-2}$ no final do século 21, RCP 4.5, intermediário e RCP 8.5, pessimista (BJØRNÆS, 2013; CHOU et al., 2014b). Segundo Chou et al. (2014a) o aquecimento é projetado em todo o continente, com maior amplitude no modelo forçado pelo cenário RCP 8.5 e a precipitação varia no país, com redução no sudeste, e sinais mistos nas demais regiões.

Com as previsões mistas dos cenários climáticos futuros, e a agricultura sendo diretamente dependente e influenciada pelo clima, determinar períodos de seca, aumento da temperatura, mudanças no padrão das chuvas, possibilitará identificar áreas de risco e propor alternativas para mitigação das mudanças climáticas.

O Balanço Hídrico Climatológico (BHC) é a contabilização da entrada e saída de água do solo (SCOTT; BIEDERMAN, 2019), determinando períodos de excedente (EXC) e déficit hídrico (DEF). Com o BHC é possível determinar períodos de seca, realizar zoneamento climático e identificar os melhores períodos para plantio (SINGH et al., 2019).

Considerando a importância do clima para o sucesso de cultivos agrícolas e o entendimento do comportamento climático futuro para direcionamento de políticas públicas, essa tese, apresentada na forma de artigos, buscou investigar o efeito das alterações climáticas na demanda de água para irrigação nos quatro polos de irrigação do Brasil. Os artigos desenvolvidos visam i) corrigir o viés dos modelos climáticos regionais; ii) analisar a tendência das mudanças climáticas para o período histórico e futuro, iii) identificar o impacto das mudanças climáticas na demanda de água para irrigação, iv) analisar a influência das mudanças

climáticas nos componentes do BHC e v) quantificar a necessidade hídrica nos períodos de cultivo nos Polos de Irrigação Alto Araguaia, Santa Maria, Oeste da Bahia e Planalto Central de 1980 a 2098.

1.1. Referências bibliográficas

ALMAGRO, A. et al. Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. **Atmospheric Research**, v. 244, p. 105053, 2020.

ALMAZROUI, M. et al. Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. **Earth Systems and Environment**, v. 5, n. 2, p. 155–183, 2021.

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N.; DA SILVA, D. D. Impacts of climate change on the evaporation and availability of water in small reservoirs in the Brazilian savannah. **Climatic Change**, v. 159, p. 215–232, 2020.

ANDRADE, C. W. et al. Climate change impact assessment on water resources under RCP scenarios: A case study in Mundaú River Basin, Northeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 41, p. E1045–E1061, 2021.

BANCO MUNDIAL. **Water in agriculture**. , 2022. Disponível em: <<https://www.worldbank.org/en/topic#1>>. Acesso em: 2 jul. 2024

BJØRNÆS, C. A guide to representative concentration pathways. **Center for International Climate and Environmental Research**, v. 560, 2013.

BRASIL. 4/19. PORTARIA N° 4, DE 24 DE MAIO DE 2019. . 2019 a.

BRASIL. 5/19. PORTARIA N° 5, DE 28 DE MAIO DE 2019. . 2019 b.

BRASIL. 2.025/19. PORTARIA N° 2.025, DE 23 DE AGOSTO DE 2019. . 2019 c.

BRASIL. 2.475/19. PORTARIA N° 2.475, DE 18 DE OUTUBRO DE 2019. . 2019 d.

BRASIL. **PORTARIA N° 2.159, DE 11 DE AGOSTO DE 2020**. , 2020. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/Portaria_2159_que_altera_a_14.pdf>. Acesso em: 5 jul. 2022

CHOU, S. C. et al. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 05, p. 512, 2014a.

CHOU, S. C. et al. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 05, p. 438, 2014b.

D'ANDREA, M. F. et al. Trends in reference evapotranspiration and associated climate variables over the last 30 years (1984–2014) in the Pampa region of Argentina. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 136, p. 1371–1386, 2019.

FITTON, N. et al. The vulnerabilities of agricultural land and food production to future water scarcity. **Global Environmental Change**, v. 58, p. 101944, 2019.

IPCC. Climate change 2013: the physical science basis T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (Eds.), Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (2013). p. 1535, 2013.

IPCC, I. P. ON C. C. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. , 2014. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>>

LAPRISE, R. et al. Challenging some tenets of regional climate modelling. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 100, p. 3–22, 2008.

LYRA, A. et al. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and applied climatology**, v. 132, p. 663–682, 2018.

MALHI, G. S.; KAUR, M.; KAUSHIK, P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1318, 2021.

MARENGO, J. A. et al. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate dynamics**, v. 38, p. 1829–1848, 2012.

ROSA, L. et al. Closing the yield gap while ensuring water sustainability. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 10, p. 104002, 2018.

ROSA, L. et al. Potential for sustainable irrigation expansion in a 3 C warmer climate. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 47, p. 29526–29534, 2020a.

ROSA, L. et al. Global agricultural economic water scarcity. **Science Advances**, v. 6, n. 18, p. eaaz6031, 2020b.

ROSA, L. Adapting agriculture to climate change via sustainable irrigation: biophysical potentials and feedbacks. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 6, p. 063008, 2022.

SCOTT, R. L.; BIEDERMAN, J. A. Critical zone water balance over 13 years in a semiarid savanna. **Water Resources Research**, v. 55, n. 1, p. 574–588, 2019.

SINGH, K. et al. Weather based information on risk management in agriculture. **Climate change and agriculture in India: Impact and Adaptation**, p. 207–216, 2019.

THAYER, A. W. et al. Integrating agriculture and ecosystems to find suitable adaptations to climate change. **Climate**, v. 8, n. 1, p. 10, 2020.

VOGEL, E. et al. The effects of climate extremes on global agricultural yields. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 5, p. 054010, 2019.

2. ARTIGOS CIENTÍFICOS

2.1. Artigo 1 – Impacto de mudanças climáticas na demanda de água para irrigação

RESUMO: Os objetivos deste estudo foi identificar o efeito das mudanças climáticas no padrão de precipitação, evapotranspiração e necessidade hídrica das principais culturas de quatro polos de irrigação do Brasil. Foi utilizado a média das variáveis climáticas de dois modelos climáticos regionais (RCM), Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, considerando dois cenários de mudanças climáticas, intermediário (RCP 4.5) e pessimista (RCP 8.5). Nos três polos que estão dentro do bioma do cerrado, Vale do Araguaia (AA), Oeste da Bahia (OB) e Planalto Central (PC), foi observado um aumento de ETo nos dados históricos e nos dados futuros, para ambos os cenários. Para a precipitação, os testes estatísticos identificaram uma tendência de redução da variável no tempo, porém essa redução não foi significativa, tanto nos dados observados quanto nos dados futuros, com exceção do cenário mais pessimista para o polo OB. Para o polo de Santa Maria (SM), que está no bioma dos pampas, para os dados históricos é indicado uma tendência de aumento da precipitação e redução da ETo nos dados históricos, mesmo que não significativos. Para os dados futuros, é observado uma tendência de aumento significativo de ambas as variáveis para os dois cenários, com exceção da ETo no cenário intermediário, em que o aumento não é significativo. A projeção para os períodos futuros (2021 a 2098) sugere que haverá um aumento na demanda de água para irrigação, especialmente no cenário mais pessimistas e nas culturas que normalmente são cultivadas nos períodos de chuva (outubro a março).

Palavras-chave: Modelos climáticos. Cerrado. Pampas. Polos de Irrigação. Necessidade Hídrica.

ABSTRACT: The objectives of this study were to identify the effect of climate change on the pattern of precipitation, evapotranspiration and water requirement of the main crops of four irrigation poles in Brazil. The mean of the climate variables of two regional climate models (RCM), Eta-HadGEM2-ES and Eta-MIROC5, were used, considering two climate change scenarios, intermediate (RCP 4.5) and pessimistic (RCP 8.5). In the three poles that are within the Cerrado biome, Vale do Araguaia (AA), Oeste da Bahia (OB) and Planalto Central (PC), an increase in ETo was observed in historical data and in future data, for both scenarios. For precipitation, the statistical tests identified a trend of reduction of the variable over time, but this reduction was not significant, both in the observed data and in the future data, with the exception of the most pessimistic scenario for the OB pole. For the Santa Maria (SM) pole, which is in the pampas biome, for the historical data, a trend of increased precipitation and reduction of ETo in the historical data is indicated, even if not significant. For future data, a significant upward trend is observed in both variables for both scenarios, with the exception of ETo in the intermediate scenario, in which the increase is not significant. The projection for future periods (2021 to 2098) suggests that there will be an increase in the demand for water for irrigation, especially in the most pessimistic scenarios and in crops that are normally grown in the rainy periods (October to March).

Keywords: Regional Climate Models. Cerrado. Pampas. Irrigation Poles. Water Requirements.

2.1.1. INTRODUÇÃO

O Brasil, um país de dimensões continentais e uma vasta diversidade ambiental, está submetido a uma série de mudanças climáticas que foram observadas ao longo dos anos. Os países que possuem uma economia altamente baseada na agricultura e recursos naturais, eventos extremos com impactos ambientais, sociais e econômicos se tornam grandes desafios a serem enfrentados (THORNTON et al., 2009).

As condições climáticas de uma região é um dos fatores de maior influência para o sucesso da atividade agrícola (APARECIDO et al., 2021; HALDER et al., 2020). Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) no quinto Relatório de Avaliação (AR5), o aquecimento global é evidente e causado em grande parte pelo aumento da concentração atmosférica de CO₂. Variações na temperatura e a desuniformidade da precipitação, tem sido objetos de estudo nas últimas décadas através de Modelos Climáticos Globais (GCM) e Regionais (RCM) (BRUMATTI et al., 2024; CERA; FERRAZ, 2015; MARENGO; TORRES; ALVES, 2017; OLIVEIRA et al., 2017)

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desenvolveu quatro conjuntos baseados no RCM Eta para partes da América do Sul, forçados com cenários RCP 8.5 e RCP 4.5 obtidos do AR5 de dois GCMs, nomeados de Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, respectivamente (CHOU et al., 2014a). Esses modelos são capazes de simular as alterações climáticas e projetá-los para o futuro.

A projeção climática de dados futuros, é uma importante ferramenta para gestão de estratégias de adaptação e mitigação para reduzir os impactos negativos das mudanças climáticas. Enquanto estratégias de mitigação são associadas a diminuição dos gases de efeito estufa (GEE) (FAWZY et al., 2020; MALHI; KAUR; KAUSHIK, 2021), as estratégias de adaptação estão relacionadas a reduzir os efeitos danosos e explorar possíveis oportunidades (ROSA, 2022).

Segundo Cunha et al. (2013) a irrigação é influenciada diretamente pelas variações do clima e pode ser utilizada como uma ótima estratégia adaptativa as mudanças climáticas. No âmbito da agricultura, a irrigação tem um papel fundamental na garantia da produção de alimentos e manutenção da segurança alimentar.

Embora muitos estudos sobre a dinâmica climática espaço-temporal tenham sido feitos no Brasil, pouco são discutidos os efeitos dessas mudanças na irrigação. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é i) corrigir o viés dos modelos climáticos regionais; ii) analisar a tendencia das mudanças climáticas e iii) identificar o impacto das mudanças climáticas na demanda de água

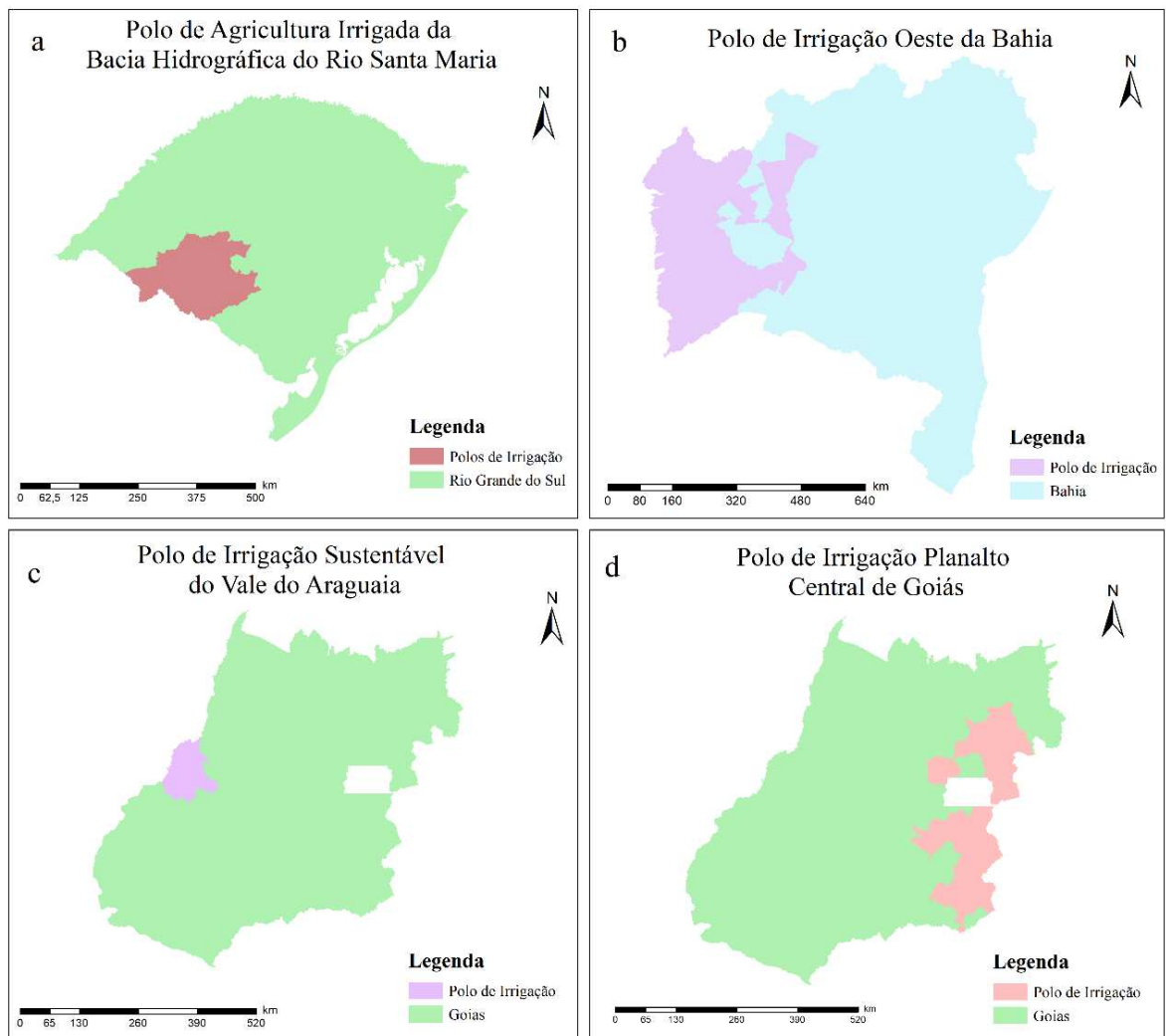
para irrigação e iv) quantificar a necessidade hídrica nos períodos de cultivo nos Polos de Irrigação Alto Araguaia, Santa Maria, Oeste da Bahia e Planalto Central desde 1980 a 2098.

2.1.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1.2.1. Área de estudo e caracterização

O estudo foi realizado para quatro polos de irrigação do Brasil. A Portaria MDR n° 1.082, de 25 de abril de 2019, estabelece a iniciativa Polos de Produção Irrigada como parte integrante das ações de implementação da Política Nacional de Irrigação e de incentivo ao desenvolvimento regional, indicando as ações para reconhecimento dos polos (BRASIL, 2020a).

Figura 1. Polos de Agricultura Irrigado utilizados



Fonte: Autor

Os polos reconhecidos pelo Ministério do Desenvolvimento Regional que foram utilizados neste estudo foram:

- i. Polo de Agricultura Irrigada da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria (SM, Figura 1a), localizado no estado do Rio Grande do Sul.
- ii. Polo de Irrigação Oeste da Bahia (OB, Figura 1b), localizado no estado da Bahia.
- iii. Polo de Irrigação Sustentável do Vale do Araguaia (AA, Figura 1c), localizado no estado de Goiás.
- iv. Polo de Irrigação do Planalto Central de Goiás (PC, Figura 1d), localizado no estado de Goiás e Minas Gerais.

2.1.2.2. Dados meteorológicos

2.1.2.2.1. Dados históricos

Os dados meteorológicos referentes à temperatura máxima ($t_{\text{máx}}$, °C) e mínima do ar ($t_{\text{mín}}$, °C), precipitação (prec , mm), radiação solar (R_s , MJ m⁻² dia⁻¹), umidade relativa (RH, %), e velocidade do vento (u_2 , m s⁻¹), foram obtidos junto à base de dados em grid disponibilizada por Xavier et al. (2022) na resolução 0.1°x0.1°, para o período de 1980 a 2020.

Esses dados foram obtidos na escala diária para a estimativa da evapotranspiração de referência (E_{To} , mm dia⁻¹) por meio da metodologia de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), e como base de dados observados para correção do viés dos modelos. Posteriormente, foram obtidas as médias mensais e somas anuais da E_{To} e precipitação para processamento e análise dos dados.

2.1.2.2.2. Dados simulados

Foram selecionados dois modelos climáticos globais (GCMs), HadGEM2-ES e MIROC5, regionalizados para a América do Sul pelo Modelo Eta (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5) (CHOU et al., 2014a) para comparar as projeções climáticas futuras e seus impactos no balanço hídrico climatológico nas quatro áreas de estudo.

Desenvolvido para estudos das alterações climáticas, uma versão de 20km de resolução do modelo regional Eta foi validada e utilizada em avaliações de impactos de mudanças climáticas (CHOU et al., 2014b, 2014a) essa versão compreende toda a América do Sul, América Central e Caribe. O período histórico simulado dos modelos compreende os anos de 1961 a 2005, enquanto as variáveis climáticas futuras são calculadas a partir do período de 2006 a 2099. Para os cálculos de E_{To} e balanço hídrico climatológico (BHC), o período simulado foi dividido em: Futuro 1 (2021 a 2047), Futuro 2 (2048 a 2073) e Futuro 3 (2074 a 2099).

O Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), considera os cenários de emissões de Gases de Efeito Estufa baseada em níveis de forçantes radioativas ao longo do século XXI. Estes cenários são chamados de *Representative Concentration Pathway* (RCP). Neste estudo foram utilizados os cenários de forçantes radioativas de 4,5 e 8,5 W m⁻² (BJØRNÆS, 2013; THOMSON et al., 2011), RCP 4.5 e RCP 8.5, definidos como cenários intermediário e pessimista, respectivamente (CHOU et al., 2014b, 2014a; LYRA et al., 2018).

2.1.2.3. Correção de Viés

A correção do viés dos RCMs foi feita pelo método *Empirical Quantile Mapping* (EQM). Segundo Brumatti et al. (2024), o método EQM apresentou os melhores resultados quando comparado a outras metodologias. Este método é baseado diariamente e pontualmente em funções de distribuições cumulativas empíricas (*eCDFs*; WILKS, 2011) de conjuntos de dados modelados e observados para o período de calibração. Utilizando *eCDFs*, o EQM geralmente é aplicável em todas as variáveis meteorológicas possíveis, enquanto outras correções baseadas em funções de distribuições cumulativas (*CDF*) podem ter dificuldades para parâmetros que não se ajustam a funções teóricas, como radiação global. Nessa variável, em que os *ECDFs* mudam de acordo com as estação (CAMUFFO, 1978; THEMESSEL; GOBIET; LEUPRECHT, 2011). Uma janela móvel de 61 dias, centrada no dia em foco, é usada para a construção do *eCDF*. A função de correção transfere a saída RCM bruta X_m para a estimativa corrigida X_o , como demonstrada na Equação 1

$$X_o = F_o^{-1}(F_m(X_m)) \quad \text{Equação 1}$$

Onde, F_m é a *eCDF* da X_m e F_o^{-1} é o inverso da *eCDF* (ou função quantílica) correspondente a X_o , em que X é a variável climática, o e m é referente aos dados observados e modelados, respectivamente.

Todo o processamento de manipulação dos dados climáticos para correção do viés foi realizado utilizando linguagem de programação R (versão 4.3.2), sendo que a correção do viés foi desenvolvida com auxílio do pacote *qmap* (GUDMUNDSSON, 2016).

2.1.2.4. Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência (ET_o) histórica e futura foram estimada com as variáveis meteorológicas corrigidas, por meio da metodologia de Penman-Monteith (ALLEN

et al., 1998), através de programação em Python. Para determinação da pressão atmosférica, componente da equação de Penman-Monteith, utilizou-se o modelo digital de elevação (MDE) disponibilizado pela Embrapa Monitoramento por Satélite (MIRANDA, 2005). Foram estimadas ETo para os dois modelos, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, e os dois cenários climáticos de RCP 4.5 e RCP8.5.

2.1.2.5. Análise de Tendência

O teste de Mann-Kendall foi utilizado a fim de identificar tendências significativas nas variáveis climáticas de precipitação (Prec) e ETo. Trata-se de um teste não paramétrico (KENDALL, 1975; MANN, 1945) e, portanto, os dados não precisam cumprir os pressupostos de normalidade. A magnitude das tendências foi determinada a partir da curvatura de Sen – *Sen's slope* (S) (SEN, 1968). Para essa finalidade, utilizou-se o pacote TREND do R software (4.3.0).

2.1.2.6. Necessidade hídrica das culturas

As necessidades hídricas das principais culturas em cada polo foram estimadas utilizando os dados de ETo observados e simulados pela média dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 para os futuros 1, 2 e 3 considerando os cenários de mudanças climáticas, RCP 4.5 (intermediário) e RCP 8.5 (pessimista). A evapotranspiração da cultura (ETc) foi estimada pelo produto da ETo e o coeficiente de cultura (kc), conforme Equação 2 (ALLEN et al., 1998).

$$ETo = ETc * kc \quad \text{Equação 2}$$

Onde, ETo é a evapotranspiração de referência, (mm dia⁻¹), ETc é a evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹), kc é o coeficiente de cultivo (adimensional).

O polo AA, tem o feijão como principal cultura (BRASIL, 2022) da região, sendo semeado na safrinha entre os meses de março a maio. Segundo Mantovani et al. (2012), o ciclo da cultura foi de 92 dias, com 28 dias na fase inicial, 26 dias na fase de crescimento, 28 dias na fase de produção e 10 dias na fase de maturação, com valores médios de kc para cada um dos períodos de 0,5; 0,7; 1,25 e 0,6 respectivamente. Para os cálculos, foi utilizado a data de plantio 01 de março.

O OB, é caracterizado por uma área rica em cultivos de soja e milho safrinha (BRASIL, 2020b), sendo semeado entre os períodos de outubro a dezembro e fevereiro a março, respectivamente. Para os cálculos, foi considerado variedades semitardias da soja com 125 dias de ciclo de cultivo (EMBRAPA, 2021b), sendo semeado no dia 15 de outubro. Os valores de

de kc e duração das fases segundo Allen et al. (1998) e Júnior et al. (2017) para a soja são de 0,4 (20 dias), 0,8 (31 dias), 1,15 (56 dias) e 0,8 (18 dias). Após o cultivo da soja, é semeado o milho 2ª safra na região. Desde a semeadura até a colheita o milho safrinha para produção de grãos varia desde 120 a 180 dias, cujas fases 1, 2, 3 e 4 correspondem a 17, 28, 33 e 22%, respectivamente, do ciclo total (EMBRAPA, 2007). Para os cálculos, foi considerado um ciclo médio de 135 dias (EMBRAPA, 2020), semeado em 01 de março. Os kcs recomendados por Souza et al. (2010) para condições climáticas do semiárido brasileiro nas fases 1, 2, 3 e 4 respectivamente são 0,87; 1,21; 1,21 e 0,61.

O polo PC, também possui cultivos de grãos, sendo a milho e feijão safrinha os de maiores áreas na região (ANA, 2020), cultivados entre outubro a dezembro e março a maio, respectivamente. A semeadura do milho foi considerada em 01 de outubro (SPEHAR; TRECENTI, 2011) e do feijão em 01 de março (DA SILVA; WANDER, 2013). O kc e a duração das fases de desenvolvimento foi considerado os já citado anteriormente para as culturas.

O cultivo de arroz inundado é a cultura predominante do polo SM (ANA, 2021). O início da semeadura na região ocorre em setembro até dezembro. Para os cálculos foi considerado um ciclo médio de desenvolvimento de 120 dias, para as condições climáticas do Rio Grande do Sul – RS (EMBRAPA, 2021a), semeado em 01 de outubro. O arroz por inundação é dividido em 3 fases de desenvolvimento, sendo elas: vegetativa (42 dias), reprodutiva (54 dias) e maturação (24 dias), com valores de kc de 1,05; 1,20 e 0,9, respectivamente (ALLEN et al., 1998; SUÁREZ; ROMÁN, 2016). Todos os períodos de plantio foram retirados do Calendário de Plantio e Colheita de Grãos no Brasil (CONAB, 2022).

Após determinada a demanda hídrica mensal de cada cultura para cada polo e cenário, foi plotado em gráficos de barras e linhas a ETc e Prec do período a fim de determinar a variação das variáveis climáticas nos dois cenários de mudanças climáticas e futuros 1, 2 e 3.

2.1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.1.3.1. Correção de viés das projeções de modelos climáticos

De acordo com Teutschbein & Seibert (2012), embora todos os métodos de correção de viés testado no estudo foram capazes de corrigir os valores médios diários, apenas o QM foi capaz de corrigir outras propriedades estatísticas tanto para precipitação quanto para temperatura. Os autores também relatam que o QM foi considerado o melhor método de correção, onde corrige a maioria das características estatísticas e possui faixas de variabilidade mais estreitas, combinadas com o melhor ajuste da média do conjunto.

São apresentados na Tabela 1 as análises estatísticas entre os dados observados e os dados modelados antes e após a correção do viés através da metodologia do Quantile-Mapping. Para as análises dos modelos foi realizado uma média entre os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5. O método de correção de viés apresentou melhora considerável das variáveis climáticas à medida que os valores de erro quadrático médio (RMSE) diminuem – com exceção da Prec –, a média (\bar{x}) dos modelos se aproximam dos observados e o viés (BIAS) se aproxima de zero. O desvio padrão (sd) não apresentou homogeneidade entre as variáveis climáticas.

Tabela 1. Análises estatísticas para o período histórico de 1981 a 2005, obtida da comparação entre os dados observados e os dados históricos gerados pelos modelos climáticos antes e após a correção de viés das variáveis meteorológicas.

Variáveis	Estatísticas	AA			SM			OB			PC		
		Obs.	M	M*	Obs.	M	M*	Obs.	M	M*	Obs.	M	M*
T _{min}	RMSE	-	2,77	2,52	-	5,63	5,01	-	2,79	2,12	-	2,95	2,57
	\bar{x}	20,59	19,84	20,59	14,10	11,62	14,03	18,01	16,47	18,01	17,75	16,53	17,75
	BIAS	-	0,75	0,00	-	2,48	0,07	-	1,54	0,00	-	1,22	0,00
	sd	2,46	1,94	1,80	5,20	4,00	3,93	2,15	1,98	1,66	2,60	2,08	1,98
T _{máx}	RMSE	-	4,31	2,77	-	5,37	5,37	-	3,84	2,64	-	4,43	3,01
	\bar{x}	32,98	29,93	33,00	24,45	24,37	24,39	30,31	27,59	30,33	29,51	26,34	29,52
	BIAS	-	3,05	-0,02	-	0,08	0,06	-	2,72	-0,02	-	3,18	-0,01
	sd	2,46	2,38	1,86	5,80	4,38	4,52	2,33	1,92	1,76	2,58	1,99	1,88
Prec	RMSE	-	8,97	9,20	-	11,36	12,09	-	6,13	6,25	-	7,69	7,91
	\bar{x}	4,16	4,31	4,10	4,27	3,30	4,22	3,05	2,85	3,03	3,78	4,21	3,78
	BIAS	-	-0,15	0,06	-	0,97	0,05	-	0,20	0,02	-	-0,44	-0,01
	sd	7,90	5,41	5,77	9,90	5,42	6,88	5,43	3,96	4,14	6,70	5,06	5,32
R _n	RMSE	-	7,66	4,55	-	9,05	6,13	-	9,34	4,71	-	8,40	4,91
	\bar{x}	17,90	11,62	17,91	16,09	9,26	16,05	19,52	11,19	19,54	18,27	11,20	18,28
	BIAS	-	6,28	-0,01	-	6,83	0,03	-	8,33	-0,02	-	7,07	-0,01
	sd	3,74	2,39	2,69	7,12	4,03	5,70	3,98	1,80	2,91	4,25	2,38	3,17
UR	RMSE	-	16,97	11,86	-	14,46	12,15	-	16,27	12,90	-	14,74	12,79
	\bar{x}	70,12	58,86	70,10	74,86	67,65	74,83	65,20	55,09	65,04	68,80	61,23	68,68
	BIAS	-	11,26	0,03	-	7,21	0,03	-	10,10	0,16	-	7,57	0,12
	sd	13,36	12,18	10,37	10,76	8,62	7,89	13,38	9,40	9,92	12,66	9,21	9,62
u ₂	RMSE	-	1,05	0,47	-	1,47	1,00	-	1,74	0,57	-	1,41	0,52
	\bar{x}	0,98	1,86	0,98	1,89	2,94	1,89	1,10	2,71	1,11	1,25	2,50	1,25
	BIAS	-	-0,88	0,00	-	-1,05	0,00	-	-1,60	0,00	-	-1,25	0,00
	sd	0,39	0,46	0,29	0,84	0,66	0,58	0,48	0,51	0,36	0,43	0,50	0,33

RMSE = raiz do erro quadrático médio; \bar{x} = valor médio; BIAS = viés, σ = desvio padrão; Obs = Dados observados; M = Média dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5; * = viés corrigido; T_{min} = Temperatura Mínima (°C), T_{máx} = Temperatura Máxima (°C); Prec = Precipitação (mm dia-1); R_n = Saldo de Radiação (W m² dia-1); UR = Umidade Relativa (%); u₂ = Velocidade do Vento (m/s).

Para os dados sem a correção do viés, os modelos apresentaram médias que diferiram dos dados observados entre -59,22 a 74,22%, considerando todas as variáveis e polos. As maiores

diferenças percentuais foram observadas na velocidade do vento (u_2) e radiação solar (R_s). Após a correção do viés, essa diferença passou para -0,32 e 1,47%, mostrando uma melhora significativa nos dados corrigidos, resultando também em uma proximidade maior do viés (BIAS) a zero.

Ainda segundo a Tabela 1, o resultado do erro quadrático médio (RMSE) dos dados corrigidos, para as variáveis T_{min} , $T_{máx}$, R_s , UR e u_2 , mostram uma redução em todos os polos. Para Prec, esta estatística aumentou, quando comparada aos dados não corrigidos. Isso pode indicar que os modelos encontram limitações em capturar adequadamente a variabilidade espaço-temporal da precipitação diária sobre as regiões climática estudadas (MENDEZ et al., 2020).

Mesmo o sd dos modelos sendo inferior ao dos dados observados, para as variáveis de Prec e R_s os modelos com correção de viés foi superior aos não corrigidos. Por definição, o sd mede a distribuição dos dados em torno da média aritmética (REIMANN et al., 2011). Segundo Lafon et al. (2013) o aumento no sd para precipitação diária pode ser explicado devido ao regime pluviométrico da região. A presença de um período chuvoso e seco, com altos valores de Prec e posteriormente valores próximos a zero, pode ser tratada de forma em que o método de correção de viés não capture essas particularidades.

2.1.3.2. Análise de tendência

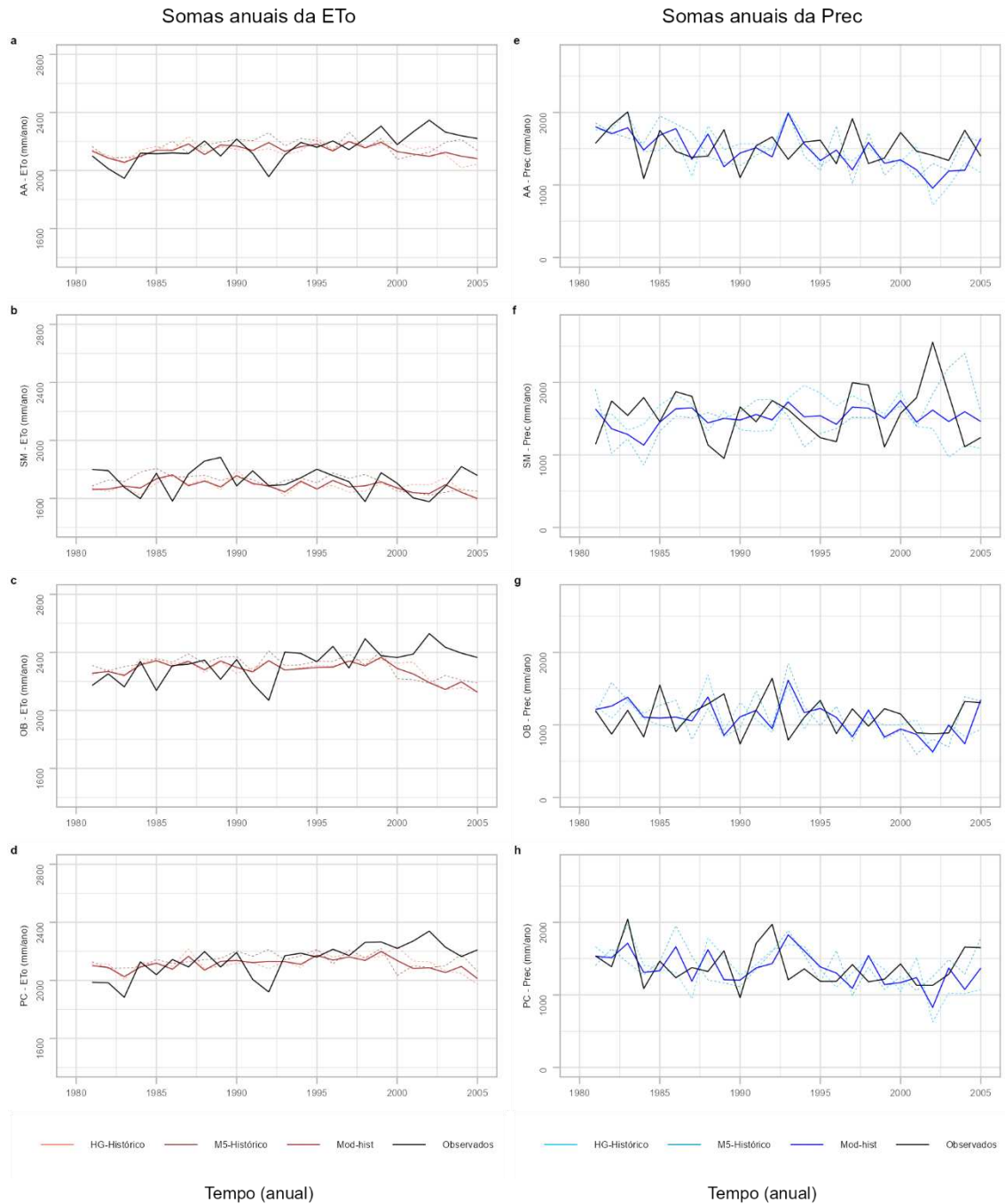
As tendências e comportamento hidroclimáticas de uma região são cruciais para um bom planejamento e desenvolvimento da agricultura. É apresentado na Tabela 2 os resultados dos testes de Mann-Kendall e *Sen's Slope* para ETo e Prec do período histórico (1981 a 2020) nas áreas de estudo. A Figura 2, mostra o comportamento e tendências das variáveis para os modelos climáticos Eta-HadGEM-ES2 (HG), Eta-MIROC5 (M5) e as médias dos dois modelos (MM) nos polos estudados para o período de 1980 a 2005.

Tabela 2. Tendências mensais do teste de Mann-Kendall representada pela curvatura de Sen para as variáveis meteorológicas do período observado e modelado.

Período	Variável	Polos			
		AA	SM	OB	PC
1981 a 2005	Prec	-0,0084ns	0,0232ns	-0,0004ns	-0,0118ns
	ETo	0,0643***	-0,0116ns	0,0619***	0,0748***

Nível de significância: ***1%, **5%, *10% e ns não significativo.

Figura 2. Evapotranspiração (ETo) e Precipitação (Prec) anual (mm ano⁻¹) observada e simulada pelos Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES e média dos modelos de 1981 a 2005.



Avaliando os dados observados da ETo para os polos AA, OB e PC, ambos apresentaram tendências de crescimento significativo (valores positivos para a curvatura de Sen) e para o polo de SM os testes foram não significativos para a variável. Os testes de Mann-Kendall para todos os polos, foram não significativos para Prec, indicando que não houve tendência significativa crescente nem decrescente.

De acordo com a Tabela 2, os polos AA, OB e PC, apresentaram tendência de crescimento da ETo, para os dados observados, de 0,0643 mm mês⁻¹ (0,772 mm ano⁻¹), 0,0619 mm mês⁻¹

(0,743 mm ano⁻¹) e 0,0748 mm mês⁻¹ (0,898 mm ano⁻¹), respectivamente. Mesmo não sendo significativo, o polo SM apresentou uma tendência de redução da ETo de -0,0116 mm mês⁻¹ (-0,139 mm ano⁻¹).

O comportamento da tendência da Prec nos polos, foi o inverso observado pela ETo. Enquanto no polo SM, a curvatura de Sen tende ao crescimento, 0,0232 mm mês⁻¹ (0,278 mm ano⁻¹), os polos AA, OB e PC mostraram uma tendência de decréscimo de -0,0084 mm mês⁻¹ (0,101 mm ano⁻¹), 0,0004 mm mês⁻¹ (0,0048 mm ano⁻¹) e -0,0118 mm mês⁻¹ (-0,141 mm ano⁻¹), respectivamente. Vale ressaltar que os impactos sobre a precipitação não foram significativos.

Na Figura 2 a ETo nos polos AA, OB e PC aumentaram com o passar dos anos, enquanto no polo SM, houve redução dessa variável, corroborando com os resultados do teste de *Sen's Slope*. A Prec nos polos AA, OB e PC, apresentam uma leve redução, e um aumento, também pequeno, é observado no polo SM.

Na Tabela 3 foram apresentados os valores máximos, mínimos e médios anuais da ETo e Prec para os quatro polos analisados. É possível observar que o polo OB é o que apresenta maiores valores de ETo, com média de 2322,54 mm ano⁻¹ e menores valores de Prec, média de 1120,11 mm ano⁻¹. Em contrapartida, no polo de SM, é observado o inverso; menores valores de ETo, média de 1724,50 mm ano⁻¹ e maiores valores de Prec, média de 1724,50 mm ano⁻¹. Os polos AA e PC aparecem no intermédio dos outros dois. Por ambos estarem no cerrado, a ETo se aproxima mais do polo OB. É observado, para os polos AA e PC, médias de 2158,64 e 2141,27 mm ano⁻¹, respectivamente. A precipitação média dos dois polos é de 1522,79 e 1389,56 mm ano⁻¹.

Tabela 3. Valores máximos, mínimos e médios das variáveis meteorológicas do período observado para os quatro polos.

Período		AA		SM		OB		PC	
		ETo	Prec	ETo	Prec	ETo	Prec	ETo	Prec
1981 a 2005	Máximo	2346,36	2006,62	1882,81	2552,25	2529,50	1643,07	2339,50	2042,78
	Médio	2158,64	1522,79	1724,50	1558,77	2322,54	1120,11	2141,27	1389,56
	Mínimo	1945,73	1086,46	1577,75	952,49	2069,33	736,52	1883,63	960,62

Essas diferenças, entre os polos SM e OB, evidencia as particularidades climáticas em cada região do Brasil. Uma vez que o polo de SM está inserido no bioma do Pampas e AA, OB e PC no Cerrado. O Pampa possui um clima subtropical úmido, caracterizado por um clima chuvoso durante todo o ano, com verões quentes e invernos frios, aonde as temperaturas chegaram abaixo de zero (IBGE, 2004). Já no Cerrado, predomina o clima tropical quente subúmido, com apenas duas estações distintas, invernos secos e verões chuvosos com chuvas torrenciais (OVERBECK et al., 2015).

Mutti et al. (2020) e Do Vale et al. (2024) observaram tendências semelhantes nas variáveis climatológicas para região oeste da Bahia. Em ambos os trabalhos, houve crescimento significativo na ETo, enquanto a precipitação, mesmo não apresentando tendências significativas de acordo com os testes estatísticos, decresceram com o tempo.

Estudando as tendências de Prec e ETo no cerrado brasileiro, Hofmann et al. (2023) observaram uma ampla tendência de redução anual na precipitação total, sendo que em grande parte da área, o resultado do teste de Mann-Kendall foi não significativo. Os autores também relataram aumento da ETo em grande área para a estação chuvosa e início da estação chuvosa. Nas estações de seca e início da estação seca, em grande parte da área, não houve diferenças significativas.

Veron et al. (2015) estudaram o bioma Pampas na Argentina identificando tendências crescentes na precipitação sem resultados significativos para os testes estatísticos. Martini (2022) também observaram tendências de crescimento de precipitação na região do Pampas no sul do Brasil. Na maioria das estações meteorológicas analisadas por D'Andréa et al. (2019), a ETo não apresentou tendência significativa de aumento ou diminuição, dados que também foram observados neste estudo.

2.1.3.3. Análise de Tendência do período futuro

A Tabela 4 apresenta os resultados do teste de Mann-Kendall e *Sen's Slope* para Prec e ETo dos valores médios entre os modelos do futuro analisado.

Tabela 4. Tendências mensais do teste de Mann-Kendall representada pela curvatura de Sen para as variáveis meteorológicas do período futuro dos cenários analisados.

Período	Cenário	Variável	Polos			
			AA	SM	OB	PC
2021 a 2098	RCP 4.5	Prec	-0,0038ns	0,0125*	-0,0003ns	0,0013ns
		ETo	0,008***	0,0053ns	0,0098***	0,0092***
	RCP 8.5	Prec	-0,0099ns	0,0346***	-0,0124***	-0,0081ns
		ETo	0,0243***	0,0133**	0,0263***	0,0276***

Nível de significância: ***1%, **5%, *10% e ns não significativo.

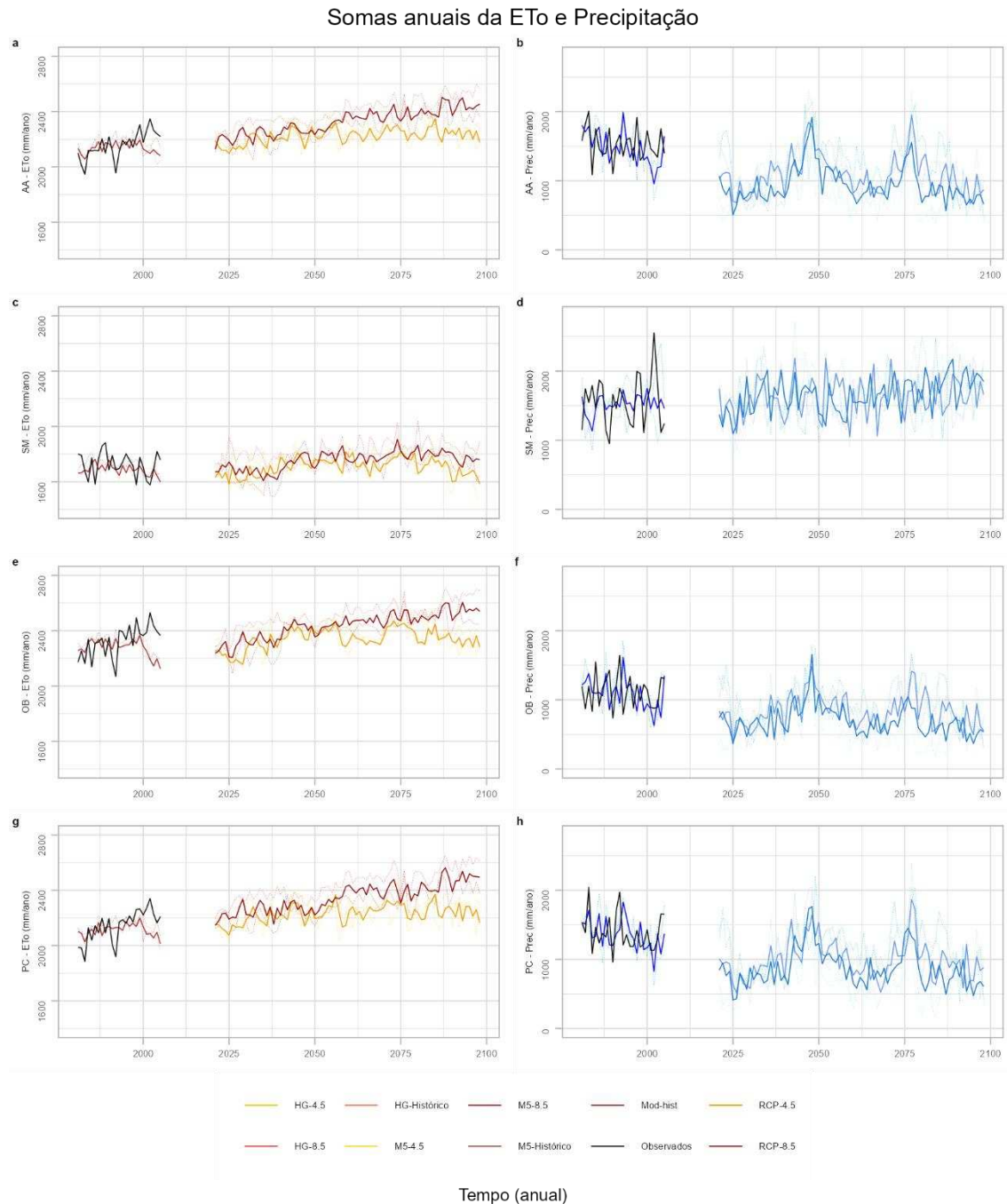
Segundo os resultados dos testes de Mann-Kendall, os polos AA, OB e PC apresentaram resultados significativos para ETo nos cenários intermediário e pessimista. Para a mesma variável o polo SM apresenta significância apenas para o cenário pessimista. Quando analisamos a Prec para o cenário intermediário, apenas o polo SM apresenta resultados significativos, sendo esse com 10% de nível de significância. Já para o cenário pessimista, resultados significativos são observados nos polos SM e OB.

O teste de *Sen's Slope* indica a magnitude da tendência. Em todos os polos e para as duas variáveis, essa magnitude se acentua no cenário mais pessimista. A Prec nos polos AA, OB e PC, tendem a decrescer no tempo. O inverso é observado no polo SM, onde o teste indica aumento da Prec até 2098. Essas tendências de aumento na precipitação no polo SM, contrasta com a redução da mesma variável nos outros polos analisados. Essa divergência pode ser explicada pelas características climáticas do polo SM, que está inserido no bioma do Pampas. Cera e Ferraz (2015) também observaram tendências de aumento na precipitação para região sul do Brasil, enquanto Marengo et al. (2017) observam tendências de redução na precipitação para a região nordeste.

Os resultados dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 foram semelhantes. Padrões de sinais de mudança iguais são identificados entre os cenários, mas com intensidades diferentes. Como esperado, o RCP8.5 provavelmente causará impactos maiores. Estes resultados são particularmente interessantes porque sugerem uma relação direta entre as concentrações de GEE e os impactos das alterações climáticas.

A Figura 3 apresenta o comportamento da ETo e Prec de 1981 a 2098. Os anos com dados faltantes foram descartados, indicando a transição do fim do período histórico (2005) para o início do período futuro (2021) analisado neste estudo, quando se inicia o efeito das forçantes climáticas dos modelos.

Figura 3. Evapotranspiração (ETo) e Precipitação (Prec) anual (mm ano⁻¹) observada e simulada pelos Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES e média dos modelos de 1981 a 2098 para os polos AA, SM, OB e PC.



Na Figura 3 é possível observar divergências dos comportamentos climáticos dos dois biomas analisados. Mesmo a ETo aumentando no tempo, a magnitude da tendência dos polos AA, OB e PC ($0,008$; $0,0098$ e $0,0092$ mm mês⁻¹) são maiores que no polo SM ($0,0053$ mm mês⁻¹). Segundo Oliveira et al. (2017), o maior aquecimento tende a ocorrer no Centro e Sudeste do Brasil, independentemente do RCP, pois é a região onde observa-se alta densidade de pessoas e atividades econômicas.

O cenário RCP8.5 resultou em maiores valores de evapotranspiração para os polos estudados. Esses resultados indicam que cenário de emissões mais elevadas provavelmente causará um impacto maior, mas também é mais incerto (Breda et al., 2020). No entanto, os testes estatísticos mostram que o RCP8.5 ainda está associado a impactos estatisticamente mais significativos.

2.1.3.4. Avaliação dos impactos das alterações climáticas na demanda de água para irrigação

É apresentado na Tabela 5 os valores médios mensais simulados pelas médias dos modelos para os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e 8.5 dos futuros analisados (F1, F2 e F3) e os dados observados de ETo e Prec.

Tabela 5. Médias mensais de ETo e Prec observada e simuladas pelas médias dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5.

Polos	Cenário	ETo				Prec			
		80-05	21-47	48-73	74-98	80-05	21-47	48-73	74-98
AA	RCP 4.5	-	182,19	186,46	187,05	-	88,77	91,95	89,70
	RCP 8.5	-	186,28	194,58	201,06	-	77,13	80,86	74,11
	Obs	179,89	-	-	-	126,90	-	-	-
SM	RCP 4.5	-	139,92	143,81	142,44	-	130,45	137,61	138,88
	RCP 8.5	-	141,22	147,38	149,49	-	131,65	131,93	150,22
	Obs	143,71	-	-	-	129,90	-	-	-
OB	RCP 4.5	-	191,14	197,02	196,59	-	66,76	69,93	69,41
	RCP 8.5	-	195,05	204,20	210,29	-	58,94	60,45	53,11
	Obs	193,55	-	-	-	93,34	-	-	-
PC	RCP 4.5	-	182,56	186,97	187,70	-	79,58	83,08	84,03
	RCP 8.5	-	187,28	196,49	203,43	-	71,63	73,79	68,53
	Obs	178,44	-	-	-	115,80	-	-	-

O polo SM, é o que apresentou menores médias de ETo, variando de 139,92 a 149,49 mm mês⁻¹, e taxas de crescimento, sendo que no RCP4.5-21a47 a 73a98 e RCP8.5-21a47, a média simulada é menor que a observada. No polo OB, são observadas as maiores médias de ETo, tanto observadas quanto simuladas. Os valores variam de 191,14 a 210,29 mm mês⁻¹. Os polos AA e PC apresentam médias que mais se assemelham entre si. Para o polo AA, a média varia de 182,19 a 201,06 mm mês⁻¹, enquanto para OB, as médias são de 182,56 a 203,43 mm mês⁻¹.

Observa-se na Tabela 5 para ETo nos polos AA, OB e PC, um aumento constante no tempo em todos os cenários, com exceção do polo OB que apresenta uma leve queda da ETo

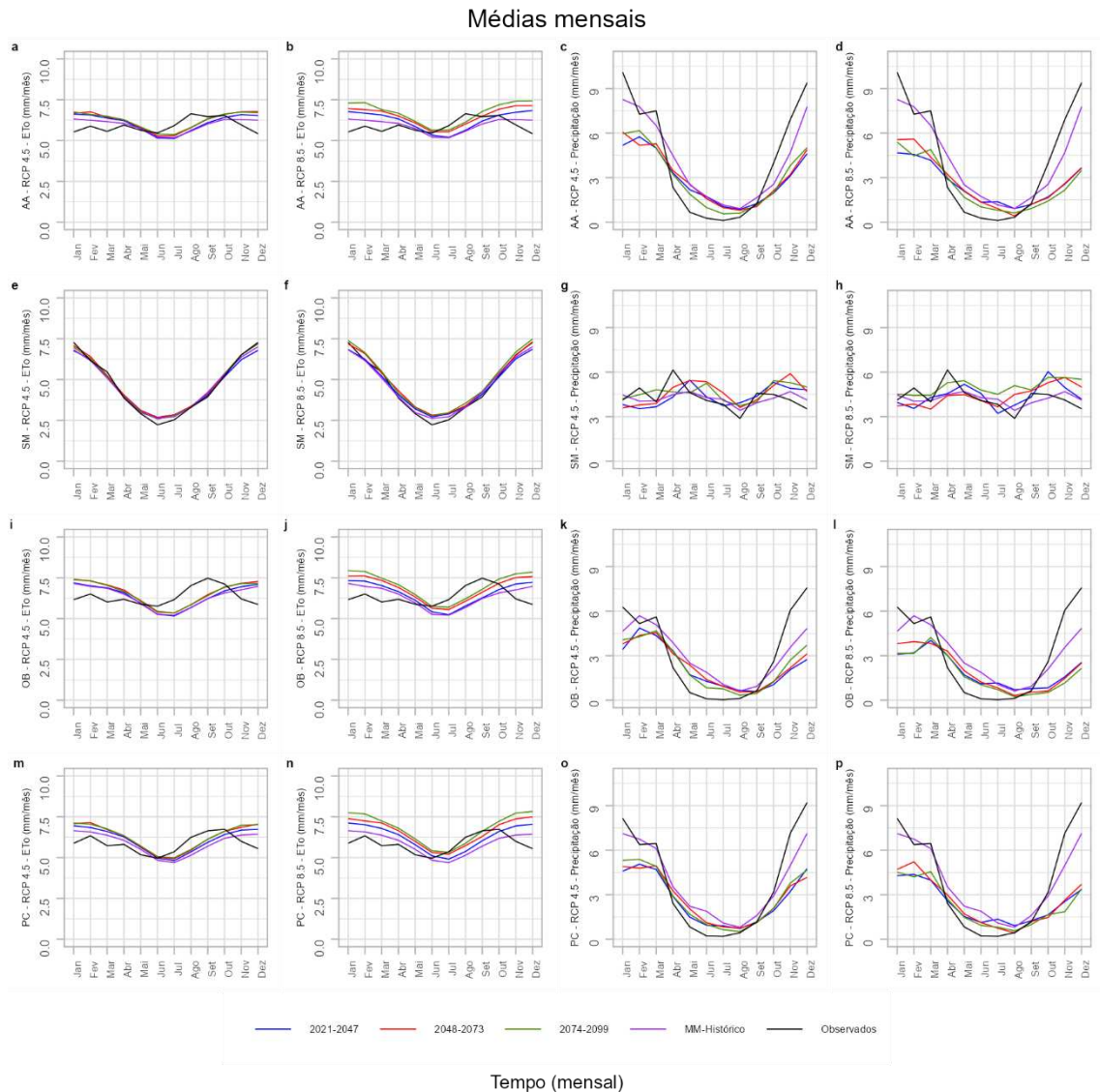
do F1 para o F3 no cenário RCP 4.5. No polo de SM, o F1 tem uma queda em relação ao observado, acende para o F2 e posteriormente decai para o F3 no RCP 4.5. No RCP 8.5, o F1 continua apresentando valores inferiores ao observado, acendendo para os F2 e F3.

Ainda na Tabela 5, para a Prec, nos polos AA, OB e PC todos os futuros são inferiores aos observados. Ainda é possível perceber que no F2 há uma ascendência da variável, seguindo por uma queda no F3, com exceção do polo PC-RCP 4.5 que acende em todos os futuros. Já no polo SM, observa-se um aumento da Prec nos dois cenários sendo que a média mensal do F3 no RCP 8.5 cresce numa taxa muito mais elevada que observado em todos os polos (+ 18,29 mm mês⁻¹).

É possível observar a influência das mudanças climáticas na demanda de água para irrigação, em que os polos que estão no cerrado terão um aumento nas necessidades hídricas das culturas, que cada vez menos será suprida pela chuva, devido aos baixos índices pluviométricos simulados.

Na Figura 4 é apresentado as médias mensais diárias de ETo e Prec para os quatro polos analisados. A ETo no RCP 4.5, possui médias próximas, sendo em alguns momentos, o F2 sendo superior ao F3. Já no RCP 8.5, é possível perceber uma distinção mais acentuada nos futuros. Em todos os polos, na grande maioria dos meses, o F3 é o que apresenta maiores valores de ETo, seguido pelo F2 e posteriormente F1, indicando a ascendência que ocorrerá no tempo com essa variável.

Figura 4. Médias mensais diárias de ETo e Prec para os quatro polos analisados considerando os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5



Considerando os polos AA, OB e PC, a partir do mês de novembro, a ETo simulada pelos modelos no RCP 4.5, é superior a observada, permanecendo assim até o mês de maio. Para o RCP 8.5, inicia-se no mês de outubro. Isso contrasta com a redução da Prec que é observada no mesmo período.

A Prec nesses polos aumenta significativamente em outubro e cai drasticamente a partir de abril. Em ambos os cenários, os futuros, ficam bem próximos entre si, sendo o F3 com menores Prec, principalmente nos períodos de seca. Como já esperado, no RCP 8.5 as lâminas são menores, encurtando mais a época de chuva, e aumentando os períodos de seca. Além da redução do período chuvoso nessas áreas, as mudanças climáticas causarão um atraso no início das chuvas, atrasando também a semeadura em cultivos não irrigados.

Enquanto os polos anteriormente citados apresentam uma variação menor da ETo nos meses, no polo SM, essa diferença é mais acentuada. Segundo os gráficos, a partir do mês de setembro, a ETo cresce, atingindo o pico em janeiro, decaindo até o mês de julho. Enquanto nos outros polos as menores ETo simuladas chegam a 5 mm dia⁻¹ no inverno – JJA –, no polo SM, os valores chegam a 2,5 mm dia⁻¹.

Já a Prec no polo SM, é mais distribuída nos meses do ano, não sendo identificado um período de seca para a região, tanto nos dados observados quanto os simulados. Em alguns meses, a Prec simulada será superior a observada, sendo no RCP 8.5 mais acentuada que no RCP 4.5.

2.1.3.5. Necessidade hídrica

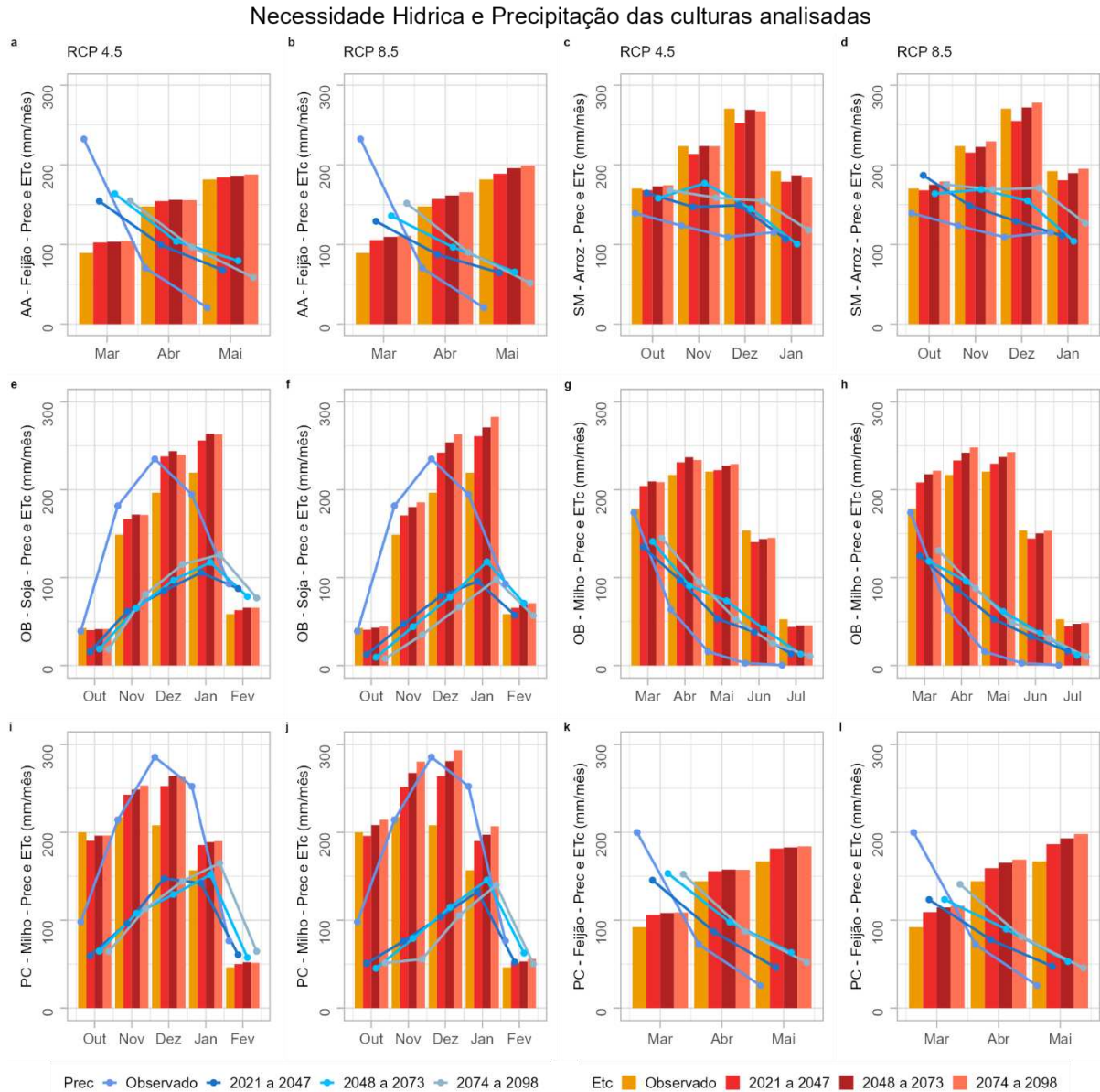
Na Figura 5 é apresentado os gráficos de ETc e Prec das principais culturas nos polos analisados considerando os dois cenários de mudanças climáticas – RCP 4.5 e 8.5. A Figura 5.a e Figura 5.b representa a demanda hídrica do feijão no polo AA para os RCPs 4.5 e 8.5 respectivamente. Durante o mês de março, na fase inicial, a demanda de água pelo feijão poderá ser suprida pela Prec em ambos os cenários e futuros, mesmo com aumento da ETc e redução da Prec no RCP 8.5. Já os meses seguintes – abril e maio – onde inicia-se a época da seca na região, a Prec não será suficiente para repor a perda de água pela ETc. Nesse período, a cultura aumenta sua demanda por água, entrando nas fases de crescimento e maturação, necessitando cada vez mais da reposição de água por irrigação. Essa necessidade – diferença entre Prec e ETc – aumenta no cenário mais pessimista (RCP 8.5).

A escassez hídrica reduzirá o desempenho agrônômico do feijão comum, independente da cultivar, reduzindo características físicas da planta e redução da produção atual e futura (COELHO et al., 2023; HEINEMANN et al., 2016). Oliveira & Carvalho (2003) determinaram a ETo para o cultivo do feijão safrinha para o diferentes locais de Goiás em estações de 15 anos de dados (1986 a 2001). Os valores variam entre 284,3 e 345,6 mm ciclo⁻¹, enquanto os deste estudo são de 418,98; 438,71 e 457,07 mm ciclo⁻¹ para os dados históricos e futuros do RCP 4.5 e 8.5, respectivamente. Os autores concluíram que a adoção de irrigações suplementares pode reduzir a quantidade de água aplicada garantindo a produção.

Fenner et al. (2017) em estudo sobre zoneamento climático do feijão no Mato Grosso (MT), identificaram que a região a sudeste do estado, próximo ao polo AA, com semeadura do feijão até o dia 10 de março, é classificado como apto para o cultivo de feijão comum segunda safra. A partir dessa data de semeadura, a cultura irá sofrer estresses em que dificultaram e até

impossibilitaram a condução da cultura. Os autores também relatam que técnicas de adaptação como irrigação, tornará possível o cultivo pleno na região.

Figura 5. ETC e Prec mensal das principais culturas dos polos analisados considerando os dois cenários de mudanças climáticas



O polo de SM (Figura 5.c e Figura 5.d) é caracterizado por uma distribuição de chuva mais uniforme durante o ano, porém com aumento significativo da ETo entre os meses de outubro a março, conforme observado na Figura 4. Considerando o período de cultivo do arroz na região, o aumento da ETc nesses meses e estacionariedade da Prec, em todos os meses, a irrigação deverá ser utilizada como complemento de reposição de água nos três futuros e ambos os cenários analisados. Na fase vegetativa da cultura, a Prec será capaz de repor grande parte

da demanda de água, necessitando pouco da irrigação. Entrando na fase reprodutiva, de meados de novembro a início de janeiro, essa reposição será mais acentuada, permanecendo assim até o final do cultivo, indicando a irrigação como necessária para reduzir os riscos e garantir plena produção.

Machado et al. (2006), determinaram a necessidade hídrica para o arroz inundado na cidade de Santa Maria-RS. Os autores obtiveram valores entre 537,4 a 642,2 mm ciclo⁻¹, enquanto os deste estudo foram de 856,50 mm ciclo⁻¹. Helfer e Louzada (2011), Petrini et al. (2013) e Sartori et al. (2013) observaram necessidade hídrica de 647,9, 948,93 e 842,00 mm ciclo⁻¹, respectivamente. O total precipitado durante o ciclo de cultivo, segundo Sartori et al. (2013), foi de 408,0 mm ciclo⁻¹, resultado parecido com este estudo, 487,53 mm ciclo⁻¹.

O polo OB possui dois cultivos principais da região, sendo eles a soja (Figura 5.e e Figura 5.f) e o milho safrinha (Figura 5.g e Figura 5.h). O início da semeadura da soja na região acontece junto do início das chuvas e período em que a ETo se eleva devido ao aumento da temperatura com o final da primavera e início do verão. Considerando os cenários de mudanças climáticas, em que ambos apresentam aumento da ETo e redução das chuvas, a Prec não será capaz de suprir a demanda de água da cultura em quase todo o ciclo de cultivo, com exceção do mês de fevereiro. Na fase inicial de desenvolvimento da cultura, no mês de outubro, a irrigação desempenhará um papel importante no sucesso do cultivo. Nesse estágio, o déficit hídrico pode gerar baixas taxas de pegamento de mudas comprometendo toda a lavoura. Nos estádios seguintes – vegetativo e reprodutivos – a falta d'água causará baixa de produtividade e má formação das vagens. Essa realidade é observada em ambos os cenários e futuros analisados, sendo no RCP 8.5 mais preocupante devido a maiores taxas de ETc e menores volumes de Prec.

Fernandes et al (2021) observaram precipitação acumulada no ciclo da soja variando de 800 a 100 mm ciclo⁻¹ na região do OB. Para os cenários futuros, os autores relataram redução de -200 a -300 mm ciclo⁻¹ para o cenário mais pessimista (RCP 8.5). Nos dados observados do presente estudo, a precipitação acumulada foi de 743,21 mm ciclo⁻¹ enquanto para o cenário mais pessimista houve uma redução de -452,34 mm ciclo⁻¹ (290,86 mm ciclo⁻¹).

A ETc no ciclo para a região do OB variou de 457 a 520 mm ciclo⁻¹ nos dados históricos de Fernandes et al (2021), enquanto para os cenários futuros houve redução de até -60 mm ciclo⁻¹. Para o presente estudo a ETo do ciclo para os dados históricos e cenário futuro RCP 8.5 foram de 666,35 e 791,01 mm ciclo⁻¹, divergindo dos dados de Fernandes et al (2021) que aumentaram ao invés de diminuir.

No estudo de Fernandes et al (2021), os autores utilizaram dados climáticos futuros advindos de Modelos Climáticos Globais (GCMs), o qual pode justificar essa divergência entre os dados futuros.

Salvador e Brito (2018), observaram uma tendência de aumento nas temperaturas para a região do MATOPIBA desde a década de 1970. Segundo Reis et al. (2020) as épocas de semeadura da soja na região do MATOPIBA, a partir da década de 1980, estão mais suscetíveis ao risco climático devido ao aumento das temperaturas. O aumento na instabilidade das chuvas nos cenários futuros para regiões tropicais (DUFFY; O’GORMAN; BACK, 2020; SAINT-LU et al., 2020) causará o aumento do risco de produtividade da soja na região do OB (DA SILVA et al., 2021).

O milho safrinha, semeado logo após a colheita da soja, acontece no início da estação seca. Desde o primeiro estágio de desenvolvimento da cultura, a chuva sozinha não será capaz de suprir toda a demanda hídrica, permanecendo assim até o final para ambos os futuros e cenários.

Avilez et al. (2020), observaram que a necessidade hídrica do milho para o município de Irecê-BA na mesma data de cultivo que esse estudo foi de 596 mm ciclo-1, enquanto a deste estudo foi de 822,28 mm ciclo-1 nos dados históricos e média de 856,24 e 889,89 mm ciclo-1 para os RCPs 8.5 e 4.5 respectivamente. A precipitação no ciclo de cultivo também foi determinado pelos autores, sendo de 141 mm enquanto a deste estudo foi de 256 mm para o período histórico e 341,73 e 315 mm, para os RCPs 8.5 e 4.5 respectivamente. Os autores simularam a necessidade hídrica considerando variedades de milho com ciclo de 120 dias e a área de estudo se encontra em outro bioma do que neste estudo, o que pode explicar um pouco da divergência dos dados.

Segundo Matsunaga et al. (2024), entender a dinâmica das variáveis climáticas é uma importante ferramenta para recomendação de datas de cultivo de milho sem auxílio da irrigação, que é dependente da entrada de água no sistema, exclusivamente por meio das chuvas. Outros estudos em outras localidades na Bahia e períodos de semeadura também determinaram o consumo hídrico do milho e identificaram que a irrigação será necessária para suplementar a reposição de água pela chuva (ROCHA et al., 2020; SOUZA et al., 2015).

Dois cultivos principais também foram analisados no polo PC, o milho (Figura 5.i e Figura 5.j) e feijão segunda safra (Figura 5.k e Figura 5.l). A semeadura do milho acontece no início das chuvas na região. Porém, mesmo com o passar dos meses e estágios de cultivo, a demanda hídrica não será completamente suprida pela chuva. Essa situação piora no cenário de mudanças climáticas mais pessimistas (RCP 8.5), com a redução da Prec e aumento da ETc.

Segundo Camilo et al. (2018), a produtividade do milho irá reduzir em até 71% considerando o cenário de mudanças climáticas RCP 8.5, devido ao aumento da temperatura e redução da precipitação em Minas Gerais. Os autores também relataram que nos cenários futuros, as melhores épocas de plantio do cultivo, deverão ser atrasadas, iniciando em meados de novembro a início de janeiro, para obter as maiores produtividades das culturas.

Finalizando a colheita do milho, acontece a semeadura do feijão segunda safra. O primeiro estágio de desenvolvimento da cultura acontece no final da época chuvosa, no mês de março. Nesse estágio, o déficit hídrico pode prejudicar todo o sucesso do cultivo, comprometendo as taxas de pegamento e conseqüentemente a redução da lavoura. Porém, também é o estágio em que a cultura demanda uma menor quantidade de água, e mesmo com o aumento da ETC e redução da Prec nos futuros e cenários, neste primeiro momento, a chuva será capaz de repor toda necessidade hídrica. Já para as demais fases da cultura, a chuva sozinha não conseguirá repor essa água, sendo necessário a utilização da irrigação para continuidade e sucesso do cultivo.

Segundo Assad et al. (2020), é previsto um risco potencial de perda até 2050 de 30, 9 e 12% para soja, milho e feijão no cerrado. Os autores relatam também que medidas de mitigação devem ser tomadas a fim de reduzir esses impactos. Entre elas estão manejo de irrigação, sistemas agroflorestais, plantio direto entre outros.

2.1.4. CONCLUSÕES

Foram determinados os impactos das mudanças climáticas nas variáveis de precipitação, ETo e necessidade hídrica das principais culturas de quatro polos de irrigação no Brasil. Foi determinado os impactos para os dados históricos (1981 a 2005) e projeções futuras (2021 a 2098), considerando a média de dois modelos climáticos regionais (RCM) e dois cenários de mudanças climáticas, intermediário (RCP 4.5) e pessimista (RCP 8.5).

De acordo com os testes estatísticos, a correção de viés melhorou consideravelmente as variáveis climáticas a medida em que o RMSE reduziu – com exceção da precipitação –, a média dos modelos se aproximaram das médias dos dados observados e o BIAS se aproximaram de zero.

Considerando os dados observados, em nenhum dos polos a precipitação apresentou resultados significativos para a precipitação pelo teste de Mann-Kendall, porém para os polos AA, OB e PC, o teste de *Ses's Slope* resultou em tendência de redução da chuva e para o polo SM aumento da variável de 1981 a 2005. Para a ETo, nos polos AA, OB e PC, houve aumento

significativo para os testes estatísticos da variável, enquanto para o polo SM a ETo diminui, porém não foi significativo.

Para os dados futuros, os polos AA, OB e PC apresentaram tendência de aumento significativo da ETo para os dois cenários de mudanças climáticas, sendo o cenário mais pessimista (RCP 8.5) a magnitude da tendência foi maior do que para o cenário intermediário (RCP 4.5). Nos três polos, é observado um aumento gradativo da variável nos três futuros analisados atingindo o pico no Futuro 3 (2074 a 2098) em ambos os cenários, com exceção do cenário intermediário do polo OB em que o pico é atingido no Futuro 2 (2048 a 2073).

Para a precipitação apenas o polo OB teve uma tendência de redução significativa pelo teste de Mann-Kendall, enquanto os polos AA e PC não tiveram diferenças significativas, porém apresentam tendências de redução pelo teste de *Sen's Slope*, com exceção do polo PC para o RCP 4.5, em que é observado aumento da variável. Nos três polos, o volume precipitado é menor no Futuro 3 para o RCP 8.5, enquanto para o RCP 4.5 o melhor valor é observado no Futuro 1 (2021 a 2047). Em todos os cenários e futuros, o volume precipitado é menor do que nos dados observados.

Para o polo de SM, mesmo ambos os cenários apresentando tendência de aumento da ETo, apenas no cenário mais pessimista (RCP 8.5) esse aumento foi significativo, atingindo o pico no Futuro 2 e Futuro 3 para o RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente. A precipitação no polo apresentou aumento significativo pelo teste estatístico em ambos os cenários de mudanças climáticas. O aumento da precipitação é gradual nos futuros, atingindo o pico no Futuro 3 para ambos os cenários.

Foi determinado a necessidade hídrica das principais culturas cultivada em cada polo. Para os polos AA, OB e PC, considerando ambos os cenários de mudanças climáticas, é observado aumento da ETc nos três futuros considerados, em que quanto mais próximo do final do século a demanda de água pelas culturas serão maiores, sendo mais críticas no cenário pessimista. Em todos os casos, a precipitação não será suficiente para repor toda a demanda de água pelas culturas, sendo que os cultivos que são semeados no início da época das chuvas (outubro) sofrerão mais devido a redução de volume e atraso no início da época da chuva. Ainda que no polo de SM a precipitação apresenta uma característica mais uniforme durante o ano e é observado um pequeno aumento da ETc no cenário de mudança climática pessimista nos anos de 2074 a 2098.

2.1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G. et al. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. **Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations**, v. 56, n. 97, p. e156, 1998.
- ANA. **Polos nacionais de agricultura irrigada: mapeamento de áreas irrigadas com imagens de satélite**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2020.
- ANA. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2021.
- APARECIDO, L. E. DE O. et al. Climate risk to peanut cultivation in Brazil across different planting seasons. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 101, n. 12, p. 5002–5015, 2021.
- ASSAD, E. D. et al. Efeito das mudanças climáticas na agricultura do Cerrado. 2020.
- AVILEZ, A. M. A. et al. **Necessidade hídrica e de irrigação do milho em função da data de semeadura no município de Irecê-Bahia**. . Em: XXIX CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM. 2020.
- BJØRNÆS, C. A guide to representative concentration pathways. **Center for International Climate and Environmental Research**, v. 560, 2013.
- BRASIL. **Polos de Agricultura Irrigada do Brasil**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/irrigacao/polos-de-irrigacao>>. Acesso em: 1 maio. 2021a.
- BRASIL. **Oeste da Bahia abriga primeira Unidade de Referência em Produção Irrigada do Brasil**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/oeste-da-bahia-abriga-primeira-unidade-de-referencia-em-producao-irrigada-do-brasil>>. Acesso em: 10 mar. 2024b.
- BRASIL. **MDR reconhece Polo de Agricultura Irrigada Araguaia-Xingu, em Mato Grosso**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/mdr-reconhece-polo-de-agricultura-irrigada-araguaia-xingu-em-mato-grosso>>. Acesso em: 4 mar. 2024.
- BRUMATTI, L. M. et al. Bias Correction in CMIP6 Models Simulations and Projections for Brazil's Climate Assessment. **Earth Systems and Environment**, v. 8, n. 1, p. 121–134, 2024.
- CAMILO, J. A. et al. **Impact of climate change on maize grown in the Brazilian Cerrado**. . Em: 2018 ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2018.
- CAMUFFO, D. Cumulated frequency distribution of daily global solar radiation at Venice, Italy. **Archiv für Meteorologie Geophysik und Bioklimatologie**, v. 26, p. 45–50, 1978.
- CERA, J. C.; FERRAZ, S. E. T. Variações climáticas na precipitação no sul do Brasil no clima presente e futuro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, p. 81–88, 2015.

- CHOU, S. C. et al. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 05, p. 438, 2014a.
- CHOU, S. C. et al. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 05, p. 512, 2014b.
- COELHO, A. P. et al. Irrigation management of common bean cultivars with contrasting growth habits. **Scientia Agricola**, v. 80, p. e20220038, 2023.
- CONAB. **Calendário de Plantio e Colheita de Grãos no Brasil 2022**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2022.
- CUNHA, D. A. DA et al. Irrigação como estratégia de adaptação de pequenos agricultores às mudanças climáticas: aspectos econômicos. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 51, p. 369–386, 2013.
- DA SILVA, E. H. F. M. et al. Impact assessment of soybean yield and water productivity in Brazil due to climate change. **European Journal of Agronomy**, v. 129, p. 126329, 2021.
- DA SILVA, O. F.; WANDER, A. E. O feijão-comum no Brasil: passado, presente e futuro. 2013.
- D'ANDREA, M. F. et al. Trends in reference evapotranspiration and associated climate variables over the last 30 years (1984–2014) in the Pampa region of Argentina. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 136, p. 1371–1386, 2019.
- DUFFY, M. L.; O'GORMAN, P. A.; BACK, L. E. Importance of Laplacian of low-level warming for the response of precipitation to climate change over tropical oceans. **Journal of Climate**, v. 33, n. 10, p. 4403–4417, 2020.
- EMBRAPA. **Cultivo do Milho**. , set. 2007. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/irrigacao/manejo>>. Acesso em: 15 fev. 2024
- EMBRAPA. **Reuniões online validam datas de semeadura do milho no DF, Entorno do DF e Oeste da Bahia**. , 2 jul. 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/53833483/reunioes-online-validam-datas-de-semeadura-do-milho-no-df-entorno-do-df-e-oeste-da-bahia>>. Acesso em: 1 abr. 2024
- EMBRAPA. **Cultivo do Arroz**. , 27 set. 2021a. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/producao/sistema-de-cultivo/arroz-irrigado-na-regiao-subtropical/cultivar>>. Acesso em: 15 fev. 2024
- EMBRAPA. **Cultivo da Soja**. , 8 dez. 2021b. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/pre->

producao/caracteristicas-da-especie-e-relacoes-com-o-ambiente/cultivares/bahia>. Acesso em: 2 fev. 2024

FAWZY, S. et al. Strategies for mitigation of climate change: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 18, p. 2069–2094, 2020.

FENNER, W. et al. Zoning of water requirement satisfaction index for common bean in Mato Grosso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 7, p. 476–480, 2017.

GUDMUNDSSON, L. **Package ‘qmap’**. Institute for Atmospheric and Climate Science, Zürich, 3 maio 2016.

HALDER, D. et al. Assessment of future climate variability and potential adaptation strategies on yield of peanut and Kharif rice in eastern India. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 140, p. 823–838, 2020.

HEINEMANN, A. B. et al. Drought impact on rainfed common bean production areas in Brazil. **Agricultural and forest meteorology**, v. 225, p. 57–74, 2016.

HELPER, F.; LOUZADA, J. A. Future water requirements for rice irrigation in the Pardo river basin (Brazil). **Irriga**, v. 16, n. 4, p. 459–459, 2011.

HOFMANN, G. S. et al. Changes in atmospheric circulation and evapotranspiration are reducing rainfall in the Brazilian Cerrado. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 11236, 2023.

IBGE, I. B. DE G. E E. Mapa de Biomas do Brasil - 1:5 000 000. 2004.

IPCC, I. P. ON C. C. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** , 2014. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>>

JÚNIOR, R. M. et al. **PLANO DE MANEJO DA IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL PARA A CULTURA DA SOJA EM SÍTIO DO MATO-BA.** . Em: ANAIS DO CONGRESSO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO DA UEG (CEPE)(ISSN 2447-8687). 2017.

KENDALL, M. Appendix: Mann-Kendall Trend Tests. 1975.

LAFON, T. et al. Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: a comparison of methods. **International journal of climatology**, v. 33, n. 6, p. 1367–1381, 2013.

LYRA, A. et al. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and applied climatology**, v. 132, p. 663–682, 2018.

- MACHADO, S. L. DE O. et al. Consumo de água e perdas de nutrientes e de sedimentos na água de drenagem inicial do arroz irrigado. **Ciência Rural**, v. 36, p. 65–71, 2006.
- MALHI, G. S.; KAUR, M.; KAUSHIK, P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1318, 2021.
- MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica: Journal of the econometric society**, p. 245–259, 1945.
- MANTOVANI, E. C. et al. Estimativa de produtividade da cultura do feijão irrigado em Cristalina-GO, para diferentes lâminas de irrigação como função da uniformidade de aplicação. **Engenharia Agrícola**, v. 32, p. 110–120, 2012.
- MARENCO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, p. 1189–1200, 2017.
- MARTINI, L. C. P. Changes in rainfall patterns in southern Brazil over 1961–2020 period detected by rain gauge data. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 9101–9114, 2022.
- MATSUNAGA, W. K. et al. Application of ERA5-Land reanalysis data in zoning of climate risk for corn in the state of Bahia—Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, n. 2, p. 945–963, 2024.
- MENDEZ, M. et al. Performance evaluation of bias correction methods for climate change monthly precipitation projections over Costa Rica. **Water**, v. 12, n. 2, p. 482, 2020.
- MIRANDA, E. E. DE. Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa monitoramento por satélite. 2005.
- MUTTI, P. R. et al. Assessment of gridded CRU TS data for long-term climatic water balance monitoring over the São Francisco Watershed, Brazil. **Atmosphere**, v. 11, n. 11, p. 1207, 2020.
- OLIVEIRA, L. F. DE; CARVALHO, D. F. DE. Regionalização da lâmina suplementar de irrigação e época de plantio da cultura de feijão, no Estado de Goiás. v. 7, n. 1, 2003.
- OLIVEIRA, V. A. DE et al. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 15, p. 5005–5023, 2017.
- OVERBECK, G. E. et al. Conservation in Brazil needs to include non-forest ecosystems. **Diversity and distributions**, v. 21, n. 12, p. 1455–1460, 2015.
- PETRINI, J. A. et al. **Estratégias de irrigação para redução do uso da água em arroz irrigado**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 8., 2013, Santa Maria. Avaliando ..., 2013.

- REIMANN, C. et al. **Statistical data analysis explained: applied environmental statistics with R**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2011.
- ROCHA, D. F. DA et al. Necessidades hídricas e térmicas de milho verde no Submédio do Vale do São Francisco. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, p. e3219108492–e3219108492, 2020.
- ROSA, L. Adapting agriculture to climate change via sustainable irrigation: biophysical potentials and feedbacks. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 6, p. 063008, 2022.
- SAINT-LU, M. et al. Influences of local and remote conditions on tropical precipitation and its response to climate change. **Journal of Climate**, v. 33, n. 10, p. 4045–4063, 2020.
- SALVADOR, M. DE A.; BRITO, J. DE. Trend of annual temperature and frequency of extreme events in the MATOPIBA region of Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 133, p. 253–261, 2018.
- SARTORI, G. M. S. et al. Rendimento de grãos e eficiência no uso de água de arroz irrigado em função da época de semeadura. **Ciência Rural**, v. 43, p. 397–403, 2013.
- SEN, A. A simpler stability criterion for a class of nonlinear systems. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 13, n. 4, p. 451–452, 1968.
- SOUZA, L. S. et al. **Determinação do coeficiente de cultura do milho (Zea mays L.) sob condições de semiárido brasileiro**. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16., 2010, Belém, PA, 2010.
- SOUZA, L. S. B. D. et al. Water requirement and crop coefficient of maize and cowpea in sole and intercropping systems. **Revista Caatinga**, v. 28, p. 151–160, 2015.
- SPEHAR, C. R.; TRECENTI, R. Desempenho agrônômico de espécies tradicionais e inovadoras da agricultura em semeadura de sucessão e entressafra no cerrado do planalto central brasileiro. **Biosci. j.(Online)**, p. 102–111, 2011.
- SUÁREZ, D. F. P.; ROMÁN, R. M. S. Consumo de água em arroz irrigado por inundação em sistema de multiplas entradas. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 78–78, 2016.
- TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. **Journal of hydrology**, v. 456, p. 12–29, 2012.
- THEMESSL, M. J.; GOBIET, A.; LEUPRECHT, A. Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 10, p. 1530–1544, 2011.
- THOMSON, A. M. et al. RCP4. 5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. **Climatic change**, v. 109, p. 77–94, 2011.

THORNTON, P. K. et al. Spatial variation of crop yield response to climate change in East Africa. **Global environmental change**, v. 19, n. 1, p. 54–65, 2009.

VALE, T. M. C. DO et al. Climate and water balance influence on agricultural productivity over the Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, n. 2, p. 879–900, 2023.

VERÓN, S. R.; DE ABELLEYRA, D.; LOBELL, D. B. Impacts of precipitation and temperature on crop yields in the Pampas. **Climatic change**, v. 130, p. 235–245, 2015.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. Cornell University, Ithaca, NY, USA: Academic press, 2011. v. 100

XAVIER, A. C. et al. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390–8404, 2022.

2.2. Artigo 2 – Impacto das mudanças climáticas no balanço hídrico climatológico no cenário atual e futuro

RESUMO: O objetivo desse trabalho foi analisar a influência das mudanças climáticas nos componentes do balanço hídrico climatológico (BHC), e os impactos no manejo de irrigação para os principais cultivos de quatro polos de irrigação do Brasil. Foi determinado o BHC anual e sequencial e o manejo de irrigação para o período histórico e futuro considerando os cenários de mudanças climáticas intermediário (RCP4.5) e pessimista (RCP8.5). Nos três polos que estão inseridos no Cerrado, Vale do Araguaia (AA), Oeste da Bahia (OB) e Planalto Central (PC), o déficit hídrico (DEF) será predominante em todos os meses do ano, para ambos os cenários climáticos. No BHC sequencial, para os dados históricos, apenas os polos OB e PC mostraram tendências de aumento de DEF. Para os dados futuros simulados, é observado predominância e tendência de crescimento do DEF até 2098. Em ambas as situações, o cenário pessimista apresentou aumentos mais críticos. Para o polo de Santa Maria (SM), no bioma dos Pampas, o período de excedente hídrico (EXC) se iniciará de 2 a 3 meses após o que foi observado no período histórico, alterando os meses úmidos e secos na região. Não foi identificado tendências no DEF e EXC para o período histórico e futuro no BHC sequencial. As culturas de verão serão as mais afetadas pelas mudanças climáticas. A redução da precipitação e aumento da evapotranspiração nesses meses aumentaram a lâmina irrigada. Os demais cultivos, sofrerão alterações pequenas em relação ao período histórico.

Palavras-chave: Modelos climáticos. Polos de irrigação. Manejo de Irrigação. Déficit hídrico. Excedente hídrico.

ABSTRACT: The aim of this paper were to analyze the influence of climate change on the components of the climatological water balance (CWB), and the impacts on irrigation management for the main crops of four irrigation poles in Brazil. The annual and sequential CWB and irrigation management for the historical and future period were determined considering the intermediate (RCP4.5) and pessimistic (RCP8.5) climate change scenarios. In the three poles that are inserted in the Cerrado, Vale do Araguaia (AA), Oeste da Bahia (OB) and Planalto Central (PC), the water deficit (DEF) will be predominant in all months of the year, for both climate scenarios. In the sequential CWB, for the historical data, only the OB and PC poles showed trends of increase in DEF. For the simulated future data, a predominance and growth trend of the DEF until 2098 is observed. In both situations, the pessimistic scenario showed more critical increases. For the Santa Maria (SM) pole, in the Pampas biome, the period of water surplus (EXC) will begin 2 to 3 months after what was observed in the historical period, changing the wet and dry months in the region. No trends were identified in the DEF and EXC for the historical and future period in the sequential CWB. Summer crops will be the most affected by climate change. The reduction in precipitation and increase in evapotranspiration in these months increased the irrigated depth. The other crops will undergo small changes in relation to the historical period.

Keywords: Climate models. Irrigation poles. Irrigation Management. Water deficit. Water surplus.

2.2.1. INTRODUÇÃO

É esperado que as mudanças climáticas tornarão algumas áreas de produção alimentar inadequadas no futuro (BEZNER KERR et al., 2022). As intervenções humanas estão afetando a ocorrência e intensidade de eventos climáticos devido as alterações causadas no clima (IPCC, 2013). No último século, a temperatura global aumentou em 1 °C (± 0.2) e projeções para 2100 é de aumentos entre 1.5 e 6 °C (IPCC, 2014, 2018). Muitas atividades sofrerão com as mudanças climáticas, especialmente a agricultura (THAYER et al., 2020).

O clima é um dos principais fatores que influenciam na expansão e produção agrícola (GOUVEIA et al., 2023). O setor agrícola exerce extrema pressão sobre o meio ambiente, sendo responsável por 30% das emissões de gases de efeito estufa e pelo consumo de 70% dos recursos hídricos do planeta (CRIPPA et al., 2021). Diante deste cenário, entender o comportamento climático futuro se torna uma importante ferramenta de planejamento para adaptação, mitigação dos impactos na agricultura.

Os Modelos Climáticos Globais (GCMs) são ferramentas avançadas para simular resposta do clima global em relação às variações da concentração de gases de efeito estufa (GEE) e para dar suporte a estudos sobre mudanças climáticas (MELLO et al., 2015). Porém, os GCMs possuem uma resolução mais grosseira (250 a 600 km), dificultando o estudo em pequenas áreas. Já os Modelos Climáticos Regionais (RCMs) têm sido amplamente utilizados devido à sua alta resolução espacial (10 a 60 km) para a representação da temperatura, precipitação e outras variáveis climáticas futuras em uma escala menor (ANJUM; DING; SHANGGUAN, 2019).

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desenvolveu quatro produtos reduzidos com base no Modelo Climático Regional (RCM) – Eta – para o Brasil. Os modelos foram forçados sob dois Caminhos de Concentração Representativo (RCP4.5 e RCP8.5), obtidos do 5º Relatório de Avaliação (AR5-IPCC) a partir de simulações globais e projeções de dois GCMs, HadGEM2-ES e MIROC5 (CHOU et al., 2014a). O RCP8.5 representa um cenário sem políticas de controle de emissões de GEE em uma sociedade altamente industrializada, indicando um cenário mais pessimista (RIAHI et al., 2011), enquanto o RCP4.5 representa um cenário mais moderado de mudanças climáticas (THOMSON et al., 2011).

Esses modelos já foram amplamente utilizados em estudos hidrológicos (ALMAGRO et al., 2020; ALMAZROUI et al., 2021; ANDRADE et al., 2021; BRÊDA et al., 2020; LLOPART et al., 2014), para avaliar a distribuição das chuvas e projeção da temperatura no Brasil. No entanto, estudos utilizando modelos climáticos para avaliar possíveis alterações nos componentes do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) ainda são escassos.

O BHC é uma ferramenta importante para contabilizar e estimar a disponibilidade de água em uma região hidrográfica. Os componentes do BHC fornecem informações cruciais sobre as interações solo-vegetação-atmosfera, sendo de suma importância para um planejamento agrícola eficiente (SCHILLING et al., 2008).

Neste contexto, o objetivo principal desse trabalho foi analisar a influência das mudanças climáticas nos componentes do BHC, e esses impactos na demanda de água para os principais cultivos dos polos de irrigação estudado para o período histórico e futuro considerando os cenários de mudanças climáticas RCP4.5 e 8.5.

2.2.2. MATERIAL E MÉTODOS

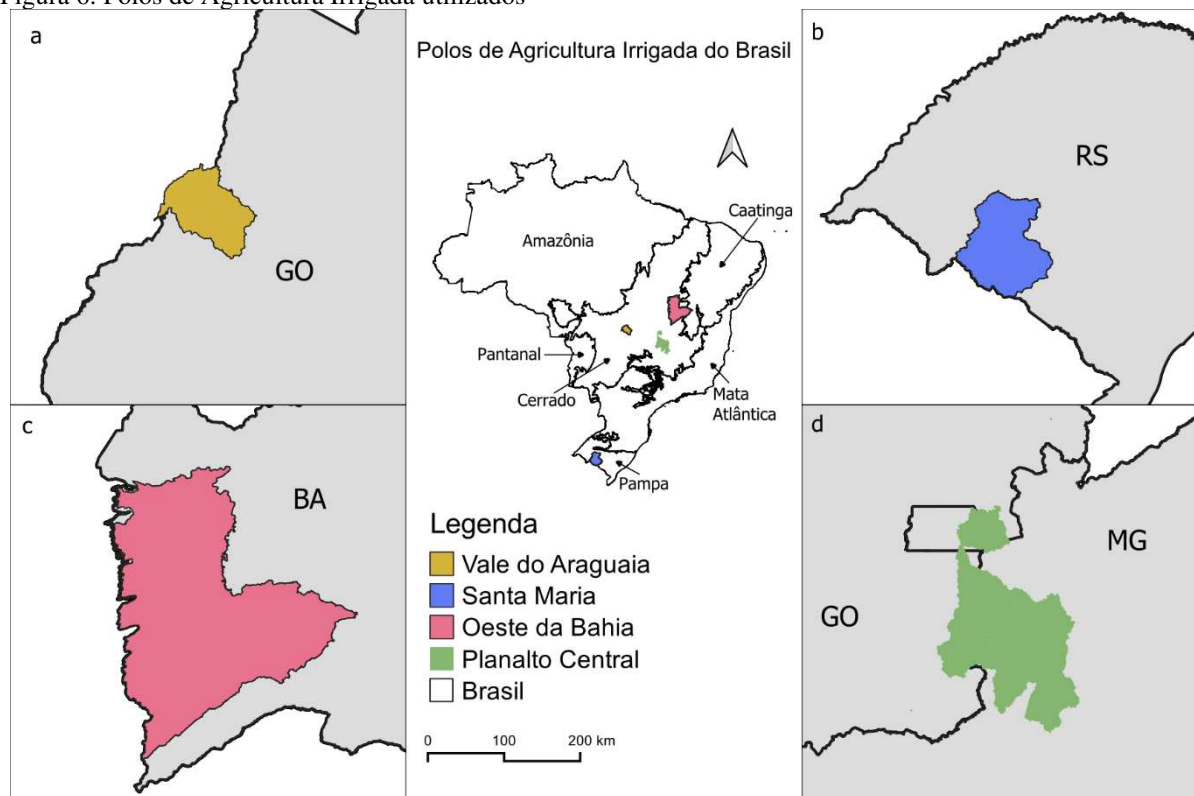
2.2.2.1. Área de estudo

Em 2019, o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), através da Portaria MDR n° 1.082, de 25 de abril de 2019 reconheceu quatro Polos de Agricultura Irrigada do Brasil. A iniciativa é parte integrante das ações de implementação da Política Nacional de Irrigação e de incentivo ao desenvolvimento regional (BRASIL, 2019).

Os quatro primeiros polos reconhecidos, que são utilizados neste trabalho, são apresentados na Figura 6, sendo eles:

- i. Polo de Irrigação Sustentável do Vale do Araguaia (AA, Figura 6a);
- ii. Polo de Agricultura Irrigada da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria (SM, Figura 6b);
- iii. Polo de Irrigação Oeste da Bahia (OB, Figura 6c);
- iv. Polo de Irrigação do Planalto Central de Goiás (PC, Figura 6d).

Figura 6. Polos de Agricultura Irrigada utilizados



Fonte: Autor

2.2.2.2. Dados meteorológicos

A base de dados referente as variáveis meteorológicas de temperatura máxima ($t_{\text{máx}}$, °C) e mínima do ar (t_{min} , °C), precipitação (prec , mm dia^{-1}), radiação solar (R_s , $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), umidade relativa (RH, %), e velocidade do vento (u_2 , m s^{-1}) utilizadas neste estudo foram obtidas de duas fontes diferentes. Uma delas para os dados observados e a outra para os dados simulados.

2.2.2.2.1. Dados observados

Os dados observados foram obtidos junto à base de dados em grid disponibilizada por Xavier et al. (2022) na resolução $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, para o período de 1980 a 2020. As variáveis climatológicas foram obtidas na escala diária para posteriormente estimar a evapotranspiração de referência (E_{To} , mm dia^{-1}) pela metodologia de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

As variáveis também foram utilizadas como dados observados para a correção do viés do modelo. Posteriormente, a E_{To} e Prec foram transformadas em somas mensais do período para preenchimento do balanço hídrico climatológico (BHC), pela metodologia de Thornthwaite & Mather (1955).

2.2.2.2.2. Dados simulados

Dois modelos climáticos globais (GCMs), HadGEM2-ES e MIROC5, regionalizados para a América do Sul pelo Modelo Eta (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5) (CHOU et al., 2014a) foram utilizados para compor a base de dados simulados futura. Os modelos, com uma versão de 20km de resolução o modelo regional Eta foi validada e utilizada em avaliações de impactos de mudanças climática (CHOU et al., 2014a, 2014b).

O período histórico simulado dos modelos compreende os anos de 1961 a 2005, enquanto as variáveis climáticas futuras são calculadas a partir do período de 2006 a 2098. Para os cálculos de ETo e BHC, o período simulado foi dividido em: Futuro 1 (2021 a 2047), Futuro 2 (2048 a 2073) e Futuro 3 (2074 a 2099).

O Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), considera os cenários de emissões de Gases de Efeito Estufa baseada em níveis de forçantes radioativas ao longo do século XXI. Estes cenários são chamados de *Representative Concentration Pathway* (RCP). Neste estudo foram utilizados os cenários de forçantes radioativas de 4,5 e 8,5 $W m^{-2}$ (BJØRNÆS, 2013; CHOU et al., 2014b), RCP 4.5 e RCP 8.5, definidos como cenários intermediário e pessimista, respectivamente. Este conjunto de dados está disponível publicamente em <https://projeta.cptec.inpe.br>.

2.2.2.3. Correção de Viés

De acordo com Brumatti et al. (2024), o método que apresentou os melhores resultados quando comparado a outras metodologias de correção de viés foi o *Empirical Quantile Mapping* (EQM), a qual foi utilizada neste estudo.

A metodologia é baseado diariamente e pontualmente em funções de distribuições cumulativas empíricas (*eCDFs*; WILKS, 2011) de conjuntos de dados modelados e observados para o período de calibração. Utilizando *eCDFs*, o EQM geralmente é aplicável em todas as variáveis meteorológicas possíveis, enquanto outras correções baseadas em funções de distribuições cumulativas (*CDF*) podem ter dificuldades para parâmetros que não se ajustam a funções teóricas, como radiação global. Nessa variável, em que os *ECDFs* mudam de acordo com as estação (CAMUFFO, 1978; THEMESSEL; GOBIET; LEUPRECHT, 2011). Uma janela móvel de 61 dias, centrada no dia em foco, é usada para a construção do *eCDF*. A função de correção transfere a saída RCM bruta X_m para a estimativa corrigida X_o , como demonstrada na Equação 1.

$$Y_{t,i}^{val} = ecdf_{t,i}^{obs,cal^{-1}}(ecdf_{t,i}^{mod,cal}(X_{t,i}^{val})) \quad \text{Equação 3}$$

Onde, F_m é a *eCDF* da X_m e F_o^{-1} é o inverso da *eCDF* (ou função quantílica) correspondente a X_o , em que X é a variável climática, o e m é referente aos dados observados e modelados, respectivamente.

Todo o processamento de manipulação dos dados climáticos para correção do viés foi realizado utilizando linguagem de programação R (versão 4.3.2), sendo que a correção do viés foi desenvolvida com auxílio do pacote *qmap* (GUDMUNDSSON, 2016).

2.2.2.4. Evaporação de referência

A evapotranspiração de referência (ET_o , mm dia⁻¹) histórica e futura foram estimada com os dados meteorológicos corrigidos, por meio da metodologia de Penman-Monteith (ALLEN, 1998), através de programação em Python. Para determinação da pressão atmosférica, componente da equação de Penman-Monteith, utilizou-se o modelo digital de elevação (MDE) disponibilizado pela Embrapa Monitoramento por Satélite (MIRANDA, 2005). Foram estimadas ET_o para os dois modelos, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, e os dois cenários climáticos de RCP 4.5 e RCP8.5. Para as análises estatísticas e cálculos, foram utilizados a média dos dois modelos referente ao mesmo RCP. Mais detalhes e definições sobre o cálculo da ET_o é encontrado no Boletim 56 da FAO (ALLEN, 1998).

2.2.2.5. Balanço Hídrico Climatológico (BHC)

O BHC para os quatro polos de irrigação, foi calculado pela metodologia de Thornthwaite & Mather (1955). Foi utilizado um valor médio de ET_o e $Prec$ para toda área do polo para o cálculo. Foi determinado o BHC para os períodos Histórico e Futuros 1, 2 e 3, simulados pela média dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, nos dois cenários climáticos de RCP 4.5 e RCP 8.5

No método proposto por Thornthwaite e Mather (1955), os ganhos de água no solo são representados pela precipitação (P) enquanto as perdas são representadas pela evapotranspiração de referência (ET_o). A quantidade que excede ou falta para atingir a Capacidade de Água Disponível (CAD , mm cm⁻¹) do solo torna-se excedente (EXC) ou déficit hídrico (DEF), respectivamente.

A CAD foi obtida a partir da base de dados de disponibilizados pela Embrapa Solos (VASQUES et al., 2021). O conjunto de dados da CAD estão disponíveis para todo território

brasileiro nas profundidades de 0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-100 e 100-200 cm, com resolução de 90m e pode ser acessado publicamente em <https://geoinfo.cnps.embrapa.br/maps/3479https://projeta.cptec.inpe.br/>.

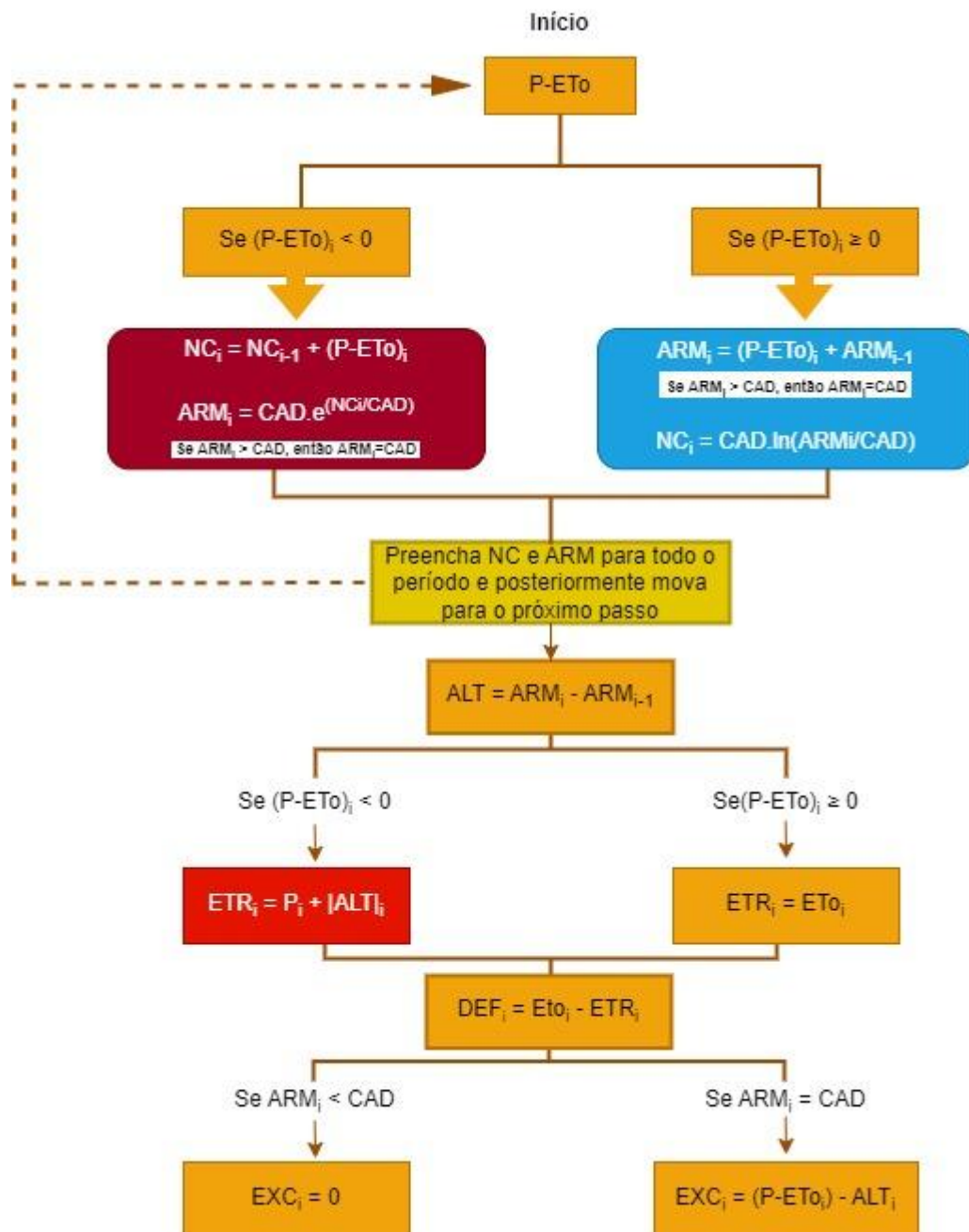
A profundidade do solo considerada foi baseada na profundidade efetiva do sistema radicular (z, cm) em que se concentravam 80% de peso das raízes, considerando as particularidades e cultivos predominantes em cada polo. Os polos com dois cultivos predominantes, foi utilizado a média da CAD para cálculo do BHC. É apresentado na Tabela 6 e as variáveis utilizadas para o BHC e na Figura 7 o fluxograma do cálculo do BHC.

Tabela 6. Coeficientes utilizados para cálculo do BHC e Manejo de Irrigação

Polos	Culturas	z (cm)	f	Data de semeadura	Duração das Fases (dias)				kc das fases				Referências
					1	2	3	4	1	2	3	4	
AA	Feijão	30	0,45	01/mar	28	26	28	10	0,5	0,7	1,25	0,6	(BRASIL, 2022; MANTOVANI et al., 2012)
SM	Arroz	35	0,5	01/out	42		54	24	1,05		1,2	0,9	(ALLEN et al., 1998; ANA, 2021; EMBRAPA, 2021a; SUÁREZ; ROMÁN, 2016)
	Soja	35	0,5	15/out	20	31	56	18	0,4	0,8	1,15	0,5	(ALLEN, 1998; BRASIL, 2020; DA SILVA et al., 2021; EMBRAPA, 2007, 2020, 2021b; SOUZA et al., 2010)
OB	Milho	50	0,55	01/mar	23	38	45	30	0,87	1,21	1,21	0,61	(ANA, 2020; MOTA et al., 2013; SPEHAR; TRECENTI, 2011)
PC	Feijão	30	0,55	01/mar	28	26	28	10	0,5	0,7	1,25	0,6	

Após a obtenção e preparação da base de dados, o BHC foi determinado e o déficit hídrico (DEF), o excedente hídrico (EXC) e o armazenamento de água no solo (ARM) foram calculados segundo a **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Figura 7. Fluxograma do Balanço Hídrico Climatológico pelo método de Thornthwaite & Mather (1955). Onde P é a precipitação (mm mês⁻¹), ETo é a evapotranspiração de referência (mm mês⁻¹), NC é o negativo acumulado (mm mês⁻¹), ARM é o armazenamento (mm mês⁻¹), CAD



Fonte: Autor.

2.2.2.6. Análise de Tendência

O teste de Mann-Kendall foi utilizado a fim de identificar tendências significativas nos componentes do BHC (ETo, Prec, DEF e EXC). Trata-se de um teste não paramétrico (KENDALL, 1975; MANN, 1945) e, portanto, os dados não precisam cumprir os pressupostos de normalidade. A magnitude das tendências foi determinada a partir da curvatura de Sen –

Sen's slope (S) (SEN, 1968). Para essa finalidade, utilizou-se o pacote TREND do R software (4.3.0).

2.2.2.7. Manejo de Irrigação pelo BHC

O manejo de irrigação foi determinado para os quatro polos, considerando as principais culturas da região. Os dados referentes as culturas encontram-se na Tabela 6. Para o manejo, foi utilizado a metodologia de balanço de água no solo com turno de rega variável, como descrito em (BERNARDO et al., 2019). Foi determinado o momento de irrigação segundo as equações a seguir:

$$D_i = D_{i-1} + ETc_i - P_i \quad \text{Equação 4}$$

$$AFD = CAD * f \quad \text{Equação 5}$$

Em que, D_i é a lâmina de água consumida até o dia i , em mm; D_{i-1} é a lâmina de água consumida até o dia anterior, em mm; ETc_i é a estimativa da evapotranspiração da cultura, em mm; P_i é a precipitação do dia i e AFD , é a água facilmente disponível, em mm. Se o D_i for inferior a AFD , a irrigação será feita, considerando todo valor de D_i .

Foi determinado a precipitação, ET_o , ET_c , Lâmina de Irrigação (IRR) e acionamentos do sistema (AS) de todo o ciclo de cultivo para os dados históricos e os futuros considerando os dois cenários de mudanças climáticas a fim de identificar alterações nos componentes.

2.2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.2.3.1. Correção de viés das projeções de modelos climáticos

O método QM elimina efetivamente o viés do modelo, não apenas para a variabilidade média e interanual, mas também para eventos extremos (AYUGI et al., 2020; GUDMUNDSSON et al., 2012). O método de correção de viés QM também foi desenvolvido e aplicado aos estudos de impacto das mudanças climáticas no Brasil (RINGARD; SEYLER; LINGUET, 2017; XAVIER et al., 2022b). Embora outros métodos de correção de viés testado no estudo de Teutschbein & Seibert (2012) foram capazes de corrigir os valores médios diários, apenas o QM corrigiu outras propriedades estatísticas, tanto para precipitação quanto para temperatura.

A Tabela 7 apresenta os resultados das análises estatísticas dos dados observados e simulados pelos modelos, antes e após a correção do viés pelo Quantile-Mapping. Em geral, os resultados mostram uma melhora considerável das variáveis climáticas. O Erro Quadrático

Médio (RMSE) reduziu, com exceção da Prec, a média (\bar{x}) se aproximaram dos dados observados, o viés (BIAS) se aproximou de zero nas variáveis corrigidas e o desvio padrão (sd) não apresentou homogeneidade nos dados.

Tabela 7. Análises estatísticas para o período histórico de 1981 a 2005, obtida da comparação entre os dados observados e os dados históricos gerados pelos modelos climáticos antes e após a correção de viés das variáveis meteorológicas.

Variáveis	Estatísticas	AA			SM			OB			PC		
		Obs.	M	M*	Obs.	M	M*	Obs.	M	M*	Obs.	M	M*
Tmin	RMSE	-	2,77	2,52	-	5,63	5,01	-	2,79	2,12	-	2,95	2,57
	\bar{x}	20,59	19,84	20,59	14,10	11,62	14,03	18,01	16,47	18,01	17,75	16,53	17,75
	BIAS	-	0,75	0,00	-	2,48	0,07	-	1,54	0,00	-	1,22	0,00
	σ	2,46	1,94	1,80	5,20	4,00	3,93	2,15	1,98	1,66	2,60	2,08	1,98
Tmáx	RMSE	-	4,31	2,77	-	5,37	5,37	-	3,84	2,64	-	4,43	3,01
	\bar{x}	32,98	29,93	33,00	24,45	24,37	24,39	30,31	27,59	30,33	29,51	26,34	29,52
	BIAS	-	3,05	-0,02	-	0,08	0,06	-	2,72	-0,02	-	3,18	-0,01
	σ	2,46	2,38	1,86	5,80	4,38	4,52	2,33	1,92	1,76	2,58	1,99	1,88
Prec	RMSE	-	8,97	9,20	-	11,36	12,09	-	6,13	6,25	-	7,69	7,91
	\bar{x}	4,16	4,31	4,10	4,27	3,30	4,22	3,05	2,85	3,03	3,78	4,21	3,78
	BIAS	-	-0,15	0,06	-	0,97	0,05	-	0,20	0,02	-	-0,44	-0,01
	σ	7,90	5,41	5,77	9,90	5,42	6,88	5,43	3,96	4,14	6,70	5,06	5,32
Rn	RMSE	-	7,66	4,55	-	9,05	6,13	-	9,34	4,71	-	8,40	4,91
	\bar{x}	17,90	11,62	17,91	16,09	9,26	16,05	19,52	11,19	19,54	18,27	11,20	18,28
	BIAS	-	6,28	-0,01	-	6,83	0,03	-	8,33	-0,02	-	7,07	-0,01
	σ	3,74	2,39	2,69	7,12	4,03	5,70	3,98	1,80	2,91	4,25	2,38	3,17
UR	RMSE	-	16,97	11,86	-	14,46	12,15	-	16,27	12,90	-	14,74	12,79
	\bar{x}	70,12	58,86	70,10	74,86	67,65	74,83	65,20	55,09	65,04	68,80	61,23	68,68
	BIAS	-	11,26	0,03	-	7,21	0,03	-	10,10	0,16	-	7,57	0,12
	σ	13,36	12,18	10,37	10,76	8,62	7,89	13,38	9,40	9,92	12,66	9,21	9,62
u2	RMSE	-	1,05	0,47	-	1,47	1,00	-	1,74	0,57	-	1,41	0,52
	\bar{x}	0,98	1,86	0,98	1,89	2,94	1,89	1,10	2,71	1,11	1,25	2,50	1,25
	BIAS	-	-0,88	0,00	-	-1,05	0,00	-	-1,60	0,00	-	-1,25	0,00
	σ	0,39	0,46	0,29	0,84	0,66	0,58	0,48	0,51	0,36	0,43	0,50	0,33

RMSE = raiz do erro quadrático médio; \bar{x} = valor médio; BIAS = viés, σ = desvio padrão; Obs = Dados observados; M = Média dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5; * = viés corrigido; Tmin = Temperatura Mínima (°C), Tmáx = Temperatura Máxima (°C); Prec = Precipitação (mm dia-1); Rn = Saldo de Radiação (W m2 dia-1); UR = Umidade Relativa (%); u2 = Velocidade do Vento (m/s).

Para todos os polos, o RMSE das variáveis Tmin, Tmáx, Rn, UR e u2 reduziu. Observou um aumento no valor do RMSE para a Prec. Segundo Mendez et al. (2020), isto pode indicar que os modelos encontraram limitações em reproduzir adequadamente a variabilidade espaço temporal da precipitação diária sobre essas regiões.

Os valores médios dos dados dos modelos não corrigidos, divergiam entorno de -59,22 a 74,22% dos dados observados, sendo as maiores diferenças observadas na u2 e Rn. Com a

correção do viés, houve redução nessa diferença – entre -0,32 e 1,47% - mostrando uma melhora significativa dos dados corrigidos, resultando na proximidade maior do BIAS a zero.

Mesmo o sd dos modelos sendo inferior ao dos dados observados, para as variáveis de Prec e Rs os modelos com correção de viés foi superior aos não corrigidos. Por definição, o sd mede a distribuição dos dados em torno da média aritmética (REIMANN et al., 2011). Segundo Lafon et al. (2013) o aumento no sd para precipitação diária pode ser explicado devido ao regime pluviométrico da região. A presença de um período chuvoso e seco, com altos valores de Prec e posteriormente valores próximos a zero, pode ser tratada de forma em que o método de correção de viés não capture essas particularidades.

2.2.3.2. Balanço Hídrico Climatológico

Segundo Rodrigues et al. (2018), a partir das análises dos gráficos de déficit (DEF) e excedente hídrico (EXC), é possível estabelecer os períodos secos, estações chuvosas e melhores período para desenvolvimento do cultivo. É apresentado das Figura 8 e Figura 9 o Balanço Hídrico Climatológico para os quatro polos de irrigação estudados dos dados observados, futuros considerando os dois cenários de mudanças climáticas – RCP 4.5 e 8.5 –, respectivamente. A Tabela 8 apresenta o DEF e EXC dos dados observados, futuros analisados e cenários de mudanças climáticas para ambos os polos de irrigação.

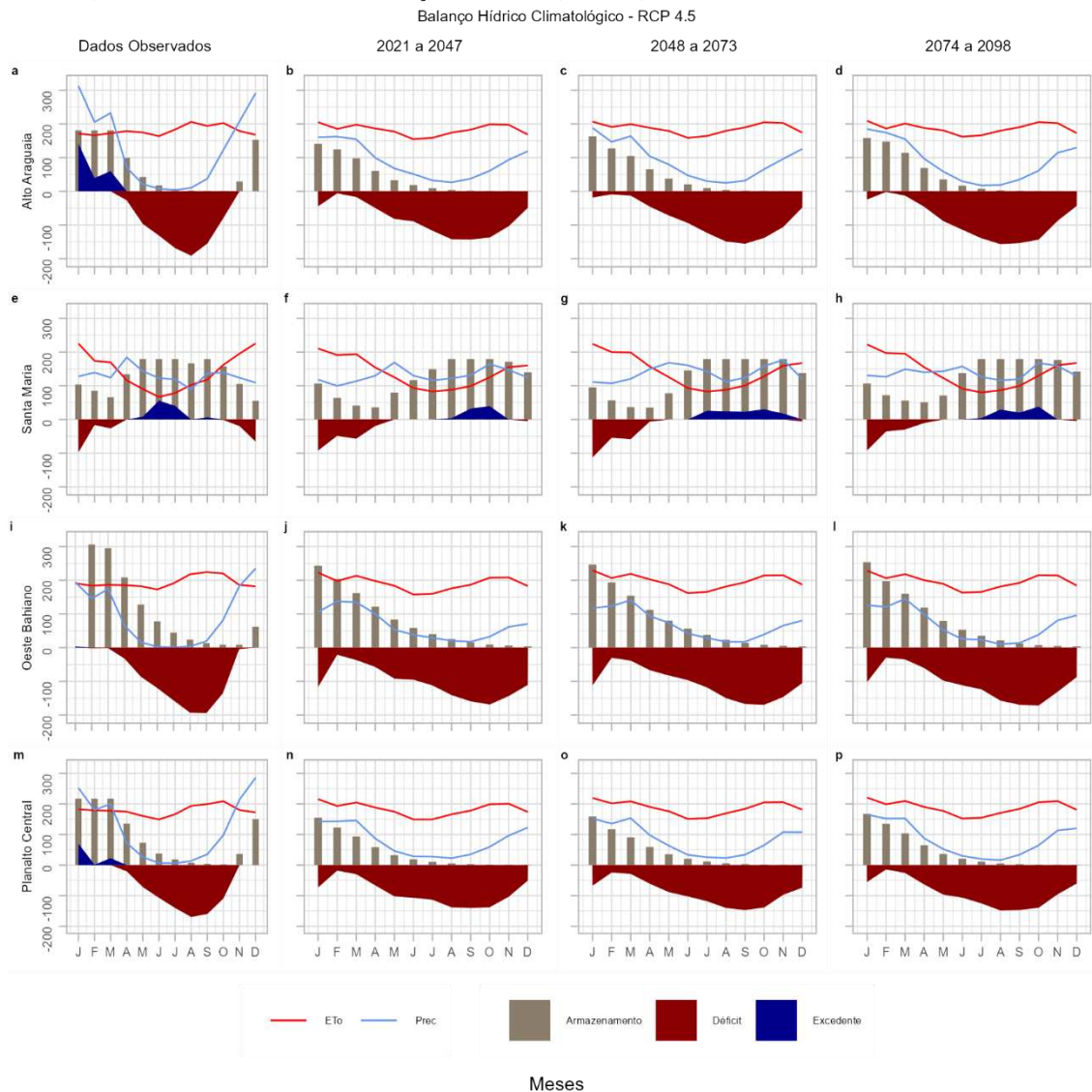
Considerando os dados observados (Figura 8a; i; m), os polos de irrigação do cerrado (AA, OB e PC) tem um mesmo padrão de comportamento. Os polos apresentam estação chuvosa iniciando em outubro e finalizando em março, onde começa a estação seca. Em ambos os polos, o EXC é observado apenas na estação chuvosa. Nos polos AA e PC, o EXC acontece nos meses de dezembro a março, já o polo OB, apenas no mês de janeiro. A partir de abril, para AA e PC, e fevereiro, para OB, o DEF aumenta, tendo pico no mês de agosto, -195,28; -179,52; -213,73 mm mês⁻¹, respectivamente. Com o início das chuvas em setembro, o DEF reduz, até chegar a 0 mm mês⁻¹ em novembro (AA e PC) e dezembro (OB).

Outros estudos que determinaram o BHC para regiões do cerrado, também observaram padrões semelhantes (DE JESUS et al., 2017; MOTA et al., 2013; PARREIRA et al., 2019). Os autores observaram períodos de EXC e DEF bem característicos para a região.

O polo de irrigação de SM, possui índices pluviométricos mais estáveis durante todo o ano, não tendo um período seco e chuvoso característico, como mostra a Figura 8e. Nessa região, o EXC se inicia no mês de maio, permanecendo até o mês de setembro. De outubro a março, a região apresenta DEF, mesmo que em menor magnitude quando comparado aos outros três polos (Tabela 8). Esse período compreende o final da primavera e o verão, onde as temperaturas

são mais elevadas, e por consequência a ETo também aumenta. O maior DEF e EXC é observado nos meses de janeiro e junho, $-97,87$ e $55,89$ mm mês^{-1} , respectivamente.

Figura 8. BHC para os polos AA, SM, OB e PC com os dados observados (1981 a 2005) e futuros (2021 a 2047, 2048 a 2074 e 2074 a 2098) considerando o cenário de mudanças climáticas (RCP 4.5)

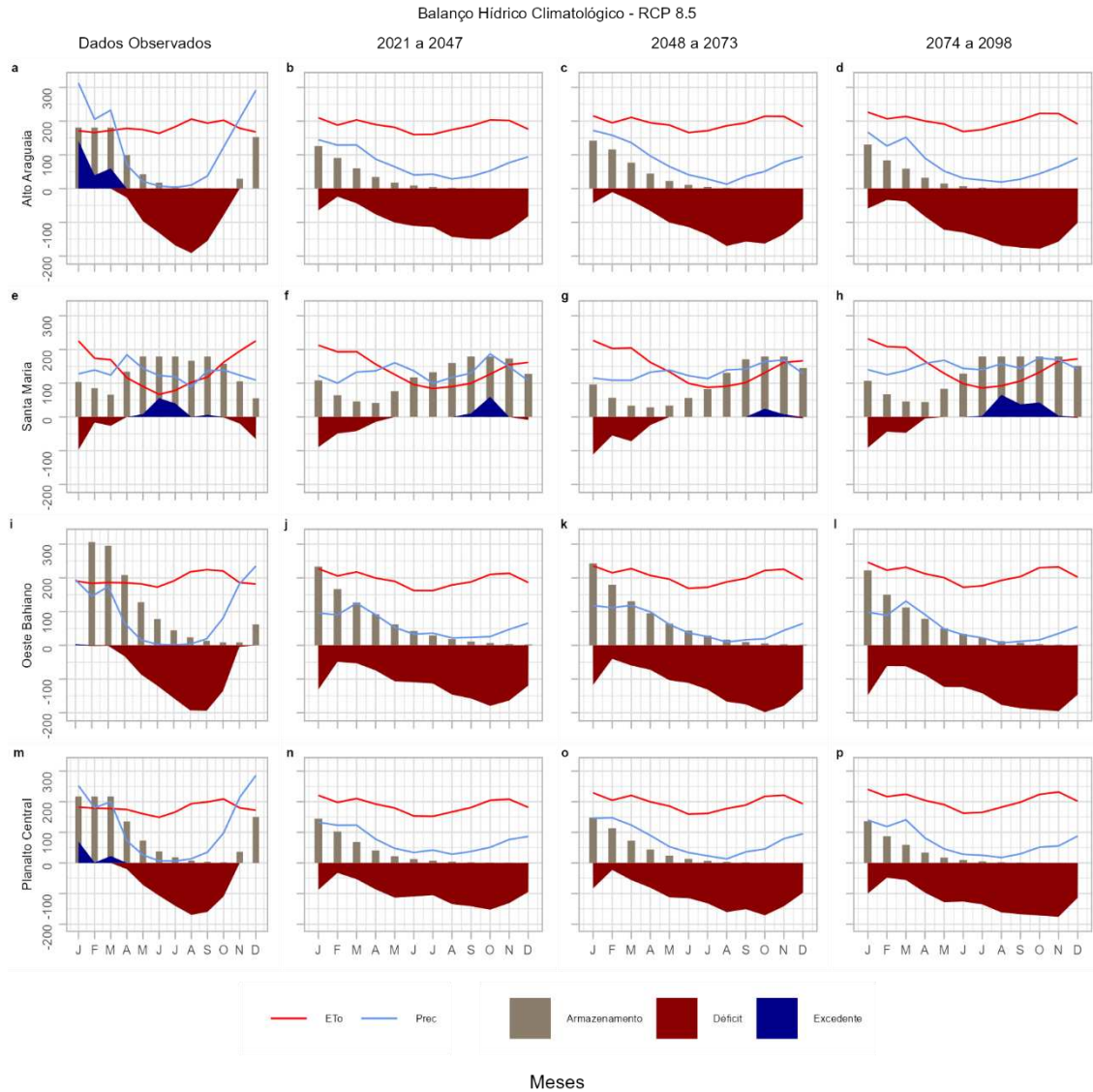


Klumb et al. (2018) e Rocha et al. (2020), estudaram diferentes regiões do pampas e obtiveram resultados semelhantes. O EXC hídrico é observado nas estações de outono/inverno, enquanto o DEF é presente nos meses de novembro a março. Segundo Rocha et al. (2021) os cenários de déficit hídrico serão ainda mais preocupantes porque os períodos de seca tendem a ser mais longos, aumentando assim a escassez hídrica na região.

O BHC para os futuros também é apresentado nas Figura 8 e Figura 9, e foi determinado considerando dois cenários de mudanças climáticas, RCP 4.5 e RCP 8.5, e a média de dois modelos, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5. Segundo Almazroui et al. (2021), a região central e costeira do Brasil apresentará redução na precipitação e aumento na temperatura, enquanto

no bioma do Pampas, de acordo com Brêda et al. (2020), é observado aumento de precipitação e evapotranspiração, bom como observado neste estudo.

Figura 9. BHC para os polos AA, SM, OB e PC com os dados observados (1981 a 2005) e futuros (2021 a 2047, 2048 a 2074 e 2074 a 2098) considerando o cenário de mudanças climáticas (RCP 8.5)



No geral, os resultados do RCP 4.5 e RCP 8.5 foram similares. Os padrões no DEF e EXC nos polos são observados entre os cenários (Tabela 8), porém com intensidades diferentes. No RCP8.5, as condições de DEF são atenuadas, quando comparada ao RCP 4.5. No geral, o cenário sob RCP 8.5 foi projetado para ter maiores impactos nos componentes do BHC, ampliando a magnitude e período de permanência do DEF no cerrado (TAVARES et al., 2023). Esses resultados são interessantes, pois sugerem uma relação direta entre as concentrações de gases de efeito estufa (GEE) e os impactos das mudanças climáticas.

Tabela 8. Valores médios mensais do volume (mm) de déficit (DEF) e excedente hídrico (EXC) nos quatro polos, dado observados, dois cenários e futuros analisados.

Meses	Dados	AA			SM			OB			PC		
		21 a 47	48 a 73	74 a 98	21 a 47	48 a 73	74 a 98	21 a 47	48 a 73	74 a 98	21 a 47	48 a 73	74 a 98
Janeiro	Obs.		141,92			-97,87			3,69			70,28	
	RCP 4.5	-44,69	-18,49	-24,46	-92,30	-112,86	-92,10	-116,89	-112,03	-102,55	-73,33	-67,47	-55,73
	RCP 8.5	-65,14	-43,37	-59,22	-89,74	-111,27	-91,57	-131,06	-117,53	-148,12	-87,92	-83,26	-100,26
Fevereiro	Obs.		39,25			-23,71			-6,38			1,18	
	RCP 4.5	-9,82	-14,65	-3,18	-67,55	-73,32	-50,32	-46,30	-64,91	-64,94	-31,37	-41,71	-25,54
	RCP 8.5	-36,01	-16,77	-49,99	-68,32	-74,19	-60,99	-97,18	-83,82	-116,82	-52,89	-38,28	-75,11
Março	Obs.		59,99			-35,81			-4,46			22,36	
	RCP 4.5	-25,37	-19,65	-20,53	-71,54	-71,42	-38,76	-69,19	-70,10	-64,94	-46,10	-43,96	-41,65
	RCP 8.5	-59,16	-51,26	-50,56	-53,16	-87,77	-59,71	-87,57	-101,29	-96,77	-75,51	-81,79	-75,76
Abril	Obs.		-42,01			0,00			-77,45			-37,93	
	RCP 4.5	-67,83	-63,15	-65,03	-22,85	-7,55	-13,22	-92,76	-104,47	-96,72	-91,13	-83,32	-89,65
	RCP 8.5	-93,61	-85,07	-101,08	-18,10	-27,90	-5,66	-106,79	-105,38	-119,67	-109,00	-103,48	-118,56
Maio	Obs.		-127,15			37,97			-151,55			-107,96	
	RCP 4.5	-100,20	-89,31	-109,77	0,00	0,00	0,00	-128,39	-112,98	-134,94	-124,30	-108,41	-119,75
	RCP 8.5	-113,55	-117,23	-136,26	0,00	0,00	0,00	-136,12	-133,62	-151,19	-130,00	-130,30	-143,31
Junho	Obs.		-150,06			55,89			-167,06			-135,01	
	RCP 4.5	-100,45	-107,48	-128,41	0,00	15,55	0,00	-119,02	-119,56	-137,56	-119,70	-115,97	-120,68
	RCP 8.5	-118,62	-123,61	-137,27	0,00	0,00	0,00	-129,00	-131,82	-140,99	-118,70	-124,82	-134,08
Julho	Obs.		-178,49			40,23			-189,43			-158,21	
	RCP 4.5	-125,20	-132,49	-147,72	19,11	59,73	42,59	-130,54	-136,33	-141,58	-121,12	-126,87	-134,45
	RCP 8.5	-118,03	-142,77	-149,79	0,00	0,00	46,34	-126,10	-146,29	-154,30	-110,04	-138,27	-139,87
Agosto	Obs.		-195,28			15,13			-213,73			-179,52	
	RCP 4.5	-146,99	-154,13	-160,83	33,74	24,27	29,35	-155,34	-164,25	-171,03	-143,22	-145,88	-154,11
	RCP 8.5	-145,95	-173,10	-170,46	25,73	5,97	65,67	-156,83	-178,38	-185,39	-138,09	-164,46	-164,31
Setembro	Obs.		-156,48			6,67			-204,98			-164,14	
	RCP 4.5	-145,26	-157,75	-155,26	32,16	23,10	20,30	-169,24	-176,73	-178,25	-142,98	-149,95	-149,74
	RCP 8.5	-149,98	-158,49	-175,71	29,76	40,38	37,61	-164,66	-181,95	-192,02	-143,58	-152,78	-168,85
Outubro	Obs.		-79,58			-2,42			-139,99			-110,83	
	RCP 4.5	-138,08	-139,19	-144,25	39,55	30,11	37,94	-174,97	-175,11	-176,90	-139,41	-140,27	-141,03
	RCP 8.5	-150,76	-163,47	-178,86	59,96	32,69	42,49	-184,25	-202,60	-213,90	-153,71	-172,07	-172,43
Novembro	Obs.		0,00			-30,95			-4,36			0,00	
	RCP 4.5	-103,86	-106,45	-87,77	-0,31	17,50	-0,02	-146,79	-149,41	-133,26	-104,11	-97,84	-96,06
	RCP 8.5	-124,95	-135,68	-157,52	-0,18	7,70	3,81	-166,28	-181,29	-197,13	-131,92	-141,91	-176,14
Dezembro	Obs.		52,05			-89,49			0,00			48,06	
	RCP 4.5	-49,25	-48,31	-43,35	-8,14	-9,57	-7,35	-112,12	-106,64	-88,43	-50,90	-74,11	-60,57
	RCP 8.5	-81,95	-88,96	-101,35	-14,76	-6,41	-4,12	-120,44	-130,15	-146,58	-94,93	-97,45	-113,95

Para os polos AA, OB e PC, o DEF será predominante em todos os meses do ano, em ambos os cenários. Essa redução na disponibilidade de água ocorre, principalmente, devido a redução da precipitação e o aumento da ETo nos meses chuvosos. Tavares et al. (2023), Brêda et al. (2020) e Almazroui et al. (2021) também observaram reduções mais proeminentes na disponibilidade de água no RCP 8.5, sendo mais intensas na região central e na costa leste do Brasil.

Segundo Marengo et al. (2012), a maior presença de DEF acontece nas regiões do nordeste e na bacia do Rio São Francisco, enquanto o EXC acontece na região sul do país. Os autores também relataram, que os maiores valores (de DEF e EXC) acontecem mais próximos no final

do século (2074 a 2098). A combinação de aumento nas taxas de ETo e diminuição das chuvas, para os polos AA, OB e PC.

Na região sul do Brasil, no polo SM, as projeções indicam tendências em direção a condições mais úmidas. As projeções deste polo demonstram uma redução da ETo no final do ano, fazendo com que os períodos de EXC aconteçam nesses meses. Enquanto para os dados observados, os períodos de EXC acontecem entre maio e setembro, as projeções futuras, indicam EXC de julho a novembro. Esses resultados podem demonstrar que os cultivos na região terão o seu atraso na época de plantio devido ao atraso nas chuvas, ou caso se mantenham, a necessidade de irrigação, para suprir a demanda de água, se tornará ainda mais importante.

Sanchez et al. (2015), Llopart et al. (2014) e Nuñez e Blázquez (2014) também observaram projeções mais úmidas e padrões de precipitação parecidas com a desse estudo da região do polo de SM. Segundo os autores, esses aumentos estão relacionados principalmente ao fluxo de umidade do sudoeste do Oceano Atlântico Sul.

2.2.3.3. Balanço Hídrico Climatológico Sequencial

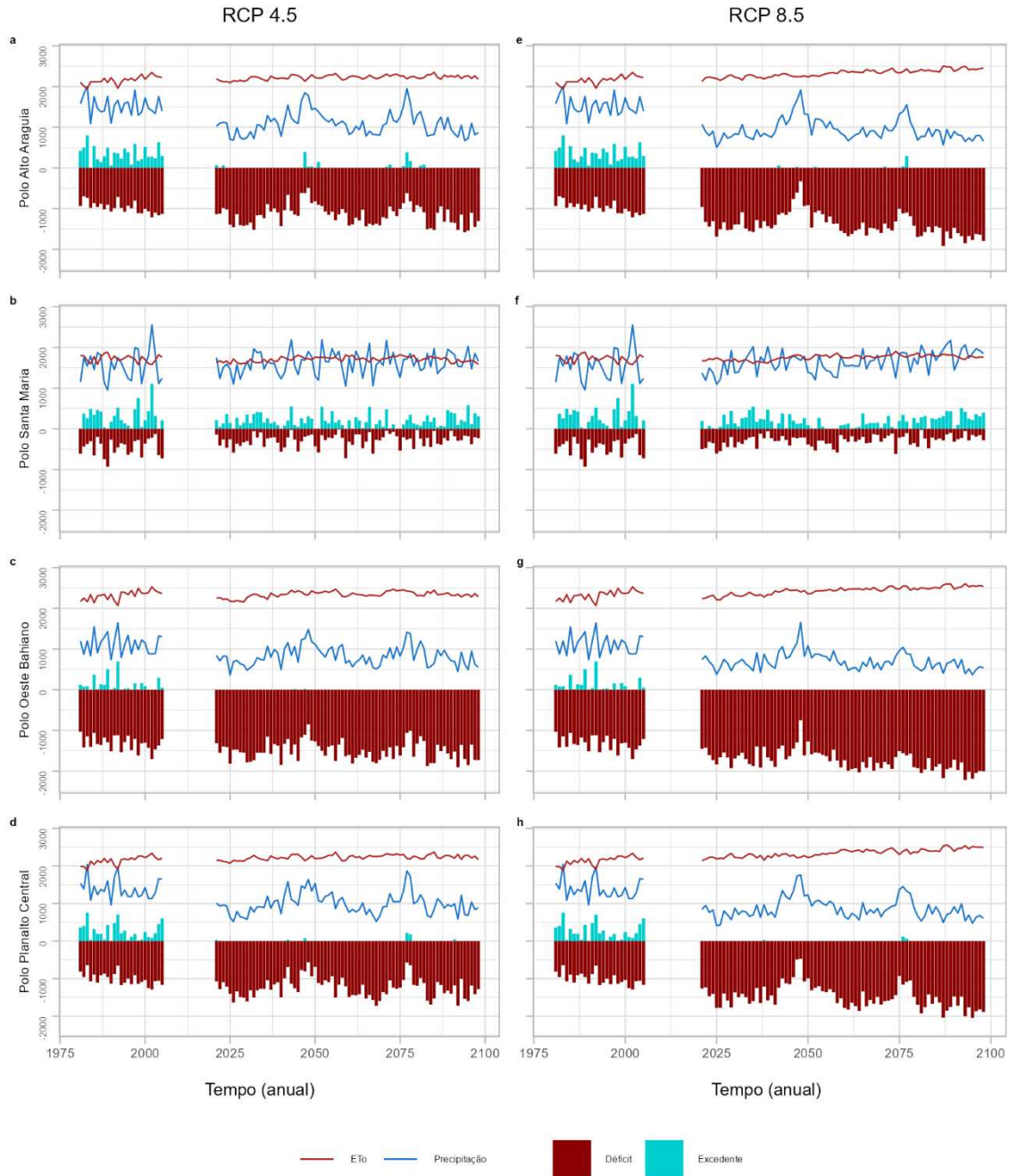
O somatório anual dos componentes do BHC sequencial (precipitação, ETo, DEF e EXC) para os quatro polos de irrigação nos dois cenários de mudanças climáticas é apresentado na Figura 10. Na Tabela 10 é apresentado o resultado dos testes de Mann-Kendall e Sen's Slope para os componentes do BHC. É apresentado na Tabela 9 os valores médios dos componentes do BHC.

A Figura 10 mostra uma predominância de DEF nos polos AA, OB e PC, tanto nos dados observados, quanto nos dados simulados. De acordo com a Tabela 9, para os polos do cerrado, o DEF se torna mais proeminente no futuro, aumentando os valores acumulados em ambos os cenários, variando de -1155,9 a -1741,9 mm ano⁻¹, sendo maiores no RCP 8.5. O EXC diminui nesses polos, chegando a valores médios anuais entre 0 e 20,4 mm ano⁻¹.

Souza e Nascimento (2022) e Matos et al. (2020) também observaram predominância de DEF, resultados semelhantes aos deste trabalho, ao fazerem o BHC sequencial para regiões do nordeste. O BHC determinado por Schmidt, Lima & Jesus (2018) para o futuro, também apresentou DEF em todos os períodos analisados.

Com a redução da precipitação, há uma tendência a DEF para grande parte do cerrado (FERREIRA et al., 2023), que resultará em impactos e desafios futuros para a região. Marengo & Bernasconi (2015) também observaram DEF na região nordeste do Brasil com valores entre -3 a -4 mm dia⁻¹ (-1095 a -1460 mm ano⁻¹) para as projeções futuras.

Figura 10. Componentes do BHC sequencial para os polos AA, SM, OB e PC com os dados observados (1981 a 2005) e futuro (2021 a 2098) considerando os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.



No polo de SM, mesmo com o aumento, ainda que pequeno, da Prec, tanto o DEF quanto o EXC são reduzidos nos cenários futuros, chegando a valores de -289,3 e 184,4 mm ano⁻¹, respectivamente, no RCP 8.5. Müller; Lovino & Sgroi (2021) estudaram as alterações na temperatura e precipitação para a região do pampas. Os autores relataram que nos cenários de emissões (RCP 4.5 e 8.5), a precipitação anual não sofreria mudanças significativas na região do estudo, porém haveria ligeiros aumentos e a variabilidade permaneceria praticamente inalterada, resultados estes que também são observados neste estudo.

Tabela 9. Valores anuais médios dos componentes do BHC para os dados observados (1981 a 2005) e futuro (2021 a 2098) considerando os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.

Cenário	Período	Variável	Alto Araguaia	Santa Maria	Oeste da Bahia	Planalto Central
			Médio	Médio	Médio	Médio
RCP 4.5	2021 a 2098	Prec	1086,1	1624,5	829,6	992,6
		ETo	2223,0	1706,8	2339,6	2229,1
		DEF	-1155,9	-278,2	-1509,2	-1242,7
		EXC	20,4	195,3	0,5	7,6
RCP 8.5	2021 a 2098	Prec	934,6	1649,8	694,3	865,1
		ETo	2325,6	1754,0	2436,7	2346,6
		DEF	-1395,8	-289,3	-1741,9	-1483,7
		EXC	6,1	184,4	0,0	2,8
Observado	1981 a 2005	Prec	1507,4	1568,6	1127,6	1383,3
		ETo	2167,5	1718,3	2332,1	2154,8
		DEF	-991,7	-453,8	-1329,5	-1022,6
		EXC	331,5	304,8	120,7	249,0

Sobre a distribuição de Prec, nos polos AA, OB e PC, nos dois cenários de mudanças climáticas, o volume precipitado futuro (2021 a 2098) e histórico (1981 a 2005), tende a se reduzir, segundo ao teste de *Sen's Slope*. Porém para ambos os casos, essa tendência não é significativa pelo teste de Mann-Kendall, com exceção do OB para o cenário RCP 8.5, em que essa redução é estatisticamente significativa. No polo SM, a precipitação observada não apresenta mudança estatisticamente significativa, porém apresenta uma tendência de aumento. Já para os dados futuros, em ambos os cenários, esse aumento é significativo, tendo uma maior magnitude no RCP 8.5.

Tabela 10. Tendências mensais do teste de Mann-Kendall representada pela curvatura de Sen para a precipitação, ETo, DEF e EXC dos períodos históricos e futuros.

Período	Modelo e Cenário	Variável	Polos			
			AA	SM	OB	PC
2021 a 2098	RCP 4.5	Prec	-0,0038ns	0,0125*	-0,0003ns	0,0013ns
		Eto	0,008***	0,0053ns	0,0098***	0,0092***
		DEF	-0,0096*	0ns	-0,0102*	-0,0061ns
		EXC	0ns	0ns	0	0ns
	RCP 8.5	Prec	-0,0099ns	0,0346***	-0,0124***	-0,0081ns
		Eto	0,0243***	0,0133**	0,0263***	0,0276***
		DEF	-0,0345***	0ns	-0,0397***	-0,0374***
		EXC	0ns	0ns	0	0ns
1980 a 2005	Observados	Prec	-0,0084ns	0,0232ns	-0,0004ns	-0,0118ns
		Eto	0,0643***	-0,0116ns	0,0619***	0,0748***
		DEF	0ns	0ns	-0,0604**	-0,0024**
		EXC	0ns	0ns	0ns	0ns

Quando analisamos a ETo para os três polos do cerrado, em todos os casos há uma tendência de aumento da variável estatisticamente significativa pelo teste de Mann Kendall. Os dados históricos apresentam uma tendência maior $-0,772$, $0,743$ e $0,898 \text{ mm ano}^{-1}$ – do que nos cenários futuros RCP 4.5 $-0,0096$, $0,118$ e $0,1104 \text{ mm ano}^{-1}$ – e RCP 8.5 $-0,0292$, $0,316$ e $0,331 \text{ mm ano}^{-1}$ –, para os polos AA, OB e PC, respectivamente. No polo de SM, em ambos os cenários de mudanças climáticas é observado tendência de aumento da ETo, no cenário pessimista esse aumento é significativo. Nos dados históricos, a ETo, mesmo não sendo significativa pelo teste de Mann-Kendall, a variável tende a diminuir, segundo o teste de *Sen's Slope*.

Os testes estatísticos resultaram no valor zero para o EXC em todas as situações. O *Sen's Slope* pode ser descrito como a mediana ponderada das diferenças entre os valores observados (SEN, 1968). Com os resultados do EXC, apresentando valores iguais a zero, na maioria das observações, o teste irá retornar esse resultado.

Para o polo SM, o resultado de *Sen's Slope* para o DEF também apresenta valores iguais a zero, tanto para os dados históricos quanto os futuros. Como observa-se na Figura 10, o polo SM possui um volume pluviométrico e valores ETo que se alternam em si, o que não é observado nos outros polos, em que a ETo é sempre superior ao volume precipitado. Quando determinado o BHC sequencial, devido os DEF e EXC se alternando, a presença de valores zero para ambas as variáveis se tornam grandes, resultando no teste de *Sen's Slope* igual a zero.

Em todas as situações em que o DEF apresentou resultados significativos, essa tendência é de aumento da variável no tempo, reduzindo o valor ainda mais (sinal negativo), atingindo os maiores picos próximo do final do século (Figura 10), principalmente para os polos AA, OB e PC no RCP 8.5.

2.2.3.4. Manejo de irrigação

Na Tabela 11 é apresentado o resumo dos componentes do manejo de irrigação considerando os principais cultivos dos polos, para os dados históricos e futuros. Os polos não apresentam um padrão entre si quanto ao número de acionamento do sistema durante o cultivo. Mas em geral, os cenários RCP 8.5 apresentaram valores mais elevados de ETc, indicando maior demanda hídrica pela cultura.

Tabela 11. Componentes do Manejo de Irrigação pelo método do balanço de água no solo com turno de rega variável para os dados observados (1981 a 2005) e futuro (2021 a 2098) considerando os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.

Polo	Cultura	Cenário	Período	P	ETo	ETc	IRR	AS
Alto Araguaia	Feijão	RCP 4.5	21 a 47	321,8	561,4	472,6	196,3	9
			48 a 73	347,3	566,7	477,5	182,5	9
			74 a 98	310,2	569,7	480,4	210,5	10
		RCP 8.5	21 a 47	281,2	574,7	483,4	217,7	10
			48 a 73	298,1	594,2	500,1	226,0	11
			74 a 98	293,7	605,2	509,4	249,1	12
Histórico	81 a 05	323,5	525,4	449,9	269,5	13		
Santa Maria	Arroz	RCP 4.5	21 a 47	569,2	653,1	708,7	153,1	4
			48 a 73	578,7	681,0	738,2	191,5	5
			74 a 98	596,7	683,8	741,6	154,1	5
		RCP 8.5	21 a 47	573,1	657,8	713,5	188,8	5
			48 a 73	588,6	688,1	745,7	191,5	5
			74 a 98	635,7	703,8	762,7	154,9	4
Histórico	81 a 05	492,7	775,2	845,4	347,3	10		
Oeste da Bahia	Soja	RCP 4.5	21 a 47	346,2	877,7	747,0	418,6	17
			48 a 73	370,1	903,9	769,3	387,8	15
			74 a 98	401,1	901,0	765,4	366,4	15
		RCP 8.5	21 a 47	283,5	895,8	762,5	458,6	19
			48 a 73	313,4	938,9	797,9	495,7	21
			74 a 98	254,6	974,3	828,5	559,7	23
Histórico	81 a 05	726,1	788,0	654,2	27,1	2		
Oeste da Bahia	Milho	RCP 4.5	21 a 47	342,5	823,5	808,0	426,7	12
			48 a 73	365,3	845,1	828,7	457,0	12
			74 a 98	334,4	844,3	828,2	476,8	13
		RCP 8.5	21 a 47	318,0	841,4	825,9	487,7	14
			48 a 73	332,3	875,2	858,3	505,9	14
			74 a 98	314,0	895,2	878,1	552,5	14
Histórico	81 a 05	258,9	810,0	789,4	534,1	13		
Planalto Central	Milho	RCP 4.5	21 a 47	501,0	909,8	886,1	361,4	10
			48 a 73	504,7	939,0	914,2	381,3	11
			74 a 98	542,6	942,2	918,9	382,0	11
		RCP 8.5	21 a 47	418,9	939,4	916,0	484,7	13
			48 a 73	450,3	989,7	967,4	506,2	14
			74 a 98	400,5	1035,0	1010,9	573,3	15
Histórico	81 a 05	915,3	829,6	800,0	66,0	4		
Planalto Central	Feijão	RCP 4.5	21 a 47	278,3	567,2	475,5	223,2	9
			48 a 73	314,3	574,3	480,3	199,2	8
			74 a 98	291,8	576,5	482,9	230,4	9
		RCP 8.5	21 a 47	248,6	582,0	487,3	244,2	10
			48 a 73	266,4	605,7	506,6	248,5	10
			74 a 98	268,0	619,0	518,2	274,3	11
Histórico	81 a 05	298,0	512,2	432,7	236,6	10		

No polo AA, durante o período de cultivo do feijão, nos cenários futuros, a precipitação terá uma alteração entre -13,1 e 7,34%, enquanto a ETo varia entre 6,85 e 15,18%. É interessante observar que mesmo com o aumento da ETc os acionamento do sistema serão reduzidos. Isso pode ser explicado devido a alteração no padrão das chuvas nos cenários futuros. Como observado nas Figura 9 e Figura 10, a partir do mês de abril os dados históricos reduzem drasticamente o volume precipitado, o que não é tão proeminente para os cenários futuros. Nesse caso, o tempo entre irrigações no futuro é maior diminuindo as vezes em que o sistema é acionado.

Durante outubro e janeiro, o arroz é cultivado no polo de SM. Nesse período a chuva nos futuros irão variar de 15,54 a 29,04% enquanto a ETo entre -15,75 e -9,21%. Nessas condições de maior volume precipitado e menor demanda de água, o volume irrigado também será reduzido bem como o número de vezes em que o sistema é ligado, variando entre 4 e 5 acionamento do sistema. As simulações de aumento da Prec, redução da ETo e o EXC acontecendo durante alguns meses do período de cultivo – como mostram as Figura 9 e Figura 10 – explica essa redução na necessidade de irrigação.

Ambos os cultivos do polo OB serão discutidos juntos. A soja é semeada logo no fim do período do vazio sanitário, em meado de outubro e logo após o período do cultivo, no início de março já é realizada a semeadura do milho. Enquanto no cultivo da soja a Prec é reduzida entre -44,76 e -64,94% e a ETo aumenta entre 11,38 e 23,63%, para o milho o total precipitado e a ETo aumentam entre 21,28 a 32,28% e 1,67 a 10,51%, respectivamente.

Segundo os testes de Mann-Kendall e *Sen's Slope*, Tabela 10, a precipitação no polo OB tende a reduzir com o passar do tempo, divergindo com o aumento que é observado no cultivo do milho. Vale et al. (2023) realizaram os mesmos testes considerando períodos trimestrais. Os autores observaram que para os meses MAM e JJA a precipitação tende a aumentar, ainda que em menor magnitude que quando comparado aos outros meses. Os autores também relaram o atraso no início das chuvas, prejudicando principalmente a soja, que é semeada no início da época chuvosa.

Portanto, caso seja mantido nessa época de semeadura, o cultivo da soja necessitará de um volume irrigado de 14,2 a 26,65% maior, chegando até 23 acionamento do sistema durante o cultivo, enquanto para o período histórico, era de 2 acionamentos. Já para o milho, o volume irrigado será de 2,35 a 11,24% maior, mantendo a irrigação entre 12 e 14 acionamentos.

No polo do PC, para ambos os cultivos, a Prec é reduzida, variando de -2,10 a -56,25% e a ETo aumenta entre 9,67 e 24,75%. O milho é semeado no mês de outubro, no início das chuvas. Com a redução da precipitação, principalmente neste período, e aumento da ETo com

a chegada da primavera/verão, a demanda de água a ser suprida pela irrigação aumentará, chegando a 573,3 mm ciclo⁻¹ no cenário mais pessimista. Nessas condições, o sistema de irrigação será ligado em torno de 10 a 15 vezes, enquanto para o período histórico a demanda era inferior, necessitando apenas de 4 acionamento do sistema por ciclo.

A semeadura do feijão safrinha da região, ocorre no mês de março, caracterizado como final do período chuvoso. Sendo cultivado no período seco, nos cenários futuros, mesmo com aumento da ETo e redução da precipitação, a demanda de água a ser suprida pela irrigação não sofrerá grandes alterações, pois já é um período em que o sucesso do cultivo depende fortemente da irrigação.

Em uma visão geral, cada região e cultura apresenta variações específicas na resposta aos cenários climáticos, o que indica a necessidade de estratégias regionais e culturais específicas para o manejo da irrigação e uso eficiente da água. Comparando o histórico com as projeções futuras, observa-se que a necessidade de irrigação tende a aumentar em todos os cenários, com algumas exceções onde a precipitação aumenta substancialmente.

2.2.4. CONCLUSÕES

Considerando os cenários de mudanças climáticas intermediário (RCP 4.5) e pessimista (RCP 8.5), em ambos os casos, para os polos de irrigação do cerrado (AA, OB e PC), o DEF será predominante em todos os meses do ano. Também é observado um aumento progressivo no volume de DEF até o ano de 2021 a 2098 para essas regiões. Em ambas as situações o cenário mais pessimista apresentou aumentos mais proeminentes.

Para o polo SM, devido a tendência de aumento de precipitação, e mudança no padrão das chuvas, o EXC se iniciará 2 a 3 meses após o que era observado no período histórico, alterando os meses mais úmidos e secos na região. Os testes estatísticos não foram capazes de identificar tendência de aumento de DEF ou EXC durante o período futuro, 2021 a 2098, mas é possível observar uma redução das variáveis em ambos os cenários.

No manejo de irrigação dos principais cultivos dos polos, aqueles que são cultivados no verão, serão os mais afetados pelas mudanças climáticas. A soja no OB e o milho no PC, sofrerão um aumento expressivo na necessidade de água que será repostada pela irrigação aumentando o número de vezes em que o sistema precisará ser ligado. O arroz em SM, o inverso é observado. Com o aumento da precipitação, a necessidade de água a ser repostada pela irrigação será reduzida e os acionamentos também. Os demais cultivos, sofrerão alterações pequenas em relação ao período histórico.

2.2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G. et al. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. **Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations**, v. 56, n. 97, p. e156, 1998.

ALLEN, R. G. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Em: **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. FAO ed. Rome: [s.n.]. p. 310.

ALMAGRO, A. et al. Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. **Atmospheric Research**, v. 244, p. 105053, 2020.

ALMAZROUI, M. et al. Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. **Earth Systems and Environment**, v. 5, n. 2, p. 155–183, 2021.

ANA. **Polos nacionais de agricultura irrigada: mapeamento de áreas irrigadas com imagens de satélite**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2020.

ANA. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2021.

ANDRADE, C. W. et al. Climate change impact assessment on water resources under RCP scenarios: A case study in Mundaú River Basin, Northeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 41, p. E1045–E1061, 2021.

ANJUM, M. N.; DING, Y.; SHANGGUAN, D. Simulation of the projected climate change impacts on the river flow regimes under CMIP5 RCP scenarios in the westerlies dominated belt, northern Pakistan. **Atmospheric Research**, v. 227, p. 233–248, 2019.

AYUGI, B. et al. Quantile mapping bias correction on rossby centre regional climate models for precipitation analysis over Kenya, East Africa. **Water**, v. 12, n. 3, p. 801, 2020.

BERNARDO, S. et al. **Manual de Irrigação**. 9ª edição ed. Viçosa-MG: Editora UFV, 2019.

BEZNER KERR, R. et al. Food, Fibre, and Other Ecosystem Products. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lössche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. **IPCC Sixth Assessment Report**, v. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 713–906, 2022.

BJØRNÆS, C. A guide to representative concentration pathways. **Center for International Climate and Environmental Research**, v. 560, 2013.

BRASIL. 1.082, de 25 de abril de 2019. PORTARIA Nº 1.082, DE 25 DE ABRIL DE 2019 - Estabelece a iniciativa Polos de Agricultura Irrigada como parte integrante das ações de implementação da Política Nacional de Irrigação e de incentivo ao desenvolvimento regional no âmbito do Ministério do Desenvolvimento Regional. . 25 abr. 2019.

BRASIL. **Oeste da Bahia abriga primeira Unidade de Referência em Produção Irrigada do Brasil**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/oeste-da-bahia-abriga-primeira-unidade-de-referencia-em-producao-irrigada-do-brasil>>. Acesso em: 10 mar. 2024.

BRASIL. **MDR reconhece Polo de Agricultura Irrigada Araguaia-Xingu, em Mato Grosso**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/mdr-reconhece-polo-de-agricultura-irrigada-araguaia-xingu-em-mato-grosso>>. Acesso em: 4 mar. 2024.

BRÊDA, J. P. L. F. et al. Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. **Climatic Change**, v. 159, n. 4, p. 503–522, 2020.

BRUMATTI, L. M. et al. Bias Correction in CMIP6 Models Simulations and Projections for Brazil's Climate Assessment. **Earth Systems and Environment**, v. 8, n. 1, p. 121–134, 2024.

CAMUFFO, D. Cumulated frequency distribution of daily global solar radiation at Venice, Italy. **Archiv für Meteorologie Geophysik und Bioklimatologie**, v. 26, p. 45–50, 1978.

CHOU, S. C. et al. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 03, n. 05, p. 512–527, 2014a.

CHOU, S. C. et al. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 05, p. 438, 2014b.

CRIPPA, M. et al. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. **Nature food**, v. 2, n. 3, p. 198–209, 2021.

DA ROCHA, N. S. et al. ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO CAMAQUÃ-RS. **Geo UERJ**, n. 37, p. e37723–e37723, 2020.

DA SILVA, E. H. F. M. et al. Impact assessment of soybean yield and water productivity in Brazil due to climate change. **European Journal of Agronomy**, v. 129, p. 126329, 2021.

DE JESUS, T. C. L. et al. Impacto do aumento da concentração atmosférica de CO₂ no balanço hídrico climatológico do Cerrado. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, 2017.

DE MATOS, R. M. et al. Balanço hídrico climatológico normal e sequencial para o município de Barbalha-CE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 973–982, 2020.

EMBRAPA. **Cultivo do Milho**. , set. 2007. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/irrigacao/manejo>>. Acesso em: 15 fev. 2024

EMBRAPA. **Reuniões online validam datas de semeadura do milho no DF, Entorno do DF e Oeste da Bahia**. , 2 jul. 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/53833483/reunioes-online-validam-datas-de-semeadura-do-milho-no-df-entorno-do-df-e-oeste-da-bahia>>. Acesso em: 1 abr. 2024

EMBRAPA. **Cultivo do Arroz**. , 27 set. 2021a. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/producao/sistema-de-cultivo/arroz-irrigado-na-regiao-subtropical/cultivar>>. Acesso em: 15 fev. 2024

EMBRAPA. **Cultivo da Soja**. , 8 dez. 2021b. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/pre-producao/caracteristicas-da-especie-e-relacoes-com-o-ambiente/cultivares/bahia>>. Acesso em: 2 fev. 2024

FERREIRA, F. et al. Spatial–temporal variability of climatic water balance in the Brazilian Savannah Region River Basins. *Water* 15 (10): 1820. 2023.

GOUVEIA, C. M. et al. Revisiting Climate-Related Agricultural Losses across South America and Their Future Perspectives. **Atmosphere**, v. 14, n. 8, p. 1303, 2023.

GUDMUNDSSON, L. et al. Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations—a comparison of methods. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 9, p. 3383–3390, 2012.

GUDMUNDSSON, L. **Package ‘qmap’**. Institute for Atmospheric and Climate Science, Zürich, 3 maio 2016.

IPCC. Climate change 2013: the physical science basis T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (Eds.), Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (2013). p. 1535, 2013.

IPCC, I. P. ON C. C. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth**

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. , 2014. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>>

IPCC, I. P. ON C. C. **Global Warming 1.5 ° C, summary for policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Geneva: [s.n.].

KENDALL, M. Appendix: Mann-Kendall Trend Tests. 1975.

KLUMB, G. B. et al. Balanço hídrico climatológico e classificação climática de Thornthwaite para o município de Pelotas/RS. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 1, n. 1, p. 229–235, 2018.

LAFON, T. et al. Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: a comparison of methods. **International journal of climatology**, v. 33, n. 6, p. 1367–1381, 2013.

LLOPART, M. et al. Climate change impact on precipitation for the Amazon and La Plata basins. **Climatic change**, v. 125, p. 111–125, 2014.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica: Journal of the econometric society**, p. 245–259, 1945.

MANTOVANI, E. C. et al. Estimativa de produtividade da cultura do feijão irrigado em Cristalina-GO, para diferentes lâminas de irrigação como função da uniformidade de aplicação. **Engenharia Agrícola**, v. 32, p. 110–120, 2012.

MARENGO, J. A. et al. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate dynamics**, v. 38, p. 1829–1848, 2012.

MARENGO, J. A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. **Climatic Change**, v. 129, p. 103–115, 2015.

MELLO, C. R. DE et al. Assessing the climate change impacts on the rainfall erosivity throughout the twenty-first century in the Grande River Basin (GRB) headwaters, Southeastern Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, p. 8683–8698, 2015.

MENDEZ, M. et al. Performance evaluation of bias correction methods for climate change monthly precipitation projections over Costa Rica. **Water**, v. 12, n. 2, p. 482, 2020.

MIRANDA, E. E. DE. Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa monitoramento por satellite. 2005.

MOTA, L. et al. Balanço hídrico climatológico e classificação climática da região de Sinop, Mato Grosso. **Scientific Eletronic Archives**, v. 3, p. 38–44, 2013.

MÜLLER, G. V.; LOVINO, M. A.; SGROI, L. C. Observed and projected changes in temperature and precipitation in the Core crop region of the humid pampa, Argentina. **Climate**, v. 9, n. 3, p. 40, 2021.

NUÑEZ, M. N.; BLÁZQUEZ, J. Climate change in La Plata basin as seen by a high-resolution global model. 2014.

PARREIRA, A. G. B. et al. Balanço hídrico climatológico para o município de Rio Verde, Goiás. **Científic@-Multidisciplinary Journal**, v. 6, n. 1, p. 26–33, 2019.

REIMANN, C. et al. **Statistical data analysis explained: applied environmental statistics with R**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2011.

RIAHI, K. et al. RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. **Climatic change**, v. 109, p. 33–57, 2011.

RINGARD, J.; SEYLER, F.; LINGUET, L. A quantile mapping bias correction method based on hydroclimatic classification of the Guiana shield. **Sensors**, v. 17, n. 6, p. 1413, 2017.

ROCHA, N. S. et al. Potential impacts of air temperature rise in the hydric balance of Brazilian Pampa biome. **Acta Geophysica**, v. 69, n. 4, p. 1427–1445, 2021.

RODRIGUES, G. S. et al. Climatological hydric balance and the trends analysis climatic in the region of Machado in Minas Gerais State, Brazil. **American Journal of Climate Change**, v. 7, n. 4, p. 558–574, 2018.

SÁNCHEZ, E. et al. Regional climate modelling in CLARIS-LPB: a concerted approach towards twentyfirst century projections of regional temperature and precipitation over South America. **Climate Dynamics**, v. 45, p. 2193–2212, 2015.

SCHILLING, K. E. et al. Impact of land use and land cover change on the water balance of a large agricultural watershed: Historical effects and future directions. **Water Resources Research**, v. 44, n. 7, 2008.

SCHMIDT, D. M.; LIMA, L. C.; JESUS, E. DOS S. Variabilidade climática da disponibilidade hídrica na região semiárida do estado do Rio Grande do Norte. v. 41, n. 3, p. 483–491, 2018.

SEN, A. A simpler stability criterion for a class of nonlinear systems. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 13, n. 4, p. 451–452, 1968.

SOUZA, T. S. DE; NASCIMENTO, P. DOS S. Sequential climatic water balance applied in the hydrographic region of Paraguaçu, in Brazil. **Sustainable Water Resources Management**, v. 8, n. 1, p. 18, 2022.

SOUZA, L. S. et al. **Determinação do coeficiente de cultura do milho (*Zea mays* L.) sob condições de semiárido brasileiro.** CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16., 2010, Belém, PA, 2010.

SPEHAR, C. R.; TRECENTI, R. Desempenho agrônômico de espécies tradicionais e inovadoras da agricultura em semeadura de sucessão e entressafra no cerrado do planalto central brasileiro. **Biosci. j.(Online)**, p. 102–111, 2011.

SUÁREZ, D. F. P.; ROMÁN, R. M. S. Consumo de água em arroz irrigado por inundação em sistema de multiplas entradas. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 78–78, 2016.

TAVARES, P. DA S. et al. Water balance components and climate extremes over Brazil under 1.5 C and 2.0 C of global warming scenarios. **Regional Environmental Change**, v. 23, n. 1, p. 40, 2023.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. **Journal of hydrology**, v. 456, p. 12–29, 2012.

THAYER, A. W. et al. Integrating agriculture and ecosystems to find suitable adaptations to climate change. **Climate**, v. 8, n. 1, p. 10, 2020.

THEMESSL, M. J.; GOBIET, A.; LEUPRECHT, A. Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 10, p. 1530–1544, 2011.

THOMSON, A. M. et al. RCP4. 5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. **Climatic change**, v. 109, p. 77–94, 2011.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. [s.l: s.n.]. v. 8

VALE, T. M. C. DO et al. Climate and water balance influence on agricultural productivity over the Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, n. 2, p. 879–900, 2023.

VASQUES, G. M. et al. **Soil Available Water Maps for Brazil at 0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-100 and 100-200 cm Depth Intervals with 90 m Spatial Resolution. Version 2021.** Embrapa Solos, Rio de Janeiro, Brazil, , 2021.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. Cornell University, Ithaca, NY, USA: Academic press, 2011. v. 100

XAVIER, A. C. et al. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390–8404, 2022a.

XAVIER, A. C. F. et al. Evaluation of Quantile Delta Mapping as a bias-correction method in maximum rainfall dataset from downscaled models in São Paulo state (Brazil). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 1, p. 175–190, 2022b.

3. CONCLUSÕES GERAIS

Com a realização do estudo, pode-se concluir que:

A correção do viés melhor consideravelmente as variáveis climáticas e possibilitou a utilização delas para processamentos posteriores.

Para os polos de irrigação estudados, foi observado uma tendência de aumento significativo da ETo dos dados históricos para os polos do cerrado (AA, OB, PC). A precipitação nestes polos mesmo não apresentando tendências significativas, os dados indicam redução de 1981 a 2098. Para o polo dos pampas (SM), mesmo ambas as variáveis não sendo significativo, a ETo histórica tende a diminuir enquanto a precipitação tende a aumentar.

O BHC anual e sequencial mostrou uma predominância de DEF para os polos do cerrado, sendo observado uma tendência de aumento do DEF nesses polos até 2098. O polo de SM, o BHC anual o período de EXC será atrasado, alterando os meses mais úmidos e secos dessa região. O BHC sequencial para este polo não apresentou predominância de um componente, tendo períodos de EXC e DEF variando entre si.

As culturas de verão serão os mais afetados pelas mudanças climáticas, caso se mantenham o cultivo nas datas que são feitas hoje. Com o aumento da precipitação, a necessidade de água a ser repostada pela irrigação será reduzida e os acionamentos também. Os demais cultivos, sofrerão alterações pequenas em relação ao período histórico.

Para os dados futuros, no geral, mesmo ambos os cenários de mudanças climáticas (RCP 4.5 e RCP8.5) mostrarem redução da precipitação e aumento da ETo, o cenário mais pessimista de (RCP 8.5) causará mais impactos e riscos para o cultivo.