

DOI: <https://doi.org/10.59824/rnrh.v6.329>

EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA REGIÃO NORTE DE MINAS GERAIS

Effects of climate change in the northern region of Minas Gerais

Douglas Roberto Neres¹
João Paulo Pereira Santos²
Marcelo Rossi Vicente³
Ronaldo Medeiros dos Santos⁴
Patricia de Oliveira e Lucas⁵

RESUMO

A região Norte de Minas Gerais, caracterizada por clima semiárido e baixa regularidade de chuvas, enfrenta grandes desafios relacionados à disponibilidade de recursos hídricos, o que afeta diretamente a agricultura e a economia local. Com o avanço das mudanças climáticas, modelos climáticos sugerem que esses fenômenos podem se intensificar em algumas regiões, resultando em períodos de seca mais prolongados e intensos, além da ocorrência de eventos climáticos extremos. Este estudo utilizou o modelo climático global FIO-ESM v2.0, dentro dos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, para avaliar as alterações nos padrões de temperatura e precipitação na região norte do estado de Minas Gerais, entre os anos de 2021 e 2060, além do impacto destas alterações no balanço hídrico climatológico (BHC), em quatro localidades da região. Os resultados indicaram uma tendência de aumento nos valores de temperatura máxima, mínima, além dos volumes de precipitação. Observou-se também um aumento dos períodos de déficit hídrico nas quatro localidades analisadas. Esses resultados sugerem desafios significativos para a gestão dos recursos hídricos e a agricultura local, reforçando a necessidade de políticas de adaptação e mitigação.

Palavras-Chave: Balanço hídrico climatológico; Modelos climáticos globais; IPCC.

¹ Graduado em Engenharia Florestal pelo Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais (IFNMG). Técnico em informática integrado ao ensino médio pelo IFNMG.

² Graduado em andamento em Engenharia Florestal no IFNMG.

³ Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Engenharia Agrícola pela UFV. Graduado em Agronomia pela UFV. Professor no IFNMG.

⁴ Doutor em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade de Brasília (UNB). Mestre em Ciência Florestal pela UFV. Graduado em Engenharia de Agrimensura pela UFV. Professor no IFNMG.

⁵ Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestre em Engenharia Elétrica pela UFMG. Especialista em Engenharia de Sistemas pela Universidade Estadual de Montes Claros (UNIMONTES). Graduado em Sistemas de Informação pela UNIMONTES. Professora no IFNMG.

ABSTRACT

The northern region of Minas Gerais, characterized by a semi-arid climate and low rainfall regularity, faces significant challenges related to water resource availability, directly impacting agriculture and the local economy. As climate change progresses, climate models suggest that these phenomena may intensify in certain areas, leading to longer and more severe drought periods, as well as the occurrence of extreme weather events. This study employed the global climate model FIO-ESM v2.0 under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios to assess changes in temperature and precipitation patterns in the northern region of Minas Gerais between 2021 and 2060, as well as the impact of these changes on the climatological water balance (CWB) in four locations in the region. The results showed a tendency for increased maximum and minimum temperature values, along with higher precipitation volumes. An increase in water deficit periods was also observed in the four analyzed locations. These findings highlight significant challenges for water resource management and local agriculture, underscoring the need for adaptation and mitigation policies.

Keywords: *Water balance climatology; Global climate models; IPCC.*

Data de submissão: 15/09/2024

Data de aprovação: 18/12/2024

1 INTRODUÇÃO

A questão climática é amplamente pesquisada em todo o mundo. Sendo foco de debates, seus efeitos são progressivamente considerados no desenvolvimento de políticas socioeconômicas (PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS - IPCC, 2021). No Brasil, já se observam os efeitos das mudanças climáticas nas alterações dos padrões sazonais e no aumento de fenômenos extremos, como longas secas, enchentes e temperaturas nunca antes registradas (Bazzanela, 2022).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, do inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*), órgão da Organização da Nações Unidas (ONU), compila as pesquisas climáticas realizadas por todo mundo em relatórios para embasar o desenvolvimento de políticas ambientais. Em seu sexto relatório, o IPCC apontou que a temperatura do ar no Brasil aumentou 0,15°C por década, desde 1961 até 2015, e as projeções realizadas para até o fim do século XXI indicam grandes variações em clima e precipitação (IPCC, 2021; Correa *et al.*, 2022).

O Norte de Minas tem uma considerável parte de sua extensão dominada pelo semiárido, caracterizado por volumes pluviométricos reduzidos e alta irregularidade na

sazonalidade das chuvas. Essas características tornam a região suscetível a déficits hídricos recorrentes, causando uma considerável instabilidade socioeconômica (Marengo *et al.*, 2011).

Os SSPs (*Shared Socioeconomic Pathways*) são cenários socioeconômicos definidos por cientistas de diversas áreas e, posteriormente, usados para simular projeções climáticas por meio dos Modelos de Circulação Global (GCMs, do inglês *Global Climate Models*), com base em diferentes projeções de emissão de gases de efeito estufa (O'Neill *et al.*, 2016). No entanto, os GCMs estão em constante aperfeiçoamento, e sua precisão pode variar conforme as características regionais (Deepthi; Sivakumar, 2022; Zhang *et al.*, 2022). O GCM FIO-ESM v2.0 tem mostrado bons resultados nas regiões semiáridas do Brasil e em áreas ligeiramente mais úmidas (Dantas *et al.*, 2022; Firpo *et al.*, 2022; Bazzanela, 2022).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Mudanças climáticas – IPCC

As mudanças climáticas e suas consequências representam um dos grandes desafios para o desenvolvimento humano seguro e sustentável. As atividades antrópicas, aliadas às fragilidades dos ecossistemas, geram um alto grau de incerteza, pois os eventos climáticos extremos e alterações sazonais, como secas prolongadas e mudanças nos padrões de precipitação, resultantes desse fenômeno, afetam diretamente a segurança hídrica da sociedade (Medeiros; Oliveira; Avila- Diaz, 2022).

Com o objetivo de orientar as políticas globais de mitigação e aprofundar o entendimento sobre as mudanças climáticas em todo o mundo, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) criou, em 1988, o IPCC, como um órgão da ONU. Esse órgão avalia constantemente, de maneira abrangente e com base em dados científicos, os efeitos das mudanças climáticas e suas consequências em todo o planeta, disponibilizando relatórios para apoiar a tomada de decisões políticas, econômicas e sociais no enfrentamento das mudanças climáticas (IPCC, 2022).

2.2 Coupled Model Intercomparison Project

Com o surgimento de evidências científicas sobre o grande impacto das atividades humanas no meio ambiente e a crescente preocupação global em relação às mudanças climáticas, foi iniciado, em 1980, pelo Conselho Internacional de Ciência (ISC, do inglês *International Science Council*), em colaboração com a Organização Meteorológica Mundial (OMM), o Programa Mundial de Pesquisa Climática (WCRP, do inglês *World Climate Research Programme*). Em 1993, a Comissão Oceanográfica Intergovernamental (COI) e a UNESCO também passaram a integrar o programa (WCRP, 2023).

O WCRP foi criado para coordenar e facilitar a pesquisa climática internacional, analisando as interações dinâmicas entre os sistemas naturais e sociais que afetam o clima em várias escalas e disciplinas. O objetivo é contribuir para o desenvolvimento de políticas gerais relacionadas ao clima (WCRP, 2023).

Posteriormente, com o intuito de promover, coordenar e padronizar as pesquisas sobre mudanças climáticas, foi iniciado, em 1995, o *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP), que focou na promoção, coordenação e padronização das pesquisas sobre os GCMs realizadas por diversas comunidades científicas (WCRP, 2023).

Os GCMs (Modelos de Circulação Global) são amplamente empregados para simular diversas variáveis climáticas históricas e projetadas para estudos de mudanças climáticas (Stouffer *et al.*, 2017). De forma genérica os modelos globais trabalham reproduzindo os fenômenos que envolvem a temperatura atmosférica; pressão atmosférica; umidade relativa; velocidade e direção do vento; temperatura da superfície do mar; circulação oceânica; concentrações de gases de efeito estufa; cobertura de gelo e neve; radiação solar. Este processo leva em consideração o comportamento matemático das variáveis e suas interações no meio global (Eyring *et al.*, 2016).

As avaliações dos GCMs são feitas, normalmente, com base em uma série de métricas estatísticas e/ou classificação, aplicadas em diferentes escalas de espaço e tempo (Yazdandoost *et al.*, 2021).

Ao coletar e arquivar os resultados dos GCMs em um formato padronizado, o CMIP torna os dados acessíveis para toda a comunidade científica e usuários, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias que promovem resultados mais claros sobre o clima e facilitam a compreensão de seu comportamento (Tian; Dong, 2020).

Atualmente, o CMIP está em sua sexta fase (CMIP6) e, a cada fase, contribui de forma significativa para as questões climáticas globais (WCRP, 2023). O CMIP abrange uma ampla gama de equipes de pesquisa climática em todo o mundo com seus critérios de parametrização, e, conseqüentemente, engloba dezenas de modelos de acoplamento climático (Eyring *et al.*, 2016).

2.4 FIO-ESM v2.0

Entre os diversos modelos do CMIP6, o *First Institute of Oceanography Earth System Model* versão 2.0 (FIO-ESM v2.0), desenvolvido pelo *Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology*, que utiliza o *Community Atmospheric Model* versão 5.0 (CAM5), segundo Neale *et al.*, 2010, tem apresentado resultados interessantes.

Este GCM tem mostrado um grau favorável de compatibilidade para regiões como caatinga, cerrado e mata atlântica, apresentando bons resultados em termos de precipitação, temperatura e parâmetros como viés e correlação espacial (Dantas *et al.*, 2022; Firpo *et al.*, 2022; Bazzanela, 2022).

2.5 Cenários futuros de mudanças climáticas

O IPCC apresenta em seus relatórios as características atuais do ciclo climático e suas conseqüências. Previsões desenvolvidas no CMIP apontam os prováveis desdobramentos climáticos, a partir das possíveis ações antropogênicas (IPCC, 2022; O'Neill *et al.*, 2016). Estes cenários no CMIP6 são trabalhados no *Scenario Model Intercomparison Project* (ScenarioMIP) (O'Neill *et al.*, 2016).

No desenvolvimento dos cenários, o ScenarioMIP utiliza duas métricas em conjunto. A primeira avalia os possíveis futuros da sociedade, chamada de *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs). Essas projeções são baseadas em variáveis como: crescimento populacional, distribuição de riqueza e desigualdades sociais, tecnologia e inovação, políticas e governança, mudanças no uso e cobertura da terra, estilos de vida e valores sociais, e transformações na agricultura. A partir dessas variáveis, são construídos cinco cenários SSP: o SSP1 e o SSP5 indicam desenvolvimento positivo, enquanto o SSP3 e o SSP4

apontam para baixo desenvolvimento, e o SSP2 descreve um cenário intermediário de desenvolvimento (O'Neill *et al.*, 2016).

A segunda métrica usada pelo ScenarioMIP é conhecida como *Representative Concentration Pathways* (RCP), que avalia a concentração de gases de efeito estufa (GEE) ao longo do tempo, até o ano de 2100. Esta métrica estima o quanto de energia, em *watts* por metro quadrado (W/m^2), o sistema climático absorve em resposta à concentração de GEE, e as consequências climáticas decorrentes desses cenários. Os valores mais comumente usados na literatura são $2,6W/m^2$, $4,5W/m^2$, $7,0W/m^2$ e $8,5W/m^2$ (Tebaldi *et al.*, 2021).

Os RCPs e SSPs são combinados para criar cenários climáticos e socioeconômicos que abrangem uma ampla gama de possíveis realidades futuras, variando de cenários muito favoráveis a cenários bastante críticos (O'Neill *et al.*, 2016; Dantas *et al.*, 2022). Como exemplo, o SSP2-4.5 e o SSP5-8.5. O SSP2-4.5 reflete um avanço climático moderado, sem mudanças drásticas, em que as variáveis climáticas permanecem próximas aos padrões históricos. Já o SSP5-8.5 teoriza um mundo de desenvolvimento social positivo, mas baseado em altas emissões de combustíveis fósseis, resultando em um aumento significativo no efeito estufa.

2.6 Balanço hídrico climatológico

A agricultura irrigada é uma atividade altamente intensiva no uso de recursos hídricos, dessa forma, a gestão de recursos hídricos deve ter uma abordagem de usos múltiplos da água, requerendo uma atuação integrada dos diversos setores que concorrem pelo seu uso (Rodrigues; Domingues; Christofidis, 2017). Nesse contexto, obter informações detalhadas sobre o regime hídrico local é importante para o desenvolvimento de empreendimentos agrícolas que dependem desse recurso.

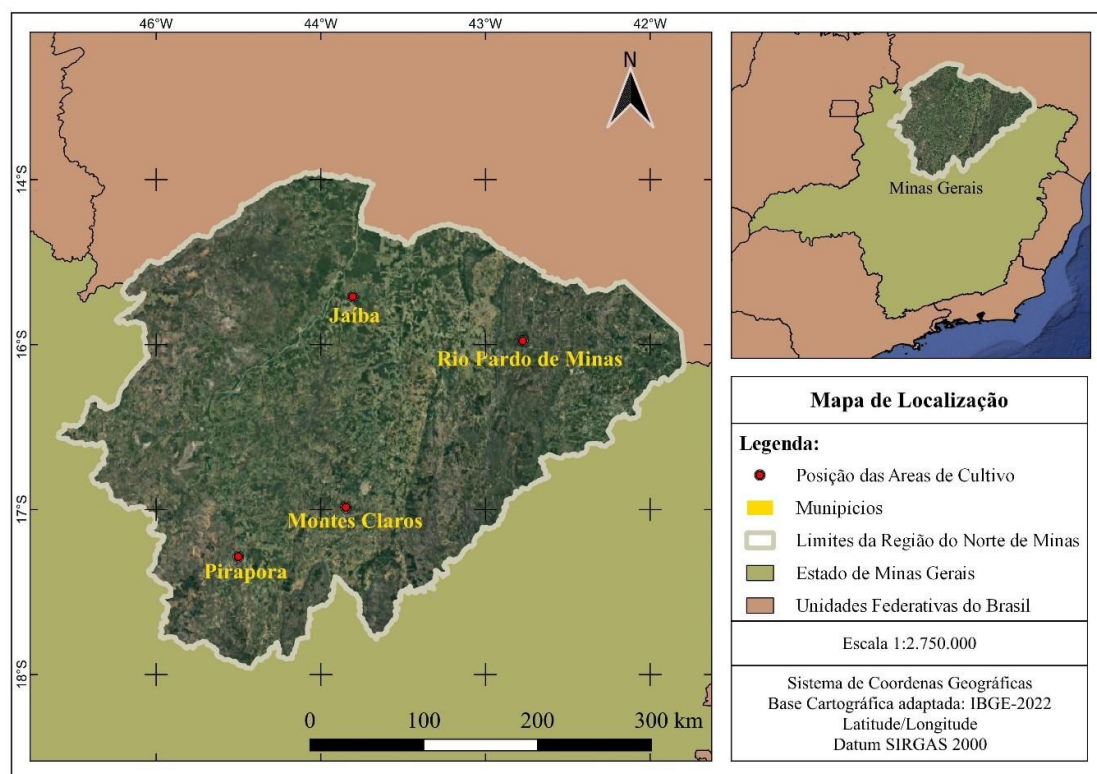
Para determinar o regime hídrico de uma área, o balanço hídrico climatológico (BHC), desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955), permite a avaliação sem a necessidade de medir diretamente as condições do solo. O balanço tem como objetivo essencial a quantificação do fluxo de entrada e saída da água disponível no solo. Para isso, são computados o fluxo de precipitação pluvial (P), a evapotranspiração potencial (ETP) e a capacidade de água disponível, a fim de estimar o BHC mensal da região.

3 MATERIAS E MÉTODOS

3.1 Descrição da área de estudo

A região de interesse da pesquisa foi o Norte de Minas Gerais (MAPA 1). A região é uma das 12 mesorregiões que compõem o estado mineiro. Com uma área estimada em 128.454,108 km², abrange 89 municípios, nos quais se espalha uma população de 1.779.701 habitantes (ASSOCIAÇÃO DOS MUNICÍPIOS DA ÁREA MINEIRA DA SUDENE - AMANS, 2023).

Mapa 1 – Localização da região avaliada



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

O clima predominante da região é o Aw (tropical com período seco no inverno), porém uma parcela das microrregiões de Salinas e Janaúba apresentam o clima predominante BWh (árido quente) com uma pequena faixa BSh (semiárido quente), já na divisa com o estado da Bahia (Martins *et al.*, 2018). O ano hidrológico inicia-se, na maior porção do Norte de Minas, em 02 de novembro (Guimarães; Landau; Barros, 2009).

Com altitude que varia de 400 metros a 1100 metros acima do mar, o Norte de Minas encontra-se em uma zona de transição de biomas. Possuindo vegetação heterogênea, apresenta espécies da mata atlântica, cerrado e caatinga. Seu solo apresenta uma composição heterogênea que varia entre Neossolo Litólico; Nitossolo Vermelho; Latossolo Vermelho; Chernossolo Háptico; Cambissolo Háptico; Neossolo Flúvico; Latossolo Amarelo; Latossolo Vermelho-Amarelo; Gleissolo Háptico; Nitossolo Háptico; Argissolo Vermelho-Amarelo; Neossolo Regolítico e Neossolo Quartzarênico (Neto *et al.*, 2018).

Destaca-se no uso e cobertura da terra da região, as pastagens, empreendimentos reflorestais e atividades agrícolas em meio a mata nativa (Cerqueira *et al.*, 2021; Sena-Souza *et al.*, 2002).

O Norte de Minas contempla as bacias hidrográficas dos rios São Francisco, Jequitinhonha e Pardo, conforme a IDE Sisema (2023), sendo o consumo hídrico voltado principalmente para atividades agrícola, agropecuária, indústria, mineração e consumo humano (Brito, 2007).

3.2 Base de dados

As variáveis climáticas temperatura mínima (TMIN), temperatura máximas (TMAX) e a precipitação (Pr) foram extraídas da base de dados *WorldClim* 2.1. Para o processamento de dados geográficos foi utilizado o *software* gratuito Qgis na versão 3.28.9. Foram utilizados dados históricos do ano de 1990 a 2018.

As projeções futuras são referentes aos períodos de 2021 a 2040 e de 2041 a 2060. Toda a base de dados geográfica foi adquirida no formato GeoTiff (.tif), com uma resolução espacial de 2,5 minutos (~21 km² no equador), sendo cada arquivo correspondente ao período de 1 mês.

Utilizou-se o modelo FIO-ESM v2.0 nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. O SSP2-4.5 que estima um futuro sem drásticas alterações climáticas e socioeconômicas, ou seja, a manutenção dos atuais padrões de emissões de GEE. O SSP5-8.5 estima um cenário futuro com altas emissões de GEE.

3.3 Balanço Hídrico Climático

O Balanço Hídrico Climático (BHC), utilizado por Santos *et al.* (2019), e desenvolvido por Rolim, Sentelhas e Barbieri (1998), foi calculado por meio de planilha automática “BHnorm”. Por meio de pixels específicos, referente às localidades de Jaíba, Montes Claros, Pirapora e Rio Pardo de Minas, obteve-se dados de precipitação e temperatura média.

De posse dos dados de temperatura máxima e mínima para cada localidade estudada, determinou-se a evapotranspiração potencial (ETP) mensal. Descrito por Pereira Sedyama e Vila Nova (2013), o método de estimativa da ETP, utilizado para o BHC, foi o proposto por Thornthwaite (1955). Neste método, primeiro determina-se a evapotranspiração potencial padrão (ETP_P), que é definida como valor típico de um mês padrão com 30 dias, sendo que cada dia tem exatamente 12 horas de fotoperíodo (N). A ETP_P foi determinada pelas Equações 1 ou 2, conforme a temperatura média mensal (T_m).

$$ETP_P = 16 \left(\frac{10 T_m^a}{I} \right) \quad [0 \leq T_m \leq 26,5^\circ C] \quad (1)$$

$$ETP_P = -415,85 + 32,24 T_m - 0,43 T_m^2 \quad [T_m > 26,5^\circ C] \quad (2)$$

Onde: ETP_P = evapotranspiração potencial padrão, mm mês⁻¹; T_m = temperatura média, °C; I e a = índices térmicos, adimensional.

Os dois índices térmicos (I e a), foram obtidos pelas Equações 3 e 4.

$$I = 12 (0,2 T_a)^{1,514} \quad (3)$$

$$a = 0,49239 + 1,7912 \cdot 10^{-2} x I - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7} x I^3 \quad (4)$$

Onde: T_a = Temperatura média anual normal, °C.

Após a obtenção do fator corretivo (f) (Equação 5), determinou-se a ETP pela Equação 6.

$$f = \left(\frac{N}{12} \right) \left(\frac{ND}{30} \right) \quad (5)$$

$$ETP = ETP_P f \quad (6)$$

Onde: F = fator corretivo, adimensional; N = fotoperíodo do mês em questão, horas; ND = número de dias no mês, dias; ETP = evapotranspiração potencial, mm mês⁻¹.

A metodologia de BHC utilizada foi a proposta por Thornthwaite e Mather (1955), descrito por Mendonça (1958), entre o conjunto etapas e equações utilizadas, destacam-se, a determinação da evapotranspiração real (ETR), obtida pela equação 6 e 7.

$$ETR = ETP \quad [P \geq ETP] \quad (7)$$

$$ETR = P + \Delta ARM \quad [P < ETP] \quad (8)$$

Onde: ETR = evapotranspiração real, mm mês⁻¹; P = precipitação mensal, mm; ΔARM = variação do armazenamento, mm.m

O armazenamento (ARM) foi calculado, para uma sequência de n meses com estiagem após a estação chuvosa, ou seja, se P-ETP for negativo, através da Equação 9.

$$ARM = CAD e^{\left(\frac{Neg. Acum.}{CAD}\right)} \quad (9)$$

Onde: ARM = armazenamento de água no solo, mm; CAD = capacidade de água disponível, mm; $Neg. Acum.$ = negativo acumulado, mm.

Já o negativo acumulado (Neg. Acum.), que representa o acúmulo de déficit hídrico ao longo do tempo, foi calculado utilizando a Equação 10, quando a P-ETP for positiva.

$$Neg. Acum. = CAD \ln \left(\frac{ARM}{CAD} \right) \quad (10)$$

A variação do armazenamento (ΔARM) foi calculada utilizando a Equação 10.

$$\Delta ARM = ARM_i - ARM_{i-1} \quad (11)$$

Onde: ARM_i = armazenagem do mês i , mm; ARM_{i-1} = armazenagem do mês anterior ao mês i , mm.

Conforme Vianello e Alves (2012), a capacidade de água disponível (CAD) adotada foi de 100 mm. Desta forma, calcularam-se os parâmetros BHC, que forneceram estimativas da deficiência hídrica no solo (DEF), o excedente hídrico (EXC), a retirada hídrica para atividades antrópicas (RET) e a reposição hídrica advinda da precipitação (REP).

3.4 Análise dos dados

O trabalho foi dividido em duas etapas. A primeira consistiu em uma análise da distribuição espacial das variáveis meteorológicas - precipitação total e médias anuais das temperaturas máxima e mínima - na região Norte de Minas, utilizando o modelo FIO-ESM v2.0 para diferentes cenários. Realizou-se, então, uma análise estatística descritiva, na qual foram determinados os valores máximos, mínimos e médios, além do desvio padrão (DP) e do coeficiente de variação (CV).

A segunda etapa, comparou-se os parâmetros do balanço hídrico climatológico para as localidades de Jaíba, Montes Claros, Pirapora e Rio Pardo de Minas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os dados de precipitação para a região Norte de Minas, comparando o histórico com as projeções dos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para os períodos de 2021-2040 e 2041-2060. Observa-se um aumento nas médias de precipitação em ambos os cenários. No SSP2-4.5, a média de precipitação aumentou de 936,23 mm no período histórico para 986,45 mm entre 2021 e 2040, e para 1012,02 mm entre 2041 e 2060. O cenário SSP5-8.5 apresentou um aumento ainda mais acentuado, com a média subindo para 1002,82 mm no primeiro período e para 1031,98 mm no segundo.

Os valores extremos máximos de precipitação também aumentaram em ambos os cenários, com um crescimento mais expressivo no SSP5-8.5, onde o valor máximo passou de 1603,79 mm (histórico) para 1795 mm no período de 2041-2060. Já os valores mínimos apresentaram um aumento menos expressivo.

Tabela 1 – Precipitação no Norte de Minas para diferentes cenários (SSP 245 e SSP 585) e períodos (2021-2040 e 2041-2060), além de dados históricos

SSP2-4.5	Histórico (mm)	SSP2-4.5 2021-2040 (mm)	SSP2-4.5 2041-2060 (mm)
Valor máximo	1603,79	1714	1774
Valor mínimo	639,79	641	655
Valor médio	936,23	986,45	1012,02
Desvio Padrão	135,23	152,91	157,77
C V	14,44%	15,50%	15,59%

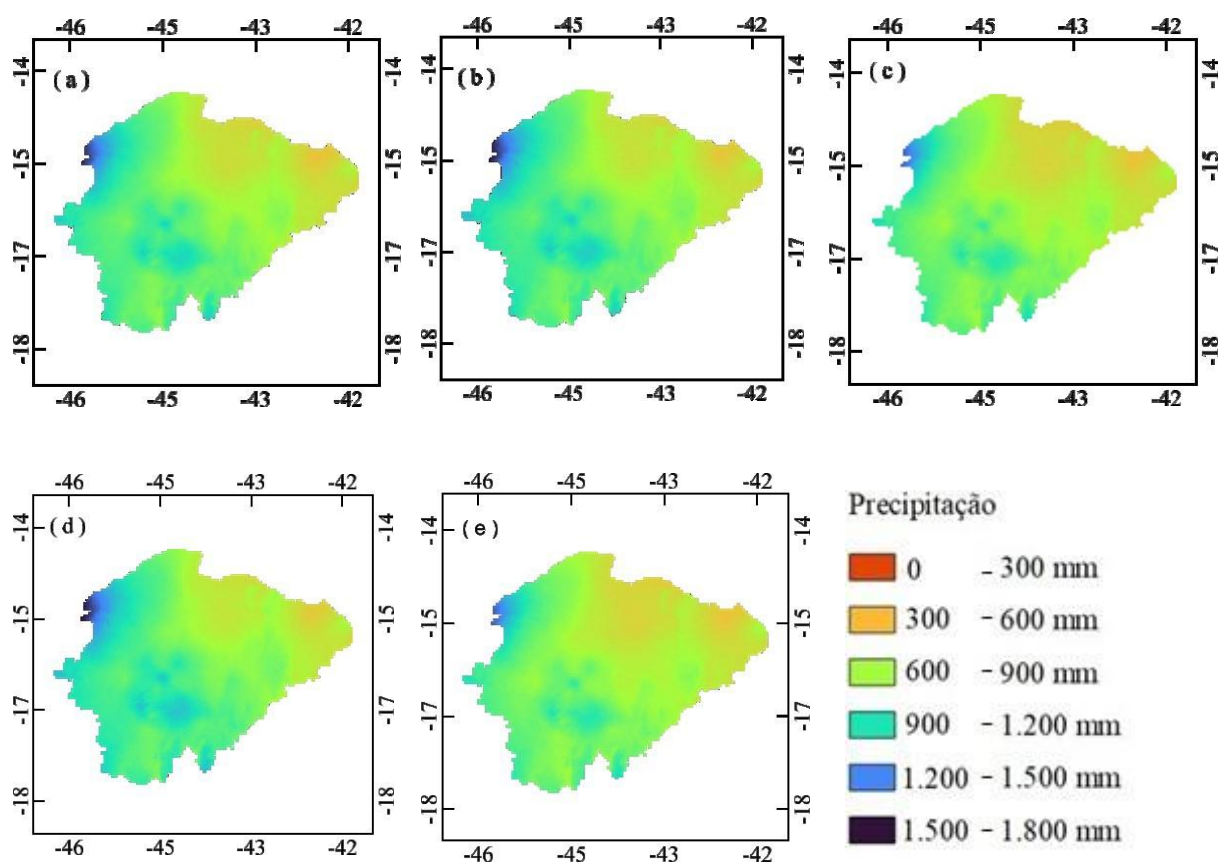
SSP5-8.5	Histórico (mm)	SSP5-8.5 2021-2040 (mm)	SSP5-8.5 2041-2060 (mm)
Valor máximo	1603,79	1748	1795
Valor mínimo	639,79	654	670
Valor médio	936,23	1002,82	1031,98
Desvio Padrão	135,23	152,75	158,39
CV	14,44%	15,23%	15,35%

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Observa-se, no Mapa 2, um aumento nas médias de precipitação ao longo do tempo em ambos os cenários. No período de 2021-2040, os volumes médios precipitados aumentaram em comparação com o histórico: de 936,23 para 986,45 mm (SSP2-4.5) e 1002,82 mm (SSP5-8.5). Este aumento foi ligeiramente superior no período de 2041-2060.

O cenário SSP5-8.5, que considera um futuro com maiores emissões de gases de efeito estufa, apresentou os maiores volumes de precipitação e maior aumento em relação ao histórico, tanto nas médias quanto nos máximos e mínimos.

Mapa 2 – Mapas de precipitação anual média, em mm, para diferentes cenários (SSP 245 e SSP 585) e períodos (2021-2040 e 2041-2060), além de dados históricos



Legenda: (a) Precipitação Total SSP 245 2021-2040
 (b) Precipitação Total SSP 245 2041-2060
 (c) Precipitação Total SSP 585 2021-2040
 (d) Precipitação Total SSP 585 2041-2060
 (e) Precipitação Total Histórica

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

A Tabela 2 apresenta os dados de temperaturas máximas para o Norte de Minas Gerais, comparando o histórico com os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para os períodos de 2021-2040 e 2041-2060. Já o Mapa 3 exibe mapas de temperatura máxima para esses cenários.

Analisando conjuntamente, observa-se o aumento geral das temperaturas máximas. O valor máximo de temperatura no cenário SSP2-4.5 aumentou de 31,31°C no histórico para 32,54°C no período de 2021-2040 e 33,15°C no período de 2041-2060. No cenário SSP5-8.5, os valores foram ainda mais altos, com a temperatura máxima subindo para 32,56°C e 33,63°C nos respectivos períodos. A média da temperatura máxima também aumentaria em ambos os cenários, passando de 29,11°C (histórico) para 31,01°C no SSP2-4.5 (2041-2060) e para

31,50°C no SSP5-8.5. Os aumentos encontrados foram inferiores aos simulados por Freitas *et al.* (2019), que observaram aumentos da temperatura em até 4°C a médio prazo (2041-2070) e até 5°C a longo prazo (2071-2100), utilizando o modelo *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* em dois cenários climáticos.

Embora sejam poucos expressivos, o desvio padrão das temperaturas máximas apresentou leve redução no cenário SSP2-4.5, passando de 1,45°C (histórico) para 1,42°C no período de 2041-2060. Já no cenário SSP5-8.5, o desvio padrão aumentou levemente no período futuro. O coeficiente de variação (CV) diminuiu ao longo do tempo em ambos os cenários, sugerindo menor variação das temperaturas máximas conforme o tempo.

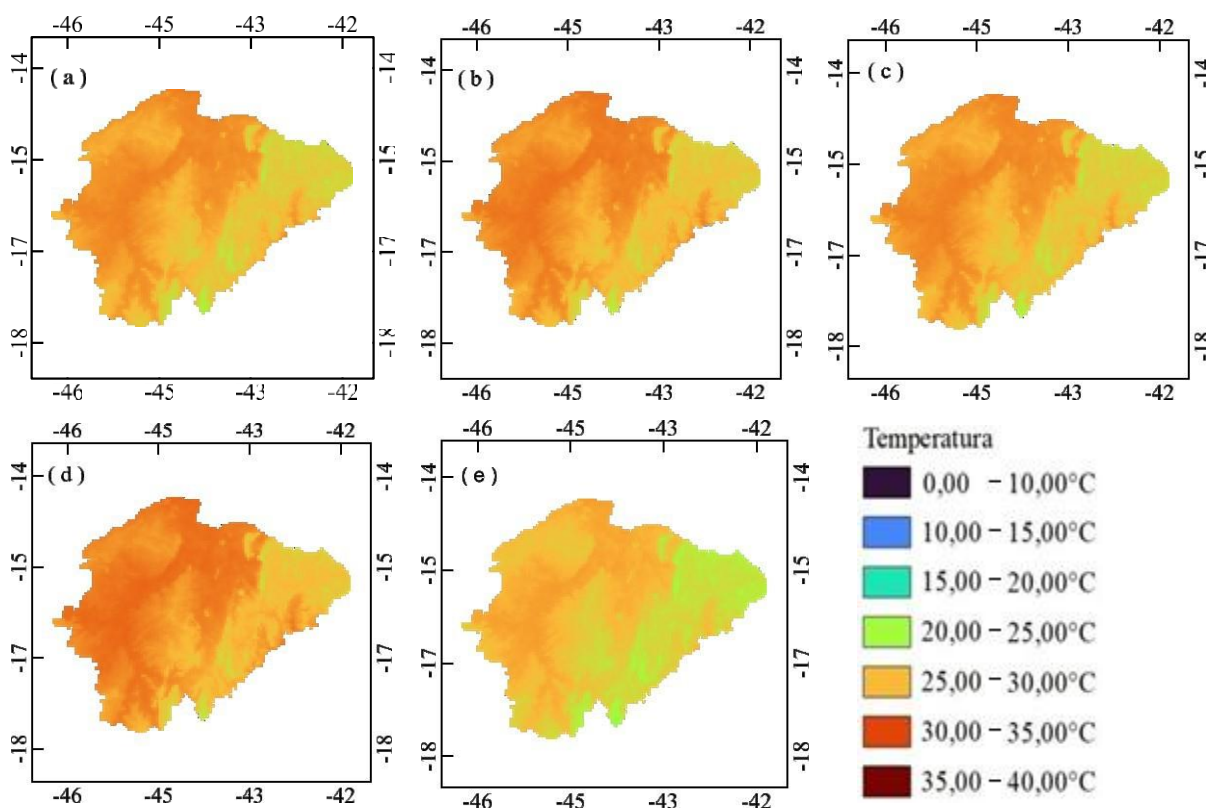
Tabela 2 – Temperaturas Máximas (TMAX) para diferentes cenários (SSP 245 e SSP 585) e períodos (2021-2040 e 2041-2060), além de dados históricos

TMAX	Histórico (°C)	SSP2-4.5 2021-2040 (°C)	SSP2-4.5 2041-2060 (°C)
Valor máximo	31,31	32,54	33,15
Valor mínimo	24,36	25,58	26,22
Valor médio	29,11	30,41	31,01
Desvio padrão	1,45	1,41	1,42
CV	4,98%	4,63%	4,58%

TMAX	Histórico (°C)	SSP5-8.5 2021-2040 (°C)	SSP5-8.5 2041-2060 (°C)
Valor máximo	31,31	32,56	33,63
Valor mínimo	24,36	25,7	26,65
Valor médio	29,11	30,43	31,5
Desvio padrão	1,45	1,43	1,44
CV	4,98%	4,70%	4,56%

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Mapa 3 – Temperatura máxima, em °C, para diferentes cenários (SSP 245 e SSP 585) e períodos (2021-2040 e 2041-2060), além de dados históricos



Legenda: (a) Média da Temperatura Máxima no SSP 245 2021-2040
 (b) Média da Temperatura Máxima no SSP 245 2041-2060
 (c) Média da Temperatura Máxima no SSP 585 2021-2040
 (d) Média da Temperatura Máxima no SSP 585 2041-2060
 (e) Média da Temperatura Máxima Histórica

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Encontram-se, respectivamente, na Tabela 3 e no Mapa 4 os valores das temperaturas mínimas e os mapas que ilustram as variações espaciais dessas temperaturas ao longo dos mesmos períodos e cenários. Assim como ocorreu com as temperaturas máximas, ocorreu um aumento geral das temperaturas mínimas.

No cenário SSP2-4.5, o valor máximo de temperatura mínima aumentou de 19,12°C (histórico) para 20,73°C no período de 2041-2060. No SSP5-8.5, o aumento foi ainda mais acentuado, chegando a 21,29°C no mesmo período. Os valores mínimos também aumentaram significativamente, de 13,23°C no histórico para 15,32°C no cenário SSP5-8.5 (2041-2060).

O desvio padrão das temperaturas mínimas apresentou um movimento ascendente constante no cenário SSP2-4.5, enquanto no SSP5-8.5 houve uma redução no período de 2021

a 2040 e um aumento no período subsequente. Já o coeficiente de variação (CV) das temperaturas mínimas diminuiu em ambos os cenários, refletindo uma menor dispersão das temperaturas mínimas ao longo do tempo, comportamento também observado com as temperaturas máximas.

Os aumentos nas temperaturas máximas e mínimas indicam um aquecimento na região Norte de Minas Gerais, com possíveis implicações para a agricultura e os recursos hídricos, já que maiores temperaturas podem intensificar a evapotranspiração e aumentar a demanda hídrica.

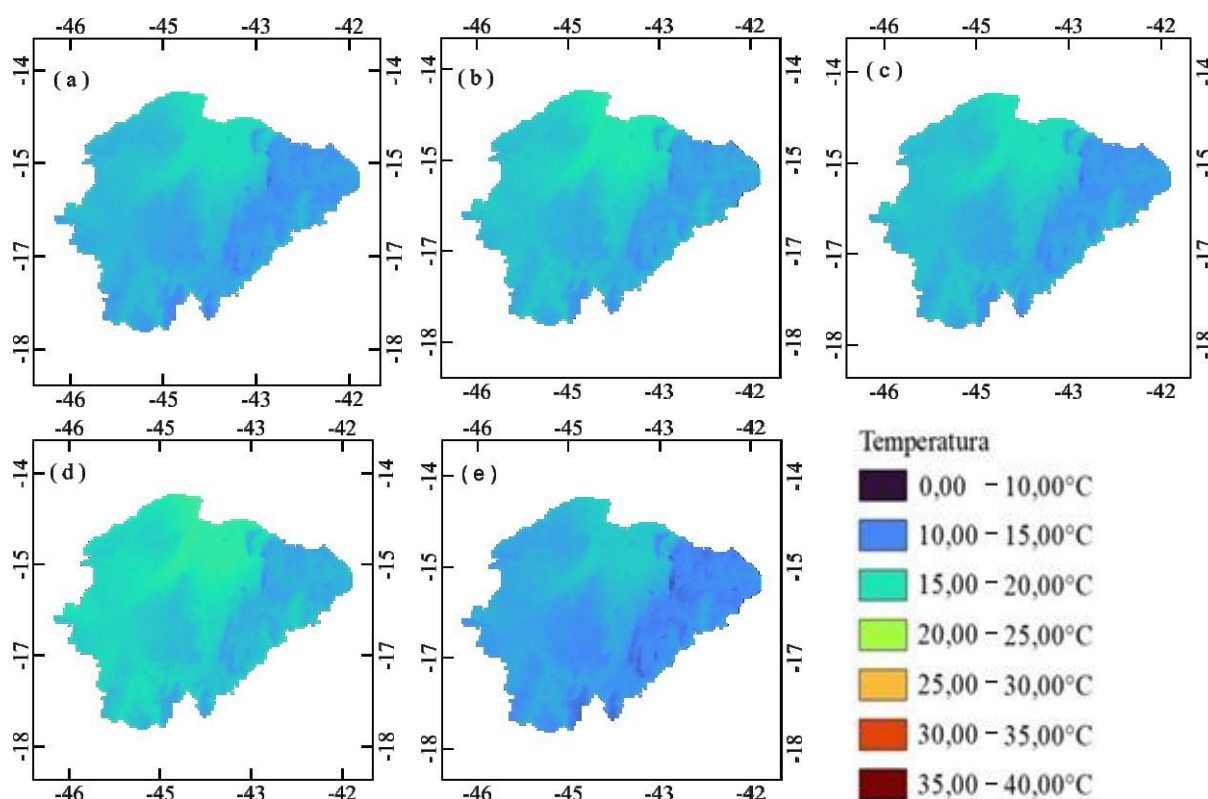
Tabela 3 – Temperaturas mínimas (TMIN) para diferentes cenários (SSP 245 e SSP 585) e períodos (2021-2040 e 2041-2060), além de dados históricos

TMIN	Histórico (°C)	SSP2-4.5 2021-2040 (°C)	SSP2-4.5 2041-2060 (°C)
Valor máximo	19,12	20,15	20,73
Valor mínimo	13,23	14,21	14,77
Valor médio	16,5	17,42	18,01
Desvio padrão	1,1176	1,14	1,14
CV	6,77%	6,54%	6,38%

TMIN	Histórico (°C)	SSP5-8.5 2021-2040 (°C)	SSP5-8.5 2041-2060 (°C)
Valor máximo	19,12	20,22	21,29
Valor mínimo	13,23	14,27	15,32
Valor médio	16,5	17,71	18,82
Desvio padrão	1,1176	1,11	1,12
CV	6,77%	6,28%	5,97%

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Mapa 4 – Temperatura Mínima, em °C, para diferentes cenários (SSP 245 e SSP 585) e períodos (2021-2040 e 2041-2060), além de dados históricos



Legenda : (a) Média da Temperatura Mínima no SSP 245 2021-2040
 (b) Média da Temperatura Mínima no SSP 245 2041-2060
 (c) Média da Temperatura Mínima no SSP 585 2021-2040
 (d) Média da Temperatura Mínima no SSP 585 2041-2060
 (e) Média da Temperatura Mínima Histórica

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

A elevação da temperatura observada em pelo menos 1°C no SSP2-4.5 no período de 2021 a 2040, e de pelo menos 2°C no SSP5-8.5 entre 2041 e 2060 apresentam-se semelhantes aos resultados encontrados por Dantas *et al.* (2022), para a região semiárida do Brasil (incluindo o norte de Minas) utilizando diferentes modelos. A elevação dos valores de temperaturas máximas, em relação à elevação reduzida das temperaturas mínimas, demonstra um aumento do gradiente térmico na região, que leva a uma maior probabilidade de extremos climáticos (Nicholls *et al.*, 2007).

A Tabela 4 apresenta os dados de Balanço Hídrico Climático (BHC) para quatro cidades do Norte de Minas Gerais (Jaíba, Montes Claros, Rio Pardo de Minas e Pirapora) nos cenários climáticos SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para os períodos de 2021-2040 e 2041-2060, sendo as

variáveis analisadas: Déficit Hídrico (DEF), Excedente Hídrico (EXC), Retiradas Hídricas (RET) e Reposição Hídrica (REP).

Diante dos dados apresentados, Jaíba poderá enfrentar um cenário preocupante alarmante de intensificação das secas. O aumento significativo do déficit hídrico, de -541,83 mm no período histórico para -652,55 mm no cenário SSP2-4.5 e -745,83 mm no SSP5-8.5 no período de 2041-2060, combinado com a redução na reposição e a ausência de excedente hídrico, indicam que a cidade terá grandes desafios relacionados à disponibilidade de água.

Já Montes Claros, embora apresente um leve aumento no excedente e na reposição hídrica, corre o risco de enfrentar desafios com o aumento significativo do déficit hídrico, passando de -164,23 mm no período histórico para -247,02 mm no SSP2-4.5 e -292,37 mm no SSP5-8.5 em 2041-2060. O crescimento das secas, mesmo que não tão acentuado quanto em outras cidades, ainda coloca a cidade em uma situação de alerta para o futuro.

O déficit hídrico em Rio Pardo de Minas aumenta de maneira considerável, passando de -256,06 mm no (período) histórico para -338,78 mm no SSP2-4.5 e -388,88 mm no SSP5-8.5, indicando um cenário crítico de aridez futura, com secas severas se tornando uma constante. A cidade está vulnerável a períodos de seca prolongada, com um grande aumento do déficit hídrico e uma diminuição na reposição e no excedente hídrico.

O excedente hídrico diminui de 105,83 mm para 73,12 mm no SSP2-4.5 e 80,68 mm no SSP5-8.5, demonstrando uma menor capacidade de armazenar água durante os períodos de maior pluviosidade. A reposição hídrica também diminui, caindo de 105,83 mm no histórico para 98,74 mm no SSP2-4.5.

A cidade de Pirapora está sujeita a desafios significativos devido ao aumento acentuado do déficit hídrico (de -344,08 mm no período histórico para -501,48 mm no SSP2-4.5 e -555,75 mm no SSP5-8.5) e à diminuição do excedente. Embora a reposição de água se mantenha estável, não será suficiente para enfrentar a intensificação das secas.

As quatro cidades analisadas no Norte de Minas Gerais apresentam riscos de um futuro de crescente aridez e menor disponibilidade hídrica. O déficit hídrico aumentará substancialmente em todas as localidades, especialmente nos cenários mais severos (SSP5-8.5), o que comprometerá as atividades econômicas, como a agricultura e o abastecimento humano. A diminuição do excedente hídrico e a reposição limitada indicam que essas regiões terão menos água disponível para armazenamento, o que agrava ainda mais o problema das secas prolongadas.

Tabela 4 – Valores do balanço hídrico climatológico de Jaíba, Montes Claros, Rio Pardo de Minas e Pirapora, para o período histórico e para os cenários futuros

Localidade	Parâmetro	Histórico(mm)	SSP245 2021-2040(mm)	SSP245 2041-2060(mm)
Jaíba	DEF	-541,83	-652,55	-702,67
	RET	-90,39	-67,46	-73,36
	REP	90,41	67,46	73,36
	EXC	0	0	0
	Parâmetro	Histórico(mm)	SSP5-8.5 2021-2040	SSP5-8.5 2041-2060
	DEF	-541,83	-634,87	-745,83
	RET	-90,39	-85,71	-85,79
	REP	90,41	85,71	85,79
EXC	0	0	0	
Localidade	Parâmetro	Histórico (mm)	SSP245 2021-2040 (mm)	SSP245 2041-2060 (mm)
Montes Claros	DEF	-164,23	-205,55	-247,02
	RET	-92,31	-95,05	-96,79
	REP	92,31	95,05	96,79
	EXC	320,62	339,7	351,95
	Parâmetro	Histórico(mm)	SSP5-8.5 2021-2040	SSP5-8.5 2041-2060
	DEF	-164,23	-228,74	-292,37
	RET	-92,31	-96,12	-97,98
	REP	92,31	96,12	97,98
EXC	320,62	355,44	348,73	
Localidade	Parâmetro	Histórico(mm)	SSP245 2021-2040(mm)	SSP245 2041-2060(mm)
Rio Pardo de Minas	DEF	-256,06	-301,65	-338,78
	RET	-97,07	-98,17	-98,74
	REP	97,07	98,17	98,74
	EXC	105,83	73,12	80,68
	Parâmetro	Histórico(mm)	SSP5-8.5 2021-2040	SSP5-8.5 2041-2060
	DEF	-256,06	-294,26	-388,88
	RET	-97,07	-98,02	-99,24
	REP	97,07	98,02	99,24
EXC	105,83	85,12	96,58	
Localidade	Parâmetro	Histórico(mm)	SSP245 2021-2040(mm)	SSP245 2041-2060(mm)
Pirapora	DEF	-344,08	-431	-501,48
	RET	-98,81	-99,5	-99,76
	REP	98,81	99,5	99,76
	EXC	77,46	69,58	78,35
	Parâmetro	Histórico(mm)	SSP5-8.5 2021-2040	SSP5-8.5 2041-2060
	DEF	-344,08	-453,06	-557,5
	RET	-98,81	-99,6	-99,86
	REP	98,81	99,6	99,86
EXC	77,46	66,29	70,36	

Legenda: Variáveis em milímetros (mm) de Déficit Hídrico (DEF);

Retiradas Hídricas (RET);

Reposição Hídrica (REP), Excedente Hídrico (EXC), entre o período histórico o período de 2021 a 2040 e 2041 a 2060 nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

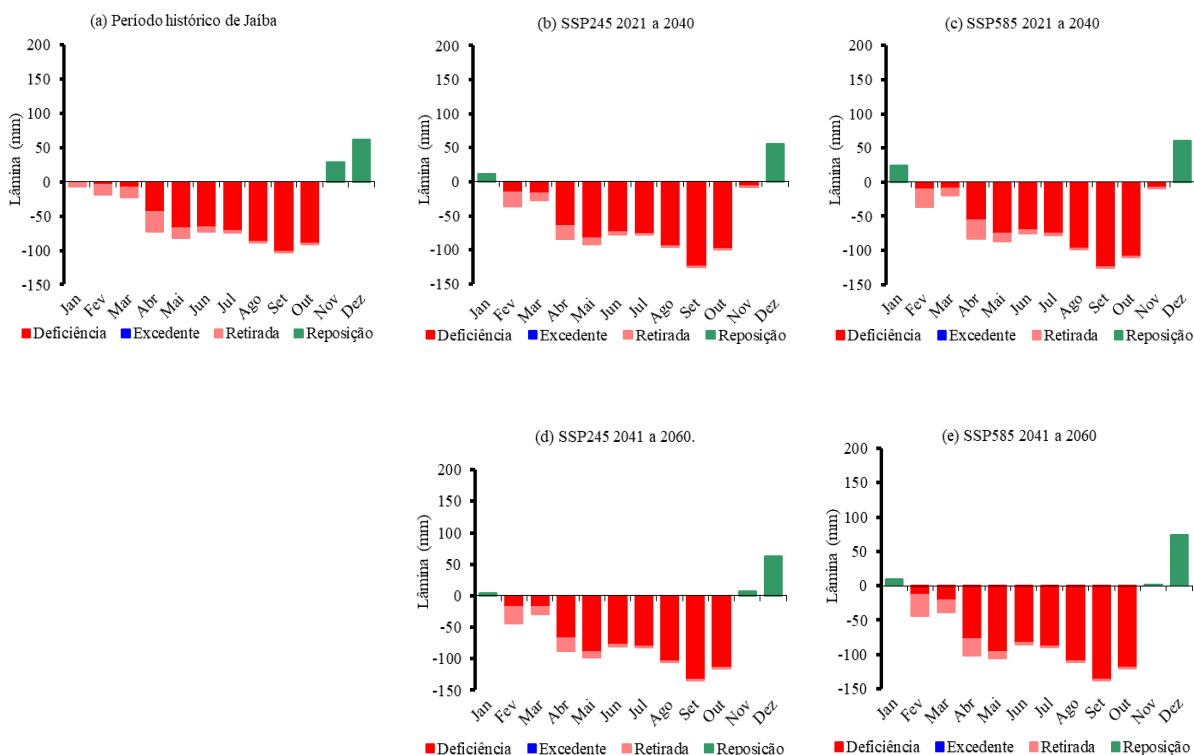
Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Os Gráficos 1, 2, 3 e 4 ilustram o comportamento do Balanço Hídrico Climático (BHC), respectivamente, nas cidades de Jaíba, Montes Claros, Rio Pardo de Minas e Pirapora, nos cenários climáticos SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para os períodos de 2021-2040 e 2041-2060.

O Gráfico 1 demonstra uma tendência de aumento no déficit hídrico ao longo do tempo. O período de seca se torna mais prolongado nos cenários futuros, com maior intensidade no SSP5-8.5. Observa-se também que a reposição hídrica (chuvas) ocorre de maneira mais fragmentada no período de 2021-2040, concentrando-se principalmente nos meses de dezembro e janeiro, com uma redução nos volumes precipitados. Já no período de 2041-2060, há uma reposição mais fragmentada, mas com volumes ainda menores.

A ausência de EXC reflete que Jaíba não possui grandes volumes de água sobrando após suprir suas necessidades básicas, o que coloca a cidade em uma situação vulnerável.

Gráfico 1 – Balanço hídrico climatológico em Jaíba

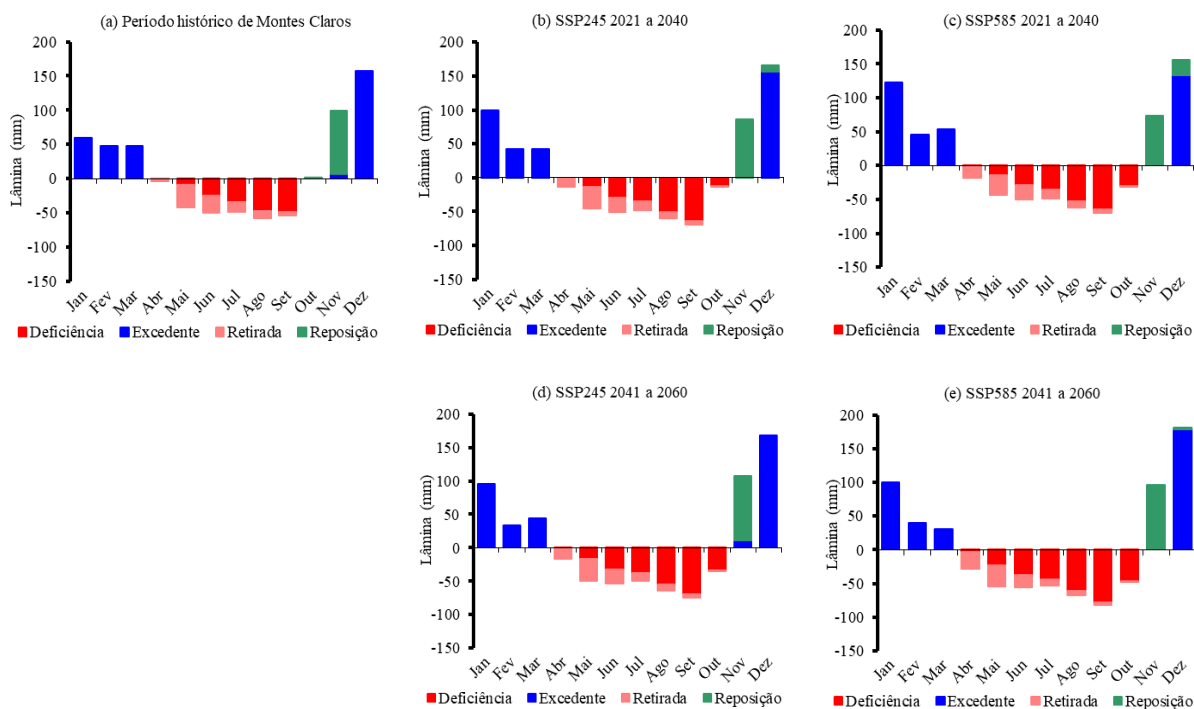


Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Em Montes Claros, no Gráfico 2, nota-se um aumento no déficit hídrico, especialmente nos meses de agosto, setembro e outubro. O déficit se intensifica nos dois cenários, com maior gravidade no SSP5-8.5 no período de 2041-2060, assim como observado

em Jaíba. A REP aumenta levemente no cenário SSP5-8.5, especialmente no mês de dezembro, sugerindo que a cidade pode ter um período de chuvas mais concentrado, porém insuficiente para compensar o déficit crescente ao longo do ano. O EXC mostra-se estável, com pequenas variações.

Gráfico 2 – Balanço hídrico climático em Montes Claros

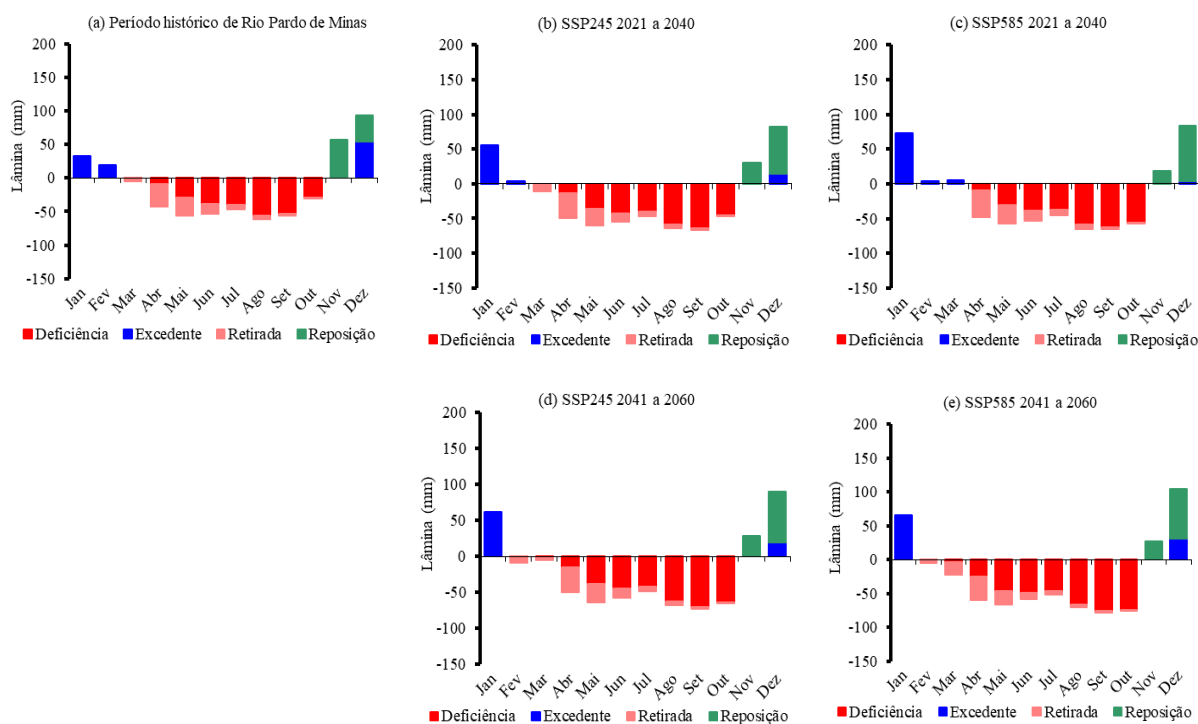


Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Em Rio Pardo de Minas, no Gráfico 3, observa-se uma queda significativa no EXC, especialmente entre 2021 e 2040 no cenário SSP5-8.5. O excedente hídrico, que normalmente ocorria de dezembro a fevereiro, passa a se concentrar apenas em dezembro e janeiro no cenário de 2041-2060.

O DEF aumenta, estendendo-se por praticamente todo o ano em 2041-2060. O cenário SSP5-8.5 apresenta uma situação crítica, com um período de déficit muito longo, refletindo as graves consequências do aquecimento global para a cidade. Já a REP se mantém estável em ambos os cenários, mas é insuficiente para sobrepor o aumento do déficit, o que sugere que a cidade enfrentará problemas de abastecimento de água.

Gráfico 3 – Balanço hídrico climático em Rio Pardo de Minas

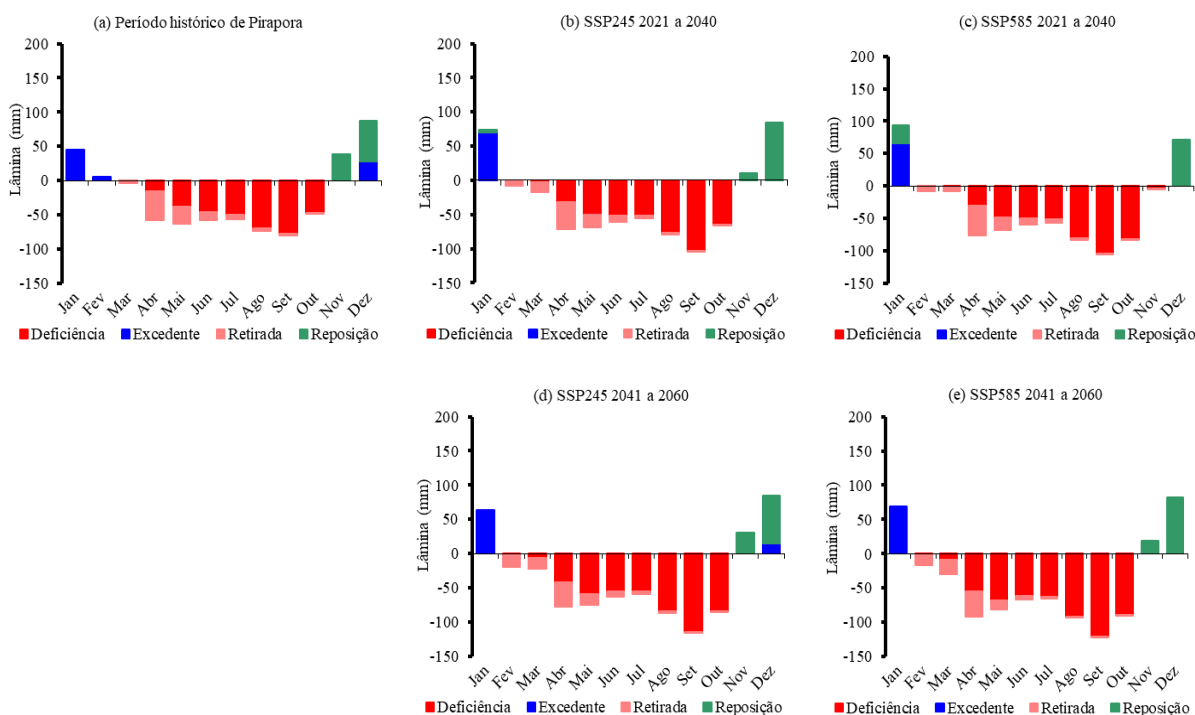


Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

A previsão para Pirapora, no Gráfico 4, será de aumento no déficit hídrico, com um agravamento maior no SSP5-8.5. O déficit, que antes ocorria principalmente entre março e outubro, se estenderá por um maior período no cenário futuro. A reposição hídrica é insuficiente para compensar o déficit prolongado.

O EXC reduz consideravelmente no SSP5-8.5, com a redução do período de chuvas mais intensas, sugerindo que Pirapora enfrentará maior dificuldade em manter reservas hídricas durante os períodos de seca.

Gráfico 4 – Balanço hídrico climático em Pirapora



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

De forma geral, os Gráficos 1, 2, 3 e 4 ilustram um aumento consistente no déficit hídrico em todas as localidades analisadas, especialmente no cenário SSP5-8.5. As secas se tornam mais longas e intensas, com uma menor reposição hídrica e redução significativa no excedente hídrico. Salienta-se também, que o aumento do déficit hídrico é intensificado pelo incremento da ETP e ETR proporcionado pela elevação da temperatura.

As cidades de Jaíba e Rio Pardo de Minas estão entre as mais vulneráveis, das localidades analisadas, com déficit hídrico extremo e ausência de excedente hídrico, o que aumenta a pressão sobre os recursos hídricos para o abastecimento humano e agrícola.

Esses resultados indicam que as cidades do Norte de Minas Gerais enfrentarão desafios consideráveis em relação à gestão da água, exigindo políticas robustas de mitigação para garantir a segurança hídrica da população e das atividades econômicas.

5 CONCLUSÃO

A análise dos cenários climáticos SSP2-4.5 e SSP5-8.5, por meio do modelo FIO-ESM v2.0, projeta alterações significativas no regime hídrico e térmico da região Norte de Minas Gerais entre 2021 e 2060. O aumento projetado na temperatura média e o prolongamento dos períodos de seca indicam um futuro potencial de maior aridez, com impactos diretos sobre a agricultura e os recursos hídricos. Em particular, o cenário SSP5-8.5, destaca-se pela intensificação dos extremos climáticos, sugerindo a necessidade urgente de estratégias de mitigação e adaptação para minimizar os impactos sobre as atividades socioeconômicas da região.

Esses resultados indicam que os impactos climáticos podem variar conforme a localidade, tornando fundamental a criação de políticas regionais de gestão dos recursos hídricos. Exemplos incluem a execução de planos diretores de recursos hídricos para as bacias hidrográficas; incentivo ao reúso de água; adoção de mecanismos de pagamento por serviços ambientais; e promoção da agricultura sustentável utilizando sistemas de irrigação mais eficientes. Além disso, práticas agrícolas mais resilientes podem ser adotadas, como modelos sustentáveis de agricultura, escolha de cultivos mais tolerantes a temperaturas elevadas e estresse hídrico, rotação de culturas, entre outros.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO DOS MUNICÍPIOS DA ÁREA MINEIRA DA SUDENE - AMAMS. **Norte de Minas teve 56 municípios com queda da população entre 2010 e 2022; AMANS reuniu prefeitos [...]**. Disponível em:

http://www.amams.org.br/6/Noticias_3/NorteDeMinasTeve56MunicipiosComQuedaDaPopulacaoEntre_1210/#:~:text=O%20Norte%20de%20Minas%20teve,evento%20realizado%20na%20sede%20da. Acesso em: 20 jun. 2023.

BAZZANELA, A. C. F. **Avaliação do desempenho dos modelos CMIP6 na representação do clima presente da América do Sul**. 2022. 67 p. Trabalho de Conclusão de Graduação – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11422/20774>. Acesso em: 01 jul.2023.

BRITO, R L. B. Disponibilidade e produtividade da água: um desafio para o século 21. *In: SIMPÓSIO DE PESQUISA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS NO SEMI-ÁRIDO MINEIRO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL REGIONAL*, 1., 2007, Montes Claros. **Resumos dos trabalhos apresentados [...]**. Montes Claros: Embrapa, 2007. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/490378>. Acesso em: 09 nov. 2024.

CERQUEIRA, M. C. *et al.* Fragmentação da paisagem no entorno e na reserva de desenvolvimento sustentável nascentes das geraizeiras, Minas Gerais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 31, n. 2, p. 607- 633, apr./jun. 2021. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509826290>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/VkhSsq6kh4D3mb67XRbX8Ms/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 08 nov. 2024.

CORREA, W. de S. C. *et al.* Avaliação das simulações de temperatura e precipitação de um subconjunto de modelos do CMIP6 para o Brasil. **Derbyana**, São Paulo, v. 43, 2022. DOI: <https://doi.org/10.14295/derb.v43.774>. Disponível em: <https://revistaig.emnuvens.com.br/derbyana/article/view/774/743>. Acesso em: 25 ago. 2023.

DANTAS, L. G. *et al.* Future changes in temperature and Precipitation over Northeastern Brazil by CMIP6 Model. **Water**, Switzerland, v. 14, n. 24, dec. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14244118>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/24/4118>. Acesso em: 26 jun. 2023.

DEEPTHI, B.; SIVAKUMAR, B. General circulation models for rainfall simulations: performance assessment using complex networks. **Atmospheric Research**, São Paulo, v. 278, nov. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106333>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169809522003192>. Acesso em: 18 out. 2023.

EYRING, V. *et al.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geosci. Model Dev.**, Germany, v. 9, n. 5, p. 1937-1958, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>. Disponível em: <https://gmd.copernicus.org/articles/9/1937/2016/>. Acesso em: 08 out. 2023.

FIRPO, M. Â. F. *et al.* Assessment of CMIP6 models' performance in simulating present-day climate in Brazil. **Front. Clim**, United Kingdom, v. 4, set. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.948499>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/climate/articles/10.3389/fclim.2022.948499/full>. Acesso em: 15 jun. 2023.

FREITAS, L. O.; CALHEIROS, T.; REIS, R. J. dos. Vulnerabilidade da mesorregião Norte de Minas Gerais face às mudanças climáticas. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v. 29, n. 56, p. 134-155, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2019v29n56p134>. Disponível em: <https://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/19340/14382>. Acesso em: 05 nov. 2024.

GUIMARÃES, D. P.; LANDAU, E. C. ; BARROS, C. A. Áreas homogêneas de precipitação no estado de Minas Gerais. *In*: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, 3., 2009, Canela, RS. **Resumos dos trabalhos apresentados** [...]. Canela: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2009. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/575133/1/Areashomogeneas.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2024.

SISTEMA ESTUDUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (Minas Gerais). **Infraestrutura de Dados Espaciais - IDE-Sisema**. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>. Acesso em: 20 jun. 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Summary for Policymakers. *In: CLIMATE CHANGE 2021 – THE PHYSICAL SCIENCE BASIS: WORKING GROUP I CONTRIBUTION TO THE SIXTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2021, Cambridge. Anais [...]. Cambridge University Press, 2023. p. 3-32. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>. Acesso em: 20 jun. 2023.*

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Water. *In: CLIMATE CHANGE 2022 – IMPACTS, ADAPTATION AND VULNERABILITY: WORKING GROUP II CONTRIBUTION TO THE SIXTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Anais [...]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023. p. 551-712. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009325844.006>. Acesso em: 20 jun. 2023.*

MARENGO, J. A. *et al.* **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro: recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**. Campina Grande: INSA, 2011. p.383-422.

MARTINS, F. B. *et al.* Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, ano 14, ed. esp. Dossiê Climatologia de Minas Gerais, p. 129-156, nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60896>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/60896>. Acesso em: 10 out. 2023.

MEDEIROS, F. J. de; OLIVEIRA, C. P. de; AVILA-DIAZ, A. A. Evaluation of extreme precipitation climate indices and their projected changes for Brazil: From CMIP3 to CMIP6. **Weather and Climate Extremes**, São Paulo, v. 38, dec. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100511>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212094722000901>. 01 ago. 2023.

MENDONÇA, P.de V. e. Sobre o novo método de balanço hidrológico do solo de Thornthwaite-Mather. *In: CONGRESSO LUSO-ESPANHOL PARA O PROGRESSO DAS CIÊNCIAS, 24., 1958, Madrid. Anais [...]. Madri: Instituto Superior de Agronomia, 1958. p.271-282.*

NEALE, R. B. *et al.* Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM5). **National Center for Atmospheric Research**, Colorado, jun. 2010. Disponível em: https://www2.cesm.ucar.edu/models/cesm2/atmosphere/docs/description/cam5_desc.pdf. Acesso em: 05 nov. 2024.

NICHOLLS, R. *et al.* Coastal systems and low-lying areas. *In: CLIMATE CHANGE 2007: IMPACTS, ADAPTATION AND VULNERABILITY. CONTRIBUTION OF WORKING GROUP II TO THE FOURTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 315-356. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg2-chapter6-1.pdf>. Acesso em: 08 nov.*

2024.

O'NEILL, B. C. *et al.* The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geosci. Model Dev.**, Germany, v. 9, n.9 , p. 3461- 3482, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>. Disponível em: <https://gmd.copernicus.org/articles/9/3461/2016/>. Acesso em: 25 jul. 2023.

PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G.C.; VILA NOVA, N. A. **Evapotranspiração**. Campinas: Fundag. 2013.

RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, A. F.; CHRISTOFIDIS, D. Agricultura irrigada e produção sustentável de alimento. *In*: RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, A. F. **Agricultura irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável**. Brasília, DF: Inovagri, 2017. p. 21-108. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1081898/1/AgriculturaIrigada.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2024.

ROLIM, G.de S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente Exceltm para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de Cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133-137, jan. 1998. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/285636209_Planilhas_no_ambiente_ExcelTM_para_os_calculos_de_balancos_hidricos_normal_sequencial_de_cultura_e_de_produtividade_real_e_potencial. Acesso em: 12 nov. 2024.

SANTOS, T. A. *et al.* Zonas homogêneas de evapotranspiração de referência para o norte e noroeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.15, n. 4, p. 3540 - 3555, jul./ago. 2019. DOI: <https://doi.org/10.7127/RBAI.V13N4001078>. Disponível em: https://inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/1078/pdf_567. Acesso em: 09 set. 2023.

SENA-SOUZA, J.P. *et al.* Influência do relevo na dinâmica temporal do uso e cobertura da terra no Norte de Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 15, n. 5, p. 2475 - 2485, 2002. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2475-2485>. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/252707>. Acesso em: 09 nov. 2024.

SILVA NETO, E. C. da *et al.* Aplicação do sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras (SAAAT) em solos do Norte de Minas Gerais. **Agrarian Academy**, Goiânia, v. 5, n.9, p.30-45, 2018. DOI: 10.18677/Agrarian_Academy_2018a4. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Athila-Oliveira/publication/326740855_APLICACAO_DO_SISTEMA_DE_AVALIACAO_DA_APTIDAO_AGRICOLA_DAS_TERRAS_SAAAT_EM_SOLOS_DO_NORTE_DE_MINAS_GERAIS/links/5d1fc3cba6fdcc2462c409e3/APLICACAO-DO-SISTEMA-DE-AVALIACAO-DA-APTIDAO-AGRICOLA-DAS-TERRAS-SAAAT-EM-SOLOS-DO-NORTE-DE-MINAS-GERAIS.pdf. Acesso em: 08 nov. 2024.

STOUFFER, R. J. *et al.* CMIP5 scientific gaps and recommendations for CMIP6. **Am. Meteorol. Soc.**, Boston, p. 95-105, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00013.1>. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/98/1/bams-d-15-00013.1.xml>. Acesso em: 10 nov. 2024.

TEBALDI, C. *et al.* Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. **Earth Syst. Dynam.**, Heidelberg, v. 12, n. 1, p. 253- 293, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021>. Disponível em: <https://esd.copernicus.org/articles/12/253/2021/>. Acesso em: 20 ago. 2023.

THE WORLD CLIMATE RESEARCH PROGRAMME (WCRP). **About us**. Disponível em: <https://www.wcrp-climate.org/about-wcrp/wcrp-overview>. Acesso em: 20 jun. 2023.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955.

TIAN, B.; DONG, X. The double-ITCZ Bias in CMIP3, CMIP5 and CMIP6 models based on annual mean precipitation. **Geophysical Research Letters**, Washington, DC, v. 47, n. 8, apr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020GL087232>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020GL087232>. Acesso em: 05 jul. 2023.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. 2. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2012.

WORDCLIM. **Global climate and weather data**. Disponível em: <https://www.worldclim.org>. Acesso em: 20 jun. 2023.

YAZDANDOOST, F. *et al.* Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: uncertainty and model intercomparison. **Atmospheric Research**, São Paulo, v. 250, mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105369>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169809520313065>. Acesso em: 08 set. 2023.

ZHANG, MZ. *et al.* Evaluation of CMIP6 models toward dynamical downscaling over 14 CORDEX domains. **Climate Dynamics**, Netherlands, v.62, p. 4475-4449, jun.2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06355-5>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-022-06355-5>. Acesso em: 07 out. 2023.