

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

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

METEOROLOGIA



TESE DE DOUTORADO

Welinagila Grangeiro de Sousa

**Cenários futuros da deficiência hídrica na região do
MATOPIBA**

Campina Grande, Março de 2024



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

TESE

**CENÁRIOS FUTUROS DA DEFICIÊNCIA HÍDRICA NA REGIÃO DO
MATOPIBA**

WELINAGILA GRANGEIRO DE SOUSA

CAMPINA GRANDE – PB
MARÇO-2024

WELINAGILA GRANGEIRO DE SOUSA

**CENÁRIOS FUTUROS DA DEFICIÊNCIA HÍDRICA NA REGIÃO DO
MATOPIBA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande, seguindo às exigências para obtenção do Título de Doutora em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Madson Tavares Silva

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Subárea: Climatologia

CAMPINA GRANDE – PB

MARÇO-2024

S725c

Sousa, Welinagila Grangeiro de.

Cenários futuros da deficiência hídrica na região do Matopiba /
Welinagila Grangeiro de Sousa. – Campina Grande, 2024.

106 f.: il. color.

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de
Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. Madson Tavares Silva".

Referências.

1. Meteorologia de Meso e Grande Escalas. 2. Climatologia.
3. Eventos Extremos. 4. Índice Padronizado de Precipitação e
Evapotranspiração (SPEI). 5. Mudanças Climáticas. I. Silva, Madson
Tavares. II. Título.

CDU 551.58(043)

WELINÁGILA GRANGEIRO DE SOUSA

CENÁRIOS FUTUROS DA DEFICIÊNCIA HÍDRICA NA REGIÃO DO MATOPIBA

TESE APROVADA EM 15/03/2024

BANCA EXAMINADORA



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



Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Dr. DIMAS DE BARROS SANTIAGO
Programa Nacional de Pós-Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. EMERSON MARIANO DA SILVA
Centro de Ciências e Tecnologia
Universidade Estadual do Ceará



Prof. Dr. JOÃO HUGO BARACUY DA CUNHA CAMPOS
Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde
Universidade Estadual da Paraíba

“Só eu sei cada passo por mim dado nessa estrada esburacada que é a vida, passei por coisas que até mesmo Deus duvida, fiquei triste, capiongo, aperreado, porém nunca me senti desmotivado, me agarrava sempre numa mão amiga, e de forças minha alma era munida, pois do céu a voz de Deus dizia assim:
-Suba o queixo, meta os pés, confie em mim, vá pra luta que eu cuido das feridas.”

Bráulio Bessa

DEDICATÓRIA

*A minha mãe,
Maria Aparecida (in memorian)
Com AMOR, Dedico.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a **Deus**, pelo seu amor e fortalecimento em todos os momentos de minha vida, não deixando que meus ânimos se abalassem pelas dificuldades;

A minha família pelo apoio e incentivo, sem vocês nada disso seria possível;

Ao meu Orientador Prof. Dr. Madson Tavares Silva por ter acreditado em mim, por sua dedicação para comigo e pelas oportunidades oferecidas, muito obrigada por sua disponibilidade e paciência;

A professora Dra. Célia Campos por todo suporte e incentivo;

A minha amiga/irmã Livia, por todo amparo, incentivo e acima de tudo por ter acreditado junto comigo.

Aos meus Amigos por toda ajuda, em especial: Mariana, Jaeci, Jessica, Silânia, Silvia, André e Fabiana;

Aos membros da banca examinadora, pela colaboração na melhoria deste trabalho;

Ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pela oportunidade de participar do curso de doutorado;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte Financeiro;

A todos os professores e funcionários da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas;

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.
Muito obrigada!

RESUMO

Eventos climáticos extremos são uma realidade em diversas regiões ao longo do tempo, e seus impactos afetam diferentes setores, especialmente a agricultura. Uma área de destaque recente é o MATOPIBA, formado pela união dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, que passou por significativas transformações sociais e ambientais devido à expansão da agricultura intensiva. O estudo teve como objetivo avaliar os padrões espaciais e temporais da variabilidade climática na região do MATOPIBA, para o período de 1961 a 2100 sob diferentes cenários de mudanças climáticas projetadas. Foram utilizados séries de dados históricos mensais de precipitação e temperatura do ar para o período de 1961 a 2018 provenientes das reanálises do CRU-TS-4.03 que fazem parte da base de dados do WorldClim 2.1. Os dados mensais futuros (2020 a 2100) de precipitação e temperatura foram originários do conjunto de dados do Modelo Climático Global (GCM) HadGEM2-ES (The Hadley Global Environmental Model versão 2) que incorpora correção de viés por meio da polarização do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados Fase 5 (Coupled Model Intercomparison Project - CMIP5). Inicialmente, foi analisada a variabilidade das secas utilizando o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) de 1961 a 2018, em uma escala de tempo de 12 meses, empregando técnicas de geoprocessamento e análise de séries temporais para compreender os padrões históricos da seca na região. Observou-se um aumento progressivo dos eventos em toda a região, especialmente nos períodos mais recentes, com tendências significativas de aumento ao longo dos anos. Posteriormente, foi analisada a sazonalidade da precipitação pluvial e evapotranspiração de referência para projeções futuras durante o período de 2020 a 2099, considerando um cenário intermediário (RCP4.5) e um pessimista (RCP8.5). Os resultados indicaram uma redução da precipitação pluvial, especialmente durante o período seco da região, e aumentos significativos na evapotranspiração de referência, destacando o cenário pessimista RCP8.5 como o mais impactante para a região estudada. Essas informações são relevantes para orientar os tomadores de decisão na adoção de medidas de mitigação para os potenciais impactos desses eventos.

Palavras-chave: Eventos Extremos; SPEI; Mudanças Climáticas.

ABSTRACT

Extreme climatic events are a reality in various regions over time, and their impacts affect different sectors, especially agriculture. A recently highlighted area is MATOPIBA, formed by the union of the states of Maranhão, Tocantins, Piauí, and Bahia, which has undergone significant social and environmental transformations due to the expansion of intensive agriculture. This study aimed to evaluate the spatial and temporal patterns of climate variability in the MATOPIBA region for the period from 1961 to 2100 under different projected climate change scenarios. Historical monthly data series on precipitation and air temperature for the period from 1961 to 2018 were used, obtained from CRU-TS-4.03 reanalyses, which are part of the WorldClim 2.1 database. Future monthly data (2020 to 2100) on precipitation and temperature were sourced from the Global Climate Model (GCM) HadGEM2-ES (The Hadley Global Environmental Model version 2), which incorporates bias correction through the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5). Initially, the variability of droughts was analyzed using the Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI) from 1961 to 2018 on a 12-month time scale, employing geoprocessing techniques and time series analysis to understand the historical drought patterns in the region. A progressive increase in events was observed throughout the region, especially in more recent periods, with significant upward trends over the years. Subsequently, the seasonality of rainfall and reference evapotranspiration for future projections during the period from 2020 to 2099 was analyzed, considering an intermediate scenario (RCP4.5) and a pessimistic scenario (RCP8.5). The results indicated a reduction in rainfall, especially during the dry period of the region, and significant increases in reference evapotranspiration, highlighting the pessimistic RCP8.5 scenario as the most impactful for the studied region. This information is relevant to guide decision-makers in adopting mitigation measures for the potential impacts of these events.

Keywords: Extreme Events; SPEI; Climate Change.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. Estrutura da tese. 32

CAPÍTULO II

Figura 1. Localização da área de estudo. 50

Figura 2. Distribuição espaço temporal da variabilidade do SPEI-12 nas microrregiões do MATOPIBA no período 1962 a 1999. 58

Figura 3. Distribuição espaço temporal da variabilidade do SPEI-12 nas microrregiões do MATOPIBA no período de 2003 a 2018. 61

Figura 4. Distribuição espacial dos grupos homogêneos com base nos valores de SPEI-12 para a região do MATOPIBA no período de janeiro de 1961 a dezembro de 2018. 63

Figura 5. Distribuição dos menores valores anuais do SPEI-12 para: A. Grupo 1; B. Grupo 2; C. Grupo 3; D. Grupo 4 e E. Grupo5 no período de 1961 a 2018. 65

Figura 6. Variabilidade temporal dos menores valores anuais do SPEI-12 para: A. Grupo 1; B. Grupo 2; C. Grupo 3; D. Grupo 4 e E. Grupo5 no período de 1961 a 2018. 70

CAPÍTULO III

Figura 1. Localização geográfica da região do MATOPIBA e altimetria da região. Fonte (autor, 2024). 83

Figura 2. Distribuição sazonal média da precipitação pluvial nas microrregiões do MATOPIBA no intervalo de 2020-2060 para o cenário RCP 4.5 e cenário RCP 8.5. 86

Figura 3. Distribuição sazonal da precipitação pluvial (mm) nas microrregiões do MATOPIBA no intervalo de 2061-2099 para o cenário RCP 4.5 e cenário RCP 8.5. 89

Figura 4. Precipitação média mensal para o período de 2020 a 2099 e a climatologia da precipitação no período de 1962 a 2018. 92

Figura 5. Distribuição sazonal da evapotranspiração de referência (mm) nas microrregiões do MATOPIBA no intervalo de 2020-2060 para o cenário RCP 4.5 e cenário RCP 8.5. 94

Figura 6. Distribuição sazonal da evapotranspiração nas microrregiões do MATOPIBA no intervalo de 2061-2099 para o cenário RCP 4.5 e cenário RCP 8.5. 96

Figura 7. Evapotranspiração média mensal para o período de 2020 a 2099 e a climatologia da precipitação no período de 1962 a 2018. 98

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela 1. Classificação da seca com base no SPEI 53

Tabela 2. Resultado do teste não-paramétrico de Mann-Kendall aplicado às microrregiões do MATOPIBA para o SPEI-12 no período de 1961-2018. 68

CAPÍTULO III

Tabela 1. Variação média da precipitação projetada no MATOPIBA para o período de 2020-2099. 93

Tabela 2. Variação média da evapotranspiração de referência (mm) projetada no MATOPIBA em comparação ao período observado de 1961-2018. 99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
AOGCMs	Modelos Globais Acoplados Oceano-Atmosfera
AR5	Quinto Relatório de Avaliação
AW	Inverno Seco
AWD	Interpolação de Ponderação de Distância Angular
BMDI	Índice de Seca de Bhalme & Mooley
CGMs	Modelos Globais Atmosféricos
CMI	Índice de Umidade de Colheita
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
CRU-TS-4.03	Climatic Research Unit- CRU-TS
D	Decis
Di	Diferença
DJF	Dezembro, janeiro, fevereiro
EDI	Índice de Seca Efetiva
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária ()
ENOS	El Niño Oscilação Sul
ETP	Evapotranspiração Potencial
HadGCM2-ES	Hadley Centre Global Environmental Model version
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
JJA	Junho, julho, agosto
MATOPIBA	Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia
MAM	Março, abril, maio
NEB	Nordeste do Brasil

NPP	Net Primary Production
P	Precipitação
PDA	Plano de Desenvolvimento Agropecuário
PDSI	Índice de Severidade de Seca de Palmer
Pi	Precipitação pluvial
RAI	Índice de Anomalia de Chuva
RCPs	Vias de Concentração Representativas
SON	Setembro, outubro, novembro
SPEI	Índice padronizado de precipitação e evapotranspiração
SPI	Índice Padronizado de Precipitação
SWSI	Índice de Fonte de Água da Superfície
TSM	Temperatura da superfície do mar
TVE	Teoria de Valores Extremos
UNCCD	United Nations Convention to Combat Desertification
WGCM	Working Group on Coupled Modelling
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	18
1. INTRODUÇÃO	18
2. HIPÓTESE	20
3. JUSTIFICATIVA	21
4. OBJETIVOS	22
4.1 Objetivo Geral	22
4.2 Objetivos específicos	22
5. REVISÃO DE LITERATURA	23
5.1 Importância do Monitoramento das Secas	23
5.2 Determinação de Índices de Seca	24
5.3 Variabilidade, Projeções e cenários climáticos	27
5.4 Implicações das Mudanças Climáticas no Bioma Cerrado	28
5.5 Análise de Séries Temporais	30
5.5 Análise Multivariada	30
6. ESTRUTURA DA TESE	32
7. REFERÊNCIAS	33
CAPÍTULO 2	46
RESUMO	46
ABSTRACT	47
1. INTRODUÇÃO	48
2. MATERIAL E MÉTODOS	49
2.1 Área de estudo	49
2.2 Dados	50
2.3 Metodologia	51
2.3.1 Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI)	51
2.3.2 Análise de Agrupamento (<i>AA</i>)	53
2.3.3 Teste de Mann-Kendall	54
2.3.3.1 Estimador de inclinação de Sen's slope (Sen)	55
2.3.4 Teste Não Paramétrico de Pettitt	56
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4. CONCLUSÕES	71
5. REFERÊNCIAS	72
CAPÍTULO 3	80
RESUMO	80

ABSTRACT	81
1. INTRODUÇÃO	82
2. MATERIAIS E MÉTODOS	83
2.1. Área de estudo	83
2.2 Dados	84
2.3 Métodos	85
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
4. CONCLUSÕES	100
5. REFERÊNCIAS	101
CAPÍTULO 4	107
CONSIDERAÇÕES FINAIS	107

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água em várias regiões do Brasil é uma questão de grande relevância na atualidade, especialmente devido às mudanças no uso do solo e à ausência de políticas formais sobre recursos hídricos, fatores cruciais que afetam diretamente a quantidade de água disponível (Dantas et al., 2020). Entre os fenômenos naturais que mais impactam essa oferta está a seca, que prejudica severamente diversas atividades sociais, especialmente em regiões como o semiárido brasileiro, onde a escassez de água é uma ameaça iminente (Wang et al., 2017; Singh et al., 2019).

A seca apresenta diferentes manifestações: meteorológica, relacionada ao déficit de precipitação pluvial; agrícola, ligada à evaporação aumentada devido a condições meteorológicas adversas; hidrológica, decorrente da redução do escoamento e infiltração hídricos; e socioeconômica, refletindo a escassez de água disponível para a população (Solh; Ginkel, 2014). Essas condições são agravadas pela irregularidade das chuvas, problemas no armazenamento de água e altas taxas de evapotranspiração de referência, especialmente em regiões agrícolas em expansão como o MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) (Marengo; Bernasconi, 2015; Marengo et al., 2017; Brito et al., 2018).

A precipitação pluviométrica é uma variável climática crucial, desempenhando papel fundamental na economia e no ciclo global da água (Souza; Nascimento, 2020). A evapotranspiração de referência, que representa a perda máxima de água sob determinadas condições climáticas, torna-se ainda mais relevante conforme as variações na precipitação, especialmente em áreas produtoras.

Nesse contexto, urge monitorar os padrões climatológicos, especialmente em regiões agrícolas dependentes do regime de chuvas (Reis et al., 2020). Destaca-se o Índice de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI), utilizado para avaliar condições de seca em diferentes contextos climáticos, incorporando também a temperatura (Mostafazadeh; Zabihi, 2016; Nóia Júnior; Sentelhas, 2019).

Devido à dificuldade em obter séries longas de dados observacionais, as reanálises climáticas têm se mostrado fundamentais nos estudos climáticos. Relatórios de avaliação do IPCC, junto com análises atuais do Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), oferecem suporte de dados e conhecimento sobre a provável evolução das secas (Kirono et al., 2020; Ma et al., 2020; Cook et al., 2014; Shrestha et al., 2020).

Contudo, as regiões tropicais são extremamente vulneráveis às condições climáticas extremas, com cenários futuros ainda mais preocupantes devido à previsão de aumento de eventos extremos (Torres et al., 2017), o que favorece a ocorrência de secas (Santos et al., 2018; Santos et al., 2019) e mudanças no uso da terra (Silva et al., 2019), impactando negativamente a biodiversidade e os recursos hídricos (Fernandez et al., 2019). Essa tendência aumentará a pressão sobre o abastecimento de água devido ao aumento da demanda (Li et al., 2020).

Portanto, é crucial estudar as tendências futuras projetadas para prevenir danos potenciais, especialmente na agricultura. Vários estudos estão focados em compreender os eventos climáticos extremos, como a seca, e suas possíveis evoluções, utilizando índices climáticos e técnicas estatísticas em diversas escalas temporais para aprimorar o entendimento desses fenômenos (Rodrigues et al., 2012; Khan et al., 2018). Um entendimento robusto da influência da variabilidade climática na produção agrícola é essencial para promover a resiliência climática e melhorar a segurança alimentar globalmente.

Assim, diante da necessidade premente de compreender e monitorar os padrões espaciais e temporais da seca na região do MATOPIBA, este estudo se propõe a avaliar criticamente a evolução desse fenômeno ao longo do tempo. Além disso, serão explorados cenários futuros de precipitação e evapotranspiração, proporcionando insights cruciais para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação e adaptação aos impactos das mudanças climáticas. Essa abordagem holística não apenas informará sobre os desafios climáticos enfrentados pela região, mas também orientará a implementação de medidas preventivas e corretivas necessárias para promover a sustentabilidade ambiental e socioeconômica.

2. HIPÓTESE

Os estudos conduzidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) indicam que as regiões produtoras estão particularmente vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas, enfrentando desafios significativos devido à diminuição das chuvas e aumento da evapotranspiração nas próximas décadas. Com base nisso, esta pesquisa parte da hipótese de que as variações climáticas afetarão a região do MATOPIBA tanto espacialmente quanto temporalmente, com um aumento esperado na frequência e intensidade dos eventos climáticos extremos, como secas prolongadas e atrasos no início da estação chuvosa.

3. JUSTIFICATIVA

As mudanças climáticas não ocorrem de forma homogênea ao redor do globo, tornando crucial entender como cada região específica será afetada. A diminuição da precipitação e o aumento da evapotranspiração de referência provocam alterações significativas nos padrões climáticos regionais, impactando diversos setores, especialmente em regiões produtoras (Reis et al., 2020).

Embora haja algumas incertezas, analisar os cenários futuros em diferentes regiões devido às mudanças climáticas é essencial. Isso contribui para o desenvolvimento de planos e políticas destinadas a mitigar os impactos dessas alterações nas atividades econômicas e sociais locais, além de promover a preservação e conservação dos biomas (Bonan, 2016).

A região MATOPIBA, predominantemente caracterizada pelo bioma cerrado e historicamente afetada por secas, enfrenta desafios que impactam diretamente a vida da população. Essa área passou por significativa transformação devido às práticas agrícolas, despertando interesse para estudos sobre as influências climáticas e antrópicas no meio ambiente local (Pereira et al., 2018; Nóia Júnior; Sentelhas, 2019). Portanto, o estudo de tendências visa identificar e classificar as mudanças climáticas por meio de testes estatísticos.

Reis et al. (2020), ao caracterizar a variabilidade da precipitação no MATOPIBA entre 1980 e 2013, obtiveram resultados consistentes com estudos semelhantes realizados no Nordeste brasileiro e em outras regiões agrícolas do Brasil. A análise revelou indícios de alterações nos padrões de precipitação, favorecendo o aumento na duração da estação seca e o atraso no início da estação chuvosa.

A vulnerabilidade das regiões tropicais às condições extremas é evidente. As projeções climáticas indicam que, até o final do século, haverá um aumento na frequência e intensidade dos fenômenos extremos, como a seca, devido à redução dos índices pluviométricos (Li et al., 2013; IPCC, 2014; Marengo; Bernasconi, 2015; Marengo et al., 2018).

Compreender os padrões climáticos no MATOPIBA sob cenários de mudanças climáticas permite entender eventos ao longo do tempo e suas incertezas. Essas mudanças aumentam a vulnerabilidade ambiental, justificando a necessidade de um planejamento melhor pelos gestores. O estudo busca mitigar impactos e adaptar-se às novas condições climáticas

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

Avaliar os padrões espaciais e temporais da variabilidade climática na região do MATOPIBA, para o período de 1961 a 2100 sob diferentes cenários de mudanças climáticas projetadas.

4.2 Objetivos específicos

-Analisar a variabilidade da seca na região do MATOPIBA utilizando o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração na escala de 12 meses (SPEI-12) para o período histórico de 1961 a 2018.

-Identificar regiões homogêneas de seca nas microrregiões da região do MATOPIBA por meio de técnicas de análise multivariada aplicadas aos dados históricos (1961 a 2018).

-Investigar as tendências anuais do fenômeno da seca na região do MATOPIBA durante o período histórico de 1961 a 2018.;

-Avaliar a variabilidade espaço-temporal da precipitação pluvial e evapotranspiração de referência sob cenários otimista (RCP 4.5) e pessimista (RCP 8.5) do CMIP5 para o período de projeção (2020 a 2100).

5. REVISÃO DE LITERATURA

5.1 Importância do Monitoramento das Secas

As regiões áridas, semiáridas e subúmidas secas compreendem quase metade da área terrestre, estando presentes em todos os continentes. Conhecidas como terras secas, são extremamente vulneráveis às alterações climáticas e antrópicas, sendo suscetíveis ao processo de desertificação e à consequente perda de produtividade (Vieira et al., 2015; CGEE, 2016; Núñez Cobo; Verbist, 2018).

Dikici (2020) descreve a seca como um evento natural, lento e capaz de afetar diferentes regimes climáticos, resultado da deficiência na precipitação em relação ao esperado para determinada localidade ao longo do tempo (Duarte et al., 2018).

A seca está diretamente ligada à diminuição da disponibilidade hídrica necessária para atender as demandas humanas e ambientais. Seus impactos transformam esse evento em um desastre natural devido às consequências nas esferas sociais e ambientais. A definição de seca varia de acordo com as características regionais, temporais e variáveis estudadas por cada setor (Van Loon; Laaha, 2015; Junior et al., 2020).

No século XX, as secas globais foram responsáveis por mais da metade das mortes relacionadas a desastres naturais, sendo o segundo maior desastre natural em termos de impactos humanos, após as inundações, conforme o Atlas das Secas (Núñez Cobo; Verbist, 2018). Em 2015, aproximadamente 50,5 milhões de pessoas foram afetadas por secas ao redor do mundo. No Brasil, o aumento nos registros de secas é notório, conforme relatório da Agência Nacional de Águas (ANA, 2018).

As secas são componentes significativas da variabilidade climática global e são classificadas em fraca, moderada, severa e extrema, dependendo da duração, intensidade e impacto. Originadas principalmente pela irregularidade das precipitações pluviais, as secas podem assumir diferentes formas de manifestação: meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica (Farias et al., 2017).

As secas meteorológicas são caracterizadas pela diminuição na precipitação pluviométrica e afetam o ciclo hidrológico, influenciando outros tipos de seca de acordo com as condições específicas de cada região (Tijdeman et al., 2018). A seca agrícola, associada à seca meteorológica, impacta a agricultura devido à escassez de precipitação, diferenças na evapotranspiração e perda de umidade do solo (Alpino et al., 2014; Nunes; Medeiros, 2020).

A seca hidrológica está relacionada à bacia hidrográfica, onde a insuficiência prolongada de precipitação pluviométrica compromete o abastecimento de água

superficial e subterrânea, afetando a sociedade. A seca socioeconômica ocorre quando a escassez de água impacta diretamente indivíduos e comunidades, prejudicando atividades econômicas como a agricultura (Nunes;Medeiros, 2020).

O Nordeste brasileiro, devido à irregularidade das precipitações e às secas severas e prolongadas, é uma das regiões mais vulneráveis aos impactos das secas (Ferreira et al., 2017). O monitoramento desses eventos extremos é crucial para aumentar a resiliência das comunidades afetadas e mitigar seus impactos negativos (Junior et al., 2020).

Para minimizar os impactos das secas na segurança hídrica, alimentar e na produção energética, sistemas de monitoramento e previsão de secas são fundamentais para emitir alertas e orientar ações de mitigação (Ahmed et al., 2018; Zhu; Troy, 2018).

Compreender os cenários climático-hidrológicos futuros e suas incertezas é essencial para estimar as demandas futuras de água e estabelecer políticas de uso e gestão sustentável dos recursos hídricos (Santos et al., 2019).

5.2 Determinação de Índices de Seca

Para abordar de maneira precisa a severidade, duração e extensão da seca, foram desenvolvidos indicadores específicos (Stagge et al., 2015; Barker et al., 2016). Brito et al. (2017) destacam que vários métodos e índices foram criados para avaliar a intensidade e os impactos desse fenômeno, utilizando variáveis climáticas e hidrológicas como precipitação pluviométrica, umidade do solo, evapotranspiração de referência e condição da vegetação.

Os índices de seca desempenham um papel crucial na análise e monitoramento da escassez de água, bem como no acompanhamento dos efeitos da variabilidade climática sobre a vegetação natural e as culturas. Avaliar a variação espacial e temporal dos episódios de seca é um desafio complexo devido à subjetividade na definição desses eventos, o que dificulta a criação de um índice único e universal (Kim;Jehanzaib, 2020).

Esses índices são métricas que numericamente caracterizam a seca quanto à sua duração, severidade, distribuição espacial e intensidade. Ao consolidar informações de diversas variáveis e indicadores em um único valor, eles oferecem uma representação útil para compreender a situação e auxiliar na tomada de decisões (Singh, 2015).

Além de serem cruciais para a vigilância de eventos e a previsão de impactos, os índices de seca são ferramentas fundamentais para o planejamento e as decisões estratégicas (Svoboda; Fuchs, 2017). Portanto, dado que não existe uma definição universal de seca que se aplique a todas as situações, a utilização de múltiplos índices é

essencial para capturar adequadamente um evento e seus impactos, refletindo as diferenças regionais e as variáveis específicas envolvidas, como precipitação pluviométrica, umidade do solo, evapotranspiração de referência e condição da vegetação (Martins et al., 2016; Santos et al., 2019).

Partindo desse entendimento, os índices de seca são adaptados para diferentes contextos específicos: secas meteorológicas consideram variáveis climáticas como precipitação pluviométrica, temperatura e evapotranspiração de referência. Já para secas hidrológicas, são incluídos aspectos relacionados ao sistema hídrico, como vazões, armazenamento, umidade do solo e acúmulo de neve. Por sua vez, os índices de secas agrícolas focam em características do solo e cultivos, como umidade, temperatura e evapotranspiração de referência, entre outros fatores.

Entre os diversos índices disponíveis, alguns se destacam pela sua aplicabilidade e metodologia específica. O método Decis (D), desenvolvido por Gibbs e Maher (1967), divide a série de precipitação pluviométrica em dez partes iguais por ordem crescente, proporcionando uma estatística precisa da precipitação medida. O PDSI (Índice de Severidade de Seca de Palmer), criado por Palmer (1965), calcula o balanço hídrico e a umidade do solo com base na temperatura e precipitação, oferecendo medidas padronizadas da umidade comparáveis entre diferentes localidades e meses, especialmente útil em aplicações agrícolas.

McKee et al. (1993) desenvolveram o Índice de Precipitação Padronizado (SPI) em resposta à escassez de precipitação pluviométrica e seus variados impactos. Este índice quantifica a deficiência de precipitação em diferentes escalas de tempo (três, seis, doze, vinte e quatro e quarenta e oito meses), refletindo o impacto das secas na disponibilidade hídrica. Valores positivos de SPI indicam que a precipitação pluviométrica está acima da mediana ou média, enquanto valores negativos indicam o oposto.

Esses índices são essenciais não apenas para entender a dinâmica das secas, mas também para planejar e implementar estratégias de mitigação e resposta aos seus variados efeitos em diferentes sistemas e regiões.

O Índice de Umidade de Cultura (CMI), desenvolvido por Palmer (1968), analisa a umidade em períodos curtos nas principais regiões agrícolas, baseando-se na temperatura média e na precipitação semanal total. Enquanto isso, o Índice de Anomalia de Chuva (RAI), formulado por Rooy (1965), classifica anomalias de precipitação positivas e negativas para determinar extremos de anomalia.

O Índice de Seca de Bhalme & Mooley (BMDI), estabelecido por Bhalme e Mooley (1980), utiliza apenas a precipitação pluvial para medir a intensidade da seca, sendo similar ao PDSI com algumas variações no método de cálculo, especialmente eficaz em regiões tropicais. O Índice de Seca Efetiva (EDI), desenvolvido por Byun e Wilhite (1999), baseia-se em dados diários de precipitação crucial para retornar às condições normais, variando de -2,5 a 2,5 com valores padronizados para facilitar comparações de secas severas entre diferentes locais.

O Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) é capaz de detectar mudanças climáticas relacionadas a variações na precipitação pluviométrica e temperatura, sendo útil na avaliação dos efeitos potenciais do aquecimento global. Segundo Vicente-Serrano et al. (2010), valores positivos indicam maior disponibilidade hídrica (anomalia positiva), enquanto valores negativos refletem menor disponibilidade hídrica (anomalia negativa), dentro de um intervalo de referência.

Além disso, o SPEI requer dados de precipitação pluvial e evapotranspiração potencial para seu cálculo, o que o torna aplicável frente a índices mais complexos, além de possibilitar a identificação de características como início, duração, severidade, intensidade e frequência das secas (Botai et al., 2017). Estudos utilizando índices, como mencionado por Caloiero (2017) e Fu et al. (2018), têm permitido a caracterização dos eventos de seca sob diferentes aspectos em diversas regiões.

O SPEI possui uma característica multi-escalar, permitindo análises de curto (1 mês), sazonal (3 meses) e médio prazo (12 meses), proporcionando uma visão abrangente dos padrões de precipitação ao longo do tempo e espaço, similar ao SPI (Bohn; Piccolo, 2018). Conforme destacado por Keyantash e Dracup (2020), os índices de seca precisam ser estatisticamente robustos, de fácil aplicação e com procedimentos de cálculo claros para garantir sua eficácia.

As vantagens do SPEI incluem sua sensibilidade à demanda evaporativa, facilidade de cálculo e adequação para análise em diferentes períodos, semelhante ao SPI. Os resultados são classificados em categorias de seca, neutralidade e períodos úmidos, com referência a limites de escala que variam de -2,5 desvios padrão para secas excepcionais até +2,5 desvios padrão para períodos excepcionalmente úmidos (Das et al., 2015).

5.3 Variabilidade, Projeções e Cenários Climáticos

Os estudos sobre variabilidade e mudanças climáticas, apesar de apresentarem incertezas nos resultados, indicam uma tendência de intensificação de eventos extremos de secas nos próximos anos (Marengo; Espinosa, 2016). Esses impactos potenciais demandam o entendimento do aumento ou redução de variáveis específicas que são cruciais para explicar a exposição a perigos climáticos, como as anomalias climáticas relacionadas à variabilidade sazonal e interanual, à diminuição da média da precipitação pluviométrica mensal, sazonal ou anual, e ao aumento na magnitude, frequência e duração das secas (PBMC, 2016).

Os Modelos Climáticos Globais (MCGs) representam matematicamente o sistema climático com base nas propriedades físicas de seus componentes, embora sua resolução espacial média de aproximadamente 250 km seja inadequada para estudos de impacto em escalas regionais. Esses modelos são acoplados com modelos oceânicos que consideram campos de temperatura da superfície do mar sobre os oceanos e processos biogeoquímicos, mas são limitados na captura das características climáticas regionais, especialmente em áreas com cobertura vegetal e topografias complexas, assim como em regiões litorâneas (IPCC, 2019).

Os MCGs são fundamentais na geração de cenários climáticos futuros e na previsão de tendências de mudanças climáticas. Esses modelos diferem de acordo com a escala adotada para a previsão, seja mesoescalar ou sinótica (Brasil, 2016). Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), tanto variáveis climáticas quanto não climáticas influenciam o sistema global, porém, é desafiador estimar completamente os impactos das mudanças climáticas devido à complexidade das interações climáticas regionais nos sistemas naturais e humanos, incluindo fenômenos não climáticos como mudanças no uso da terra (IPCC, 2007).

Desde sua criação em 1988, o IPCC tem evoluído junto com os MCGs e cenários climáticos para incorporar estimativas de gases de efeito estufa e cenários socioeconômicos de vulnerabilidade, gerando previsões climáticas futuras (Moss et al., 2010). Eyring et al. (2016) destacam que o CMIP (Coupled Model Intercomparison Projects) visa entender as mudanças climáticas passadas, presentes e futuras por meio de eventos naturais, variabilidade forçada e mudanças na força radiativa, utilizando vários modelos.

O CMIP é coordenado pelo WGCM (Working Group on Coupled Modelling), que organiza os grupos de modelagem e garante que os dados dos modelos estejam

disponíveis de forma padronizada para a comunidade climática e outros usuários. Cada nova fase do CMIP baseia-se na premissa de que novas gerações de MCGs mostrarão melhorias progressivas em termos de eficiência computacional, resolução e representação de processos físicos (O'Neill, 2016; Petrie et al., 2021).

Os cenários conhecidos como Caminhos Representativos de Concentração (RCPs) foram escolhidos para fornecer uma gama diversificada de resultados sobre as mudanças climáticas no final do século. O Quinto Relatório de Avaliação do IPCC-AR5 apresentou quatro RCPs que exploram diferentes futuros potenciais de emissões de gases de efeito estufa, sendo essenciais para novas simulações de vários modelos de circulação global (IPCC, 2013; Pinheiro et al., 2014).

Nas Vias de Concentração Representativas são representadas um conjunto de ideais climáticos do século vinte e um, sendo eles o cenário RCP2.6 que apresenta um nível de forçamento muito baixo, os RCP4.5 e RCP6 que são vistos como dois cenários de estabilização e o RCP8.5 sendo o cenário com emissões de gases de efeito estufa muito elevadas (IPCC, 2014).

5.4 Implicações das Mudanças Climáticas no Bioma Cerrado

A precipitação e a evapotranspiração desempenham papéis fundamentais no balanço hídrico climatológico, representando ganhos e perdas de água na superfície terrestre. Este recurso é essencial para a sobrevivência das espécies e deve ser gerido de forma racional, especialmente na agricultura, maior consumidora global de água. Um manejo adequado pode resultar em significativos ganhos na produção de alimentos, enquanto seu uso inadequado pode levar à degradação ambiental (Pessoa et al., 2016).

Na agricultura, dados precisos sobre precipitação e evapotranspiração de referência são cruciais para entender os impactos, distribuição e frequência da escassez hídrica, além de planejar projetos e gerenciar bacias hidrográficas, sistemas de irrigação e drenagem (Paca et al., 2019). Como um dos setores mais vulneráveis às mudanças climáticas, a agricultura depende diretamente dos fatores climáticos e dos recursos naturais. Medidas de adaptação adequadas ao contexto regional podem ajudar a mitigar esses impactos (Oliveira et al., 2022).

A temperatura global afeta os sistemas biológicos de várias maneiras, incluindo mudanças na distribuição de espécies, na fenologia e na produção de biomassa. A capacidade dos ecossistemas e das espécies de responder às mudanças climáticas depende de suas características específicas e da interação com ameaças antrópicas atuais e futuras.

Os regimes climáticos futuros apresentam desafios além dos observados até agora, exigindo resistência natural dos sistemas biológicos (Beaumont et al., 2011; IPCC, 2019).

Pesquisas indicam que as projeções de mudanças climáticas para as próximas décadas podem colocar pressão significativa sobre a integridade e a sobrevivência das ecorregiões mais relevantes biologicamente, principalmente nos ecossistemas tropicais e subtropicais da África e da América do Sul (Beaumont et al., 2011). A Amazônia, por exemplo, é particularmente vulnerável, e estudos sugerem que a superação de um ponto de inflexão crítico, como o desmatamento de 40% da bacia amazônica, pode levar à transição de floresta úmida para savana devido à redução da convecção e precipitação (Nobre; Borma, 2009; Lovejoy; Nobre, 2018).

Pesquisas recentes enfatizam a resiliência da Amazônia e de outras florestas tropicais, sugerindo que esse limite crítico pode ser superior a 50%. Em escala continental, regiões com altas taxas de desmatamento, como no Brasil, enfrentam uma redução significativa na precipitação se ultrapassarem determinadas dimensões críticas de áreas desmatadas contínuas (Lawrence; Vandecar, 2014).

O Cerrado, outro ecossistema terrestre em risco de desequilíbrio ecológico, é afetado não apenas pelo alto desmatamento, mas também pelas mudanças climáticas. A diversidade fitofisionômica do Cerrado, incluindo a transição entre vegetação lenhosa e herbácea, pode ser severamente impactada pelas projeções climáticas, com potenciais reduções na Net Primary Production (NPP) devido ao aumento da temperatura e à redução da precipitação (PBMC, 2014; Nóbrega et al., 2017).

As projeções climáticas indicam que o Cerrado pode enfrentar aumentos de temperatura de até 4°C, com variações regionais significativas, e reduções de precipitação que podem chegar a 70% em algumas áreas até o final do século. Essas mudanças alterarão a distribuição temporal e espacial das chuvas no bioma, afetando seu funcionamento e a absorção de CO₂ (Marengo et al., 2009; Bustamante et al., 2012).

Estudos de modelagem preditiva mostram que muitas espécies no Cerrado podem perder áreas habitáveis significativas até 2050 devido ao aumento da temperatura e à redução da disponibilidade de água, destacando a vulnerabilidade desse bioma às mudanças climáticas (Canhos et al., 2008; Joly et al., 2019).

Além disso, fenômenos climáticos como o El Niño Oscilação Sul (ENOS) desempenham um papel crucial na variabilidade climática da América do Sul, afetando as chuvas na Amazônia e na transição para o Cerrado. As fases do El Niño e La Niña influenciam diretamente a vazão dos rios e as inundações na região, alterando os padrões

de umidade e precipitação em áreas tropicais e subtropicais (Marengo et al., 2006; Debortoli, 2016).

Diante desses desafios, compreender melhor as consequências das mudanças climáticas para o Cerrado requerem informações detalhadas sobre a variabilidade espacial e temporal dos ecossistemas terrestres e aquáticos, assim como novas abordagens de modelagem que considerem os feedbacks entre diferentes fatores de perturbação ambiental (Bustamante et al., 2012; Strassburg et al., 2017).

5.5 Análise de séries temporais

A definição de séries temporais refere-se a um conjunto de observações de uma variável de interesse, capturadas consecutivamente e igualmente espaçadas ao longo do tempo, resultando em uma sequência ordenada. Essas séries podem ser discretas ou contínuas, estacionárias ou não estacionárias, homocedásticas ou heterocedásticas, tanto no contexto univariado quanto multivariado (Box et al., 2015).

A teoria subjacente à análise de séries temporais pressupõe a existência de um processo temporal que influencia os dados passados e futuros, com um componente aleatório que afeta as observações. Esse processo pode gerar padrões tanto aleatórios quanto não aleatórios, detectáveis por métodos estatísticos (Ababneh et al., 2013; Kiliç; Uğur, 2016).

Os modelos de séries temporais são desenvolvidos para capturar a estrutura de correlação temporal e são amplamente utilizados para prever variáveis climáticas. Um dos principais objetivos desses modelos é prever os valores futuros da série temporal (Box, 2015).

Pesquisas práticas demonstram que uma variedade de modelos estatísticos é essencial e de fácil aplicação na análise de séries temporais. Modelos descritivos, tanto simples quanto sofisticados, são frequentemente utilizados como uma etapa inicial na organização e compreensão dos dados, antes da aplicação de técnicas mais avançadas (Verma; Verma, 2012).

5.6 Análise multivariada

A análise multivariada representa um método estatístico essencial na análise de dados climatológicos, permitindo identificar regiões com características semelhantes e obter padrões regionalizados. A escolha da técnica multivariada adequada depende dos objetivos específicos da pesquisa, uma vez que existem várias técnicas disponíveis, cada

uma aplicável a diferentes aspectos do estudo. Essas técnicas são empregadas para simplificar dados através da redução de dimensão, agrupamento de dados, análise da dependência entre variáveis e construção de testes de hipóteses (Hair et al., 2009; Freitas et al., 2013).

A integração de técnicas multivariadas com geoestatística tem possibilitado abordagens eficazes, especialmente ao considerar a variação espacial de múltiplas variáveis simultaneamente (Silva et al., 2010). Além disso, destacam-se métodos como os testes não paramétricos, como o teste de Mann-Kendall e o teste de Pettitt, que são utilizados para detectar tendências temporais significativas em séries de dados ambientais.

O teste de Mann-Kendall, por exemplo, é robusto e não paramétrico, sendo amplamente empregado para verificar se há uma tendência temporal estatisticamente significativa em séries de dados, independentemente da distribuição dos dados (Yue et al., 2002). Complementarmente, o teste de Pettitt é útil para identificar pontos de mudança abrupta nas médias de séries históricas, também utilizando uma abordagem não paramétrica (Pettitt, 1979; Groppo et al., 2005).

Essas ferramentas estatísticas não apenas ajudam a identificar padrões e tendências nos dados climáticos, mas também são fundamentais para subsidiar decisões em gestão ambiental, planejamento urbano e agricultura, proporcionando uma compreensão mais profunda dos impactos das mudanças climáticas em diferentes escalas espaciais e temporais.

6. ESTRUTURA DA TESE

A estrutura proposta para a tese consiste na seguinte forma: O **Capítulo 1** abrange a introdução, contendo em conjunto a hipótese, justificativa, objetivo geral e específicos, assim como a revisão de literatura. No **Capítulo 2** apresenta-se a identificação e compreensão da variabilidade espaço temporal de eventos de secas meteorológicas (SPEI-12) ocorridos na região do MATOPIBA no período de 1961 a 2018, por meio de técnicas multivariadas e de tendências. O **Capítulo 3** foi verificado a sazonalidade espaço temporal da precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência para dois cenários futuros de mudanças climáticas (RCP4.5 e RCP8.5), intermediário e pessimista através de projeções do quinto relatório do IPCC-CMIP5. No **Capítulo 4** é verificadas as considerações finais da presente tese. Na sequência pode-se observar o esquema da estrutura da tese (Figura 1).

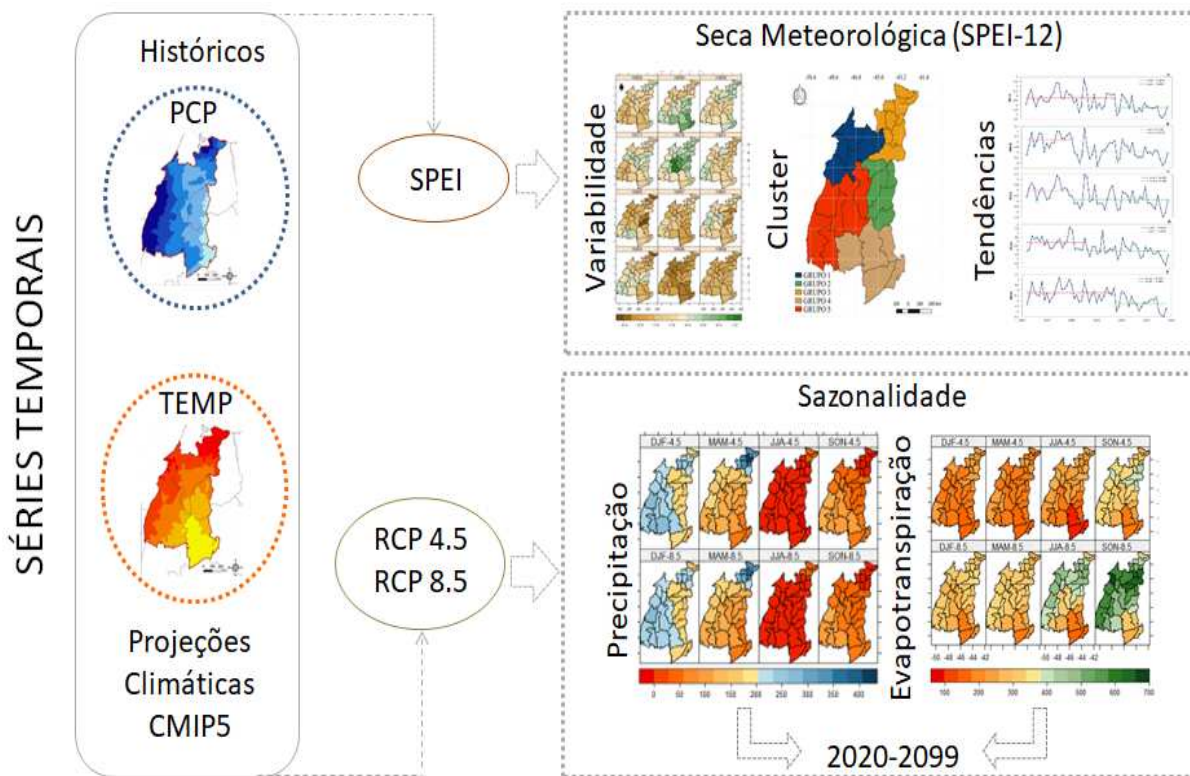


Figura 1. Estrutura da tese.

7. REFERÊNCIAS

- ABABNEH, F.; WADI, S. A.; ISMAIL, M. T. Haar and daubechies wavelet methods in the modeling banking sector. v. 8, p. 551–566, 2013.
- AHMED, K.SHAHID, S.; ISMAIL, T.; NAWAZ, N., W, X. Evaluation of Gridded Precipitation Datasets over Arid Regions of Pakistan. *Atmósfera*, v. 31, n.3, p.301-316, 2018. doi: 10.20937 / ATM.2018.31.03.0
- ALPINO, T. M. A.; FREITAS, C. M. COSTA, A. M. Seca como um desastre. *Revista Ciência & Trópico*. Recife, v. 38, n. 2, p.109-134, 2014.
- ALVALÁ, R.C.S. CUNHA, A.P.M.A.; BRITO, S.S.B.; SELUCHI, M.E.; MARENGO, J.A.; MORAES, O.L.L.; CARVALHO, M.A. Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v.91, 2019.doi.org/10.1590/0001-3765201720170209
- AMBRIZZI, T.; SOUZA, E.B.; PULWARTY, R.S. The Hadley and Walker regional circulations and associated ENSO impacts on the South American seasonal rainfall. In: Diaz HF, Bradley RS (Eds) *The Hadley circulation: present, past and future*, v.21, p. 203–235, 2004. doi:10.1007/978-1-4020-2944-8_8
- ANA. Agência Nacional de Águas (Brasil). Relatório de Gestão 2018. 158p. 2018. Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/todos-os-documentos-do-portal/documentosaud/relatoriodegestaodoexercicio20132018/relatorio_ana_2018_venviada_tcu_compressed.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2022.
- BARKER, L. J.; HANNAFORD, J.; CHIVERTON, A.; SVENSSON, C. From meteorological to hydrological drought using standardised indicators. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 20, n. 6, p. 2483, 2016.
- BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. *Atmosfera, tempo e clima*. 9 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- BEAUMONT, L. J.; PITMAN, A.; SARAH, P.; ZIMMERMANN, E. N.; YOCOZE, N. G.; THUILLER, W. Impactos das mudanças climáticas no mundo's maiscorregiões excepciona. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 108, n. 6, p.2306 ,2011.
- BHALME, H. N.; MOOLEY, D. A. Large-scale drought/floods and monsoon circulation. *Monthly Weather Review*, Boston, v. 108, n. 8, p. 1197-1211, 1980.
- BOHN, V. Y.; PICCOLO, M. C. Índice padronizado de precipitação e evapotranspiração como uma ferramenta para determinar a dinâmica hidrológica de regiões planas (Argentina). *Revista Geociências*, v. 37, n. 3, 2018.

- BONAN, G. B. Forests, Climate, and Public Policy: A 500- Year Interdisciplinary Odyssey - *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* v.2016, p.47:97–121, 2016. Doi:10.1146/annurev-ecolsys-121415-032359.
- BOTAL, CHRISTINA M., JOEL O. BOTAL, JACO P. DE WIT, KATLEGO P. NCONGWANE, AND ABIODUN M. ADEOLA. Drought Characteristics over the Western Cape Province, South Africa" *Water* 9, no. 11: 876.2017. <https://doi.org/10.3390/w9110876>
- BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G. C.; LJUNG, G. M. Time series analysis: forecasting and control. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. Modelagem climática e vulnerabilidades Setoriais à mudança do clima no Brasil / Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, p.590, 2016. ISBN: 978-85-88063-30-3
- BRITO, S. S. B.; CUNHA, A. P. M. A.; CUNNINGHAM, C. C.; ALVALÁ, R. C.; MARENGO, J. A.; CARVALHO, M. A. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. *International Journal of Climatology*, 38, p.517–529, 2018.
- BRITO, S. S. B.; CUNHA, A. P. M. A.; CUNNINGHAM, C. C.; ALVALÁ, R. C., MARENGO; J. A.; CARVALHO, M. A. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. *International Journal of Climatology*, v. 38, n. 2, p. 517- 529, 2018.
- BUSTAMANTE, M. M.C.; Nardoto, G.B.; Pinto, A.S.; Resende, J.C.F.c.; Takahashi, F.S.C.; Vieira, L.C.G. Potential impacts of climate change on biogeochemical functioning of Cerrado ecosystems. *Brazilian Journal of Biology*, 2012, v. 72, n. 3, p. 655-671, 2012.
- CANHOS, V. P.; SIQUEIRA, S. F.; MARINO, A.; CANHOS, D. A. L. Análise da vulnerabilidade da biodiversidade brasileira frente às mudanças climáticas globais, In: *Parcerias estratégicas*, v. 27, p. 113-139, 2008.
- CARLETON, T.A.; HSIANG, S.M. Social and economic impacts of climate. *Science*, v.353, 2016. doi.org/10.1126/science.aad9837
- CGEE-CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Desertificação, degradação da terra e secas no Brasil, Brasília-DF, 252 p., 2016

- COOK, B.I.; SMERDON, J.E.; SEAGER, R.; COATS, S. Global warming and 21st century drying. *Climate Dynamics*, v.43, p. 2607–2627,2014.
- DANTAS, J. C.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Drought impacts, social organization, and public policies in northeastern Brazil: a case study of the upper Paraíba River basin. *Environ Monit Assess*, v.192, n.317, 2020. doi.org/10.1007/s10661-020-8219-0
- DAS, P. K.; DUTTA, D.; SHARMA, J.R.; DADHWAL, V. K. Trends and behaviour of meteorological drought (1901–2008) over Indian region using standardized precipitation–evapotranspiration index. *International Journal of Climatology*, v.36, p. 909-916, 2016.
- DEBORTOLI, N. S.; DUBREUIL, V.; FUNATSU, B.; DELAHAYE, F.; OLIVEIRA, C.H; RODRIGUES, F. S.; SAITO, C. H.; FETTER, R. Rainfall patterns in the Southern Amazon: a chronological perspective (1971–2010). *Climatic Change*, v.130, p.1573-1480, 2015. Doi 10.1007/s10584-015-1415-1
- DIKICI, M. Drought Analysis With Diferente Indices for the Asi Basin (Turkey). *Scientific Reports*, v.10, n.20739, 2020. doi.org/10.1038/s41598-020-77827-z
- DUARTE, J. G. P.; FARIAS, A. A.; SOUSA, F. A. S.; SOUZA, J. T. A.; RAMOS, M. M.Q. Secas e Impactos na Agropecuária no Município de Campina Grande – PB. *Brasileira de Meteorologia*, v. 33, n. 2, p.289-297, 2018. doi.org/10.1590/0102-7786332008
- EMBRAPA - Grupo de Inteligência Territorial Estratégica (GITE). 2021. Disponível em <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/gite/quem/index.html>. Acessado em 27 set 2021.
- EYRING, V., BONY, S., MEEHL, G. A., SENIOR, C. A., STEVENS, B., STOUFFER, R. J., AND TAYLOR, K. E.: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937–1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>, 2016.
- ERASMI, S.; SCHUCKNECHT, A.; BARBOSA, M.; MATSCHULLAT, J. Vegetation greenness in Northeastern Brazil and its relation to ENSO warm events. *Remote Sensing*, v.6, p.3041–3058, 2014. doi.org/10.3390/rs6043041.
- ERASMI, S.; SCHUCKNECHT, A.; BARBOSA, M.; MATSCHULLAT, J. Vegetation greenness in Northeastern Brazil and its relation to ENSO warm events. *Remote Sensing*, v.6, p.3041–3058, 2014. doi.org/10.3390/rs6043041.

- FARIAS, A. A.; SOUSA, F. A. S.; NETO, J. M. M.; ALVES, A. S. Secas e Seus Impactos no Município de Boqueirão, PB, Brasil. *Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 12, n. 2, p. 1-15, 2017. doi:10.4136/ambi-agua.2004.
- FERNANDEZ, J. P. R.; FRANCHITO, S. H.; RAO, V. B. Future changes in the aridity of South America from regional climate model projections. *Pure and Applied Geophysics*, v.176, n.6, p.2719–2728, 2019. doi.org/10.1007/s00024-019-02108-4.
- FERREIRA, P.S.; GOMES, V.P.; GALVÍNCIO, J.D.; SANTOS, A.M.; SOUZA, W.M. Avaliação da tendência espaço-temporal da precipitação pluviométrica em uma região semiárida do estado de Pernambuco. *Brasileira de Climatologia*, v. 21, p.113-134, 2017.
- FREITAS, J. C.; ANDRADE, A. R. S.; BRAGA, C. C., NETO, A. H. G., ALMEIDA, T. F. Análise de Agrupamentos na Identificação de Regiões Homogêneas de Índices Climáticos no Estado da Paraíba, PB – Brasil. *Brasileira de Geografia Física*, v.6, n.4, p.732 – 748, 2013.
- FU, H., HARDY, J., DUFF, K.E. Selective vulnerability in neurodegenerative diseases. *Nat Neurosci*, v.21, p.1350–1358, 2018.. <https://doi.org/10.1038/s41593-018-0221-2>
- GASQUES, J. G.; SOUZA, G. S. E.; BASTOS, E. T.; GOMES, E. G.; DOSSA, D. Projeções do Agronegócio - Brasil - 2010/2011 A 2020/2021. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, 2011.
- GIBBS, W. J.; MAHER, J. V. Rainfall Deciles as Drought Indicators. *Bureau of Meteorology Bulletin n. 48*, Melbourne, Australia, 1967.
- GROPPO, J. D.; Moraes, J. M.; Beduschi, C. E.; Martinelli, L. A. Análise de séries temporais de vazão e precipitação em algumas bacias do estado de São Paulo com diferentes graus de intervenções antrópicas. *Geociências*. v. 24, n. 2, p. 181-193, 2005.
- GUIMARÃES, S.O.; COSTA, A.A.; VASCONCELOS JÚNIOR, F.C.; SILVA, E.M.; SALES, D.C.; ARAÚJO JÚNIOR, L.M.; SOUZA, S.G. Projeções de Mudanças Climáticas sobre o Nordeste Brasileiro dos Modelos do CMIP5 e do CORDEX. *Brasileira de Geografia*, v.3, p. 337-365, 2016.
- HAIR, F. J.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. *Análise Multivariada de Dados*. Bookman, p. 688, Porto Alegre, 2009.
- HASTENRATH, S. Exploring the climate problems of Brazil's Nordeste: a review. *Climatic Change*, v.112, p.243–251, 2012.

- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Central and South America. In: Barros, V. (ed) Climate change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Part B: Regional aspects, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, p.1499–1566, 2014.
- IPCC- Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p.1535. 2013.
- IPCC- Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, p.151. 2014.
- IPCC- Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas: Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystem (SRCCL), 2019.
- JOLY, C.A.; SCARANO, F.R.; SEIXAS, C.S.; METZGER, J.P.; OMETTO, J.P.; BUSTAMANTE, M.M.C.; PADGURSCHI, M.C.G.; PIRES, A.P.F.; CASTRO, P.F.D.; GADDA, T.; TOLEDO, P. (Eds.) 1º Diagnóstico Brasileiro de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos. Editora Cubo, São Carlos p.351. 2019. doi.org/10.4322/978-85-60064-88-5
- JUNIOR, L. M.MA.; FILHO, F. A. C.; CID, D. A. C.; SILVA, S. M.O.; SILVEIRA, C. S. Avaliação de Índices de Seca Meteorológica e Hidrológica em Relação ao Impacto de Acumulação de Água em Reservatório: Um Estudo de Caso para o Reservatório de Jucazinho-PE. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica, v.13, n.2,2020. doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.2.65562
- KHAN, M. I.; LIU, D.; FU, Q.; FAIZ, M. A. Detecting the persistence of drying trends under changing climate conditions using four meteorological drought indices. Meteorol. Appl. v.25, p.184–194, 2018.

- KILIÇ, D. K.; UĞUR, Ö. Multiresolution analysis of s&p500 time series. *Annals of Operations Research*, Springer, p. 1–20, 2016.
- KIM, T. W.; JEHANZAIB, M. Drought Risk Analysis, Forecasting and Assessment under Climate Change. *Water*, v.12, n.7, p.1862, 2020. doi:10.3390/w12071862
- KIRONO, D.G.C.; ROUND, V.; HEADY, C.; CHIEW, F.H.S.; OSBROUGH, S. Drought projections for Australia: Updated results and analysis of model simulations. *Weather and Climate Extremes*. v.30, n.100280, 2020.
- LAWRENCE D. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. *Nature Climate Change*, v.5, 2014. Doi: 10.1038/NCLIMATE2430
- LI, D.; LI, H.; QIAO, Y.; WANG, Y.; CAI, Z.; DONG, B.; SHI, C.; LIU, Y.; LI, X.; LIU, M. Effects of elevated CO₂ on the growth, seed yield, and water use efficiency of soybean (*Glycine max (L.) Merr.*) under drought stress. *Agricultural Water Management*, v.129, p.105–112, 2013.
- LI, Z.; FANG, G.; CHEN, Y.; DUAN, W.; MUKANOV, Y. Agricultural water demands in Central Asia under 1.5 °C and 2.0 °C global warming. *Agric. Water Manag.*, v.231, 2020
- LIANG, X.Z.; WU, Y.; CHAMBERS, R.G.; SCHMOLDT, D.L.; GAO, W.; LIU, C.; LIU, Y. A.; SUN, C.; KENNEDY, J.A. Determining climate effects on US total agricultural productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v.114, p.2285–2292, 2017. doi.org/10.1073/pnas.1615922114.
- LOVEJOY, T. E. NOBRE, C. Amazon Tipping Point. *Science Advances*, v. 4, ed.2, 2018. DOI: 10.1126/sciadv. Aat23408.
- MA, F.; YUAN, X.; JIAO, Y.; JI, P. Unprecedented Europe Heat in June–July2019: Risk in the Historical and Future Context. *Geophysical Research Letters*, v.47, p.1–10, 2020.
- MACHADO FILHO, H.; MORAES, C.; BENNATI, P.; RODRIGUES, R.A.; GUILLES, M.; ROCHA, P.; LIMA, A.; VASCONCELOS, I. Mudança do Clima e os Impactos na Agricultura Familiar no Norte e Nordeste do Brasil. *Centro Internacional de Políticas para o Crescimento Inclusivo. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento*, n.141, 2016.
- MARENGO, J. A. Mudanças climáticas e seus efeitos sobre a Biodiversidade: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o Território Brasileiro ao longo do Século XXI. *Series Biodiversidade No. 26*, MMA, 2006.

- MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P.; ALVES, L. M.; CUADRA, S.V.; VALVERDE, M. C.; TORRES, R. R.; SANTOS, D. C.; FERRAZ, S. E. T. Future change of climate in South America in the late twentyfirstcentury: intercomparison of scenarios from three regional climate models. *Climate Dynamics*, v.35, p.1073–1097, 2010. DOI 10.1007/s00382-009-0721-6.
- 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. doi.org/10.1007/s10584-014-1310-1.
- MARENGO, J. A.; DIAS, P. L. S. Mudanças climáticas globais e seus impactos nos recursos hídricos, In “Águas doces no Brasil”, Aldo da C. Rebouças, Benedito Braga, José Galiza Tundizi (Orgs.).2006. ISBN: 85-86303-41-0
- MARENGO, J. A.; LINCOLN, M. A.; REGINA, C.S A.; ANA, P. C., SHEILA, B. OSVALDO, L.L. M. Climatic characteristics of the 2010–2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 90, p.1973–1985, 2018.
- MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI / José A. Marengo – Brasília: MMA. 2a edição. p.212. (Série Biodiversidade, v. 26), ISBN 85-7738-038-6, 2007.
- MARENGO, J.A.; ALVES, L.M.; ALVALA, R.C.S.; CUNHA, A.P.; BRITO, S.; MORAES, O.L.L. Climatic characteristics of the 2010- 2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v.90, p. 1973-1985, 2018.
- MARENGO, J.A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity / drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. *Nature Climate Change*, v. 129, p. 103–115, 2015. doi.org/10.1007/s10584-014-1310- 1.
- MARENGO, J.A.; ESPINOZA, J.C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *Int. J. Climatol.*, v.36, 1033–1050, 2016<https://doi.org/10.1002/joc.4420>
- MARTINS, E. S. P. R.; SILVA, R. F. V.; BIAZETO, B.; QUINTANA, C. M. Monitor de Secas no Nordeste - o processo In: DE NYS, E.; ENGLE, N. L.; MAGALHÃES, A. R. (Org.). *Secas no Brasil: política e gestão proativas*. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE; Banco Mundial, p.292, 2016.

- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to the time scales. In: Conference on Applied Climatology, 1993, Anaheim, CA. Proceedings. Boston: American Meteorological Society, p. 179-184, 1993.
- MOSTAFAZADEH, R.; ZABIHI, M. Comparison of SPI and SPEI indices to meteorological drought assessment using R programming (Case study: Kurdistan Province). *Journal of the Earth and Space Physics*, v.42, n.3, 2016.
- MOURA, M.M.; SANTOS, A.R.; PEZZOPANE, J.E.M.; ALEXANDRE, R.S.; SILVA, S.F.; PIMENTEL, S.M.; ANDRADE, M.S.S.; SILVA, F.G.R.; BRANCO, E.R.F.; MOREIRA, T.R.; SILVA, R.G.; CARVALHO, J.R. Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. *Science of the Total Environment* v.651, p. 1639-1651, 2019. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.242.
- MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VANVUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, v. 463, p. 747–756, 2010. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- NASCIMENTO, J.M.; FRADE, T.G.; SILVA, R.M. Modelagem da resposta do escoamento em uma bacia do semiárido da Paraíba utilizando o modelo SWAT. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.11, n.3, p.1137-1150, 2018.
- NOBRE, C. A.; BORMA, L. S. Tipping points for the Amazon Forest. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v.1, p.28–36, 2009. Doi 10.1016/j.cosust.2009.07.003
- NÓBREGA, R.L.B.; Guzha, A.C.; Torres, G.N.; Kovacs, K.; Lamparter, G.; Amorim R.S.S.; Couto, E.; Gerold, G. Effects of conversion of native cerrado vegetation to pasture on soil hydro physical properties, evapotranspiration and streamflow on the Amazonian agricultural frontier. *PLoS ONE* v.12, n.6, 2017. doi.org/10.1371/journal.pone.0179414
- NÓIA JUNIOR, R.D.S.; SENTELHAS, P.C. Soybean-maize off-season double crop system in Brazil as affected by El Niño Southern Oscillation phases. *Agricultural Systems*, v. 173, p. 254–267, 2019. doi.org/10.1016/j.agsy.2019.03.012

- NUNES, L. F. C. V; MEDEIROS, P. H. A. Análise histórica da severidade de secas no Ceará: efeitos da aquisição de capital hidráulico sobre a sociedade. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v.17, n.18, 2020. doi.org/10.21168/rega.v17e18.
- NÚÑEZ COBO, J.; VERBIST, K. Atlas de sequías de América Latina y el Caribe - UNESCO Digital Library. 1. ed. UNESCO y CAZALAC, 2018.
- O'NEILL, B.C.; TEBALDI, C.; VAN VUUREN, D.P.; EYRING, V.; FRIEDLINGSTEIN, P.; HURTT, G.; KNUTTI, R.; KRIEGLER, E.; LAMARQUE, J.F.; LOWE, J.; MEEHL, G.A.; MOSS, R.; RIAHI, K.; SANDERSON, B.M. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geoscientific Model Development*, v.9, p.3461-3482, 2016. doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016.
- OLIVEIRA, S. F.; PRADO. R. B.; MONTEIRO. J. M. G. Impactos das mudanças climáticas na produção agrícola e medidas de adaptação sob a percepção de atores e produtores rurais de Nova Friburgo. *Interações, Campo Grande, MS*, v. 23, n. 4, p. 1179-1201, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.20435/inter.v23i4.3548>
- PACA, V. H. M. da; ESPINOZA-DÁVALOS, G. E.; HESSELS, T. M.; MOREIRA, D. M.; COMAIR, G. F.; BASTIAANSSEN, W. G. The spatial variability of actual evapotranspiration across the Amazon River Basin based on remote sensing products validated with flux towers. *Ecological processes*, v. 8, n. 1, p. 6, 2019.
- PALMER, W. C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new Crop Moisture Index. *Weatherwise, Washington*, v. 21, p. 156–161, 1968.
- PALMER, W. C. Meteorological drought. Washington: U. S. Department of Commerce, n. 45, p.65, 1965.
- PETTITT, A. N. A non-parametric Approach to the Change-point Problem. *Applied Statistics*, v.28. 1979. <https://doi.org/10.2307/2346729>.
- PBMC- Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. (AMBRIZZI, T.; ARAÚJO, M. (Org.). Base científica das mudanças climáticas: Grupo de Trabalho 1 - Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas. Rio de Janeiro: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 464p. 2014.
- PBMC-Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. 2016. Mudanças Climáticas e Cidades. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas [RIBEIRO, S.K.; SANTOS, A.S. (Eds.)]. Universidade Federal do Rio de Janeiro, p.116, 2016. ISBN: 978-85-285-0344-9.

- PENALBA, O.C.; RIVERA, J.A. Precipitation response to El Niño/La Niña events in southern South America – emphasis in regional drought occurrences. *Advances Geosciences*, v. 42, p.1-14, 2016. doi.org/10.5194/adgeo-42-1-2016.
- PEREIRA, C. N.; PORCIONATO, G. L.; CASTRO, N. C. Aspectos socioeconômicos da região do MATOPIBA. *Boletim Regional, Urbano e Ambiental*, v. 18, p. 47–59, 2018.
- PESSOA, M. F.; ASSIS, L. F.; VIEIRA, A. S. Planejamento ótimo da água na agricultura irrigada: um estudo de caso em um perímetro paraibano. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 07, n. 1, p. 221-234, 2016.
- PETRIE, R.; DENVIL, S.; AMES, S.; LEVAVASSEUR, G.; FIORE, S.; ALLEN, C.; ANTONIO, F.; BERGER, K.; BRETONNIÈRE, P.A.; et al. Coordinating an operational data distribution network for CMIP6 data. *Geoscientific Model Development*, v.14, p.629–644, 2021. doi.org/10.5194/gmd-14-629-2021
- PINHEIRO, J. U.; NEVES, J. A.; CHAVES, R. R.; MENDES, D.; BARRETO, N. C. Avaliação de Modelos do CMIP5 que Melhor Expressam a Atuação dos Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCANS) no Nordeste brasileiro (NEB) (Evaluation of the CMIP5 Models that Express the Best Performance of Vortice in High Levels (VCANS) in Northeast...). *Brasileira Geografia Física*, v. 7, n. 5, 2014.
- RAMALHO, M.F.J.L.; GUERRA, A.J.T. O risco climático da seca no semiárido brasileiro. *Revista Territorium*, v.25, 2018.
- REIS; L. C.; SILVA; C. M. S.; BEZERRA; B. G.; SPYRIDES, M. H. C. Caracterização da variabilidade da precipitação no MATOPIBA, região produtora de soja. *Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 4, p. 1425-1441, 2020.
- ROCHA, V.M.; CORREIA, F.W.; FIALHO, E.S. A Amazônia frente às mudanças no uso da terra e do clima global e a importância das áreas protegidas na mitigação dos impactos: um estudo de modelagem numérica da atmosfera. *Acta geográfica*, p. 31-48. 2012. doi:10.5654/actageo2012.0002.0002.
- RODRIGUES, A.; FACHEL, J. M. G.; PASSUELLO, A. C. Estatística espacial e análise de cluster em dados de desastres naturais: mapeamento das inundações no Rio Grande do Sul entre 2003 e 2009. *Revista Iniciação Científica*, v. 10, n. 1, p. 48-67. 2012.
- RODRIGUES, R.Á.; PEDRINI, J.E.; FRAISSE, C.W.; FERNANDES, J.M.C.; JUSTINO, F.B.; HEINEMANN, A.B.; COSTA, L.C.; VALE, F.X.R. Utilization of

- the cropgrosoybean model to estimate yield loss caused by Asian rust in cultivars with different cycle. *Bragantia* v.71, n.2, p.308-317, 2012.
- ROOY, M. P. V. A rainfall anomaly index independent of time and space. *Notos*, Pretoria, v. 14, p. 43-48, 1965.
- SANTOS, C. A. G.; BRASIL NETO, R. M.; SILVA, R. M.; COSTA, S. G. F. Cluster analysis applied to spatiotemporal variability of monthly precipitation over Paraíba state using tropical rainfall measuring mission (TRMM) data. *Remote Sensing*, v.11, n.6, 2019. doi.org/10.3390/rs11060637.
- SANTOS, C. A. G.; BRASIL NETO, R. M.; SILVA, R. M.; PASSOS, J. S. A. Integrated spatiotemporal trends using TRMM 3B42 data for the upper São Francisco River basin, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, v.190, n.175,2018. doi.org/10.1007/s10661-018-6536-3.
- SANTOS, S. R. Q.; Amaral, A. P. M.; RIBEIRO-NETO, G. G. Avaliação de Dados de Precipitação para o Monitoramento do Padrão Espaço-Temporal da Seca no Nordeste do Brasil. *Brasileira de Climatologia*, n. 15, v.25, 2019.
- SHRESTHA, A.; RAHAMAN, M.M.; KALRA, A.; JOGINEEDI, R.; MAHESHWARI, P. Climatological Drought Forecasting Using Bias Corrected CMIP6 Climate Data: A Case Study for India. *Forecasting*, v.2, p.59–84,2020.
- SILVA, M. O.; FREIRE, M. B. G. S.; MENDES, A. M. S.; FREIRE, F. J.; CAMPOS, M. C. C.; AMORIM, L. B. Discriminação de diferentes classes de solos irrigados com águas salinas, na região de Mossoró, RN, com o uso de análise multivariada. *Ambiência*, v. 6, n. 2, p. 261-270, 2010.
- SILVA, L. P.; XAVIER, A. P. C.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Modeling land cover change based on an artificial neural network for a semiarid river basin in northeastern Brazil. *Global Ecology and Conservation*, v.21, 2019. doi.org/10.1016/j.gecco. 2019.e00811.
- SINGH, T. P.; KUMBHAR, V.; DAS, S.; DESHPANDE, M. M.; DHOKA, K. Comparison of TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) estimation with ground-based precipitation data over Maharashtra, India. *Environment, Development and Sustainability*, v.22, p. 5539–5552, 2019. doi.org/10.1007/s10668-019-00437-x
- SOLH, M.; GINKEL, M. Drought preparedness and drought mitigation in the developing world's drylands. *Weather and Climate Extremes*, v.3, n.1, p.62-66, 2014.

- SOUZA, T. S.; NASCIMENTO, P. S. Análise da Variabilidade Espacial e Temporal da Precipitação Pluviométrica na Região Hidrográfica do Recôncavo Sul (BA), v.27, n.16, p. 1-18, 2020.
- STAGGE, J. H.; TALLAKSEN, L.M.; GUDMUNDSSON, L.; VAN LOON, A. F.; STAHL, K. Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, v. 36, n. 4, p. 2132–2138, 2015.
- STRASSBURG, B. B. N., BROOKS, T.; FELTRAN-BARBIERI, A. I.; CROUZEILLES, R.; LOYOLA, R.; LATAWIEC, A. E.; FRANCISCO J. B. O. F.; SCARAMUZZA, C.A. M.; SCARANO, F. R.; SOARES-FILHO, B.; BALMFORD, A. Moment of truth for the Cerrado hotspot. *Nat Ecol Evol* v.1, n. 99, 2017. doi.org/10.1038/s41559-017-0099
- SVOBODA, M.; FUCHS, B. *Handbook of drought indicators and indices*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization and Global Water Partnership, 2017. Disponível em: <https://www.droughtmanagement.info/literature/GWP_Handbook_of_Drought_Indicators_and_Indices_2016.pdf>. Acesso em: 26 jun 2021.
- CMIP6 landscape. *Nature Climate Change*, v.9, n.727,2019. doi.org/10.1038/s41558-019-0599-1.
- TIJDEMAN, E.; BARKER, L. J.; SVOBODA, M. D.; STAHL, K. Natural and human influences on the link between meteorological and hydrological drought indices for a large set of catchments in the contiguous United States. *Water Resources Research*, v.54, p.6005–6023, 2018. doi.org/10.1029/2017WR022412.
- TORRES, R. R.; LAPOLA, D. M.; GAMARRA, N. L. R. Future climate change in the Caatinga. In J. M. C. SILVA, I. R. LEAL, M. TABARELLI (Eds.), *Caatinga*. Cham: Springer, 2017. doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3_15.
- UNCCD-United Nations Convention to Combat Desertification. *Texto: Land and Drought*. 2018. Disponível em: Acesso em: 23 de ago. 2021.
- VAN LOON, A.F.; LAAHA, G. Hydrological Drought Severity Explained by Climate and Catchment Characteristics. *Journal of Hydrolog*, v.526, p.3-14, 2015. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.059
- VERMA, N.; VERMA, A. Performance analysis of wavelet thresholding methods in denoising of audio signals of some indian musical instruments. *International Journal of Engineering Science and Technology*, v. 4, n. 5, p. 2040–2045, 2012.

- VICENTE-SERRANO, S. M. A.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. Multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal Climate*, v. 23, p. 1696-1718, 2010. doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1
- VIEIRA, R. M. S. P.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R. C. S.; SESTINI, M. F.; AFFONSO, A. G.; RODRIGUEZ, D. A.; BARBOSA, A. A.; CUNHA, A. P. M. A.; VALLES, G. F.; CREPANI, E.; OLIVEIRA, S. B. P.; SOUZA, M. S. B.; CALIL, P. M.; CARVALHO, M. A.; VALERIANO, D. M.; CAMPELLO, F. C. B.; SANTANA, M. O. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. *Solid Earth*, v. 6, n. 1, 347–360, 2015.
- WANG, Z.; LI, J.; LAI, C.; ZENG, Z.; ZHONG, R.; CHEN, X.; ZHOU, X.; WANG, M. Does drought in China show a significant decreasing trend from 1961 to 2009? *Science of the Total Environment*, v.579, n.2, p.314–324, 2017.
- YUE, S.; PILON, P.; CAVADIAS, G. Power of the Mann-Kendall and spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, v. 259, n. 1-4, p. 254-271, 2002.
- ZHU, X., TROY, T. J. Agriculturally relevant climate extremes and their trends in the world's major growing regions. *Earth's future*, v.6, p.656–672, 2018. doi.org/10.1002/2017EF000687.

CAPÍTULO 2

VARIABILIDADE ESPAÇO TEMPORAL DA SECA METEOROLÓGICA NAS MICRORREGIÕES DO MATOPIBA

RESUMO

A avaliação de risco de extremos a exemplo da seca no MATOPIBA é primordial, tendo em vista a susceptibilidade do local ao fenômeno que pode vir a causar danos à região. Portanto, objetivou-se através deste trabalho identificar e compreender a variabilidade espaço temporal de eventos de secas meteorológicas ocorridas nas microrregiões pertencentes ao MATOPIBA através de técnicas de análise de séries temporais. Utilizaram-se séries dados históricos mensais de precipitação e temperatura do ar para o período de 1961 a 2018 provenientes das reanálises do CRU-TS-4.03 que fazem parte da base de dados do WorldClim 2.1. A caracterização da seca se deu através do Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI), especificamente utilizando-se do SPEI com incidência de doze meses (SPEI-12), que caracteriza uma interface da seca meteorológica e hidrológica. As microrregiões com características homogêneas de SPEI-12 foram obtidas por meio da análise de agrupamento, assim como aplicação dos testes não-paramétricos de Mann-Kendall (tendência) e Pettitt (quebra estrutural) para verificar os padrões temporais para a região. Portanto, através da variabilidade das secas na região foi possível observar o aumento progressivo de intensidade e magnitude desse evento em toda a região, com ênfase nos períodos mais recentes. Além disso, constatou-se que o grupo mais seco é o Grupo 5, que engloba grande parte do estado do Tocantins (com exceção de três microrregiões) e uma microrregião do extremo sul maranhense. Em contrapartida, destaca-se o Grupo 1 como o mais úmido do período analisado, que abrange o sudoeste do Maranhão e norte do Tocantins. As análises de tendências identificaram que todas as microrregiões analisadas apresentaram tendências decrescentes significativas, denotando aumento das secas durante os anos avaliados.

Palavras-chave: Índice de precipitação pluvial e evapotranspiração, variabilidade, agrupamento, tendência.

ABSTRACT

Drought is a recurrent natural event, and its evaluation is important in places susceptible to this phenomenon. This is the case of the extensively explored region known as MATOPIBA, acronym for the four states that compose it (Maranhão, Tocantins, Piauí and Bahia). The objective of this work was to identify and understand the spatiotemporal variability of meteorological drought events that have occurred in the microregions of the MATOPIBA through time series analysis techniques. Monthly historical data series of precipitation and air temperature for the period of 1961-2018 based on CRU-TS-4.03 reanalysis were used. The characterization of the drought was based on the Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI), specifically the SPEI with a twelve-month incidence (SPEI-12), which characterizes an interface of meteorological drought. Microregions with homogeneous SPEI-12 characteristics were obtained through cluster analysis, as well as non-parametric Mann-Kendall test and Sen's slope estimator, and Pettitt's homogeneity tests to investigate the temporal patterns for the region. The analysis of the variability of droughts in the region indicated a progressive increase in the intensity and magnitude of this event throughout the region, especially in more recent periods. Further, Group 5, encompassing a large part of the state of Tocantins (with the exception of three microregions) and a microregion in the extreme south of Maranhão, was the driest group. In turn, Group 1, which covers the southwest of Maranhão and north of Tocantins, stood out as the most humid in the analyzed period. The trend analyses showed that all microregions analyzed showed significant decreasing trends, resulting in an increase in drought events in the region during the years evaluated.

Keywords: Precipitation and evapotranspiration index, variability, clustering, trend.

1. INTRODUÇÃO

Visto como um evento natural recorrente, a seca ocorre em basicamente todos os regimes climáticos, cujos impactos prejudicam diferentes setores da sociedade, como a geração da energia elétrica, agricultura, recursos hídricos, turismo e os ecossistemas (Zhao et al., 2018; Marengo et al., 2020; Wang et al., 2023). O grande desafio dos gestores naturais e tomadores de decisões é monitorar o começo, evolução e o término das secas (Dantas et al., 2020).

As secas são classificadas em quatro categorias, como meteorológica que corresponde à diminuição de precipitação pluviométrica num determinado período de tempo, a seca agrícola em decorrência de um déficit hídrico prolongado ocasionando redução de água no solo, a hidrológica que representa uma diminuição dos níveis nos locais de armazenamento de água, e por último a socioeconômica que está relacionada aos prejuízos sociais e ambientais fomentado pela ausência contínua da água (Malik et al., 2021; Ojha et al., 2021).

O monitoramento de eventos extremos em regiões consideradas como fronteiras para novos investimentos do agronegócio no Brasil, a citar o MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) é de grande pertinência, tendo em vista que um bom entendimento da variabilidade climática é vital para a resiliência climática e a melhoria da segurança alimentar em todo o mundo (Khan et al., 2018; Araújo et al., 2019).

Entre todos os tipos de secas, as do tipo meteorológicas são as mais importantes, pois a partir dela é que os outros tipos são desencadeados, vindo a prejudicar o desenvolvimento de diversas atividades da sociedade (Dash et al., 2020).

Monitorar as secas, a exemplo das meteorológicas e seus efeitos, não é uma tarefa fácil. É fundamental criar uma rede de observação que registre com precisão a variabilidade espaço-temporal da precipitação, o que é um desafio, principalmente nas regiões áridas e semiáridas. Entretanto, com a evolução da tecnologia, métodos de estimativas têm sido utilizados para supervisionar desastres naturais e auxiliar na gestão de recursos hídricos em grandes áreas (Quintana-Seguí et al., 2020).

Diante de sua complexidade, diversos índices vêm sendo desenvolvidos para auxiliar a supervisão desse fenômeno e entre esses o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) é considerado um dos mais difundidos no mundo. Isso está ligado ao fato de que o SPEI é um índice que permite a avaliação das secas em diferentes escalas de tempo (3, 6, 9, 12, 24 e 48 meses) e categorias, viabilizando comparações entre resultados de diferentes regiões (Caloiero et al., 2018).

No entanto, métodos de análise de tendências vêm atraindo a atenção de diversos pesquisadores por contribuir no conhecimento do padrão das secas, colaborando para sua compreensão, assim como variações futuras. Em relação às secas, os testes não paramétricos de Mann-Kendall, Sen's Slope e Pettitt são úteis para identificar e caracterizar as suas tendências em várias escalas de tempo (Dashtpajardi et al., 2018; Khan et al., 2018).

Do ponto de vista alternativo, diversos trabalhos estão sendo elaborados com propósito de identificar regiões com comportamento similares em relação à ação e comportamento das secas. Deste modo, as técnicas de análises de clusters demonstram ser uma ferramenta eficiente na identificação dos fatores que induzem a ocorrência de secas em diferentes localidades, auxiliando na compreensão das secas de maneira multidisciplinar (Yang et al., 2018).

A identificação do comportamento espacial das secas é um trabalho importante, uma vez que cria subsídios para o mapeamento de áreas susceptíveis a esse evento, além de ajudar no planejamento das atividades agrícolas e no gerenciamento dos recursos hídricos.

Diante do exposto o presente estudo tem como objetivo identificar e compreender a variabilidade espaço temporal de eventos de secas meteorológicas ocorridos nas microrregiões do MATOPIBA no período de 1961 a 2018 mediante aplicação do índice SPEI.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O MATOPIBA localiza-se entre a região Amazônica e o Semiárido Brasileiro, englobando áreas das regiões Norte e Nordeste do Brasil. Sua área total abrange os estados do Maranhão (33%), Tocantins (38%), porção sudoeste do Piauí (11%) e noroeste da Bahia (18%), com total de quase 74 milhões de hectares (Miranda et al., 2014; Salvador e Brito, 2018) (Figura 1). Incluem o bioma Cerrado (91%), Amazônia (7,3%) e Caatinga (1,7%), sendo a cobertura vegetal natural formada predominantemente por savanas (63,6%), áreas de tensão ecológicas (15%) e floresta estacional decidual (10,7%) (Sano et al., 2019). A respeito do relevo, 47,9% são de áreas planas (até 3% de declividade) e 33,7% de áreas suavemente onduladas (de 3% a 8%), ou seja, uma declividade favorável à mecanização das atividades agrícolas.

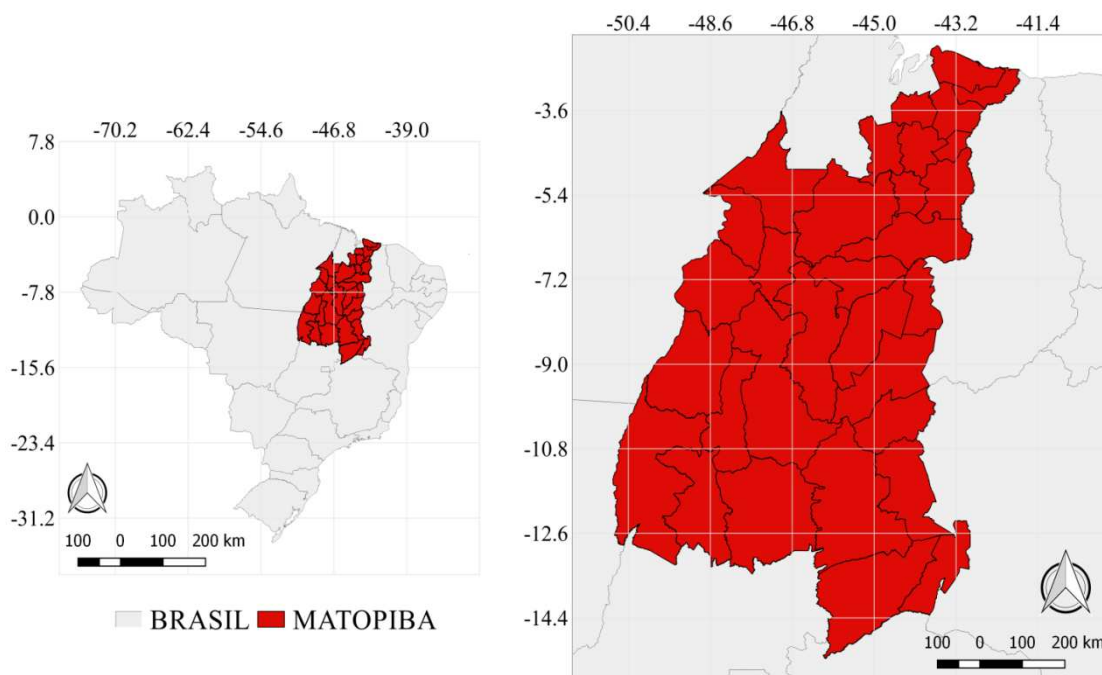


Figura 1. Localização da área de estudo.

O clima do MATOPIBA é tropical úmido com inverno seco (Aw), de acordo com a classificação de Köppen, com temperaturas médias mensais que variam de 22 a 28°C em todos os meses do ano, e precipitação pluviométrica média anual entre 800 a 2.000 mm, distribuída em duas estações bem definidas: a estação seca, que estende de maio a setembro, e a estação chuvosa, de outubro a abril. Suas pastagens plantadas ocupam cerca de 8 milhões de hectares, 3 dos quais com indicativos de degradação (Alvares et al., 2014).

O calor é mais intenso nas regiões mais úmidas e mais baixas, formando seis unidades climáticas com diferentes ciclos de precipitação que vão desde o superúmido (equatorial) até o semiárido (tropical central). As áreas mais baixas da região são observadas no Norte maranhense e as áreas mais elevadas, no Extremo Oeste baiano. As regiões hidrográficas são áreas banhadas pelos principais rios do MATOPIBA: Araguaia, Tocantins, São Francisco, Parnaíba, Itapicuru, Mearim, Gurupi e Pindaré (Reis et al., 2020).

2.2 Dados

Os dados meteorológicos utilizados neste estudo constam dos valores históricos mensais de temperatura mínima e máxima (°C) e precipitação total (mm) para o período que compreende de janeiro de 1961 a dezembro de 2018. Esses dados são reformatados das reanálises do Climatic Research Unit- CRU-TS-4.03 (dados em pontos de grade com

resolução espacial de 0,5°) pela Unidade de Pesquisa Climática da Universidade de East Anglia (Fick; Hijmans, 2017).

Os dados do CRU-TS-4.03 são produzidos usando a interpolação de ponderação de distância angular (ADW), fornecendo dados em campos de grade mensais baseados em valores observacionais mensais obtidos a partir de dados diários ou subdiários pelos Serviços Meteorológicos Nacionais e outros agentes externos (Harris; Jones, 2020).

Fez-se uso dos acumulados mensais de precipitação pluvial e médias mensais de temperatura do ar para o cálculo da evapotranspiração de referência (ETP), para em seguida dar procedimento a determinação dos valores do Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) para as microrregiões que compõem a região do MATOPIBA.

2.3 Metodologia

A análise estatística do trabalho se deu por meio do uso de planilha eletrônica para organização dos dados, assim como do Software R (R Core Team, 2019) para a obtenção do Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI), fazendo-se uso dos seguintes pacotes: mapproj, lattice, RColorBrewer, sp, sf, GDALtools, cartography e raster. Como também para a execução da estatística Multivariada (Análise de Agrupamento) e os testes não-paramétricos de Pettitt e o de Mann-Kendall.

2.3.1 Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI)

O SPEI (Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração) desenvolvido por Serrano et al. (2010), permite comparar a severidade da seca através do tempo e do espaço, podendo ser aplicado a variados climas. Seu cálculo se dá pela diferença entre a precipitação pluvial (P) e evapotranspiração de referência (ETP), estimando, assim, a descrição da severidade das condições de seca em determinadas regiões (Li et al., 2017)

A evapotranspiração de referência (ETP), é estimada a partir da equação de Thornthwaite, como descrito em (Ometto et al., 1981), conforme equações:

$$ETP = 16K \left(\frac{10T}{I} \right)^m \quad (1)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514} \quad (2)$$

$$K = \left(\frac{N}{12}\right) \left(\frac{NDM}{30}\right) \quad (3)$$

$$m = 6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,79 \times 10^{-2} I + 0,492 \quad (4)$$

em que: ETP é a evapotranspiração de referência; T é a temperatura média mensal (°C); I é o índice de calor, que é calculado como a soma de 12 valores mensais do índice (*i*); *T_i* é derivado da temperatura média mensal; *K* é um coeficiente de correção, calculado em função da latitude e mês, e *m* é um coeficiente baseado no índice de calor *I*; *NDM* é o número de dias do mês e *N* é o número máximo de horas de Sol.

Portanto, a medida simples do excedente ou déficit de água para o período analisado é expressa pela diferença (*D_i*) entre a precipitação pluvial (*P_i*) e a evapotranspiração de referência (ETP) para o mês *i* obtido a partir da Equação (5):

$$D_i = P_i - ETP_i \quad (5)$$

Os valores de *D_i* calculados são agregados em diferentes escalas de tempo para detecção de padrões temporais da seca (Equação 6). Sendo assim, os valores SPEI são calculados para as escalas mensal, trimestral, semestral e anual (SPEI-1, SPEI-3, SPEI-6 e SPEI-12).

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-1-i} - ETP_{n-1-i}), \quad n \geq k \quad (6)$$

em que: *n* é a frequência de cálculo e *k* é a escala de tempo.

O balanço hídrico, expresso por *D_i* é então normalizado utilizando a função densidade de probabilidade da distribuição log-logística para calcular a série temporal do SPEI, como segue a Equação (7):

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right)^{-2} \quad (7)$$

em que: *α*, *β* e *γ* são parâmetros de escala, forma e origem, respectivamente, para valores de *D* no intervalo ($\gamma > D < \infty$). A função de distribuição de probabilidade *F(x)* da série temporal do índice *D_i* é então definida mediante Equação (8):

$$F(x) = \int_0^x f(t) dt = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma}\right)^\beta\right]^{-1} \quad (8)$$

O SPEI é obtido como os valores padronizados de *F(x)* segundo (Serrano et al., 2010; Li et al., 2015) a partir da Equação (9):

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} \quad (9)$$

em que: $W = (-2\ln(p))^{0,5}$, para $p \leq 0,5$, sendo p a probabilidade de exceder um valor D determinado, $p = 1-F(x)$. Se $p > 0,5$, p é substituído por $1-p$ e o sinal do SPEI resultante é invertido. As constantes são: $C_0 = 2,515517$, $C_1 = 0,802853$, $C_2 = 0,010328$, $d_1 = 1,432788$, $d_2 = 0,189269$, $d_3 = 0,001308$.

A partir de então o SPEI torna-se uma variável padronizada (média 0 e o desvio padrão 1) podendo ser comparada com outros valores de SPEI ao longo do tempo e do espaço de acordo com as categorias de seca descritas pelo índice (Tabela 1) (Mckee et al., 1993; Tan et al.,2015).

Tabela 1. Classificação da seca com base no SPEI.

Classificação da seca	SPEI
Sem seca	$\geq -0,5$
Seca suave	$(-1,0; -0,5)$
Seca moderada	$(-1,5; -1,0)$
Seca severa	$(-2,0; -1,5)$
Seca extrema	$\leq -2,0$

2.3.2 Análise de Agrupamento (AA)

Os agrupamentos são um dos métodos de análise de dados mais utilizados para inúmeras aplicações práticas em diversas áreas de pesquisa (Ahmad; Starkey, 2017). É uma técnica cuja finalidade é criar grupos (*clusters*) de objetos semelhantes de certo conjunto de entradas (Osiński, 2005; Härdle; Simar, 2007). Esse método reduz a subjetividade, onde os bons clusters têm a característica de que objetos pertencentes ao mesmo cluster são "similares" uns aos outros, enquanto objetos de dois *clusters* diferentes são "dissimilares" (Osiński, 2005).

O método de agrupamento hierárquico de Ward, cuja função de agrupamento utilizada foi a Distância Euclidiana, foi utilizado no estudo, com o propósito de agrupar os indivíduos com base em suas características. O método de Ward interliga as amostras por suas associações e considera, para a formação inicial dos grupos, aqueles indivíduos que proporcionam a menor soma de quadrados dos desvios. As regiões homogêneas foram constatadas por meio de uma matriz de dados, organizada da seguinte maneira: as linhas são compostas pelas microrregiões e as colunas pelos valores mínimos do SPEI-12 para todo o período.

Segundo Wilks (2006) e Bem et al. (2015) a função de dissimilaridade é empregada como critério para medir a distância entre dois pontos ou para designar o quanto eles são semelhantes, através da raiz quadrada da soma dos quadrados das diferenças de valores para cada variável, e é calculada de acordo com a Equação (10):

$$d_{ij} = [X_i - X_j] = \left[\sum_{k=1}^p (X_{i,k} - X_{j,k})^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

em que:

X_{ik} é o valor da variável X_k para o objeto i ;

X_{jk} é o valor da variável X_k para o objeto j e

p variáveis usadas X_1, \dots, X_p

O método hierárquico de Ward procura por partições que minimizem a perda associada a cada agrupamento (Everitt, 1974; Bussab et al., 1990; Mingoti, 2005). A perda é calculada mediante diferença entre a soma dos erros quadráticos de cada padrão e a média da partição em que está contido, conforme Equação (11)

$$SQD = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad (11)$$

em que:

n é o número total de elementos do agrupamento e x_i é o i -ésimo elemento do agrupamento.

2.3.3 Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann Kendall foi derivado dos estudos propostos por Mann (1945) e Kendall (1975), sendo amplamente utilizado na análise de tendências de secas hidrológicas e meteorológicas (Yeh, 2019). Esse teste verifica a existência de uma tendência em uma determinada série temporal, identificando eventuais variações nas tendências ao longo do tempo, além detectar os possíveis pontos de mudança na série do SPEI-12.

A estatística usada é calculada dada uma série temporal t_1, t_2, \dots, t_n e sua sequência de dados correspondentes x_1, x_2, \dots, x_n , sendo n o número de pontos de dados. A hipótese nula do teste indica uma amostra com variáveis aleatórias e identicamente distribuídas, enquanto a hipótese alternativa indica distribuições não idênticas para X_i e X_j (Kazemzade; Malekian, 2018), calculado como: em que: x_i e x_j são

$$S = \sum_{i=j}^{n-1} \sum_{j=1+i}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_i) \quad (12)$$

valores de dados para os anos; n o número de pontos de dados usados, i e j ($j > i$), respectivamente, e $\operatorname{sgn}(x_j - x_i)$ é a função do sinal, dada como:

$$\begin{aligned} \operatorname{sgn}(x_j - x_i) &= \{+1 \text{ if } x_j - x_i > 0 \\ &= 0 \text{ if } x_j - x_i = 0 \\ &= -1 \text{ if } x_j - x_i < 0 \end{aligned} \quad (13)$$

A variância dessa distribuição é calculada pelas Equações 14 e 15:

$$\operatorname{var}(S)n = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^p t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (14)$$

em que: p é o número de grupos empatados, o sinal de soma (p) indica a soma de todos os grupos vinculados, e t_i é o número de valores no grupo (PIYOOSH; GHOSH, 2017).

$$Z_s = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{(s)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{(s)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (15)$$

em que: Z caracteriza se existe tendência no teste para os dados utilizados. Os valores Z positivos indicam uma tendência crescente e os valores Z negativos indicam uma tendência decrescente. Se o valor de Z for 0, não há tendência.

O Tau Kendall (Kendall, 1938, Kendall, 1948) mede a força da relação monotônica entre x e y . O coeficiente de correlação tau de Kendall é dado por:

$$\tau = \frac{x_i - x_j}{i - j} \text{ for all } j < i \quad (16)$$

2.3.3.1 Estimador de inclinação de Sen's slope (Sen)

O teste de inclinação não paramétrico de Sen foi desenvolvido por Sen (1968) cujo intuito é calcular a magnitude das tendências. Para o cálculo de Sen's slope, computam-se todas as curvaturas de todos os pares dos valores apresentados em determinada série temporal. É um método insensível a outliers e dados ausentes, sendo mais rigoroso do que a curvatura da regressão linear, provendo uma medida mais real das tendências em séries temporais (Silva et. al., 2015). A inclinação é obtida através da Equação (17):

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \text{ for } i = 1, \dots, n \quad (17)$$

em que: x_j e x_k são os valores nos tempos j e k ($j > k$), respectivamente. Se houver n valores de x na série temporal, obtemos até $N = n(n-1)/2$ estimativas de inclinação

Q_i . Os valores N de Q_i são classificados do menor ao maior, e o estimador de inclinação de Sen é a mediana dos valores N de Q_i ; este valor é estimado conforme Equação (18):

$$Q_{med} = \begin{cases} Q\left(\frac{n+1}{2}\right) & \text{se } N \text{ for ímpar} \\ \frac{Q\left(\frac{n}{2}\right) + Q\left(\frac{n+2}{2}\right)}{2} & \text{se } N \text{ for par} \end{cases} \quad (18)$$

O sinal de Q_{med} retrata a tendência dos dados, sendo o valor a inclinação da tendência. Para determinar se a inclinação média é significativamente diferente de zero, o intervalo de confiança de Q_{med} deve ser obtido em uma probabilidade específica. Conforme Gilbert, (1987) o intervalo de confiança levando em conta a inclinação de tempo, pode ser calculado conforme Equação (19):

$$Ca = Z_{1-\alpha/2} - \alpha/2 \sqrt{var(s)} \quad (19)$$

em que: $Z_{1-\alpha/2}$ é obtido por meio de uma tabela de distribuição normal padrão. Então, em seguida $M1 = (n - Ca) / 2$ e $M2 = (n + Ca) / 2$ são calculados. Os limites inferior e superior do intervalo de confiança, Q_{min} e Q_{max} , é o $M1^o$ maior e $(M2 + 1)$ o maior das estimativas de inclinação ordenada n , respectivamente (Gilbert, 1987). A inclinação Q_{med} é significativamente diferente de zero se os dois limites (Q_{min} e Q_{max}) tiverem sinais semelhantes.

2.3.4 Teste Não Paramétrico de Pettitt

Levando em consideração uma sequência de variáveis aleatórias X_1, X_2, \dots, X_N , esta sequência possui um ponto de mudança em τ para o caso em que X_t para $t = 1, \dots, \tau$ tenha uma função de distribuição comum $F_1(x)$ e X_t para $t = \tau + 1, \dots, N$ possua uma função de distribuição comum $F_2(x)$, desde que $F_1(x) \neq F_2(x)$. Assume-se como problema de teste a hipótese nula do caso “sem mudança”, confrontando com a hipótese alternativa de “mudança” (Pettitt, 1979).

Tendo em conta então a problemática da mudança abrupta, Pettitt (1979) modifica a estatística de Mann-Whitney, de forma a ser utilizada para o teste da “não mudança”, confrontando com a “mudança”, derivando sua probabilidade de significância em uma estatística não paramétrica. Yang et al. (2018) define o teste de Pettitt como uma forma de determinar o ponto de mudança mais significativo de uma série. O teste, conforme proposto por Pettitt (1979) pode ser representado pela Equação (20):

$$U_{t,N} = U_{t-1,N} + j \sum_j^n \text{sgn}(X_t - X_j), \text{ para } t=2, \dots, N \quad (20)$$

em que:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & \text{para } x > 0 \\ 0, & \text{para } x = 0 \\ -1, & \text{para } x < 0 \end{cases}$$

Portanto, o teste estatístico conta o número de vezes que um membro da primeira amostra excedeu um membro da segunda amostra (Santos et al., 2016). Sendo assim, a estatística é dada pela Equação (21):

$$Kt = \max|U_{t,N}| \quad (21)$$

Yang et al. (2018) afirmam que o ponto de mudança mais significativo pode ser identificado como o ponto em que o valor de $U_{t,N}$ é máximo, com sua significância sendo representada pela Equação (22).

$$\rho = 2_{exp} \left\{ \frac{-6(K_t)^2}{(N^3 + N^2)} \right\} \quad (22)$$

Sendo a hipótese nula para o teste de Pettitt a não ocorrência de um ponto de mudança, valores de significância calculados que sejam inferiores à significância adotada ao teste, na maior parte das vezes 0,05, indicam rejeição à hipótese nula. Logo, para estes casos, o teste indica a presença de um ponto de mudança significativo para a série histórica, ocorrendo no ano t (Yang et al., 2018).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a Figura 2, a variabilidade do SPEI-12 no MATOPIBA de 1962 a 1999 revela a presença de seca meteorológica (valores $\leq -0,5$) em todos os anos analisados, com diferentes magnitudes em cada microrregião.

Durante o período avaliado, as maiores intensidades do evento ocorreram a partir da década de 80, com a maior severidade em 1998. Os eventos variaram entre as categorias de severa (-2,0 a -1,5) no nordeste do Maranhão, sudoeste do Piauí e sul do Tocantins, e extrema ($\leq -2,0$) na região entre o sudoeste da Bahia e o norte do Tocantins, além de quatro microrregiões do Maranhão (Imperatriz, Alto Mearim e Grajaú, Porto Franco e Chapadas das Mangabeiras).

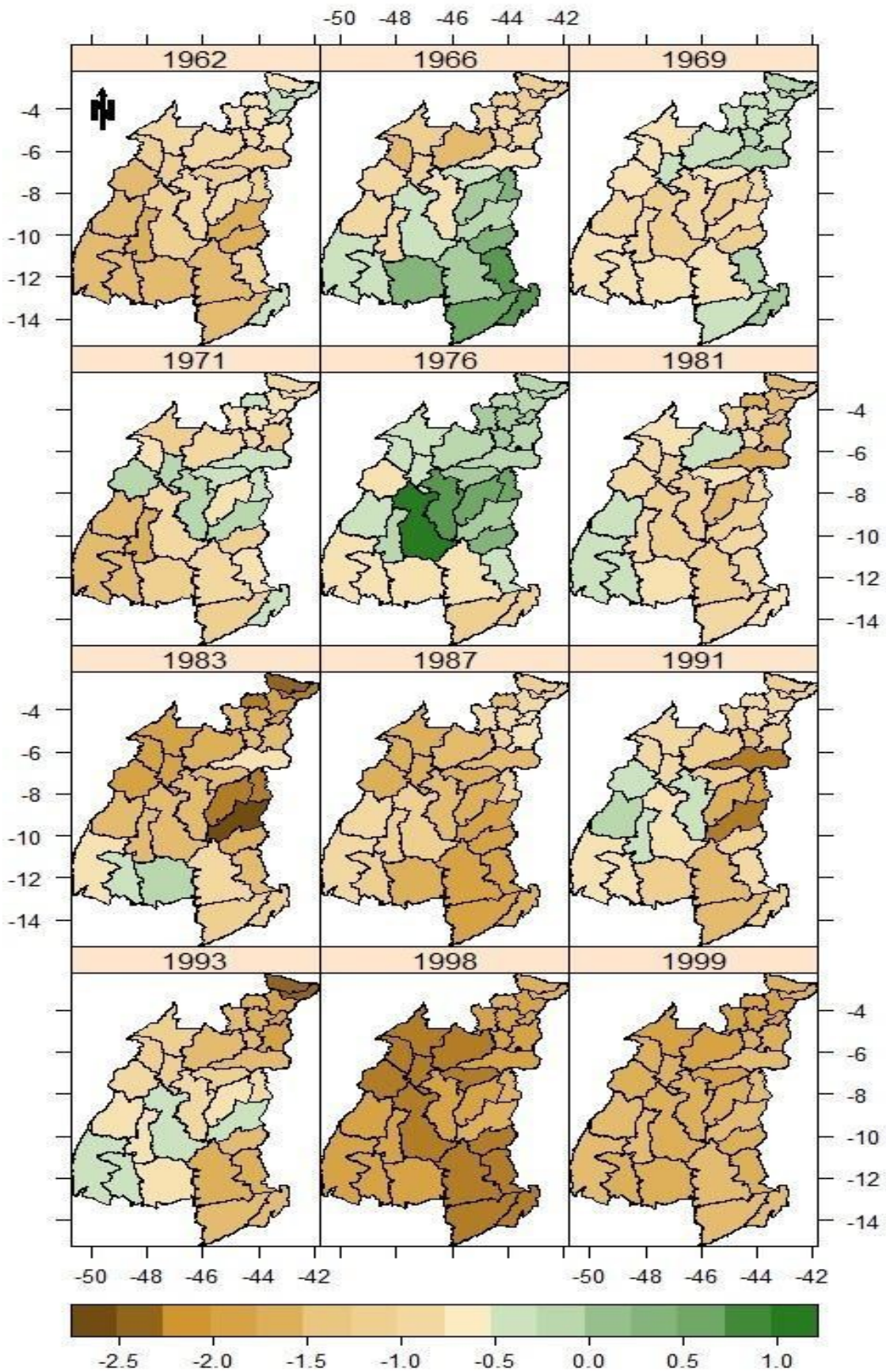


Figura 2. Distribuição espaço temporal dos menores valores do SPEI-12 nas microrregiões do MATOPIBA no período 1962 a 1999.

Marengo et al. (2018) respaldam, mediante resultado avaliativo, que o ano de 1998 foi observado e dito como um dos anos mais secos em toda a região Nordeste, principalmente em decorrência da redução da precipitação pluviométrica.

No entanto, além do ano supracitado, os anos de 1962, 1983, 1987, 1991, 1993 e 1999 também se destacaram quanto aos menores valores de SPEI-12, caracterizando maior intensidade de seca quando comparados aos demais (Figura 2). Em 1962 os eventos variaram na categoria de suave a moderada, onde quatro micros foram caracterizados não secas (Baixo Parnaíba Maranhense, Chapadinha, Coelho Neto e Bom Jesus da Lapa).

Consequentemente, os eventos foram se intensificando (variando de suave a extrema) e diminuindo a quantidade de micros não secas (apenas nos anos de 1983, 1991 e 1993). Nos anos de 1987 e 1999 observou-se um comportamento semelhante, onde em toda a região verificou-se a existência do evento, com domínio da categoria severa.

A presença de secas no Brasil, em nível anual, são exemplos da variabilidade interanual do clima associados a eventos de ENOS no Atlântico Tropical Norte e a Sul da linha equatorial, mais intensamente nas regiões Norte e Nordeste (secas durante El Niño nos biomas Amazônia, Caatinga e região norte do Cerrado), que podem gerar anomalias climáticas que levam a grandes secas como as de 1983 e 1998 (Brito et al., 2018).

De acordo com Da Silva et al. (2020) ao utilizarem o Índice Padronizado de Precipitação-SPI para Aracaju, observaram que os registros de anos mais secos se destacaram entre o período de 1961 a 1963, onde o ano de 1963 foi de atuação El Niño, um dos fenômenos responsáveis por ocorrência de secas no nordeste brasileiro.

Cunha et al. (2019) por meio do índice SPI, fizeram a comparação do padrão espacial de eventos de seca severa dos últimos 30 anos no Nordeste, e observaram que uma característica da seca é sua tendência a se tornar mais frequente durante a ocorrência de eventos de El Niño (a exemplo dos anos 1982–1983, 1992–1993, 1997–1998), coincidindo assim com os anos de maiores intensidades encontrado no período estudado.

Observou-se que os anos de 1966, 1969 e 1976 (Figura 2) abrangeram as maiores quantidades de microrregiões não secas ($\geq -0,5$) segundo a variabilidade do índice no século XX. Contudo, observa-se de modo geral que no ano de 1966 o sul e o sudeste do MATOPIBA, caracterizaram-se não secas, abrangendo todas as regiões do Piauí, Bahia, quatro micros pertencentes ao Tocantins (Dianópolis, Gurupi, Rio Formoso e Jalapão) e uma ao Maranhão (Chapada das Mangabeiras).

Oliveira-Junior et al. (2021) ao definirem os períodos úmidos e secos no estado de Alagoas por meio do Índice de Precipitação Padronizada (SPI), observaram a variabilidade do índice para a escala de tempo de 12 meses, nas categorias úmidas com destaque para as décadas de 1960, 1970 e início de 1980.

No ano de 1969 observaram-se quinze micros com características não secas, sendo a região nordeste da área avaliada (Maranhão) a que abrangeu a maior quantidade (12 micros) e as outras no Sudeste (Bahia). Todavia, o destaque maior se deu para o ano de 1976, o qual configurou-se como o mais úmido do período avaliado, tendo em vista que, de acordo com o índice (SPEI-12) 26 microrregiões retrataram valores acima do estipulado para caracterizar seca, engloba a porção centro norte da região.

Avaliando a variabilidade do índice para os anos de 1966 e 1976, observa-se uma inversão de regiões não secas. Em 1966 a porção sul foi mais úmida e em 1976 a região centro norte denota essa característica. Durante esse intervalo todas as microrregiões do Piauí, uma do Tocantins e uma da Bahia permaneceram com a configuração de não seca.

Em tese, observou-se na série histórica desse período, na escala de tempo de 12 meses que os episódios de seca também tiveram persistência plurianual, ainda que a severidade tenha mudado frequentemente de ano para ano. Porém, a seca severa foi a categoria mais dominante (-2,0 a -1,5). No entanto, as categorias extremas também estiveram presentes (-2,0 a -1,5; $\leq -2,0$).

De acordo com a Figura 3, a variabilidade espaço-temporal do SPEI-12 nas microrregiões do MATOPIBA durante o século XXI indica uma tendência de intensificação das secas meteorológicas em toda a região. Essa intensificação reflete um aumento na frequência, severidade e área afetada pelas secas em comparação com as décadas anteriores.

Portanto, sugere-se uma associação com as fortes secas dos últimos anos, onde a frequência, severidade e a área afetada aumentaram em relação às décadas anteriores em toda a área de estudo (Figura 3). Na escala do SPEI-12, identifica-se uma variabilidade interanual, com maior severidade da seca evidenciada pelos baixos valores do índice ($\leq -0,5$), predominando as categorias severa (-2,0 a -1,5) e extrema ($\leq -2,0$). À exceção de algumas microrregiões com seca suave, a região como um todo experimentou eventos secos mais intensos em comparação ao século anterior.

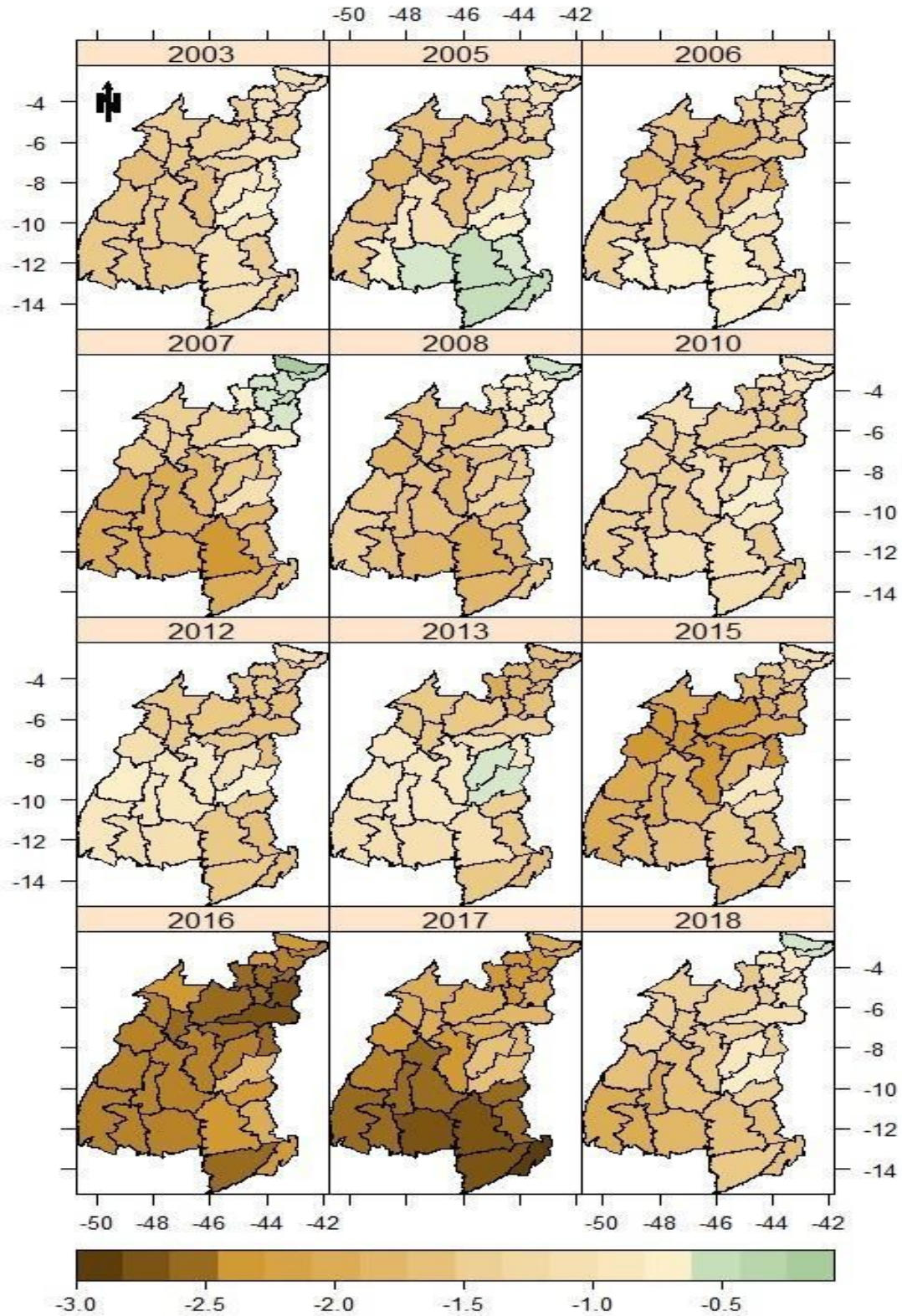


Figura 3. Distribuição espaço temporal dos menores valores do SPEI-12 nas microrregiões do MATOPIBA no período de 2003 a 2018.

Altin e Altin (2021), ao aplicarem o SPI-12 à bacia hidrográfica do Mediterrâneo oriental da Turquia no período de 1967 a 2017, observaram que a área é sensível à seca.

Eles destacaram um período ininterrupto de secas de 2002-2003 a 2008-2009, conforme os valores do SPI-12.

Conforme a variabilidade do índice, algumas microrregiões não apresentaram seca (Figura 3). Os anos específicos incluem 2005 (porção sudeste, com quatro microrregiões da Bahia e uma do Tocantins), 2007 e 2008 (região norte, com microrregiões do norte e leste do Maranhão), 2013 (porção leste, com duas microrregiões do Piauí) e 2018 (norte, com duas microrregiões do norte do Maranhão).

O ano de 2007 se destacou com a maior quantidade de microrregiões não secas, incluindo Lençóis Maranhenses, Baixo Parnaíba Maranhense, Chapadinha, Itapecuru Mirim, Codó, Coelho Neto e Caxias. Esse padrão também foi observado em 2008 e 2018, com Lençóis Maranhenses e Baixo Parnaíba Maranhense continuando a não apresentar seca.

Ojha et al. (2021) analisaram diversas categorias de seca na bacia do rio Punpun, Índia, focando na seca meteorológica de 1991 a 2020, utilizando índices como o SPEI em diferentes escalas de tempo. Os resultados mostraram que a intensidade e a duração da seca aumentaram após 2004, juntamente com uma tendência negativa em todas as escalas de tempo para todas as estações avaliadas.

Nascimento et al. (2017) utilizaram o índice SPI para analisar padrões espaciais e temporais de extremos secos e chuvosos no Maranhão de 1987 a 2015. Eles identificaram que as maiores incidências de secas ocorreram no sul do estado, enquanto as maiores incidências de chuvas foram observadas no norte. A maioria dos eventos extremos coincidiu com os anos de El Niño/La Niña, especialmente na região norte.

Ao longo da série temporal (Figura 3), todos os anos mostraram presença de seca, sendo mais intensificada no período de 2012 a 2018, com os menores valores de SPEI-12 em todas as microrregiões. Destacam-se os anos de 2016 e 2017, com valores do índice registrando eventos de até -3.0, representando os anos mais severos de seca da série temporal avaliada.

Filho et al. (2020), utilizando um modelo estatístico para representar as características multivariadas da seca no Ceará, identificaram que o maior período de seca ocorreu de 2012 a 2018, caracterizando-se como uma série de secas consecutivas ao longo desses anos. Uma característica marcante observada é a propensão da seca em se intensificar durante fortes eventos de El Niño, como o período de 2015–2018 (Moura et al., 2019; Lee et al., 2020).

O desenvolvimento da seca ao longo do tempo sugere que períodos prolongados desse fenômeno são exacerbados pela escassez de água persistente ao longo dos anos, sendo amplificados por períodos contínuos de ausência de chuvas (Tirivarombo et al., 2018).

Para detectar padrões climáticos regionais e globais e delinear regiões homogêneas, utilizaram-se processos multivariados de análise de clusters, reconhecidos por sua eficácia em agrupar variáveis naturais distintas com base em suas características específicas. Aplicando essa técnica hierárquica aos valores mínimos do SPEI-12 de cada microrregião, identificaram-se regiões homogêneas do índice para as localidades avaliadas ao longo do período de janeiro de 1961 a dezembro de 2018 (Figura 4).

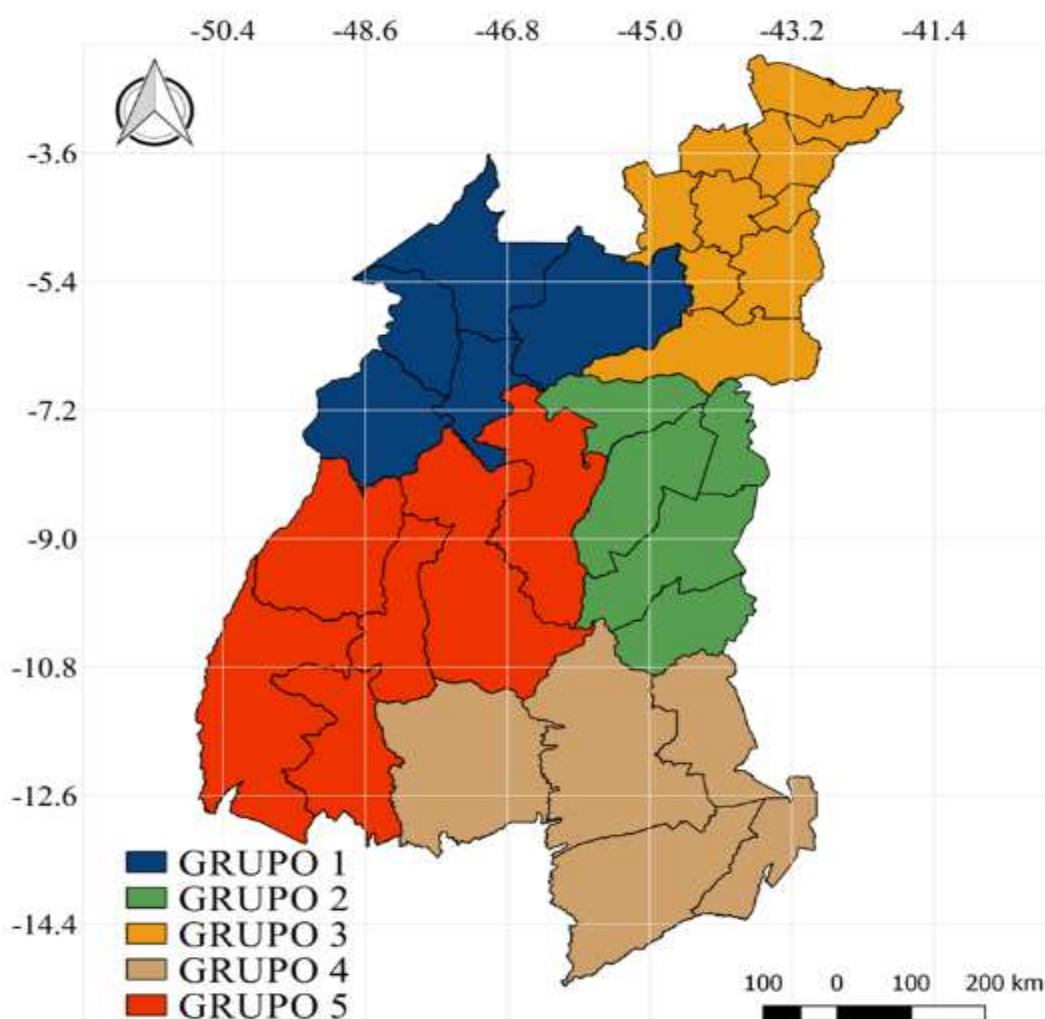


Figura 4. Distribuição espacial dos grupos homogêneos com base nos valores de SPEI-12 para a região do MATOPIBA no período de janeiro de 1961 a dezembro de 2018.

A análise de agrupamento revela a disposição espacial das microrregiões com padrões homogêneos de distribuição do SPEI-12. Os grupos são definidos da seguinte maneira: Grupo 1 (G1) com cinco microrregiões no sudoeste do Maranhão e norte do

Tocantins; Grupo 2 (G2) incluindo quatro microrregiões do Piauí e uma do sul do Maranhão (Chapadas das Mangabeiras); Grupo 3 (G3) composto por dez microrregiões no nordeste do Maranhão; Grupo 4 (G4) englobando as microrregiões do oeste da Bahia e uma do Tocantins; e Grupo 5 (G5) abrangendo todas as outras regiões do estado do Tocantins, exceto Dianópolis, além de uma microrregião do sul do Maranhão

A variabilidade no padrão de incidência de secas foi analisada separadamente para cada grupo com base nos valores mínimos e máximos dos menores valores do SPEI-12, visando verificar as condições alternadas de seca ao longo do período estudado (Figura 5). Em geral, observa-se que todos os grupos apresentam um padrão similar de variabilidade do índice, variando principalmente na duração, intensidade e magnitude das secas.

Para os períodos de médio prazo, há uma continuidade de eventos secos e úmidos ao longo do tempo, facilitando a identificação de períodos úmidos e secos, conforme definido por Wable et al. (2019). O período mais úmido para os cinco grupos estudados foi entre as décadas de 1970 e 1980, enquanto o intervalo de 2003 a 2018 é identificado como o mais seco para todos os grupos em análise (Figura 5).

Durante o período observado, as secas mais frequentes ocorreram nos anos de 1962, 1966, 1981–1983, 1987-1993, 1997-2000, 2002-2003, 2005-2010 e 2012-2018, predominando nas categorias suave e moderada para todos os grupos. As secas mais severas foram registradas nos anos de 1983, 1993, 1998, 2016, 2017 e 2018, especialmente afetando os grupos localizados na região nordeste (G1, G2, G3 e G4), que enfrentam historicamente secas recorrentes severas, impactando a agricultura e os recursos hídricos (CGEE, 2016).

Nobre et al. (2016) destacam que os períodos de seca na escala de 6-12 meses foram mais frequentes ao longo dos anos de 1961 a 2015 no Brasil. A CGEE (2016) relata diversos eventos históricos de seca, sendo o mais significativo em 1877-1879, seguido por outros como em 1963, 1966, 1969-83, 1987, 1990, 1992-93, 1997-98, 2002-03 e 2011-2017.

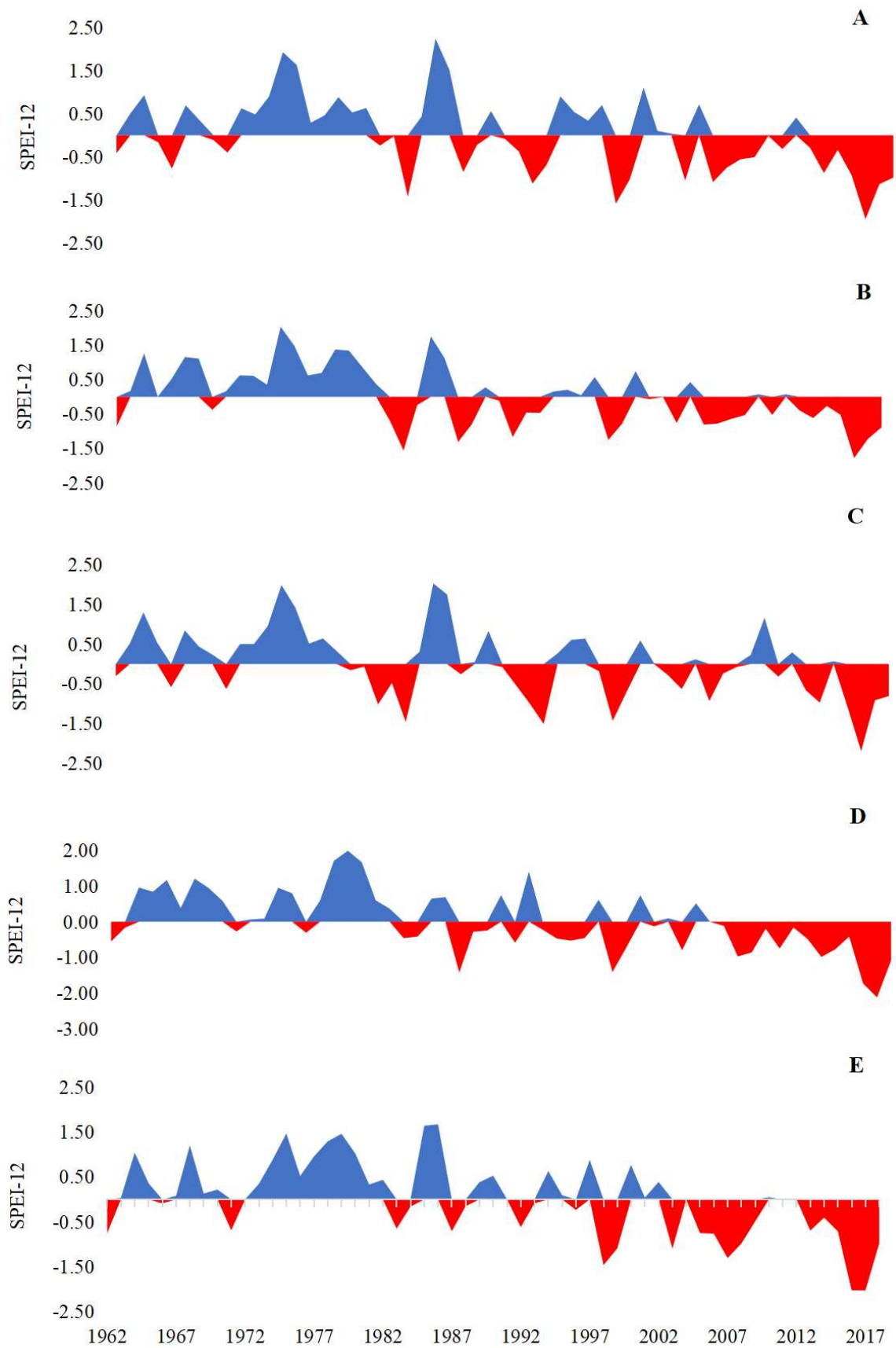


Figura 5. Distribuição dos menores valores anuais do SPEI-12 para: A. Grupo 1; B. Grupo 2; C. Grupo 3; D. Grupo 4 e E. Grupo 5 no período de 1961 a 2018.

Conforme a variabilidade das secas observada na Figura 5, verificou-se que o grupo mais seco é o G5, abrangendo boa parte do estado do Tocantins e uma microrregião do extremo sul maranhense (Gerais de Balsas). Neste grupo, as secas variam de moderadas a extremas, com valores de SPEI-12 chegando a -2,48.

Em contrapartida, destaca-se o G1 como o mais úmido do período analisado segundo os valores do índice SPEI-12. Este grupo abrange três microrregiões do sudoeste do Maranhão (Alto Mearim, Imperatriz e Porto Franco) e duas microrregiões do norte do Tocantins (Araguaína e Bico do Papagaio), com um mínimo de SPEI-12 de -2,37 e um máximo de 2,72.

Roldão e Ferreira (2019), ao avaliarem as características climáticas do estado do Tocantins, observaram que a precipitação aumenta gradualmente na direção norte-noroeste, enquanto as porções sudeste, sul e sudoeste apresentam menor pluviosidade. Além disso, destacaram que há um excedente hídrico na direção sudeste-noroeste, com os maiores déficits concentrados no centro-sul do estado.

Neto et al. (2020) salientam que a região norte do Tocantins é particularmente vulnerável à seca devido aos menores índices de chuva, influenciados pela transição climática entre os biomas Cerrado e Amazônia, e sua proximidade com o semiárido nordestino.

Nordeste brasileiro enfrenta atualmente uma das piores crises de seca, uma condição que pode persistir no futuro. Durante o período estudado, foi registrado o impactante evento de seca no NEB, iniciado em 2012 durante o La Niña e parcialmente encerrado em 2018 (Oliveira et al., 2022).

No Maranhão, uma vasta diversidade de ecossistemas e biomas contribui para sua caracterização como um conjunto de ambientes transacionais únicos. Essa diversidade torna o estado particularmente suscetível a secas prolongadas, possivelmente agravadas por mudanças climáticas induzidas por atividades humanas (Sousa et al., 201; Bezerra et al., 2018).

Silva et al. (2017) documentaram um número significativo de decretações de emergência devido a secas severas no Maranhão entre 2010 e 2016, especialmente na região sul do estado. Eles destacam que, apesar do potencial agrícola da região, o estado tem enfrentado incertezas e prejuízos crescentes, especialmente evidentes no impacto severo de eventos climáticos como o El Niño em 2015.

É notável que o Grupo 3 das microrregiões do Maranhão apresenta um período de relativa umidade entre 2008 e 2009, em contraste com anos secos circundantes, distinto

dos demais grupos (Figura 5). A CGEE (2016) relata que o Nordeste brasileiro passou por um período de chuvas irregulares de 2010 a 2015, marcado por um ano seco em 2010, embora os reservatórios estivessem cheios devido aos dois anos chuvosos anteriores, o que pode explicar o episódio úmido observado.

Nos grupos restantes analisados (G2 e G4), observa-se que, especialmente durante as décadas de 1970 e 1980, houve registros mais altos de umidade para ambos. O pico máximo ocorreu em 1974 para as microrregiões desses grupos, com valores de SPEI-12 alcançando 2,04 para o G2 e 1,99 para o G4. Em contrapartida, os menores valores do índice foram registrados em 2016 para o G2 (-1,78) e em 2017 para o G4 (-2,11).

Recentemente, estudos baseados em medições confirmam o aumento das temperaturas e a redução da evapotranspiração e precipitação em regiões tropicais afetadas pela supressão da cobertura vegetal nativa. Isso indica uma tendência de aumento na frequência de períodos de seca, especialmente em áreas onde há conversão de biomas (Perugini et al., 2017; Casagrande et al., 2018).

A partir dessa perspectiva, foi escolhido avaliar as tendências dos eventos extremos de seca nas microrregiões do MATOPIBA. Utilizando o teste não paramétrico de Mann-Kendall e o estimador de declive Sen's slope aplicados aos dados do Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração das 31 microrregiões listadas na Tabela 2, identificamos as tendências de aumento ou redução das secas durante o período analisado, incluindo suas significâncias estatísticas.

Os resultados do teste Mann-Kendall indicam que todas as microrregiões estudadas apresentaram uma tendência decrescente estatisticamente significativa, refletindo um aumento nos eventos de seca ao longo do período analisado. Isso se traduz em valores negativos do SPEI-12, que indicam níveis mais baixos do índice, refletindo maior gravidade nos eventos de seca.

Estudos semelhantes, como o de Posteri e Pal (2016), que avaliaram padrões espaciais de tendências nos Estados Unidos, também observaram um aumento no número de estações com tendências decrescentes nas últimas décadas.

Tabela 2. Resultado do teste não-paramétrico de Mann-Kendall aplicado às microrregiões do MATOPIBA para o SPEI-12 no período de 1961-2018.

Grupos	Microrregiões	Mann-Kendall		
		Tau de Kendall	Sen's slope	p-valor
Grupo-1	Alto Mearim	-0,3672	-0,0299	< 0,0001
	Araguaína	-0,3584	-0,0305	< 0,0001
	Bico do Papagaio	-0,3421	-0,0276	0,0002
	Imperatriz	-0,302	-0,0242	0,0009
	Porto Franco	-0,3759	-0,0309	< 0,0001
	Alto Médio Gurgueia	-0,2218	-0,0193	0,0151
Grupo-2	Alto Parnaíba Piauiense	-0,2782	-0,0254	0,0023
	Bertolândia	-0,3484	-0,0296	0,0001
	Chapadas das Mangabeiras	-0,3759	-0,0328	< 0,0001
	Chapadas do Extremo Sul Piauiense	-0,3421	-0,0294	0,0002
	Baixo Parnaíba Maranhense	-0,2619	-0,0205	0,0041
	Caxias	-0,3434	-0,0295	0,0002
Grupo-3	Chapadas do Alto Itapecuru	-0,3346	-0,0285	0,0002
	Chapadinha	-0,2995	-0,0224	0,001
	Codó	-0,3546	-0,0272	0,0001
	Coelho Neto	-0,3195	-0,0248	0,0005
	Itapecuru Mirim	-0,2882	-0,0195	0,0016
	Lençóis Maranhenses	-0,2118	-0,0183	0,0203
Grupo-4	Médio Mearim	-0,4048	-0,0291	< 0,0001
	Presidente Dutra	-0,4098	-0,0309	< 0,0001
	Barreiras	-0,3296	-0,0266	0,0003
	Bom Jesus da Lapa	-0,4612	-0,0334	< 0,0001
	Cotegipe	-0,4386	-0,0329	< 0,0001
	Dianópolis	-0,3534	-0,0255	0,0001
Grupo-5	Santa Maria da Vitória	-0,3083	-0,0219	0,0007
	Gerais de Balsas	-0,4273	-0,0348	< 0,0001
	Gurupi	-0,3246	-0,0242	0,0004
	Jalapão	-0,4185	-0,033	< 0,0001
	Miracema do Tocantins	-0,3434	-0,0266	0,0002
	Porto Nacional	-0,312	-0,0245	0,0006
	Rio Formoso	-0,3734	-0,0275	< 0,0001

A Tabela 2 também exhibe os coeficientes de declividade de Sen's slope, destacando a magnitude das tendências nos dados do SPEI-12. É relevante notar que todas as 31 microrregiões estudadas demonstram uma tendência temporal negativa estatisticamente significativa, corroborando os resultados do teste Mann-Kendall (p-valor $<0,05$) realizado previamente.

Essas tendências indicam uma redução nos valores do índice de SPEI, variando entre -0,02 e -0,03 ao longo dos 57 anos de estudo. A maior redução registrada, conforme o estimador de Sen's slope, foi observada na microrregião de Gerais de Balsas (-0,0348), que pertence ao Grupo 5 e está localizada na região sul do estado do Maranhão.

Yao et al. (2018) aplicaram o teste não paramétrico de Mann-Kendall aos índices SPI e SPEI para investigar as tendências de seca na província de Xinjiang, China. Após 1997, observou-se tendências negativas significativas, com aumento nas condições de seca em 47,1% das estações para o SPI e em 70,5% das estações para o SPEI.

O teste de Pettitt aplicado aos cinco grupos revelou a variabilidade temporal dos menores valores anuais do SPEI-12, identificando o ponto em que ocorreu uma mudança abrupta na série temporal durante o período de 1961 a 2018 (Figura 6). Em geral, o marco de mudança na série para todos os grupos ocorreu principalmente nos anos de 1980 e 1997, exceto para o grupo 4, cuja mudança foi em 1985. Isso caracteriza uma tendência de aumento na frequência e magnitude dos eventos de secas a partir desses períodos de transição.

Após o ponto de ruptura identificado (Figura 6), todos os grupos revelaram uma tendência decrescente em suas médias de SPEI-12, indicando um aumento nas incidências de secas na região estudada. Os Grupos 1, 2 e 5 destacaram-se ao exibir as maiores reduções nas médias, cerca de -1,1, refletindo a transição de períodos relativamente não secos ($\geq -0,5$) para secas moderadas. Os Grupos 3 e 4 apresentaram menores reduções nas médias, em torno de -0,9, também indicando uma mudança de períodos não secos para secas suaves.

Reis et al. (2020) destacaram que as regiões norte e centro-sul do MATOPIBA registram os menores índices de chuva, especialmente no sul do Maranhão e sudoeste do Piauí, durante a estação chuvosa. Segundo Marengo et al. (2022), essa redução na precipitação tem contribuído significativamente para a seca e o aquecimento na região, com efeitos mais acentuados no estado do Tocantins em comparação com outras áreas do MATOPIBA.

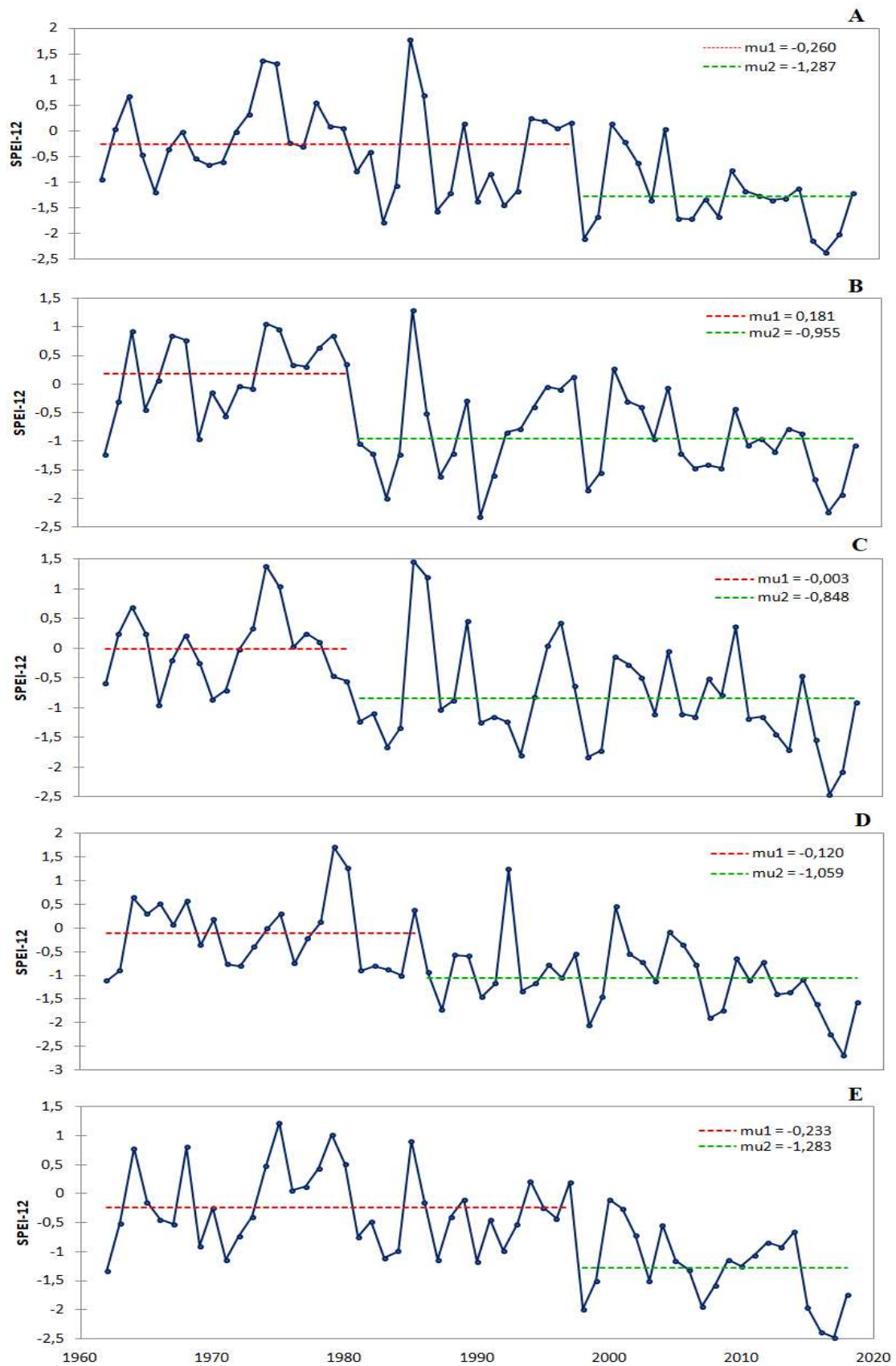


Figura 6. Variabilidade temporal dos menores valores anuais do SPEI-12 para: A. Grupo 1; B. Grupo 2; C. Grupo 3; D. Grupo 4 e E. Grupo5 no período de 1961 a 2018.

Alguns estudos destacam que a região do MATOPIBA experimentou um aquecimento de longo prazo e uma tendência de seca desde os anos 1980, associados à reduzida atividade convectiva. Esses padrões foram identificados através da análise de variáveis atmosféricas e hidrológicas, evidenciando as maiores tendências de aquecimento e seca na América do Sul na transição entre o leste da Amazônia e o Cerrado (Marengo et al., 2022).

Lima et al. (2011), ao analisarem as tendências no estado da Bahia, observaram que a precipitação anual diminuiu ao longo das últimas cinco décadas em todo o estado, com exceções em apenas duas localidades (Cipó e Caravelas), favorecendo o aumento das secas. Junqueira et al. (2020), ao avaliarem a distribuição da precipitação em Juazeiro-BA pelo índice SPI, identificaram um aumento no déficit hídrico ao longo dos anos, destacando uma redução no volume médio anual de precipitação.

Além disso, o teste de Pettitt (Figura 6) revelou tendências significativas de aumento das secas meteorológicas nos cinco grupos analisados ($p < 0,05$), corroborando os resultados do teste de Mann-Kendall aplicado às microrregiões. Isso indicou um declínio no índice avaliado (SPEI-12), onde valores menores refletem eventos extremos mais severos. Reis et al. (2020) afirmam que as variações na precipitação pluviométrica na região estão alinhadas com estudos realizados no Nordeste e em outras áreas agrícolas do Brasil, evidenciando uma redução na precipitação durante a estação de transição seca e chuvosa, o que prolonga a estação seca.

4. CONCLUSÕES

A análise do índice SPEI-12 para caracterizar secas meteorológicas na região do MATOPIBA revelou sua eficácia multi-escalar na identificação de períodos úmidos e secos, destacando-se pela clareza e precisão na determinação desses eventos.

Os resultados obtidos demonstraram uma variabilidade nos episódios de seca meteorológica na região, com um aumento tanto na intensidade quanto na frequência desses eventos. Observou-se uma associação entre secas intensas em anos anteriores e ocorrências recentes, indicando uma continuidade e intensificação do fenômeno ao longo do tempo.

Quanto ao agrupamento das microrregiões, identificaram-se padrões homogêneos na distribuição de secas, resultando na formação de cinco grupos distintos. As regiões mais úmidas durante o período avaliado compuseram o Grupo 1, abrangendo parte do

Maranhão e duas microrregiões do Tocantins, enquanto as mais secas foram agrupadas no Grupo 5, incluindo parte do Tocantins e uma microrregião do Maranhão.

Análises de tendências utilizando testes não paramétricos revelaram que todas as microrregiões estudadas no MATOPIBA apresentaram tendências significativas de aumento nas secas ao longo do período analisado. Esse cenário sugere um desafio crescente para a região, destacando a necessidade urgente de aprimorar estudos voltados ao entendimento e proteção dessas microrregiões, visando mitigar os impactos causados por esse evento extremo.

5. REFERÊNCIAS

- AHMAD, A. U.; STARKEY, A. Application of feature selection methods for automated clustering analysis: a review on synthetic datasets. *Neural Computing and Applications*, 29,317–328. 2018. <https://doi.org/10.1007/s00521-017-3005-9>.
- ALTIN, B. T.; ALTIN, B. N. Response of hydrological drought to meteorological drought in the eastern Mediterranean Basin of Turkey. *Journal of Arid Land*, 13,470–486. 2021. <https://doi.org/10.1007/s40333-021-0064-7>.
- ÁLVARES, C.A. STAPE, J. L. SENTELHAS, P. C.; Moraes, G., LEONARDO, J., SPAROVEK, G. Köppens climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22,711-728. 2014. <https://doi.org/10.1127/09412948/2013/0507>.
- ARAÚJO, M. L. S.; SANO, E. E.; BOLFE, É. L. SANTOS, J. R. N.; SANTOS, J. L.; SILVA, F. B. Spatiotemporal dynamics of soybean crop in the Matopiba region, Brazil (1990- 2015). *Land Use Policy*, 8, 57-67. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.09.040>.
- BEM, J. S.; GIACOMINI, N. M. R.; WAISMANN, M. Utilização da técnica da análise de Clusters ao Emprego da Indústria Criativa entre 2000 e 2010: Estudo da Região do Consinos, RS. *Interações, Campo Grande*, v.16, p.27-41. 2015. <https://doi.org/10.1590/151870122015102>.
- BEZERRA, D. S.; DIAS, B. C. C.; RODRIGUES, H.S.; TOMAZ, R.B.; A. L. S.; SILVA JUNIOR, C.H.L. Análise Dos Focos de Queimadas e Seus Impactos no Maranhão Durante Eventos de Estiagem no Período de 1998 a 2016. *Brasileira de Climatologia*, v.22, p.446-462. 2018. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v22i0.57337>.
- BRITO, S.S.B.; CUNHA, A.P.M.A.; CUNNINGHAM, C.C.; ALVALÁ, R.C.; MARENGO, J.A.; CARVALHO, M.A. Frequency, duration and severity of

- drought in the Brazilian Semiarid. *International Journal of Climatology*, 38517-529, 2018. <https://doi.org/10.1002/joc.5225>.
- BUSSAB, W. O.; MIAZAKI, E. S.; ANDRADE, D. *Introdução à Análise de Agrupamentos*, 1 ed. UNESP, São Paulo. 1990.
- CALOIERO, T.; VELTRI, S.; CALOIERO, P.; FRUSTACI, F. Drought analysis in Europe and in the Mediterranean basin using the Standardized Precipitation Index. *Water*, v.10. 2018 <https://doi.org/10.3390/w10081043>.
- CASAGRANDE, E.; RECANATI, F.; PACO, M. P. Assessing the Influence of Vegetation on the Water Budget of Tropical Areas. - *IFAC Papers On Line*, v.51, p.1-6. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.190>.
- CGEE- Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. *Secas no Brasil: política e gestão proativas – Brasília: - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Brasília. 2016.*
- CUNHA, A. P. M. A.; TOMASELLA, J.; RIBEIRO NETO, G. G.; BROWN, M.; GARCIA, S.R.; BRITO, S. B.; CARVALHO, M. A. Changes in the spatial-temporal patterns of droughts in the Brazilian Northeast. *Atmospheric Science Letters*, v.19, p.1-8. 2019. <https://doi.org/10.1002/asl.855>.
- DA SILVA, D. F.; LIMA, M. J. S. SOUZA NETO, P. F.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D. S.; ALMEIDA, H. R. R. C.; PEREIRA, M. P. S. COSTA, R. L. Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no Índice Padronizado de Precipitação para o Leste do Nordeste. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.13. 2020. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.2.p449-464>.
- DANTAS, J. C.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Drought impacts, social organization, and public policies in northeastern Brazil: a case study of the upper Paraíba River basin. *Environ Monit Assess*, 192. 2020. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8219-0>
- DASH, S.K.; SHARMA, N.; PATTNAYAK, K.C.; GAO, X.J.; SHI, Y. Temperature and precipitation changes in Northeast India and their future projections. *Global and Planetary Change*, v.99, p.31-44. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.07.006>.
- DASHTPAGERDI, M. M. KUMARI, M. R.; VAGHARFARD, H.; GHONCHEH POUR, D. HOSSEINI, M. E.; ANAHI, H. An investigation of drought magnitude trend during 1975–2005 in arid and semi-arid regions of Iran. *Environmental Earth Sciences*, v.73, p. 1231-1244. 2018. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3477-1>.
- EVERITT, B. S. 1974. *Cluster Analysis*, 5ed. Heinemann Educational Books, London.

- FICK, S. E. HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, v.37, p.4302-4315. 2017. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.
- FILHO, J. D. P.; FILHO, F. A.; MARTINS, E. S. P. R.; STUDART, T. M. C. Copula-based multivariate frequency analysis of the 2012-2018 drought in Northeast Brazil. *Water*, v.12, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12030834>.
- GILBERT, R. O. *Statistical methods for environmental pollution monitoring*, 115ed. Van Nostrand Reinhold Company, New York. 1987.
- HARDLE, W.; SIMAR, L. *Applied Multivariate Statistical Analysis*, 2ed. Springer, Berlin. 2007.
- HARRIS, I.C.; JONES, P.D. CRU TS4.03: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 4.03 of high-resolution gridded data of month-by-month variation in climate (jan. 1901- Dec. 2018). University of East Anglia Climatic Research Unit, centre for Environmental Data Analysis. 2020. <https://dx.doi.org/10.5285/10d3e3640f004c578403419aac167d82>.
- JUNQUEIRA, H. S.; ALMEIDA, L. M. F., SOUZA, T. S. NASCIMENTO, P. S. Análise da Variação Sazonal e de Tendências na Precipitação Pluviométrica no Município de Juazeiro-BA. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.13. 2020. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.6.p2641-2649>.
- KAZEMZADEH, M.; MALEKIAN, A. Changeability evaluation of hydro-climate variables in Western Caspian Sea region, Iran. *Environmental Earth Sciences*, n.77. 2018. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7305-x>.
- KENDALL, M. G. *Rank correlation measures*, 2ed. Charles Griffin, London. 1945.
- KENDALL, M.G. *Rank Correlation Methods*, 3 ed. Charles Griffin, United States of America. 1948.
- KHAN, M. I.; LIU, D.; FU, Q.; FAIZ, M. A. Detecting the persistence of drying trends under changing climate conditions using four meteorological drought indices. *Meteorological Applications*, v.25. 2018. <https://doi.org/10.1002/met.1680>.
- LEE, C.W.; YU-HENG, T.; CHUNG-HSIUNG, S.; ZHENG, F.; ERH-TUNG, W. Characteristics of the prolonged El Niño events during p.1960 -- 2020. *Water*, 12. 2020. <https://doi.org/10.3390/w12030834>.
- LI, B., LIANG, Z., ZHANG, J., WANG, G. A revised drought index based on precipitation and pan evaporation. *International Journal of Climatology*, v. 17. 2017. <https://doi.org/10.1002/joc.4740>.

- LIMA, J. R.A.; NEVES, D. J. D.; ARAÚJO, L. E.; AZEVEDO, P. V. Identificação de Tendências Climáticas no estado da Bahia. *Geografia*, v.28. 2011. <https://doi.org/10.3390/w12030834>.
- LI, N.; WANG, Z.; CHEN, X. AUSTIN, G. Studies of general precipitation features with TRMM PR data: An extensive overview. *Remote Sensing*, v.11. 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11010080>.
- MALIK, A.; KUMAR, A.; RAI, P.; KURIQI, A. Prediction of multi-scalar standardized precipitation index by using artificial intelligence and regression models. *Climate*, n.9, v.28, 2021. <https://doi.org/10.3390/cli9020028>.
- MANN, H. B. *Econometrica*. The econometric society, v.13, p.245-259. 1945. <http://dx.doi.org/10.2307/1907187>.
- MARENGO, J. A., ALVES, L. M., ALVALÁ, R. C. S.; CUNHA, A. P., BRITO, S., MORAES, O. L. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Earth Sciences*, v.90. 2018. <https://doi.org/10.1590/00013765201720170206>
- MARENGO, J. A. JIMÉNEZ, J. C.; ESPINOZA, J. C. CUNHA, A. P.; ARAGÃO, L. E. L.O. Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone. *Scientific Reports*, v.12. 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04241-4>.
- MARENGO, J.A. CUNHA, A.P.M.A.; NOBRE, C.A.; RIBEIRO NETO, G.G.; MAGALHAES, A.R.; TORRES, R.R.; SAMPAIO, G.; ALEXANDRE, F.; ALVES, L.M.; CUARTAS, L.A.; DEUSDARÁ, K.R.L.; ALVALA, R.C.S. Assessing drought in the drylands of Northeast Brazil under regional warming exceeding 4°C. *Natural Hazards*, v.103. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04097-3>.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration of time scales, in 8th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Anaheim, California. 1993. https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf.
- MINGOTI, S. A. *Análise de Dados Através de Métodos de Estatística Multivariada: Uma abordagem Aplicada*, 1 ed. UFMG, Belo Horizonte. 2005.

- MIRANDA, E. E., MAGALHÃES, L. A., CARVALHO, C. A. Proposta de delimitação territorial do MATOPIBA. Campinas: Embrapa, 18p. (Nota Técnica, 1). 2014. https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT1_DelimitacaoMatopiba.pdf.
- MOURA, M. M. SANTOS.; A. R., PEZZOPANE, J. E. M.; ALEXANDRE, R. S.; SILVA, S. F.; PIMENTEL, S. M.; ANDRADE, M. S. S.; SILVA, F. G. R.; BRANCO, E. R. F.; MOREIRA, T. R.; SILVA, R. G.; CARVALHO, J. R. Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. *Science of the Total Environment*, 651, 1639-1651. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.242>.
- NASCIMENTO, F. C. A.; BRAGA, C. C. ARAÚJO, F. R. C. D. Análise Estatística dos Eventos Secos e Chuvosos de Precipitação do Estado do Maranhão. *Brasileira de Meteorologia*, v.32, p.375-386. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863230005>.
- NETO, V. L. S.; VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; PEREIRA, S. B. Mapeamento de Chuvas Intensas para o Estado do Tocantins. *Brasileira de Meteorologia*, v.35. 2020. <https://doi.org/10.1590/0102-7786351017>.
- NOBRE, C.A.; MARENGO, J.A.; SELUCHI, M.E.; CUARTAS, L.A.; ALVES, L.M. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. *Journal of Water Resource and Protection*, v.8. 2016. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2016.82022>.
- OJHA, S. S.; SINGH, V.; ROSHNI, T. Comparison of Meteorological Drought using SPI and SPEI. *Civil Engineering Journal*, v.7. 2021. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-2021-03091783>.
- OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; GOIS, G.; SILVA, I. J.L.; SOUZA, E. O. JARDIM, A. R. F.; SILVA, M. V. SHAH, M., Amjareegulgarn, P. Wet and dry periods in the state of Alagoas (Northeast Brazil) via Standardized Precipitation Index. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 224. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105746>.
- OLIVEIRA, M. L.; SANTOS, C. A. C.; OLIVEIRA, G.; SILVA, M. T.; SILVA, B. B.; CUNHA, J. E. B. L.; RUHOFF, A.; SANTOS, C. A. G. Remote sensing-based assessment of land degradation and drought impacts over terrestrial ecosystems in Northeastern Brazil. *Science of The Total Environment*, 835. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155490>.
- OMETTO, J. C. Bioclimatologia Vegetal, Agronômica Ceres Ltda, São Paulo. 1981.

- OSIŃSKI, S.; WEISS, D. A concept-driven algorithm for clustering search results. *IEEE Intelligent Systems*, v.20. 2005. <https://doi.org/10.1109/MIS.2005.38>.
- PERUGINI, L.; CAPORASO, L.; MARCONI, S.; CESCATTI, A.; QUESADA, B.; DE NOBLET-DÉCOUDRE, N.; HOUSE, J. I.; ARNETH, A. Biophysical effects on temperature and precipitation due to land cover change. *Environmental Research Letters* v.12. 2017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6b3f>.
- PETTITT, A. N. A non-parametric Approach to the Change-point Problem. *Applied Statistics*, v.28. 1979. <https://doi.org/10.2307/2346729>.
- PIYOOSH, A. K.; GHOSH, S. K. Effect of autocorrelation on temporal trends in rainfall in a valley region at the foothills of Indian Himalayas. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v.31, p.2075–2096. 2017. <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1347-y>
- POSHTIRI, M.P.; PAL, I. Patterns of hydrological drought indicators in major U.S. River basins. *Climatic Change*, v.134, p.549–563. 2016. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1542-8>.
- QUINTANA-SEGÚÍ, P. BARELLA-ORTIZ, A.; REGUEIRO-SANFIZ, S.; MIGUEZ-MACHO, G. The utility of land-surface model simulations to provide drought information in a water management context using global and local forcing datasets. *Water Resour Manage*, v.34, p.2135 -- 2156. 2020. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2160-9>.
- REIS, L. C.; SILVA, C. M. S.; BEZERRA, B. G.; SPYRIDES, M. H. C. Caracterização da variabilidade da precipitação no MATOPIBA, região produtora de soja. *Brasileira de Geografia Física*, v.13, p.1425-1441. 2020. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.4.p1425-1441>.
- ROLDÃO, A. F.; FERREIRA, V. O Climatologia do Estado do Tocantins –Brasil. *Caderno de Geografia*, v.29. 2019. <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2019v29n59p1161>.
- SALVADOR, M.A.; BRITO, J. I. B. Trend of annual temperature and frequency of extreme events in the MATOPIBA region of Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 133, 253–261. 2017. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2179-5>.
- SANTOS, C. A.; LIMA, A. M. M. FARIAS, M. H. C. S. AIRES, U. R. V.; SERRÃO, E. A.O. Análise Estatística da não Estacionariedade de Séries Temporais de Vazão Máxima Anual Diária na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo. *Holos*, v.7. 2016. <https://doi.org/10.15628/holos.2016.4892>.

- SEN, P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, v.63, p.1379-1389. 1968. <https://www.jstor.org/stable/2285891>.
- SHIAU, J.T.; LIN, J. W. Clustering quantile regression-based drought trends in Taiwan. *Water Resources Management*, v.30, p.1053–1069, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1210-9>.
- SILVA, M. N.; TEREZA, A.; BEZERRA, D. S.; PEREIRA, L. ELOI, C. M. A.; SANTOS, A. S.L. A seca no Maranhão no período de 2010 a 2016 e seus impactos. *Revista. Parcerias Estratégica*, v.22. 2017. <https://doi.org/10.24863/rccp.v30i1.204>.
- SILVA, W. L.; DEREZYNSKI, C.; CHANG, M.; FREITAS, M. MACHADO, B. J.; TRISTÃO, L.; RUGGERI, J. Tendências observadas em indicadores de extremos climáticos de temperatura e precipitação no estado do Paraná. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.30. 2015. <https://doi.org/10.1590/0102-778620130622>.
- TAN, C.; YANG, J.; LI, M. Temporal-spatial variation of drought indicated by SPI and SPEI in Ningxia Hui autonomous region, China. *Atmosphere*, v.6, p.1399-1421. 2015. <https://doi.org/10.3390/atmos6101399>.
- TIRIVAROMBO, S.; OSUPILE, D.; ELIASSON, P. Drought monitoring and analysis: Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Standardized Precipitation Index (SPI). *Physics and Chemistry of the Earth* v.106, p.1-10. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.07.001>.
- WABLE, P. S.; JHA, M. K.; SHEKHAR, A. Comparison of Drought Indices in a Semi-Arid River Basin of India. *Water Resources Management*, v.33, p.75–102. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2089-z>.
- WANG, T. XINJUN T, VIJAY P, S., CHEN, X., LIN, K., ZHOU, Z., ZHU, J. A CMIP6-based framework for propagation from meteorological and hydrological droughts to socioeconomic drought. *Journal of Hydrology*, 623. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129782>
- WILKS, D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 2 ed. Cornell University, Ithaca, NY, USA. 2006.
- YANG, Y.; YANG, Z., YIN, X.; LIU, Q. A framework for assessing flow regime alterations resulting from the effects of climate change and human disturbance. *Hydrological Sciences Journal*, v.63, p.441-456. 2018. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1430897>.

YAO, J.; ZHAO, Y.; YU, X. Spatial-temporal variation and impacts of drought in Xinjiang 159 (Northwest China) during 1961-2015. Peer 6. 2018. <https://doi.org/10.7717/peerj.4926>.

ZHAO Q.; CHEN Q.; JIAO, M.; WU, P.; GAO, X.; MA, M.; HONG, Y. The temporal-spatial characteristics of drought in the Loess Plateau using the remote-sensed TRMM precipitation data from 1998 to 2014. Remote Sensing, v.10, p.838. 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10060838>.

CAPÍTULO 3

**CENÁRIOS FUTUROS DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL E
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO MATOPIBA**

RESUMO

Estudar a variação da precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência espaço-temporalmente contribui para a tomada de decisões em regiões de produção agrícola, sendo essencial para a gestão e disponibilidade hídrica. Este estudo objetivou analisar a sazonalidade espacial e temporal da precipitação e evapotranspiração na região do MATOPIBA, considerando cenários de projeções futuras. Utilizou-se como base de dados históricos a reanálise da versão CRU-TS-3 (com valores mensais de temperatura mínima e máxima em °C, e precipitação total em mm) para o período de 1961 a 2018. Os cenários de mudanças climáticas adotados foram o cenário intermediário baseados no quinto relatório do IPCC RCP4.5 e o cenário pessimista RCP8.5, utilizando dados futuros do Modelo Climático Global (GCM) HadGEM2-ES para o intervalo de 2020 a 2099. Conforme resultados, a análise sazonal revelou uma diminuição da precipitação num todo, porém com destaque para o período relativamente seco da região (JJA e SON). A porção oeste da região evidenciou-se quanto aos maiores volumes de precipitação, mesmo com decréscimo em algumas estações. Espera-se mediante análise uma redução de 10% anualmente em períodos distantes. Quanto à sazonalidade da evapotranspiração, nos dois cenários a mesma aumenta disparadamente, com realce para os trimestres de JJA e SON. A região centro-oeste deteve os maiores aumentos da variável em períodos mais distantes. Anualmente, espera-se um aumento na evapotranspiração de 193% na região.

Palavras- chaves: Projeções, Sazonalidade, Temporal.

ABSTRACT

Studying the spatial and temporal variation of rainfall and reference evapotranspiration contributes to decision-making processes in agricultural production regions, playing a crucial role in water management and availability. This study aimed to analyze the seasonal patterns of precipitation and evapotranspiration in the MATOPIBA region under future projection scenarios. Historical data were derived from the CRU-TS-3 reanalysis (monthly values of minimum and maximum temperatures in °C and total precipitation in mm) for the period 1961 to 2018. Climate change scenarios included the intermediate scenario RCP4.5 and the pessimistic scenario RCP8.5, using future data from the HadGEM2-ES Global Climate Model (GCM) for the interval 2020 to 2099. According to the results, seasonal analysis revealed an overall decrease in precipitation, with particular emphasis on the relatively dry periods of the region (JJA and SON). Despite this trend, the western part of the region stood out for higher precipitation volumes, even with decreases in some seasons. A projected annual reduction of 10% is expected in distant periods. Regarding evapotranspiration seasonality, both scenarios showed a sharp increase, especially in the JJA and SON quarters. The central-west region exhibited the highest increases in this variable in more distant periods, with an annual expected increase in evapotranspiration of 193% in the region.

Keywords: Projections, Seasonality, Temporal.

1.INTRODUÇÃO

A chuva desempenha um papel fundamental como principal entrada de água em qualquer sistema. Compreender seu histórico é crucial para o planejamento e controle dos impactos causados por excesso ou escassez de água em uma região específica, influenciando diretamente a tomada de decisões em diversos setores econômicos, incluindo a agricultura (Casaroli et al., 2018).

Dentre os componentes do ciclo hidrológico, o conhecimento da pluviometria é essencial para a definição do clima de uma região, afetando significativamente a umidade do ar, o balanço hídrico no solo e a temperatura. A precipitação pluviométrica é a variável meteorológica mais intimamente ligada ao balanço hídrico, permitindo avaliar se uma região está em excesso ou déficit hídrico (Sousa et al., 2018).

Por outro lado, as saídas de água são influenciadas principalmente pela evapotranspiração de referência, uma variável crucial para a agricultura. É utilizada na modelagem de processos climáticos e hidrológicos, no planejamento de irrigação, na previsão de safras e na caracterização climática de uma determinada área (Nobre et al., 2017). Em ecossistemas agrícolas, representa mais de 65% do balanço hídrico anual em terras áridas e semiáridas (Lei et al., 2018).

Portanto, é evidente que regiões produtoras, como o MATOPIBA (abrangendo áreas do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), são altamente sensíveis aos impactos das mudanças climáticas, enfrentando desafios significativos a curto e longo prazo (Burrell et al., 2020). As mudanças climáticas estão modificando a regularidade, intensidade, extensão, duração e época de ocorrência de fenômenos climáticos extremos e, conseqüentemente, afetando de maneira extraordinária o clima (Costa et al., 2020).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) relata que as mudanças climáticas estão intensificando eventos climáticos extremos, especialmente aqueles relacionados à precipitação pluviométrica, como inundações e secas severas, que estão se tornando mais frequentes globalmente. Isso tem despertado grande preocupação entre autoridades e comunidades científicas devido aos impactos em larga escala (Cunha et al., 2019).

O estudo das distribuições temporais de variáveis climáticas, como precipitação pluvial e evapotranspiração de referência, para determinar seus padrões de ocorrência, periodicidade e sazonalidade, é uma ferramenta de valor inestimável para o planejamento e gestão de diversas atividades agropecuárias e humanas.

Este estudo parte do pressuposto de que a quantidade e distribuição de chuvas na região do MATOPIBA variam significativamente devido a diferentes cenários meteorológicos, assim como as alterações indicadas nas projeções de mudanças climáticas. Portanto, o objetivo é caracterizar a variabilidade espacial e temporal da precipitação e evapotranspiração de referência no MATOPIBA, considerando diferentes cenários de mudanças climáticas

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A região do MATOPIBA abrange quatro estados brasileiros: Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, totalizando 73 milhões de hectares e é composta por 337 municípios (Figura 1). As altitudes na região alcançam valores superiores a 800 metros acima do nível médio do mar, sendo as maiores encontradas no extremo oeste da Bahia e as menores no norte do Maranhão. O MATOPIBA é composto por três biomas distintos em seu território: Cerrado (90,94%), Amazônia (7,27%) e Caatinga (1,64%), abrangendo áreas de 665.435,41 km², 53.196,29 km² e 12.031,08 km², respectivamente (Miranda et al., 2014).

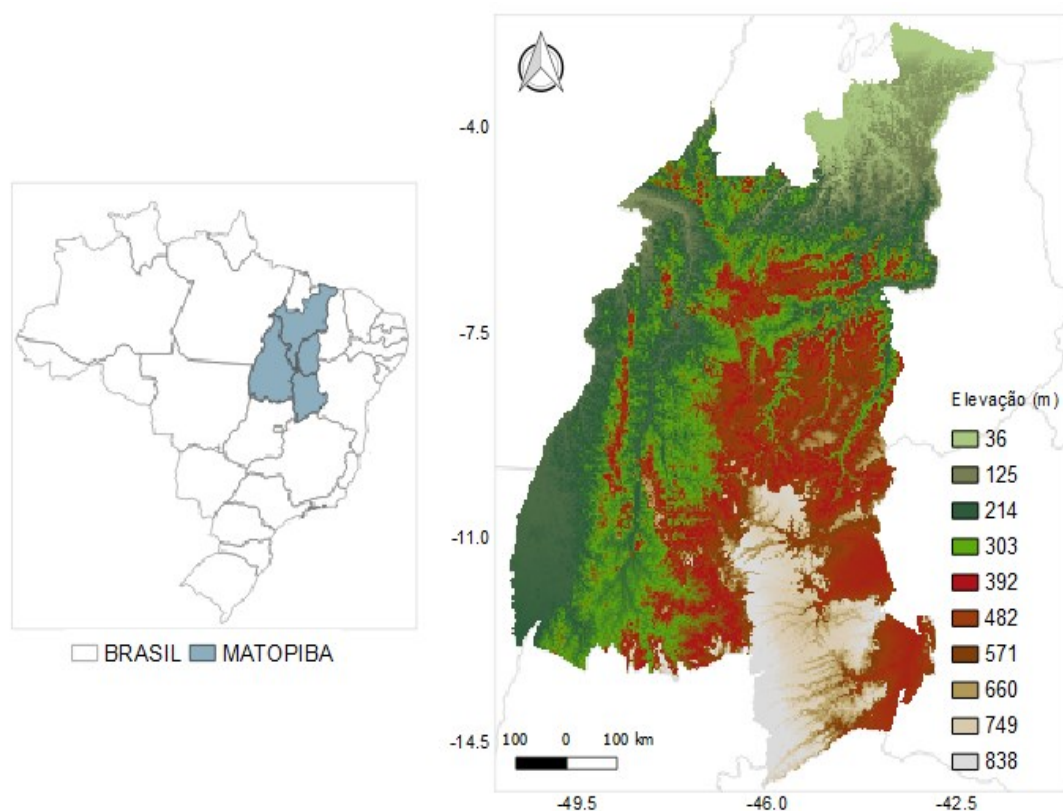


Figura 1. Localização geográfica da região do MATOPIBA e altimetria da região. Fonte (autor, 2024).

Quanto à pluviometria no MATOPIBA, o regime é sazonal, com período chuvoso de setembro/outubro a abril/maio, onde os valores superam os 900 mm, e período seco de maio a setembro, com precipitações abaixo de 600 mm (Alvares et al., 2013). Devido à sua vasta extensão territorial, o MATOPIBA apresenta distribuição variada de chuvas conforme os biomas, sendo os maiores (menores) registros próximos à fronteira com a Amazônia (Caatinga) (Weber et al., 2004).

Em termos de relevo, 47,9% da área é composta por terrenos planos e 33,7% possui declividade suave. Os dados de aptidão agrícola da região indicam que uma parcela significativa das terras apresenta alto potencial para agricultura intensiva, com aproximadamente 26 milhões de hectares (35% do total) classificados como de aptidão boa e regular (Lumbreras et al., 2015). As grandes regiões produtoras de grãos nas áreas de Planaltos e Depressões predominam devido à facilidade de mecanização e menor risco de erosão, embora seja necessário cuidado devido à predominância de solos com textura média a arenosa (Mingot et al., 2014).

O MATOPIBA é atravessado por três principais bacias hidrográficas: Tocantins, Atlântica (entre as regiões de transição norte e nordeste) e a do Rio São Francisco. Nestas bacias, encontram-se importantes rios como o Tocantins, Araguaia, São Francisco e Parnaíba (Miranda et al., 2014).

2.2 Dados

Os dados meteorológicos utilizados neste estudo consistem nas medições mensais de temperatura mínima e máxima (°C) e precipitação pluvial (mm) abrangendo o período de janeiro de 1961 a dezembro de 2018, totalizando 57 anos de dados históricos. Essas séries temporais mensais formam a base histórica essencial para a análise realizada. Além disso, foram consideradas séries mensais para o período de janeiro de 2020 a dezembro de 2099, o que representa 79 anos de dados futuros.

A base de dados históricos foi obtida da reanálise CRU-TS-3 do Climatic Research Unit (CRU) da Universidade de East Anglia, com uma resolução espacial de 0,5° (Harris et al., 2013; Ashraf Vaghefi et al., 2017; Harris et al., 2020). Esses dados foram acessados através do site Water Weather Energy Ecosystembase (<https://www.2w2e.com/home/CIMP>), que oferece acesso a séries históricas e futuras de temperatura e precipitação pluvial. A área de estudo compreende a região do MATOPIBA, distribuída em 235 pontos de grade com resolução espacial de 0,5°x0,5°.

Os dados climáticos futuros são originários do conjuntos de dados do Modelo Climático Global (GCM) HadGEM2-ES (The Hadley Global Environmental Model versão 2 (HadGEM), do Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP5), que oferece dados com correção através da polarização dos dados do Projeto de Intercomparação de Modelo Acoplado Fase 5 (Coupled Model Intercomparison Project - CMIP5), com os seguintes cenários de Via de Concentração Representativa (RCP), um cenários de estabilização RCP4.5 (via de emissão baixa a moderada) e um cenário pessimista RCP8.5 (via de alta emissão) (Collins et al, 2011; Vaghefi et al., 2017).

2.3 Métodos

2.3.1 Evapotranspiração de referência (ETp)

A estimativa da Evapotranspiração de referência mensal se deu pelo método de Thornthwaite e para os meses dos anos 1961 a 2099 com uso do pacote SPEI do software R. A obtenção da ET_0 se dá mediante equação de Thornthwaite, como descrito em (Ometto et al., 1981), conforme equações (1- 4):

$$ET = 16K \left(\frac{10T}{I} \right)^m \quad (1)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514} \quad (2)$$

$$K = \left(\frac{N}{12} \right) \left(\frac{NDM}{30} \right) \quad (3)$$

$$m = 6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,79 \times 10^{-2} I + 0,492 \quad (4)$$

em que: ET_0 é a evapotranspiração potencial; T é a temperatura média mensal (°C); I é o índice de calor, que é calculado como a soma de 12 valores mensais do índice (i); T_i é derivado da temperatura média mensal; K é um coeficiente de correção, calculado em função da latitude e mês, e m é um coeficiente baseado no índice de calor I; NDM é o número de dias do mês e N é o número máximo de horas de sol.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2, é possível visualizar a distribuição sazonal da precipitação nas microrregiões do MATOPIBA em dois cenários de projeções climáticas futuras: um cenário intermediário (RCP 4.5) e um cenário pessimista (RCP 8.5) para o período de 2020 a 2060. A precipitação exibe um padrão sazonal consistente em ambos os cenários,

com duas estações distintas: o primeiro semestre do ano registra as maiores médias de precipitação, enquanto o segundo semestre detém os menores valores pluviométricos, com meses como junho e agosto próximos a zero em média.

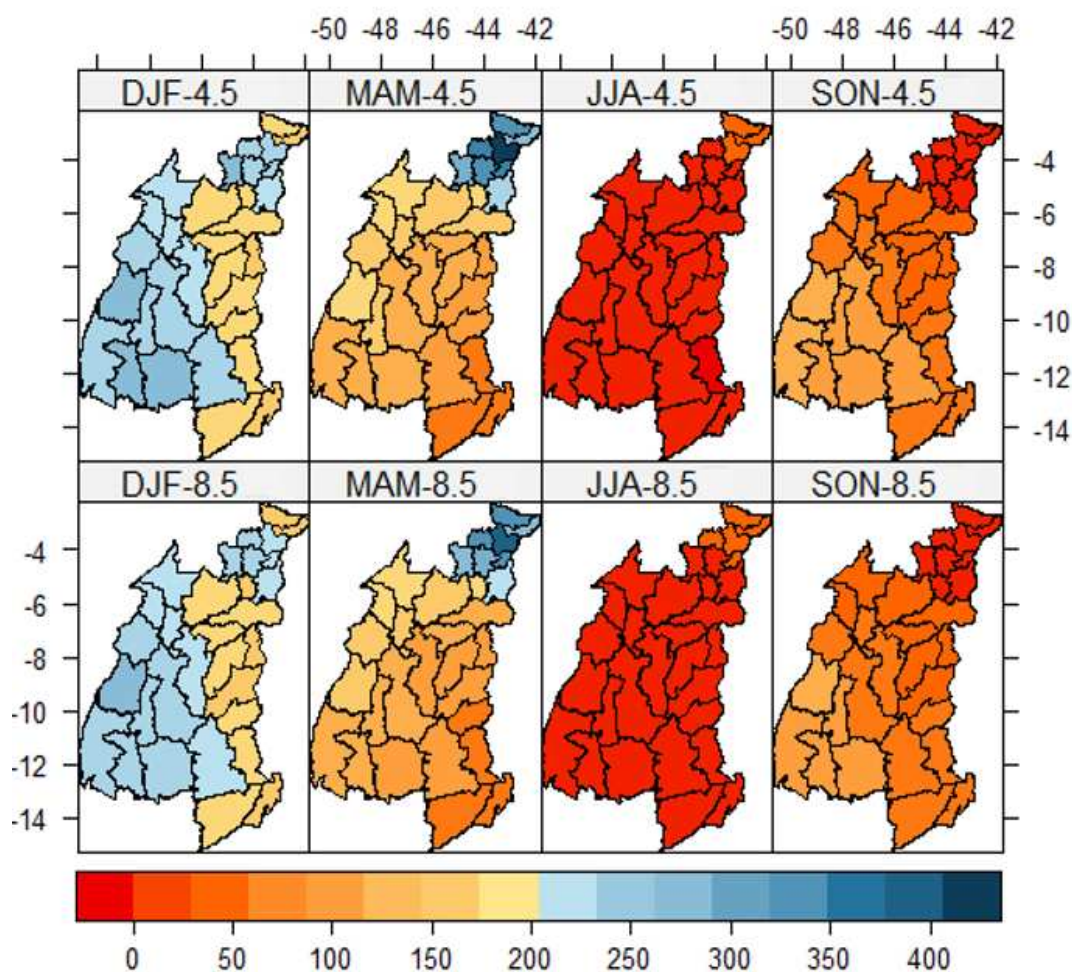


Figura 2. Distribuição sazonal média da precipitação pluvial nas microrregiões do MATOPIBA no intervalo de 2020-2060 para o cenário RCP 4.5 e cenário RCP 8.5.

A sazonalidade bem definida da precipitação pluvial é uma característica significativa observada na região nordeste do Brasil, onde os meses das estações secas frequentemente registram ausência total de chuvas, conforme documentado por Oliveira et al. (2017).

Em ambos os cenários estudados, a distribuição da precipitação segue um padrão similar. Os trimestres de DJF (verão) e MAM (outono) apresentam os maiores volumes de precipitação, embora haja uma redução no cenário pessimista (RCP 8.5). Durante o verão, os maiores índices pluviométricos ocorrem principalmente na faixa oeste da região do MATOPIBA, abrangendo todo o estado do Tocantins, a maior parte das microrregiões do Maranhão e uma microrregião no extremo oeste da Bahia (Barreiras), com volumes médios frequentemente superiores a 300 mm (Figura 2).

Por outro lado, no trimestre de DJF, as áreas do Maranhão (região centro-leste e nordeste), sudoeste do Piauí e parte do oeste baiano apresentam os menores valores de precipitação pluvial, variando entre 50 e 200 mm nos dois cenários (RCP 4.5 e RCP 8.5).

As projeções mais severas de mudanças na precipitação para a região do Tocantins são evidenciadas no cenário RCP 8.5 para meados do século XXI, com reduções significativas especialmente no sul e sudoeste da região, que diminuem gradualmente em direção ao nordeste. Essas diminuições na precipitação durante períodos de estiagem podem intensificar o risco de incêndios florestais e contribuir para a degradação da biota nativa, devido ao acúmulo de biomassa vegetal seca (Sousa et al., 2019).

A partir de abril (Figura 2), é evidente uma queda significativa no acumulado mensal da precipitação, com registros variando entre 50 e 100 mm. Esta diferença supera 100 mm em comparação à estação anterior, sinalizando o término do período chuvoso na maior parte da região. Durante o outono (MAM), os menores valores pluviométricos são encontrados na porção centro-sul do MATOPIBA, enquanto no nordeste da região (nordeste do Maranhão), os índices pluviométricos são mais elevados, indicando um aumento na intensidade dos regimes pluviais nessa área nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

Em síntese, as microrregiões do nordeste maranhense experimentaram um aumento no volume de chuvas nos dois cenários, com destaque para Chapadinha, onde os volumes médios de precipitação pluviométrica ultrapassam 400 mm (RCP 4.5) e 300 mm (RCP 8.5), respectivamente, representando uma redução de 100 mm na precipitação nessa microrregião. Apesar da diminuição na pluviosidade na região extremo norte do MATOPIBA, ainda são observados regimes pluviais elevados.

Costa et al. (2020) identificaram um aumento nos eventos de precipitação na maioria das estações no Maranhão ao analisarem índices de extremos climáticos para o nordeste do Brasil. Além disso, cenários pessimistas como o RCP 8.5 estão associados a uma maior frequência de extremos, incluindo déficits de chuvas (Nobre; Marengo, 2017; Dos Santos et al., 2020).

Reis et al. (2020) destacam que a porção norte do MATOPIBA recebe os maiores volumes de chuvas, com acumulados variando entre 330 e 380 mm durante o trimestre de MAM. Esse período coincide com a época em que a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) está mais ao sul, influenciada pelo deslocamento sazonal da temperatura da superfície do mar (TSM) no Atlântico Tropical. No entanto, há uma diminuição na precipitação pluvial no final do período chuvoso, com médias em torno de 150 mm na maior parte da região. Durante esses meses, os menores valores são registrados na porção

centro-sul do MATOPIBA, enquanto os maiores índices pluviométricos são observados na parte norte, indicando um aumento na intensidade dos regimes pluviais nessa área.

Os trimestres de inverno (JJA) e primavera (SON) nos cenários climáticos RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período de 2020 a 2060 (Figura 2) apresentaram os menores valores pluviométricos em todas as microrregiões do MATOPIBA, com precipitação próxima de zero. A partir da primavera, os valores de precipitação começam a aumentar, marcando a transição entre o período seco e chuvoso da região.

Durante a primavera, a porção sudoeste do MATOPIBA registra os valores mais elevados de precipitação, em torno de 100 mm, abrangendo sete microrregiões nos estados do Tocantins e Bahia no cenário RCP 4.5. No cenário RCP 8.5, essa configuração é similar, com os menores valores de precipitação localizados na porção norte do MATOPIBA (sudeste do Maranhão). A diferença está na quantidade de microrregiões afetadas, mantendo a mesma média de precipitação (cinco microrregiões nos estados do Tocantins e Bahia).

A distribuição sazonal da precipitação pluviométrica mostra um padrão consistente em ambos os cenários climáticos projetados, com períodos secos marcantes durante o inverno e a primavera, quando as médias de precipitação são próximas de zero em julho e agosto. Essa sazonalidade na precipitação é uma característica distintiva identificada na região nordeste do Brasil (NEB), onde os meses da estação seca frequentemente registram ausência completa de chuvas, conforme observado no estudo de De Oliveira et al. (2017).

A análise da distribuição sazonal da precipitação nas microrregiões do MATOPIBA em dois cenários climáticos futuros (RCP 4.5 e RCP 8.5) para o período de 2061 a 2099 (Figura 3) indica uma configuração semelhante à observada no período anteriormente avaliado (2020-2060).

A sazonalidade na região do MATOPIBA mantém-se bem definida, com os maiores volumes de precipitação ocorrendo no primeiro semestre, durante o verão e outono. No verão, há extensas áreas de microrregiões com médias acima de 350 mm, especialmente na parte oeste do MATOPIBA, abrangendo o Tocantins, o extremo oeste da Bahia e o centro-leste do Maranhão. As outras microrregiões registram valores em torno de 150 mm, predominando na parte leste da região. Estudos de observações e projeções futuras para a América do Sul apontam uma tendência positiva na precipitação durante o verão nessa região (Almazroui et al., 2021).

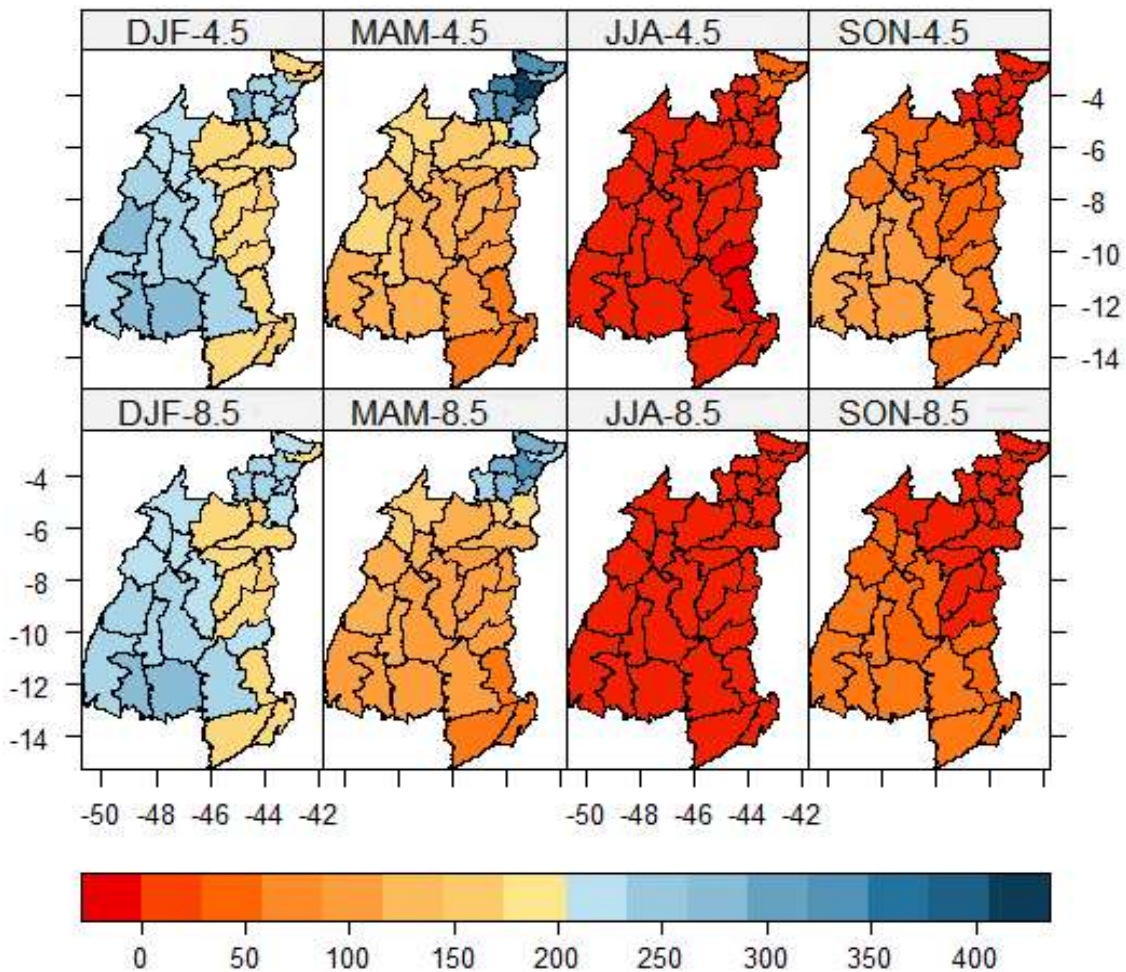


Figura 3. Distribuição sazonal da precipitação pluvial (mm) nas microrregiões do MATOPIBA no intervalo de 2061-2099 para o cenário RCP 4.5 e cenário RCP 8.5.

No cenário futuro projetado, há um aumento na precipitação em duas microrregiões específicas: uma no norte do Maranhão (Lençóis Maranhenses) e outra no sudoeste do Piauí (Chapadas do Extremo Sul Piauiense) no cenário pessimista (RCP 8.5). Em contraste, no mesmo período (DJF) no cenário intermediário (RCP 4.5), essas microrregiões apresentam valores menores de precipitação, com um aumento no acumulado de 170 mm para 210 mm (Figura 3).

A partir do outono (MAM), observa-se uma diminuição nos valores de precipitação pluviométrica em toda a área de estudo, com uma média de aproximadamente 150 mm, marcando o final do período chuvoso em grande parte da região. Nesta estação, os menores registros concentram-se na porção centro-sul do MATOPIBA, enquanto os maiores índices pluviométricos são observados na parte norte da região, indicando um aumento na intensidade dos regimes pluviais nessa área no cenário RCP 4.5 em comparação ao trimestre anterior (DJF). Destaca-se a microrregião de Chapadinha, onde os valores chegam a 400 mm. Por outro lado, no cenário RCP 8.5,

há uma perceptível queda na precipitação em toda a região, passando de 133 mm para 113 mm no geral, é de 325 mm para 250 mm na região norte, representando uma redução de 75 mm de chuva.

Em um estudo sobre projeções para o total precipitado no período chuvoso no Estado do Tocantins, observou-se uma diminuição dessa variável em ambos os RCPs (4.5 e 8.5), indicando uma redução projetada da precipitação acumulada em comparação com o clima atual. Destaca-se que a maior redução foi prevista para a região sul, especialmente no RCP 8.5.

A porção norte é a área que recebe os maiores volumes de chuvas, com precipitação acumulada variando entre 330 e 380 mm nos meses de março e abril. Este período coincide com a época em que a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) se desloca mais ao Sul, favorecendo a precipitação na região (Reis et al., 2020).

Fernandez et al. (2021) avaliaram os impactos das mudanças climáticas na produtividade da soja de sequeiro e irrigada na região do MATOPIBA, considerando dois cenários futuros (2011–2040 e 2041–2070) para duas trajetórias de concentração representativas (RCP 2.6 e 8.5). Eles observaram um aumento das chuvas na região do extremo norte em todos os cenários futuros estudados.

Os meses de junho, julho e agosto (Figura 3) marcam a estação seca na região do MATOPIBA, onde apenas uma pequena porção no extremo norte registra volumes de chuvas entre 32 e 37 mm no cenário RCP 4.5. Na maior parte da área, os volumes não ultrapassam 10 mm nos dois cenários de mudanças climáticas avaliados. Com a chegada da estação da primavera (SON), especialmente em outubro, inicia-se o período chuvoso. Entretanto, na porção norte da região, são registrados os menores regimes de chuva em ambos os cenários, com valores inferiores a 25 mm.

Silva et al. (2014) contribuíram com dados valiosos sobre a precipitação pluvial em diversas localidades da Região do MATOPIBA, analisando sua correlação com os fenômenos El Niño e La Niña. Os resultados destacam que não há variações significativas na precipitação durante o período seco. No entanto, durante o período chuvoso (outubro a abril), observa-se uma forte influência desses fenômenos sobre a precipitação na região.

Na porção centro-sul da região, a precipitação apresenta um aumento inicial, variando entre 30 e 50 mm, com os menores valores registrados nas regiões sul do Maranhão, sudoeste do Piauí e oeste da Bahia nos dois cenários projetados. Os maiores volumes de chuva são observados na faixa oeste da região, abrangendo parte do estado do Tocantins, onde os volumes ultrapassam 70 mm no RCP 4.5 (Figura 3), diminuindo

para 50 mm no cenário RCP 8.5, ainda assim maior em comparação com as demais regiões.

Rodrigues (2017) examinou os impactos hidrológicos associados aos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para três bacias hidrográficas no sudeste do Tocantins, identificando uma redução na precipitação pluviométrica tanto no início quanto em meados do século XXI. Esses resultados corroboram com as tendências observadas neste estudo, que indicam uma tendência geral de diminuição da chuva na região.

A sazonalidade da precipitação é uma característica distintiva, particularmente na região Nordeste do Brasil, onde os meses de estação seca registram quase ausência completa de chuvas, conforme analisado por Oliveira et al. (2017).

A Figura 4 denota os valores médios mensais de precipitação pluvial simulada nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, comparados com os valores médios observados no período de referência nas microrregiões do MATOPIBA. Observa-se que em ambos os cenários, os modelos tendem a subestimar a precipitação pluvial mensal nos meses de agosto a novembro e a superestimar nos meses mais chuvosos (dezembro a abril). Para os demais meses do ano, os valores simulados de precipitação pluvial se aproximam dos valores históricos nos dois cenários, com um leve acréscimo nos meses chuvosos, para o intervalo de tempo de 2020 a 2060.

Farinosi et al. (2019) investigaram os impactos das mudanças no uso do solo e dos cenários climáticos RCP 4.5 e 8.5 na vazão da bacia do rio Tapajós na Amazônia brasileira. Os resultados para o período de 2026 a 2045 revelaram uma redução nas vazões, atribuída principalmente ao decréscimo da precipitação pluvial durante a estação chuvosa. Esse fenômeno tem o potencial de afetar negativamente a produtividade da região.

Comparando a projeção da precipitação pluvial nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período de 2061-2099 com os dados climatológicos observados de 1962-2018 (Figura 4), nota-se um padrão semelhante na distribuição, porém com uma tendência geral de redução na quantidade de chuvas na região. No cenário RCP 4.5, há uma diminuição da precipitação durante o período seco (maio a novembro), enquanto ocorrem aumentos nos meses chuvosos, especialmente em março e abril, com médias que podem atingir até 300 mm.

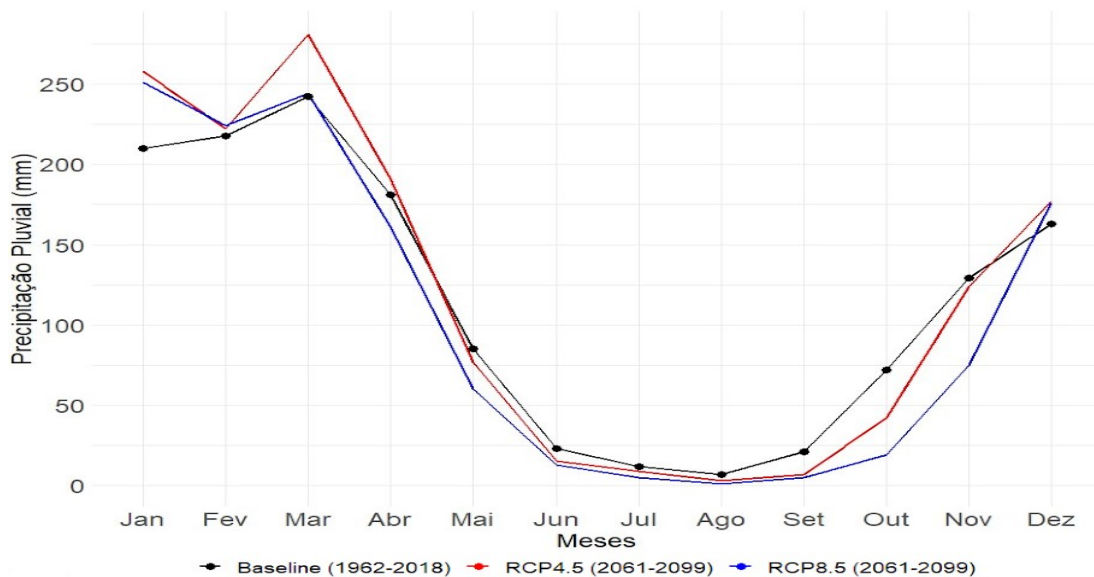
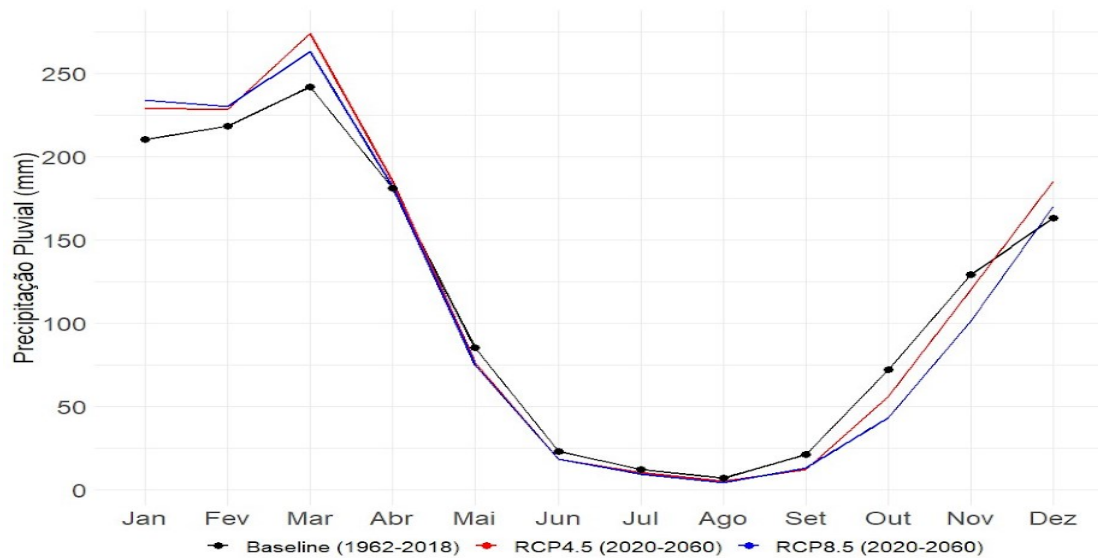


Figura 4. Precipitação média mensal para o período de 2020 a 2099 e a climatologia da precipitação no período de 1962 a 2018.

No cenário RCP 8.5 para o período de 2061-2099, observa-se uma redução da precipitação de abril a novembro em comparação com os valores históricos (1962-2018), enquanto os meses da estação chuvosa apresentam um discreto aumento no volume de chuva em relação aos demais meses. Ambos os cenários mostram uma diminuição média de 43 mm nos meses de março e novembro no RCP 8.5 em comparação ao RCP 4.5.

As projeções confirmam a sazonalidade da precipitação pluvial no MATOPIBA para os dois períodos analisados. Na Tabela 1 observa-se a variação percentual da precipitação em relação ao intervalo de 2020 a 2099. Ambos os cenários exibem um padrão sazonal similar, com reduções nos trimestres de JJA e SON (período seco) e

aumentos nos trimestres de DJF e MAM (período chuvoso), exceto no cenário RCP 8.5 para o período de 2061-2099.

Tabela 1. Variação média da precipitação projetada no MATOPIBA para o período de 2020-2099.

Cenários	RCP 4.5		RCP 8.5		
	Períodos	2020-2060	2061-2099	2020-2060	2061-2099
DJF		8.6	11.2	7.3	10.7
MAM		5.0	7.9	2.2	-8.5
JJA		-22.6	-35.4	-25.4	-55.4
SON		-15.8	-22.3	-29.3	-55.5
ANUAL		2.3	3.06	-1.6	-9.5

No cenário RCP 4.5, o trimestre de JJA teve a maior redução na precipitação ao longo dos períodos analisados, aproximadamente 23% (2020-2060) e 35% (2061-2099). Em seguida, o trimestre de primavera (SON) mostrou reduções de 16% para o intervalo de 2020-2060 e 22% para 2061-2099. No cenário RCP 8.5, houve uma diminuição mais acentuada na precipitação para os mesmos períodos, com queda de 25% (JJA) e 29% (SON) para 2020-2060, e reduções em torno de 55% para ambos os trimestres em 2061-2099.

As projeções para o cenário RCP 8.5 indicam variações positivas nos meses de verão e outono, exceto pelo outono no intervalo 2061-2099, que mostrou uma redução de 8% na precipitação. De maneira geral, há uma tendência de queda significativa na precipitação ao longo do tempo nesse cenário. Estima-se uma diminuição anual de -1,6% nas chuvas para o período de 2020-2060, enquanto para 2061-2099, a projeção sugere uma redução anual mais acentuada de -9,5%

No cenário RCP 8.5, as projeções indicam uma redução significativa de aproximadamente 10% na precipitação anual do MATOPIBA para 2061-2099, comparado aos valores históricos. Esses cenários pessimistas estão ligados a eventos climáticos extremos, podendo resultar em déficits ou excessos de chuvas (Nobre, Marengo, 2017; Dos Santos et al., 2020). A precipitação é crucial para regular a vazão dos rios e tem potencial de impactar severamente as atividades socioeconômicas da região, especialmente a agricultura, variando conforme características locais como vegetação, uso do solo e cobertura vegetal (Coe et al., 2009; Dias et al., 2018).

A Figura 5 ilustra a evapotranspiração de referência nas microrregiões do MATOPIBA para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 de 2020 a 2060. Ambos os cenários mostram um padrão com duas estações distintas: o primeiro semestre com valores mais baixos e o segundo semestre com valores mais altos de evapotranspiração. Essa variação reflete uma intensificação da evapotranspiração potencial nos períodos secos, influenciada pela maior incidência de radiação solar na superfície (Shen et al., 2021).

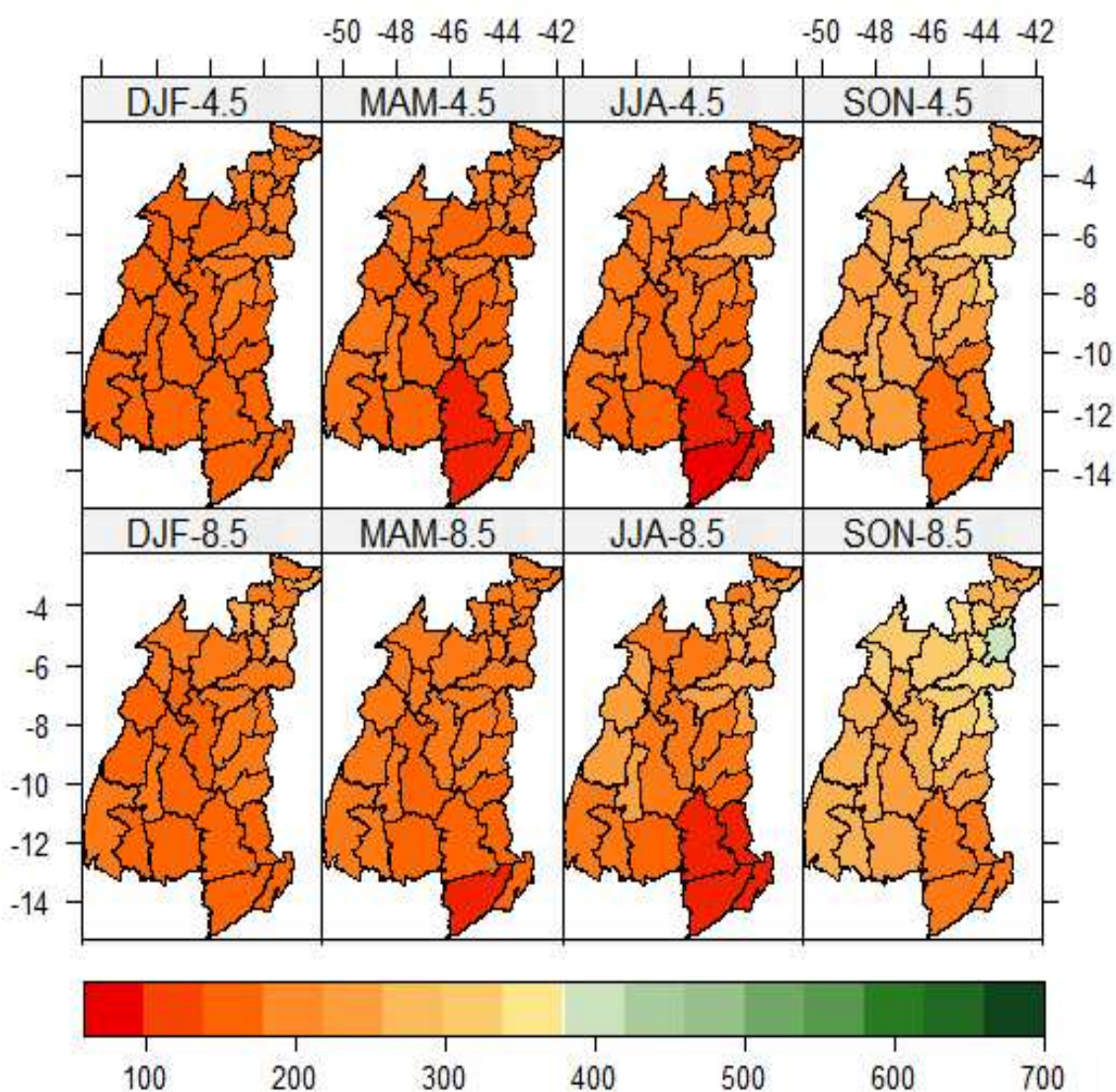


Figura 5. Distribuição sazonal da evapotranspiração de referência (mm) nas microrregiões do MATOPIBA no intervalo de 2020-2060 para o cenário RCP 4.5 e cenário RCP 8.5.

Durante o verão, a evapotranspiração de referência nas microrregiões do centro-oeste e sudeste do MATOPIBA atingiu aproximadamente 180 mm no cenário RCP 4.5, incluindo o Tocantins, extremo oeste da Bahia e sudoeste do Piauí. Houve um leve aumento para cerca de 190 mm na região centro-leste do Maranhão. Esses padrões se

repetem no cenário RCP 8.5, com valores aumentando para 190 mm no centro-oeste e sudeste, e destacando-se na região norte com valores mais altos, alcançando até 230 mm.

A combinação da redução nos volumes de precipitação pluvial, como observado anteriormente, junto com a alta demanda evaporativa, contribui para que a região apresente uma predominância de evapotranspiração superior à precipitação, especialmente na estação seca.

No trimestre de MAM, os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 apresentaram comportamentos semelhantes, com leve diminuição no RCP 4.5 e aumento discreto de 10 mm no RCP 8.5, elevando-se de 175 para 185 mm. Santa Maria da Vitória e Barreiras, no extremo oeste da Bahia, registraram os menores valores de evapotranspiração de referência, com 140 mm no RCP 4.5. No RCP 8.5, houve um aumento generalizado, alcançando 185 mm em toda a região, exceto em Santa Maria da Vitória, que manteve os valores mais baixos em 134 mm.

Estudos indicam que as projeções de mudanças climáticas apontam para alterações significativas no regime de precipitação e no padrão de temperatura, prevendo-se um aumento geral desta última em todo o país. Esse aumento de temperatura também contribui para o aumento da evapotranspiração de referência (Oliveira et al., 2021).

A evapotranspiração de referência durante o período de JJA varia de 98 a 226 mm na maior parte do MATOPIBA, com exceção das microrregiões do norte no Maranhão, onde alcança 220 mm, enquanto o extremo oeste da Bahia registra os menores valores de 100 mm no RCP 4.5. No cenário pessimista, há um aumento geral na região, com destaque para valores superiores a 250 mm no extremo leste e nordeste do MATOPIBA, exceto pelo extremo oeste da Bahia que continua com os menores valores (Figura 6).

Durante o período de SON, tanto no cenário RCP 4.5 quanto no RCP 8.5, ocorrem elevações significativas na evapotranspiração em toda a região, com destaque para valores superiores a 380 mm na microrregião de Caxias, Maranhão, no RCP 8.5. Esse aumento ocorre apesar da diminuição da precipitação, conforme observado anteriormente. Estudos anteriores (Melo Neto, 2013) também ressaltaram subestimações significativas da evapotranspiração durante períodos de recessão.

A evapotranspiração aumenta durante períodos secos devido à escassez de chuvas, afetando a vazão dos rios. Monitorar essa variável é essencial para estudos hídricos e agrícolas (Teixeira et al., 2015). Nas regiões semiáridas próximas ao Equador, a alta energia disponível intensifica as demandas evapotranspiratórias, reduzindo a umidade do

solo e a disponibilidade de água, o que, somado à diminuição da precipitação, leva a uma menor disponibilidade hídrica (Silva, 2014).

De maneira geral, a avaliação da distribuição sazonal da evapotranspiração de referência nas microrregiões do MATOPIBA, considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período de 2061 a 2099 (Figura 6), mostra taxas mais elevadas de evapotranspiração de julho a novembro e taxas mais baixas de dezembro a maio, conforme as projeções para o futuro próximo (2020-2060).

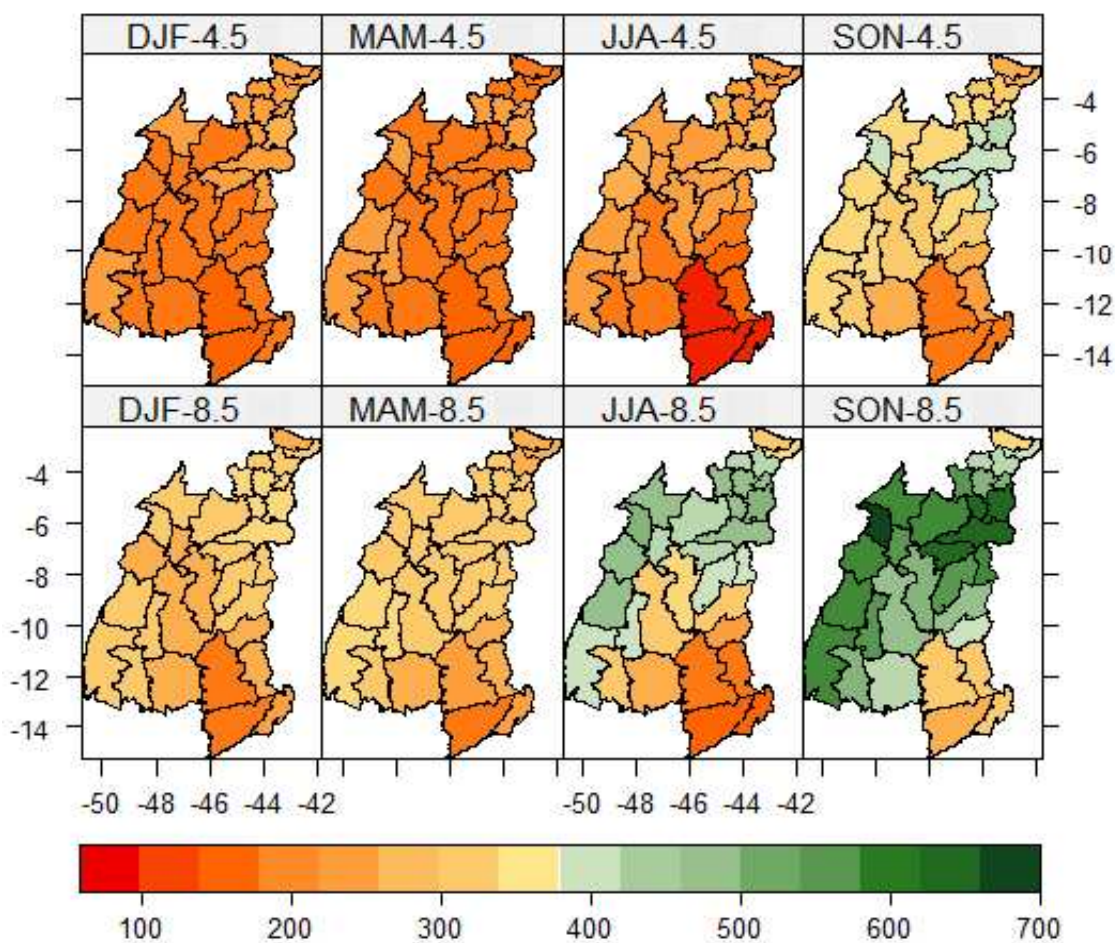


Figura 6. Distribuição sazonal da evapotranspiração nas microrregiões do MATOPIBA no intervalo de 2061-2099 para o cenário RCP 4.5 e cenário RCP 8.5.

Os menores valores de evapotranspiração de referência no cenário RCP 4.5 ocorrem nos trimestres de DJF e MAM, destacando-se na região centro-oeste do MATOPIBA, com valores entre 150 e 200 mm, representando um aumento de 35 mm em relação ao período anterior. No cenário RCP 8.5, observa-se um aumento significativo para esses mesmos meses em toda a região, especialmente no centro-norte, onde os valores atingem até 350 mm, apesar da redução significativa na precipitação nesse intervalo.

A combinação de baixos volumes de chuva e altas taxas de evapotranspiração de referência intensifica o estresse hídrico nas plantas (Correia Filho et al., 2018). Portanto, o crescimento vegetativo está diretamente condicionado ao regime de chuvas; em períodos de precipitação insuficiente, o desenvolvimento das plantas depende da disponibilidade de água subterrânea (Doble et al., 2006), sendo crucial tanto para áreas de vegetação nativa quanto para zonas agrícolas irrigadas.

Nos meses subsequentes (JJA e SON), há um aumento significativo na evapotranspiração de referência (ET_o), com exceção do extremo oeste da Bahia durante JJA no cenário RCP 4.5. Na primavera (SON), os aumentos são particularmente expressivos nas regiões leste (norte do Tocantins) e oeste (leste do Maranhão e oeste do Piauí), onde os valores chegam a 400 mm (Figura 6).

No cenário RCP 8.5, observa-se um aumento preocupante nos valores da ET_o para esses trimestres, com uma tendência de crescimento da região sudeste para o norte em ambos os cenários. Apesar do aumento registrado, o extremo oeste da Bahia continua apresentando os menores valores de evapotranspiração (200 a 350 mm). Durante o trimestre de SON, o cenário pessimista se destaca com taxas extremamente elevadas de evapotranspiração, alcançando valores próximos a 700 mm nas porções central, leste e oeste.

Estudos anteriores (Rodrigues, 2017) baseados em modelos de projeções climáticas indicaram aumentos consistentes na evapotranspiração para a região do Tocantins, tanto no RCP 4.5 quanto no RCP 8.5, com valores mais elevados previstos para o período de 2071 a 2099. Esse aumento simulado na evapotranspiração acompanha as projeções de aquecimento global ao longo do século XXI, correlacionando-se com o aumento na concentração de gases de efeito estufa (Van Vuuren et al., 2011).

Na Figura 7, são observados valores médios mensais de evapotranspiração de referência simulados para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 em dois períodos de tempo (2020-2060 e 2061-2099), comparados aos valores médios climatológicos observados no período de 1962 a 2018 nas microrregiões do MATOPIBA. Observa-se que ambos os cenários tendem a superestimar a evapotranspiração mensal em todos os meses, sendo mais acentuado no RCP 8.5.

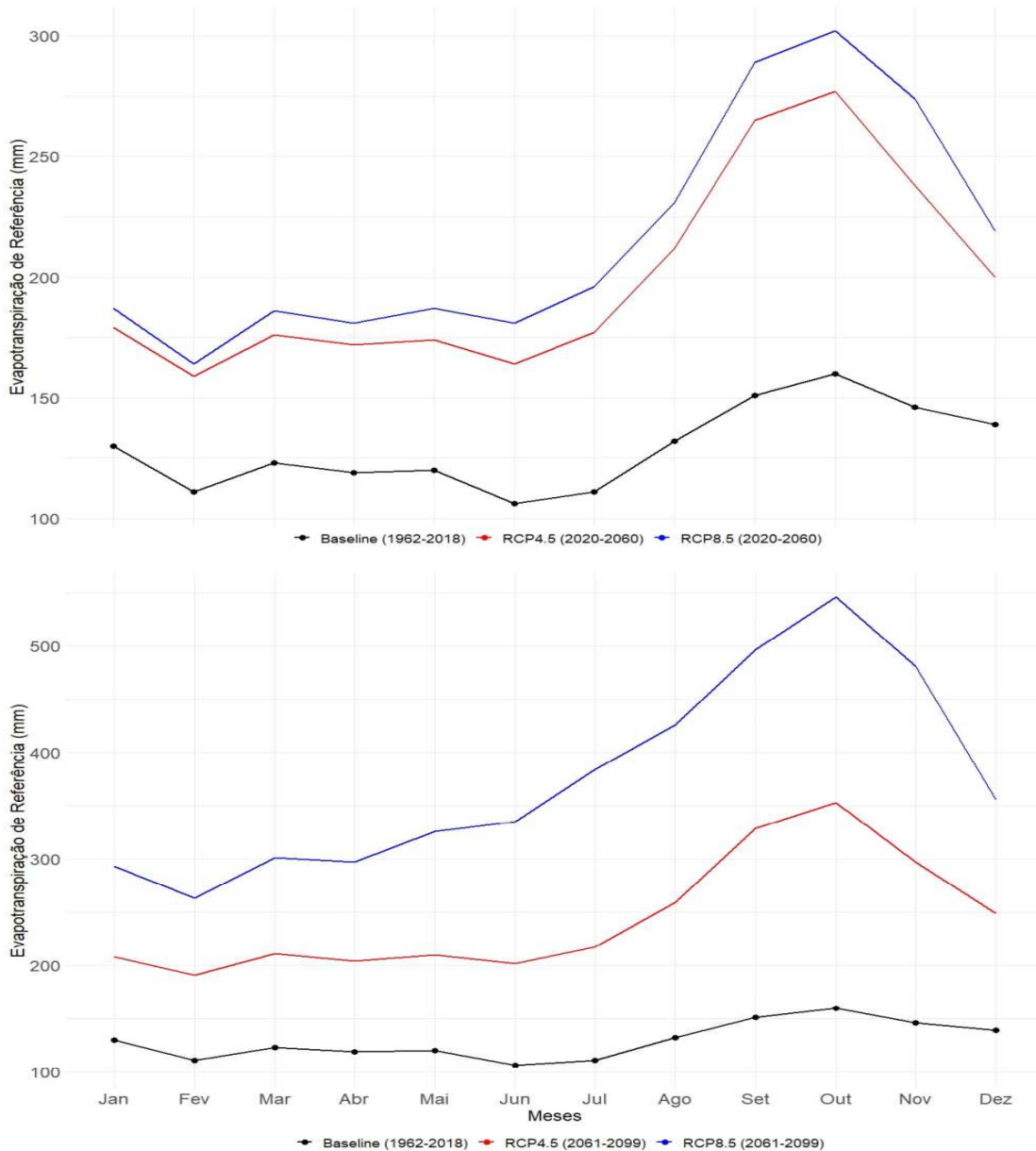


Figura 7. Evapotranspiração média mensal para o período de 2020 a 2099 e a climatologia da precipitação no período de 1962 a 2018.

Analisando a evapotranspiração de referência sob cenários de mudanças climáticas na região árida de Uribia-Guajira, Colômbia, Ospina-Noreña et al. (2017) observaram um incremento significativo no cenário RCP 4.5 para 2041-2060. As projeções para a média mensal de evapotranspiração no MATOPIBA de 2020-2060 mostram aumento da ETo em todos os meses, destacando-se os meses secos de julho a novembro com valores acima de 300 mm para o RCP 8.5, e um aumento moderado em outubro e novembro em ambos os cenários.

Para o período de 2061-2099 (Figura 7), as projeções no cenário RCP 4.5 indicam os menores valores de ETo em comparação com o cenário pessimista, mas ainda

representam um aumento dessa variável em relação aos valores históricos. No entanto, a média das projeções do cenário RCP 8.5 mostra um aumento notável de 200 mm em outubro em comparação ao RCP 4.5.

Gomes (2020) destacou um aumento significativo na evapotranspiração de referência em outubro no Arco do Desmatamento na Bacia Amazônica, com um aumento de quase 50% até 2050 no cenário RCP 8.5. Em outro estudo, a análise da produtividade do algodão herbáceo em cenários climáticos futuros para o semiárido nordestino indicou uma tendência de aumento na evapotranspiração potencial ao longo do período de 2020 a 2080, com potenciais impactos negativos na produtividade da cultura (Silva et al., 2020).

Na Tabela 2, são apresentadas as variações percentuais da evapotranspiração de referência para o MATOPIBA nos cenários de mudanças climáticas de 2020 a 2099. Ambos os cenários mostram um padrão sazonal semelhante, com variações mais pronunciadas nos trimestres de JJA e SON (período seco) e variações menores nos trimestres de DJF e MAM (período chuvoso). No entanto, o RCP 8.5 para o período de 2061-2099 revela aumentos significativos em todos os trimestres.

Tabela 2. Variação média da evapotranspiração de referência (mm) projetada no MATOPIBA em comparação ao período observado de 1961-2018.

Cenários	RCP 4.5		RCP 8.5		
	Períodos	2020-2060	2061-2099	2020-2060	2061-2099
DJF		41.9	70.9	50.1	140.2
MAM		44.4	73.1	53.2	155.9
JJA		58.5	94.0	74.3	228.0
SON		70.8	114.5	89.2	233.4
ANUAL		55.9	90.8	69.0	193.3

No cenário RCP 4.5, o trimestre de SON registrou o maior aumento na precipitação, com aproximadamente 71% (2020-2060) e 115% (2061-2099). Em seguida, o outono (MAM) apresentou um acréscimo de 59% para o período de 2020-2060 e 94% para 2061-2099. Por outro lado, no cenário RCP 8.5, houve um notável aumento na evapotranspiração de referência em todos os períodos analisados, variando de 50% (DJF) a 89% (SON) no horizonte mais próximo (2020-2060) e de 140% (DJF) a 233% (SON) no intervalo mais distante (2061-2099).

Ambos os cenários projetam um aumento anual na evapotranspiração potencial no MATOPIBA para ambos os períodos. No período mais próximo (2020-2060), as projeções indicam um aumento anual na ETo de 56% e 69% nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente. Para o período mais distante (2061-2099), as projeções sugerem um aumento anual ainda mais significativo na evapotranspiração, de 90% no cenário RCP 4.5 e de 193% no cenário RCP 8.5 (ver Tabela 2).

Foi observada uma disparidade significativa na evapotranspiração de referência na região, com aumentos substanciais no cenário pessimista para o período mais distante, chegando a ser até 100 vezes maior em comparação ao cenário intermediário. Esses resultados são consistentes com estudos semelhantes, como o de Ospina-Noreña et al. (2017), que analisaram a evapotranspiração sob cenários de mudanças climáticas em uma região árida da Colômbia, encontrando um aumento significativo no cenário RCP 8.5 (368 mm) para o período de 2061-2080.

Guimarães et al. (2016) conduziram uma análise sobre o desempenho e as projeções de simulações climáticas de Modelos Globais do CMIP5 para o Nordeste do Brasil (NEB), onde observaram mudanças de longo prazo na evapotranspiração potencial mensal e anual. Os resultados indicaram aumentos significativos no cenário RCP 8.5, com valores quase dobrados ou mais em comparação ao RCP 4.5, especialmente para períodos distantes como 2079-2099.

O cenário RCP 8.5 representa as projeções climáticas futuras mais pessimistas, impulsionadas pelo aumento no forçamento radiativo até 2100. Este cenário pressupõe um aumento substancial na concentração dos gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono, cujo impacto no aquecimento global pode provocar alterações significativas nas variáveis climáticas (Lyra et al., 2016).

É plausível que o aumento na evapotranspiração potencial esteja diretamente relacionado ao aumento da temperatura. Contudo, sem um aumento correspondente na precipitação pluviométrica em toda a região para compensar essa maior demanda atmosférica, é provável que ocorra um aumento significativo na deficiência hídrica como consequência desse desequilíbrio.

4.CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, projeta-se uma redução na precipitação pluvial no MATOPIBA nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período de 2020-2099 em comparação com o período de referência (1961-2018). A análise sazonal revelou uma

diminuição geral da precipitação, com maior destaque para os períodos relativamente secos da região (JJA e SON). No período chuvoso (primeiro semestre), foram observadas reduções, embora discretas.

As maiores diminuições nas estimativas de precipitação pluvial foram verificadas no cenário RCP 8.5, com uma média de redução anual de cerca de 10% em períodos distantes, superando as estimativas históricas e as projeções intermediárias para todos os períodos analisados. No entanto, a parte oeste da região apresentou os maiores volumes de precipitação, mesmo com diminuições em algumas estações, resultando em uma variação anual ligeiramente positiva.

Em relação à evapotranspiração de referência sazonal, observou-se um aumento geral em todos os períodos. Os trimestres de JJA e SON destacaram-se com as maiores elevações em ambos os cenários. A região centro-oeste registrou os maiores aumentos na variável em períodos mais distantes. O cenário RCP 8.5, sendo o mais pessimista, apresentou mudanças mais drásticas no geral. Para o intervalo mais distante (2061-2099), espera-se um aumento anual na evapotranspiração de 193% na região.

Este estudo temporal e espacial da precipitação pluvial e evapotranspiração de referência serve como base para o planejamento local, recomendando-se a investigação da variabilidade de outros fenômenos climáticos que possam impactar a região.

5. REFERÊNCIAS

- ALMAZROUI, M.A.; ASHFAQ, M.; ISLAM, M.N.; RASHID, I.U.; KAMIL, S.; 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. Doi <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>
- ASHRAF VAGHEFI, S.; ABBASPOUR, N.; KAMALI, B. ABBASPOUR, K. C.A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions – Case study: California-Baja California Peninsula, *Environmental Modelling & Software*, v. 96, p.181-198, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.033>.
- BURRELL, A. L.; EVANS, J. P.; DE KAUWE, M. G. Anthropogenic climate change has driven over 5 million 2 of drylands towards desertification. *Nature Communications*, v. 11, n. 1, p. 3853, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17710>.

- CASAROLI, D., RODRIGUES, T., MARTINS, A., EVANGELISTA, P., JÚNIOR, J.A. Padrões de Chuva e de Evapotranspiração em Goiânia, GO. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.33, p.247-256, 2018. <https://doi.org/10.1590/0102-7786332004>.
- COLLINS, W. J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N. ; HALLORAN, P.; HINTON, T.; HUGHES, J.; JONES, C. D.; JOSHI, M.; LIDDICOAT, S.; MARTIN, G.; O'CONNOR, F.; RAE, J.; SENIOR, C.; SITCH, S.; TOTTERDELL, I.; WILTSHIRE, A.; WOODWARD, S. Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, v.4, p. 1051–1075, 2011. Doi:10.5194/gmd-4-1051-2011.
- CORREIA FILHO, W.L.F.; DOS SANTOS, T.V.; DIOGO, A.M.; DE AMORIM, R.F.C. Diagnóstico da Precipitação e EVI em Dois Eventos de Seca no Nordeste do Brasil. *Rev. Depart. Geogr.* 35, 102–112, 2018.
- COSTA, R.L.; BAPTISTA, G.M.M.; GOMES, H.B.; SILVA, F.D.S.; ROCHA, J. R. L.; SALVADOR, M. A.; HERDIES, D.L. Analysis of climate extremes indices over northe ast Brazil from 1961 to 2014. *Weather and Climate Extremes*, v.28, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100254>.
- DIAZ, L.B.; SAURRAL, R.I.; VERA, C.S. Assessment of South America summer rainfall climatology and trends in a set of global climate models large ensembles. *International Journal of Climatology*, v. 41, n: 1, p. 1-19, 2020.
- DOBLE, R.; SIMMONS, C.T.; JOLLY, I.; WALKER, G. Spatial relationships between vegetation cover and irrigation-induced groundwater discharge on a semi-arid floodplain, Australia. *J. Hydrol.* 329, 75–97, 2006.
- DOS SANTOS, D. J.; PEDRA, G. U.; DA SILVA, M. G. B.; JUNIOR, C. A. G.; ALVES, L. M.; SAMPAIO, G.; MARENGO, J. A. Future rainfall and temperature changes in Brazil under global warming levels of 1.5°C, 2°C and 4°C. *Sustainability in Debate*, v. 11, p. 57-73, 2020. <https://doi.org/10.1590/0102-778632120150053>.
- FARINOSI, F.; ARIAS, M. E.; LEE, E.; LONGO, M.; PEREIRA, F. F.; LIVINO, A.; MOORCROFT, P. R.; BRISCOE, J. Future climate and land use change impacts on river flows in the Tapajós Basin in the Brazilian Amazon. *Earth's Future*, v. 7, p. 993–1017, 2019. <https://doi.org/10.1029/2019EF001198>
- FERNANDES, R. D. M.; Melo, D. M.; ELLI, E. F. Impactos das mudanças climáticas na produtividade da soja irrigada e de sequeiro na nova fronteira agrícola do Brasil. *Theor Appl Climatol* v.147, p.803–816, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03865-w>.

- GOMES, W. W.E. Modelagem espaço-temporal da evapotranspiração de referência na bacia amazônica em um cenário de crescimento na emissão de gases do efeito estufa. 2020. 71f. Dissertação Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2020.
- GUIMARÃES, S. O.; COSTA, A. A.; SALES, D.C. Climate Change Projections over Northeast Brazil According to CMIP5 Models. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31,2016. <https://doi.org/10.1590/0102-778631320150150> .
- HARRIS, B.J.C.; HARRISON, J.; HETHERINGTON, A. M.; WILLIAMS, M. T. Phylogenomic Evidence for the Monophyly of Bryophytes and the Reductive Evolution of Stomata. *Current Biology*, v.30, p.2001–2012, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.03.048>
- HARRIS, I.; JONES, P.D.; OSBORN, T.J.; LISTER, D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 dataset. *International Journal of Climatology*, v.34, p. 623-642, 2013.
- HE, L.; LI, Z. L.; WANG, X.; XIE, Y.; YE, J.-S. Lagged precipitation effect on plant productivity is influenced collectively by climate and edaphic factors in drylands. *Sci. Total Environ.* 755, 2020.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability Part B: regional aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. BARROS, V.R.; FIELD, C.B.; DOKKEN, D.J.; MASTRANDREA, M.D.; MACH, K.J; et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 688 p., 2014.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE: Summary for policymakers. In: Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S.L.; PÉAN, C.; et al. Cambridge University Press, p.40, 2021.
- LEI, H., GONG, T.; ZHANG, Y.; YANG, D. Biological factors dominate the interannual variability of evapotranspiration in an irrigated cropland in the North China Plain. *Agricultural and Forest Meteorology*, p. 262-276. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.007>
- LUMBRERAS, J.F; CARVALHO FILHO, A.; MOTTA, P.E.F; BARROS, A.H.C; AGLIO, M.L.D; DARDO, R.; O.; SILVEIRA, H.L.F; QUARTAROLI,

- C.F.; ALMEIDA, R.E.M. Aptidão Agrícola das Terras do Matopiba, Embrapa Solos. Documentos, 179; Embrapa Solos: Rio de Janeiro, Brasil, 2015.
- LVARES, C.A.; STAPE, L.J.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.D.M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22: 711-728. 2013.
- LYRA, A. A.; CHOU, S. C.; SAMPAIO, G. O. Sensitivity of the Amazon biome to high Resolution climate change projections. *Acta Amazonica*, v. 46, p. 175-188, 2016. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201502225>
- MELO NETO, J. O. Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Lavras. Lavras, 149 p. 2013.
- MINGOTI, R.; BRASCO, M.A; HOLLER, W.A; LOVISI FILHO, E.; SPADOTTO, C.A. Matopiba. Caracterização das Áreas com Grande Produção de Culturas Anuais. 2014. Disponível online: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/991059/matopiba-caracterizacao-das-areas-com-grande-producao-de-culturas-anuais>. Acessado em 23 nov de 2023.
- MIRANDA, E.E; MAGALHÃES, L.A; CARVALHO, C.A. Nota técnica nº 1: Proposta de Delimitação Territorial do Matopiba. Embrapa. 2014. Disponível online: https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT1_DelimitacaoMatopiba.pdf (acessado em 18 de dez de 2023).
- NASCIMENTO, D.; NOVAIS, G. Clima do Cerrado: Dinâmica atmosférica e características, variabilidades e tipologias climáticas. *Élisée Rev. UEG* v. 9, 2020.
- NOBRE, C.; MARENGO, J. A. Mudanças climáticas em rede: um olhar interdisciplinar. Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas. São José dos Campos, SP, 608 p, 2017.
- OLIVEIRA, P.T., SANTOS, S. C. M., LIMA, K.C. Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology* 130, 77-90. 2017. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1865-z>.
- OLIVEIRA, R. G.; JÚNIOR, L. C.G.V.; SILVA, J. B.; ESPÍNDOLA, D. A.L.F.; LOPES, R.D.; JOSÉ S.; NOGUEIRA, L. F.A. CURADO, T. R. R. Temporal trend changes in reference evapotranspiration contrasting different land uses in southern Amazon basin. *Agricultural Water Management*, 250, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106815>.
- OMETTO, J. C. Bioclimatologia Vegetal. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda. 440p. 1981.

- OSPINA-NOREÑA, J. E., DOMÍNGUEZ-RAMÍREZ, C. A., VEGA-RODRÍGUEZ, E. E., DARGHAN-CONTRERAS, A. E., & RODRÍGUEZ-MOLANO, L. E. Analysis of the water balance under regional scenarios of climate change for arid zones of Colombia. *Atmósfera*, v. 30, n. 1, p. 63-76, 2017.
- REIS, L. C.; SANTOS, S. C. M.; BEZERRA, B. G.; SPIRIDAS, M. H C. Caracterização da variabilidade da concorrência no MATOPIBA, região produtora de soja. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, 04, 1425-1441. 2020.
- RODRIGUES, J. A. M. Impactos antrópicos no regime hidrológico de tributários do Rio Tocantins. 128 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) –Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2017.
- SANTOS, S. F. D.; COSTA, R. L.; JÚNIOR, R. L. R.; GOMES, H. B.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, V. P. R.; MONTEIRO, L. A. Cenários Climáticos e Produtividade do Algodão no Nordeste do Brasil. Parte II: Simulação Para 2020 a 2080. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, 2020. Doi: 10.1590/0102-778635501
- SHEN, Q.; NIU, J.; SIVAKUMAR, B.; LU, N. Efeitos da cobertura morta na produtividade e evapotranspiração do milho na Bacia do Rio Heihe, noroeste da China. *Sensoriamento Remoto*, v.14, n3. 2022.
- SILVA, G. B.; SOUZA, W. M. e AZEVEDO, P. V. Cenários de Mudanças Climáticas no Estado da Bahia através de Estudos Numéricos e Estatísticos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 5, n. 5, 2012.
- SILVA, M. T. Mudança no uso de solo e no aporte de sedimentos na bacia hidrográfica do submédio Rio São Francisco. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande, 121 2014.
- SOUSA, W. S., VIANA, J. F. S., SILVA, R. R., IRMÃO, R. A. Estimativa do balanço hídrico de uma sub bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema com o Modelo SWAT. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 03, p.146-154, 2018. 10.24221/jeap.3.1.2018.1708.146-154
- SOUZA, R. M.; VIOLA, M. R.; CHOU, S. C.; ALVES, M. V. G.; AVANZI, J. C. PROJEÇÕES CLIMÁTICAS REGIONALIZADAS PARA O ESTADO DO TOCANTINS, BRASIL, NOS CENÁRIOS RCP 4.5 E RCP 8.5. *Revista Brasileira De Climatologia*, v.24. 2021. <https://doi.org/10.5380/abclima.v24i0.57052>
- VAGHEFI, S.A.; ABBASPOUR, N.; KAMALI, B.; ABBASPOUR, K.C. A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions e

case study: California-Baja California Peninsula. *Environmental Modelling & Software*, v.96, p. 181 – 198, 2017.

VAN.; V. D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; ROSE, S. K. As vias de concentração representativas: uma visão geral. *Mudanças Climáticas*, e. 109, p. 5-31. 2011. doi:10.1007/s10584-011-0148-z

WEBER, E.; HASENACK, H.; FERREIRA, C.J.S. Adaptação do Modelo Digital de Elevação do SRTM Para O Sistema de Referência Oficial Brasileiro E Recorte Por Unidade da Federação ; Centro de Ecologia da UFRGS: Porto Alegre, Brasil, 2004; Disponível online: <https://sosgisbr.com/2011/06/18/modelos-digitais-de-elevacao-do-srtm-no-formato-geotiff/> (acessado em 6 de out de 2023).

WILCOX, K.R.; BLUMENTHAL, D.M.; KRAY, J.A.; MUELLER, K.E.; DERNER, J.D.; OCHEL TREE, T.; PORENSKY, L.M. Plant traits related to precipitation sensitivity of species and communities in semiarid shortgrass prairie. *New Phytol.* v.229, p. 2007–2019, 2020.

CAPÍTULO 4

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O devido trabalho se propôs a oferecer entendimento a respeito dos padrões e tendências de eventos extremos, a exemplo da seca na região do MATOPIBA para o período de 1961-2018, permitindo o conhecimento configurativo desse fenômeno climatológico nas últimas décadas. Além de permitir a identificação da sazonalidade da precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência em cenários de mudanças climáticas futuras para o intervalo de 2020-2099.

Em suma o índice SPEI-12 denota potencial de caracterização na determinação de secas meteorológicas na região, identificando um aumento na sua intensificação e ocorrências, diferindo na magnitude e frequência. Foi possível verificar que as regiões mais úmidas do período avaliado compõem parte do Maranhão e duas micros do Tocantins (noroeste da localidade), e as mais secas pertencem ao centro-oeste do MATOPIBA (Grande parte do Tocantins e uma micro do Maranhão). Além de todas as microrregiões analisadas designaram tendências decrescentes significativas, ou seja, aumento do fenômeno extremo das secas durante todo o período avaliado.

Os cenários de projeções futuras RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período de 2020-2099, retratam uma redução na precipitação pluvial na região em sua totalidade, com destaque para o período relativamente seco (JJA e SON). As maiores reduções nas estimativas foram no RCP 8.5, com decréscimo de 10% anualmente em períodos distantes. Contudo, a porção oeste da região evidenciou-se quanto a permanência dos maiores volumes de precipitação, mesmo com decréscimo da mesma em algumas estações.

Constatou-se um incremento na evapotranspiração de referência em todos os períodos, com realce para os trimestres de JJA e SON. A região centro-oeste deteve dos maiores aumentos da variável em períodos mais distantes. O cenário RCP 8.5 em geral retratou modificações mais drásticas como um todo. Diante deste cenário, no intervalo mais distante (2061-2099) espera-se um aumento anual na evapotranspiração de referência de 193% na região.

Entretanto, pode ser conjecturado mediante estudo que a região avaliada está sujeita a intensificação de eventos extremos, podendo ser acometida futuramente principalmente por fenômenos rigorosos, a citar a seca.