



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



RONALDO GUILHERME SANTOS LIMA

**ANÁLISE DA EVOLUÇÃO TEMPORAL DA REGIÃO SEMIÁRIDA BRASILEIRA A  
PARTIR DE BASE DE DADOS ESPACIALIZADA EM ALTA RESOLUÇÃO**

SÃO CRISTÓVÃO  
2025

RONALDO GUILHERME SANTOS LIMA

**ANÁLISE DA EVOLUÇÃO TEMPORAL DA REGIÃO SEMIÁRIDA BRASILEIRA A  
PARTIR DE BASE DE DADOS ESPACIALIZADA EM ALTA RESOLUÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Sergipe, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ludmilson Abritta Mendes  
Coorientadora: Dra. Vania Elisabete Schneider

SÃO CRISTÓVÃO  
2025

## Ficha catalográfica

É concedida à Universidade Federal de Sergipe permissão para reproduzir cópias desta qualificação e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho acadêmico pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Ronaldo Guilherme Santos Lima

Lima, Ronaldo Guilherme Santos.

Análise da evolução temporal da região semiárida brasileira a partir de base de dados espacializada em alta resolução/ Ronaldo Guilherme Santos Lima. São Cristóvão, 2025.

77 p.

Orientador: Prof. Dr. Ludmilson Abritta Mendes

Coorientadora: Dra. Vania Elisabete Schneider

Dissertação de mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe.

1. Índice de Aridez. 2. Análise de tendência. 3. Variação de temperatura. 4. Mudanças climáticas. I. Mendes, Ludmilson Abritta. II. Schneider, Vania Elisabete. III Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe. IV. Análise da evolução temporal da região semiárida brasileira a partir de base de dados espacializada em alta resolução

## **Agradecimento**

A Deus por ter me dado a graça de entender que Nele os meus sonhos não eram impossíveis e por sua providência, que nunca falha.

Aos meus pais, Ronaldo Silva e Maria José, meu irmão Ronald Lucas por todo amor e apoio em minha jornada.

A minha prima Tamara, que não mede esforços em me ajudar quando preciso.

Ao meu orientador, Prof. Dr Ludmilson, por todos ensinamentos, paciência e amizade, a coorientadora Dra. Vania Schneider, que colaborou tanto na expansão e multidisciplinaridade desta dissertação. Obrigado por colaborarem tanto para a execução deste trabalho.

Aos amigos que a graduação e o mestrado me presentearam, Ana Lara, Izaías Neto, Hellen Karine, Prof. Dra. Denise Michelan, que não pouparam esforços para me ajudar e, de alguma forma, sempre se faziam presentes em cada etapa desse mestrado.

Aos meus amigos José Ítalo, Matheus de Jesus e Renato Santana, por todo apoio, incentivo e inspiração, tanto nas alegrias quanto nas tristezas, especialmente Renato, que ajudou tanto na reta final desse trabalho.

Aos meus amigos Diego Teles, Luciene Santos e Rozivania Catarino, pelo convívio e cuidado nesses anos morando no Rosa Elze.

Aos meus amigos Emerson Vieira, Iza Luana, Lucas Felipe, Rosicleide Barreto, por todo carinho, confiança e todo o incentivo para continuar.

A Ane Caroline e Juliano Neto, meus compadres, por toda amizade, preocupação e cuidado.

Aos membros da comunidade: Eis aí tua mãe, Obra de Maria, que já passaram pela missão Muribeca, por toda intercessão e acolhimento.

A Agência Financiadora: Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo incentivo financeiro.

## RESUMO

Para uma efetiva observação meteorológica que represente as condições climáticas é necessário que sua realização seja feita de maneira sistemática, uniforme e ininterrupta, especialmente no contexto de mudanças climáticas. As concentrações elevadas de gases de efeito estufa no ambiente resultam no aquecimento do planeta conseqüentemente, há também o aumento das temperaturas, amplificando as ondas de calor. O aumento das temperaturas eleva os níveis de Evapotranspiração (ET), e podem causar mudanças no comportamento da Precipitação (P) em todo o planeta. Diante disso, essa dissertação tem como objetivo geral analisar a delimitação do semiárido brasileiro, seguindo os critérios da Precipitação ( $P < 800\text{mm}$ ) e Índice de Aridez ( $IA < 0,5$ ), de modo a verificar quais municípios pertencem a este território. Esse estudo foi aplicado nos nove estados do Nordeste brasileiro (NEB), em Minas Gerais e no Espírito Santo. Utilizou-se a Base de Dados BR-DWGD para a obtenção dos dados de  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$ , ET e P do período de 1961 a 2020, e com a razão entre P e ET obteve-se a série de IA. Com essas séries, foi feita a análise da evolução temporal dessas variáveis, como também a comparação da delimitação oficial do Semiárido com os resultados dos municípios que apresentaram Precipitação  $< 800\text{ mm}$  e  $IA < 0,5$ . Utilizando uma rotina nos softwares Rstudio e com o auxílio do Qgis, foi feita a análise das séries históricas e suas tendências. O estudo revelou um aumento de áreas com  $T_{\max} > 31^{\circ}\text{C}$  e  $T_{\min} > 19^{\circ}\text{C}$ , indicando aquecimento na região, associado ao aquecimento do Atlântico e aos gases de efeito estufa. A evapotranspiração ( $ET > 1800\text{ mm}$ ) expandiu-se, principalmente, em áreas agrícolas, enquanto a precipitação com  $P < 600\text{ mm}$  cresceu, afetando o semiárido, com a redução de áreas úmidas. A análise do IA evidenciou o surgimento do clima árido, particularmente na Bahia, avançando para o leste e norte e expansão da área semiárida, enquanto as áreas úmidas diminuíram ao longo do tempo. A delimitação do semiárido utilizando os critérios de Precipitação e IA, com os dados de 1991 a 2020 mostrou maior coincidência com a delimitação do bioma Caatinga.

**Palavras-chaves:** Índice de Aridez; Análise de tendência; Variação de temperatura; Mudanças climáticas.

## ABSTRACT

For an effective meteorological observation that accurately represents climatic conditions, it is essential that it be conducted in a systematic, uniform, and uninterrupted manner, particularly in the context of climate change. Elevated concentrations of greenhouse gases in the atmosphere result in planetary warming, which, in turn, leads to rising temperatures and an intensification of heat waves. The increase in temperature raises Evapotranspiration (ET) levels and may cause alterations in Precipitation (P) patterns globally. In this context, the primary objective of this dissertation is to analyze the delimitation of the Brazilian semi-arid region based on the criteria of Precipitation ( $P < 800$  mm) and Aridity Index ( $AI < 0.5$ ), in order to identify the municipalities that belong to this territory. The study was applied to the nine states of the Brazilian Northeast (NEB), as well as Minas Gerais and Espírito Santo. The BR-DWGD Database was used to obtain Tmax, Tmin, ET, and P data for the period from 1961 to 2020, and the AI series was derived from the ratio between P and ET. These series enabled an analysis of the temporal evolution of these variables, as well as a comparison between the official delimitation of the semi-arid region and the results for municipalities that presented Precipitation  $< 800$  mm and  $AI < 0.5$ . A historical series analysis and trend assessment were conducted using routines in RStudio and with the support of QGIS. The study revealed an expansion of areas with  $T_{max} > 31^{\circ}\text{C}$  and  $T_{min} > 19^{\circ}\text{C}$ , indicating regional warming associated with Atlantic warming and greenhouse gas emissions. Evapotranspiration ( $ET > 1800$  mm) increased, particularly in agricultural areas, while regions with  $P < 600$  mm expanded, impacting the semi-arid zone and leading to a reduction in humid areas. The AI analysis highlighted the emergence of an arid climate, particularly in Bahia, with an eastward and northward expansion of arid conditions and a growing semi-arid area, while humid regions declined over time. The delimitation of the semi-arid region based on Precipitation and AI criteria, using data from 1991 to 2020, showed a greater coincidence with the delimitation of the Caatinga biome.

**Keywords:** Aridity Index; Trend Analysis; Temperature Variation; Climate Change.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Suscetibilidade à desertificação .....	24
<b>Tabela 2:</b> Índice de Aridez para as classes climáticas .....	24
<b>Tabela 3:</b> Porcentagem das áreas correspondentes às $T_{\max}$ média .....	30
<b>Tabela 4:</b> Porcentagem das áreas correspondentes às $T_{\min}$ média .....	33
<b>Tabela 5:</b> Evolução da ET na área de estudo .....	35
<b>Tabela 6:</b> Evolução da P na área de estudo .....	39
<b>Tabela 7:</b> Evolução da IA na área de estudo .....	42
<b>Tabela 8:</b> Distribuição de municípios que fazem parte do semiárido oficial.....	54
<b>Tabela 9:</b> Municípios que pertencem ao semiárido pela Delimitação oficial e pelos critérios I e II (1981-2010).....	56
<b>Tabela 10:</b> Municípios que pertencem ao semiárido pela Delimitação oficial e pelos critérios I e II (1991-2020).....	58

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Nordeste brasileiro.....	13
<b>Figura 2:</b> Área de estudo. ....	25
<b>Figura 3:</b> Delimitação Oficial do semiárido (2017). ....	27
<b>Figura 4:</b> Períodos utilizados no trabalho.....	29
<b>Figura 5:</b> Evolução da $T_{max}$ .....	30
<b>Figura 6:</b> Evolução da $T_{min}$ média. ....	32
<b>Figura 7:</b> Evolução da ET.....	34
<b>Figura 8:</b> Uso e ocupação do solo em 1985. Fonte: Adaptada do Map Biomas (2024). ....	36
<b>Figura 9:</b> Uso e ocupação do solo em 2020. ....	36
<b>Figura 10:</b> Evolução temporal de P. ....	37
<b>Figura 11:</b> Evolução temporal de IA. ....	41
<b>Figura 12:</b> Teste de tendência da $T_{max}$ .Fonte: Desenvolvida pelo autor. ....	44
<b>Figura 13:</b> Teste de tendência da $T_{min}$ .....	46
<b>Figura 14:</b> Teste de tendência da ET.Fonte: Desenvolvida pelo autor. ....	48
<b>Figura 15:</b> Teste de tendência de P.....	50
<b>Figura 16:</b> Tendência da série anual de IA. ....	52
<b>Figura 17:</b> Comparação da delimitação oficial (2017) do semiárido com os municípios que atendem aos Critérios I e II no período 3. ....	55
<b>Figura 18:</b> Comparação da delimitação oficial (2017) do semiárido com os municípios que atendem aos Critério I e II no período 4.....	57
<b>Figura 19:</b> Evolução dos municípios que pertencem ao semiárido e os critérios de inclusão (versão preliminar) .....	59

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

BR-DWGD - *Brazilian Daily Weather Gridded Data*

ET - Evapotranspiração Potencial

IA - Índice de Aridez

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

NEB - Nordeste do Brasil

P- Precipitação

SUDENE - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste

$T_{\max}$  – Temperatura máxima

$T_{\min}$  – Temperatura mínima

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	9
1.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	9
1.2.	OBJETIVOS.....	12
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	13
2.1.	NORDESTE BRASILEIRO.....	13
2.2.	DELIMITAÇÃO DO SEMIÁRIDO .....	15
2.3.	BASES DE DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS .....	17
2.3.1.	Base de Dados Gradeados .....	18
2.4.	COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS.....	20
2.5.	INDICADORES DE SECA E ARIDEZ.....	23
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	25
3.1.	ÁREA DE ESTUDO .....	25
3.2.	OBTENÇÃO DOS DADOS .....	26
3.3.	CÁLCULO DO ÍNDICE DE ARIDEZ (IA).....	26
3.4.	ANÁLISE DA DELIMITAÇÃO DO SEMIÁRIDO .....	26
3.5.	ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS SÉRIES TEMPORAIS.....	28
3.6.	PRODUÇÃO DE MAPAS E <i>SHAPEFILES</i> .....	28
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	29
4.1.	TEMPERATURA MÁXIMA E MÍNIMA .....	29
4.2.	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL .....	33
4.3.	PRECIPITAÇÃO.....	37
4.4.	ÍNDICE DE ARIDEZ.....	40
4.5.	TESTE DE TENDÊNCIA DAS VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS .....	43
4.6.	ANÁLISE DA DELIMITAÇÃO DO SEMIÁRIDO .....	54
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	60
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	64

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As observações meteorológicas representam as condições climáticas em um momento e local específico e precisam ser realizadas de maneira sistemática, uniforme e ininterrupta. Tais observações são feitas utilizando instrumentos adequados que medem e registram séries de dados meteorológicos, as quais devem captar a variação constante dos elementos atmosféricos, resultando em dados precisos que descrevem o comportamento do clima (Brasil, 2024).

Estes dados são amplamente usados nos estudos relacionados aos recursos hídricos, sendo aplicados na elaboração de cartas de previsão de tempo, investigação de leis que regem os fenômenos climáticos, em estudos hidrológicos, no projeto de estruturas hidráulicas, no gerenciamento dos recursos hídricos, na previsão de cheias, na avaliação da capacidade de atendimento das demandas hídricas de uma região e na estimativa do potencial de aproveitamento hidráulico para geração de energia elétrica (Brasil, 2024; Tucci, 2005).

Entretanto, existem problemas com as séries históricas de dados meteorológicos, pois elas estão sujeitas a apresentar um número considerável de falhas, e a densidade dos postos pode ter uma cobertura espacial insuficiente, dada a extensão do território brasileiro (Paz *et al.*, 2018). Os dados tratados estatisticamente por meio da interpolação ajudam a mitigar o problema da baixa qualidade dos dados, gerando pontos fictícios que simulam um posto de monitoramento de dados hidrometeorológicos. Isso aumenta a quantidade de informações disponíveis tanto no tempo quanto no espaço (Abreu *et al.*, 2019).

Utilizando o artifício da interpolação, a base de dados desenvolvida por Xavier *et al.* (2022), o Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD) apresenta um conjunto de dados de alta qualidade para o Brasil. Ela foi construída a partir de dados de pluviômetros e estações climatológicas operadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), possui resolução espacial de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ , e cobre o período de janeiro de 1961 a julho de 2020. Nesta base estão disponíveis os dados de Precipitação (P), Evapotranspiração Potencial (ET), Temperatura Máxima ( $T_{max}$ ), Temperatura Mínima ( $T_{min}$ ), radiação solar, velocidade do vento a dois metros de altura e umidade relativa do ar.

As mudanças climáticas, sejam de origem antropogênica ou natural, afetam de forma significativa os sistemas naturais e humanos em escala global e levantam grandes preocupações entre os círculos científicos, políticos e sociais (Marengo, 2008). As concentrações elevadas de gases de efeito estufa no ambiente retêm a radiação solar, o que resulta no aquecimento do

planeta. Ademais, segundo o relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC* (2022) os centros urbanos são responsáveis por 70% da emissão de CO<sub>2</sub>.

A concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera atingiu 417,2 partes por milhão em 2022, representando um aumento de 51% em relação aos níveis pré-industriais. As emissões de combustíveis fósseis são a principal fonte desse gás, com contribuições significativas de setores como energia, indústria e transporte (Friedlingstein *et al.*, 2022). Se esse cenário não for reduzido, é provável que em meados do século XXI a sua concentração atmosférica seja equiparada ao início do Eoceno, há cerca de 50 milhões de anos atrás (Foster; Royer; Lunt, 2017).

A maior parte dos países está em sérios riscos, pois, as mudanças climáticas estão causando os aumentos na temperatura, o que levam a incêndios florestais, aumento da ET e maior variabilidade de P, a elevação do nível do mar, eventos climáticos extremos bem como secas e inundações (Clarke *et al.*, 2022). Outrossim poderá haver mudanças rápidas e extensas nos ecossistemas globais, que poderão resultar em impactos desconhecidos e imprevisíveis na saúde humana e no ecossistema (IPCC, 2022).

Ainda no âmbito das mudanças climáticas, o comportamento das variáveis climatológicas pode sofrer alterações que podem desencadear o aumento das temperaturas globais (Richie; Roser, 2017), o que tem chances de desencadear condições de seca, que, por sua vez, agrava o processo de desertificação em todo o globo (Jung *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2018), como também intensifica a ocorrência e severidade de eventos de chuvas extremas (Alexander, 2016). Esses fenômenos podem ser percebidos no Brasil no aumento da região semiárida do país (SUDENE, 2021), no recente surgimento de uma região árida no Nordeste Brasileiro (Brasil, 2023), nos eventos recentes de chuva extrema no Rio Grande do Sul, que resultaram em duas cheias históricas no intervalo de seis meses (Brasil, 2023) e no registro que 2024 foi o ano mais quente desde 1961, apresentando uma temperatura 0,79°C maior que a média histórica registrada (INMET, 2025).

O processo de desertificação, por outro lado, é um fenômeno complexo, caracterizado pela redução significativa na precipitação, que compromete a disponibilidade de água nos ecossistemas afetados pelo aumento nas temperaturas, o que intensifica a perda de umidade do solo por evaporação e eleva as taxas de transpiração das plantas, agravando ainda mais o estresse hídrico. A combinação desses fatores resulta na degradação progressiva dos solos, tornando-os menos férteis e mais suscetíveis à erosão. Consequentemente, a vegetação também sofre impactos severos, com a redução na cobertura vegetal, contribuindo para a amplificação

do aquecimento local, criando um ciclo de retroalimentação que acelera a desertificação (Zhou *et al.*, 2021).

Nesse contexto, as classes de aridez, determinadas com base em índices de aridez ou umidade, são representações confiáveis da disponibilidade potencial de água, especialmente em grandes escalas (Zhou *et al.*, 2021). Os índices de aridez podem ser estimados de diversas formas como: o índice de aridez de Budyko (Budyko, 1974), índice de aridez do PNUMA (PNUMA, 1992), índice de intensidade de aridez (Costa;Soares, 2009), índice de aridez de Martonne (de Martonne, 1926), índice de aridez de Thornthwaite - IA (Thornthwaite, 1948), e índice de aridez da UNESCO (UNESCO, 1979).

Portanto, é imprescindível a investigação do comportamento das variáveis climatológicas, tornando possível identificar padrões e tendências que caracterizam essas variáveis (Makarigakis; Jimenez-Cisneros, 2019). A exemplo de Silva *et al.* (2018), que encontraram tendência de crescimento de ET na porção ocidental do estado de Alagoas, e Carvalho *et al.* (2020), que identificaram tendência de crescimento de chuva no litoral do Nordeste brasileiro (NEB) e decaimento na região semiárida.

No NEB, especificamente no semiárido, o déficit crônico e contínuo de precipitação representa um desafio significativo, agravado pelo fato de ser a região semiárida mais densamente povoada do mundo (Sales, 2002; Marengo *et al.*, 2011). Destaca-se que 81% das comunidades quilombolas do Brasil vivem nessa área, onde a população rural mais pobre é a mais afetada pelos eventos de seca (Marengo *et al.*, 2017; Da Silva; Bezerra, 2020).

A Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) é o órgão responsável pela delimitação oficial da região semiárida do país. Essa delimitação é crucial para o direcionamento de políticas públicas, investimentos e ações de desenvolvimento regional. Os critérios para que os municípios sejam incluídos no semiárido são: precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm, Índice de Aridez de Thornthwaite (IA) igual ou inferior a 0,5 e percentual de déficit hídrico igual ou superior a 60% considerando todos os dias do ano (SUDENE, 2021). Destes três critérios, o último não é de fácil repetição do método, pois são necessárias estimativas da variação diária de água no solo, as quais não estão disponíveis em nenhum banco de dados e possuem diferentes formas de serem calculadas (Souza, 2023). Dada a complexidade em aplicar os critérios estabelecidos, é clara a dificuldade em verificar o pertencimento dos municípios à região do semiárido. Isso representa um desafio significativo para as gestões municipais aderirem às decisões da SUDENE.

Diante do exposto, este estudo é relevante pois as mudanças climáticas têm intensificado o aumento das temperaturas e alterado os padrões de precipitação, impactando diretamente a dinâmica climática e a disponibilidade hídrica em diversas regiões. A análise temporal de variáveis como temperatura máxima, temperatura mínima, evapotranspiração, precipitação e índice de aridez é fundamental para compreender a evolução dessas mudanças e seus efeitos sobre os ecossistemas e a sociedade. Além disso, a identificação do avanço da aridez e da redução de áreas úmidas pode subsidiar políticas públicas voltadas à gestão sustentável dos recursos hídricos e ao desenvolvimento regional.

## 1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a evolução temporal da região semiárida do Brasil. São objetivos específicos:

- Analisar o comportamento das variáveis climatológicas Temperatura máxima ( $T_{\max}$ ), Temperatura mínima ( $T_{\min}$ ), Evapotranspiração (ET), Precipitação (P), bem como suas tendências na área de estudo;
- Avaliar, por meio do Índice de Aridez (IA), a suscetibilidade à desertificação e a classificação climática dos estados que fazem parte do Semiárido brasileiro;
- Verificar a delimitação da região semiárida do Brasil, seguindo os critérios de Precipitação anual e o Índice de Aridez e verificar quais municípios pertencem a este território.

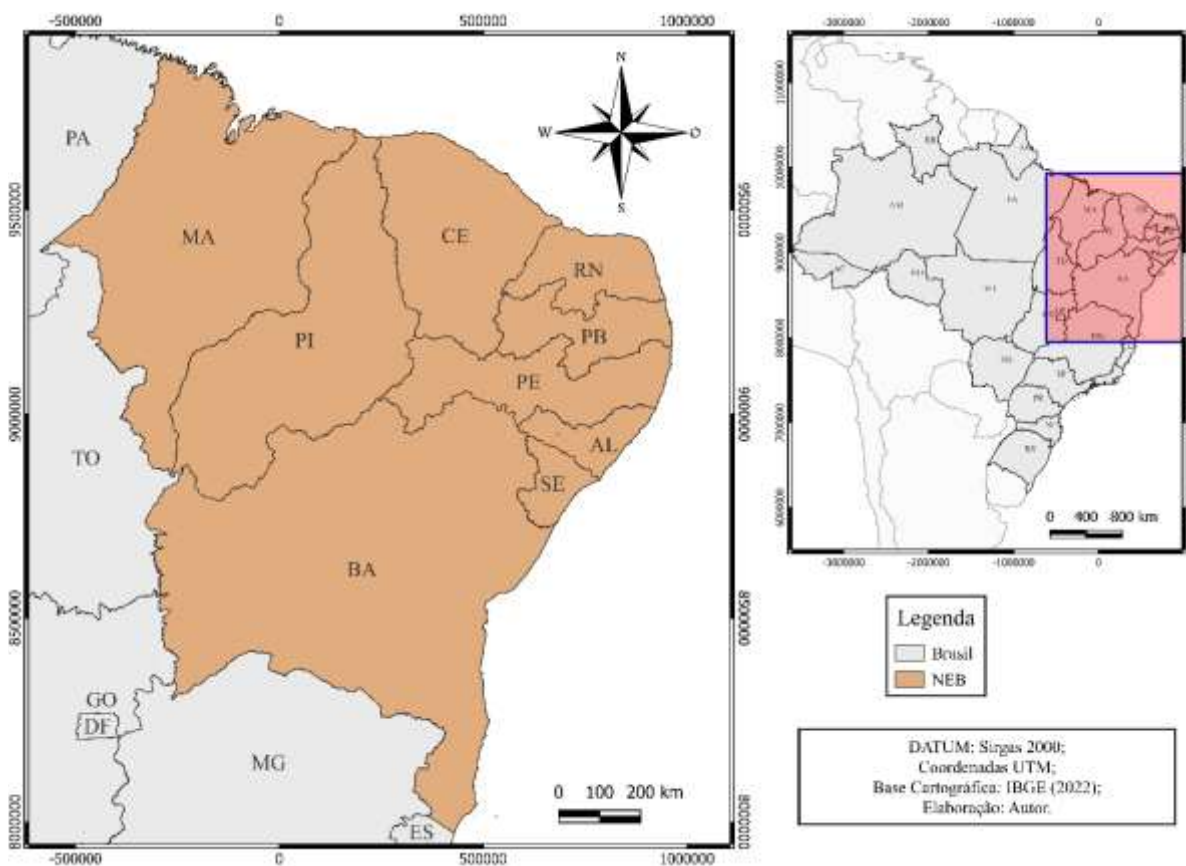
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta as principais contribuições do estado da arte para a compreensão do tema estudado, com ênfase na caracterização do Nordeste Brasileiro, que corresponde à maior parte da área de estudo. Além disso, são discutidas as bases de dados disponíveis para a pesquisa, as delimitações do semiárido e as variáveis climáticas intervenientes. Por fim, abordam-se os indicadores de seca e aridez, fundamentais para entender os processos envolvidos nos aspectos analisados neste estudo.

### 2.1. NORDESTE BRASILEIRO

O Nordeste Brasileiro (NEB), ilustrado na Figura 1, ocupa uma área de 1.552.175 km<sup>2</sup>, distribuída entre nove Unidades da Federação: Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Piauí, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Sergipe. O NEB ocupa 18% do território nacional e conta com uma população de 54.644.582 habitantes (Brasil, 2022).

**Figura 1:** Nordeste brasileiro.



Fonte: Desenvolvida pelo autor

O NEB pode ser dividido em três regiões distintas: a primeira é a área costeira, que possui um clima com maior incidência de umidade e uma precipitação média anual de cerca de 1.500 mm, coberta por fragmentos de Mata Atlântica; a segunda é a região semiárida, que ocupa aproximadamente 60% do Nordeste, sendo dominada pela vegetação da Caatinga e apresentando um índice pluviométrico médio de 800 mm/ano; a terceira é a porção mais a oeste, caracterizada pela vegetação de Cerrado e uma precipitação média anual superior a 1.000 mm (Brasil, 1993). Quanto ao seu clima, Cavalcante *et al.* (2015) relatam a existência de três tipos predominantes: o Litorâneo Úmido, que se estende do litoral da Bahia ao do Rio Grande do Norte; Tropical, abrangendo áreas dos estados da Bahia, Ceará, Maranhão e Piauí; e o Tropical semiárido, englobando todo o sertão nordestino.

O NEB caracteriza-se por apresentar temperaturas elevadas, sendo que as médias anuais variam de 24°C a 28°C, com uma média máxima de aproximadamente 35°C, que ocorre entre os meses de setembro a outubro (Dos Passos, 2020). O relevo da região, segundo Costa (2012), apresenta interferência direta na circulação das massas de ar, já que atua como uma barreira dificultando o transporte da umidade vinda do oceano Atlântico para o interior do Nordeste, em especial, o semiárido.

A alta variação da precipitação no NEB pode se manifestar de maneira sazonal, interanual e interdecadal. A variabilidade sazonal ocorre ao longo dos meses, sendo influenciada por fatores geográficos, topográficos, pela natureza da superfície e pelos sistemas meteorológicos que atuam no NEB. Dentre estes estão: Linhas de Instabilidade, Zona de Convergência Intertropical, Distúrbios Ondulatórios de Leste, Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis, Zona de Convergência do Atlântico Sul, Sistemas Frontais e Sistemas Convectivos de Mesoescala (Assis; Souza; Sobral, 2015; Cavalcanti *et al.*, 2015; Abreu, 2018). Segundo Cunha (2013), a concentração de chuva ocorre em poucos meses do ano, principalmente nas áreas semiáridas. No leste, essa concentração acontece entre os meses de maio e agosto; no sul, entre novembro e dezembro; e no semiárido, entre fevereiro e maio (Tucci, 2005),

A variabilidade interanual, por sua vez, é de baixa frequência e está relacionada à alternância da temperatura do oceano Pacífico Equatorial, apresentando-se mais quente (El Niño) ou mais frio (La Niña) (Timmermann *et al.*, 2018; Marengo *et al.*, 2011). Este fenômeno, denominado El Niño-Oscilação Sul (ENOS), causa um aumento do volume de chuva no NEB durante a La Niña, enquanto nos períodos de El Niño, a região tende a enfrentar secas (Kayano; Andreoli, 2009). A variação interdecadal ou decenal, de frequência ainda mais baixa, pode

influenciar a variabilidade interanual. Um exemplo desse fenômeno é a Oscilação Decenal do Pacífico (Marengo *et al.*, 2011; Cavalcanti *et al.*, 2015).

## 2.2. DELIMITAÇÃO DO SEMIÁRIDO

A primeira delimitação territorial do semiárido foi feita pela Lei 175, de 7 de janeiro de 1936, conhecida como Polígono das Secas (Brasil, 1936). Esta lei instituiu um plano de defesa contra a seca, destinando obras de emergência e serviços de assistência à população da região, a fim de mitigar os efeitos causados pelo clima. Essa delimitação foi revisada posteriormente pelo Decreto-Lei n.º 9.857, de 13 de setembro de 1946 (Brasil, 1946) e pela Lei 1.348, de 10 de fevereiro de 1951 (Brasil, 1951). Em 1965, a Lei n.º 4.763 incluiu o município de Vitória da Conquista no Polígono da Seca e determinou que todos os municípios criados por desdobramento de área de um município, incluído total ou parcialmente neste Polígono, seriam considerados como pertencente a ele para todos os efeitos legais e administrativos (Brasil, 1965).

Em 1968, o Decreto-Lei n.º 63.778, de 11 de dezembro, delegou à Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) a responsabilidade de definir quais municípios fazem parte do Polígono da Seca (Brasil, 1968). Por meio da Lei 7.827, de 27 de setembro de 1989, foi feita a primeira delimitação que institui a região com precipitação média igual ou inferior a 800 mm como semiárido (Brasil, 1989). No ano de 1995, por meio da Portaria n.º 1.181, ocorreu a primeira atualização desta lei (SUDENE, 2024).

O Grupo de Trabalho Interministerial (GTI-2004) foi constituído em 2004 para delimitar um novo semiárido brasileiro. Em 2005, foi definido que o semiárido abrange 1.135 municípios, distribuídos entre os estados de Alagoas (38), Bahia (266), Ceará (150), Minas Gerais (85), Paraíba (170), Pernambuco (122), Piauí (128), Rio Grande do Norte (147) e Sergipe (29). Os critérios definidos pela Portaria Interministerial n.º 1, para essa delimitação, foram a precipitação pluviométrica média anual inferior a 800 milímetros; índice de aridez de até 0,5, considerando o período entre 1961 e 1990; e risco de seca maior que 60% (SUDENE, 2024).

Devido aos diversos pedidos de inclusão de municípios na região semiárida, em 2014 foi instituído o Grupo de Trabalho (GT-2014) por meio da Portaria n.º 196, de 28 de maio de 2014, com o objetivo de propor outra delimitação para o semiárido. Utilizando os mesmos critérios de 2004, foi observado que a região semiárida tinha crescido e passou a abranger 1.189 municípios. Na XXI reunião do Conselho Deliberativo da SUDENE, que aconteceu em 27 de julho de 2017, foi apresentado o relatório final gerado pelo GT-2014, e foi estabelecido o prazo de 60 dias para os estados se manifestarem a respeito do relatório. Em resposta a isso, os estados

da Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba e Rio Grande do Norte recorreram e solicitaram a inclusão de novos municípios no semiárido. O resultado em novembro de 2017 foi a inclusão de mais 73 municípios à delimitação (SUDENE, 2024).

Após o recurso dos municípios em 2017, o GT-2014 sugeriu a adição de 49 municípios ao semiárido. Após análise do último relatório, a SUDENE sugeriu a inclusão de outros 24 municípios advindos dos recursos dos estados que fazem fronteira com o limite do semiárido. Assim o Conselho Deliberativo da SUDENE definiu o novo semiárido com 1.262 municípios, sendo estes distribuídos entre os estados de Alagoas (38), Bahia (278), Ceará (175), Maranhão (2), Minas Gerais (91), Paraíba (194), Pernambuco (123), Piauí (185), Rio Grande do Norte (147) e Sergipe (29) (SUDENE, 2024).

Da Silva e Bezerra (2020) correlacionam a força política e econômica dos estados nessa nova regionalização e afirmam que alguns territórios não possuem características típicas do semiárido e mesmo assim foram incorporados a ele por conveniência e influência política, já que o governo federal destina grandes montantes de verba pública para mitigar o impacto causado pelo clima semiárido. Desse modo, esse contexto demanda que essas regiões sejam verificadas, a fim de observar se de fato elas se enquadram nos pressupostos da Lei nº 4.763 de 1965.

Ressalta-se que, dentre os critérios adotados para essa delimitação, o percentual de déficit hídrico é realizado a partir de um balanço hídrico diário, considerando as características do solo, observando a sua capacidade de armazenamento e condutividade. Os dados meteorológicos são provenientes de estações climáticas do INMET, INPE e CEMIG. A partir disso, são realizadas estimativas da variação diária de armazenamento de água no solo. Com isso, é calculado o número de dias com déficit hídrico (SUDENE, 2021). Segundo Souza (2023), essa metodologia apresenta dificuldade em sua execução e é necessário estimar os parâmetros de armazenamento no solo, os quais podem ser calculados de diferentes formas e, na lei que define o semiárido não consta qual método deve ser utilizado para tal fim.

Existe, no entanto, uma versão preliminar da delimitação do semiárido que foi apresentada pela SUDENE em 2022, como uma atualização à vigente. Esta nova versão busca incorporar avanços metodológicos e dados mais recentes para refinar os limites da região semiárida brasileira. Foram utilizados os mesmos critérios da delimitação oficial. No entanto, a versão preliminar ainda não detalhou como foi feito para calcular o critério do déficit hídrico. A delimitação preliminar sugeriu a inclusão de 215 novos municípios no semiárido, e retirados

outros 52 municípios. Entretanto, essa delimitação ainda está em processo para se tornar oficial por meio de decretos e leis (SUDENE, 2022).

### 2.3. BASES DE DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS

São notórios os impactos sociais e econômicos causados pela oscilação da chuva no NEB, dado que a sobrevivência da população e o desenvolvimento agropecuário dependem da disponibilidade de água (Medeiros *et al.*, 2018). O conhecimento dessas variações possibilita a gestão adequada dos recursos hídricos, como também torna possível a implantação de sistemas de resposta a crises advindas de eventos extremos. No entanto, para tornar isso possível, é necessária uma rede de monitoramento que forneça dados de qualidade (Medeiros; Oliveira; Torres, 2020).

Entre 1900 e 1920, o governo federal atribuiu ao serviço público a responsabilidade pelo monitoramento hidrometeorológico nacional, criando instituições específicas para essa tarefa (ANA, 2024). Atualmente, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) coordena a Rede Hidrometeorológica Nacional (RNH), em colaboração com órgãos e entidades públicas e privadas, conforme estabelecido pelo artigo 4º, inciso XIII, da Lei Nº 9.984, de julho de 2000 (BRASIL, 2000). Esta rede é formada por estações pluviométricas, fluviométricas e meteorológicas ou climatológicas, associadas a variáveis climáticas, tais como: velocidade do vento, umidade relativa do ar, radiação solar e pressão atmosférica. Estes dados estão disponíveis ao público no portal HidroWeb (ANA, 2024).

Uma das principais instituições que operam as estações meteorológicas é o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que elabora e divulga, diariamente, em nível nacional, a previsão do tempo, avisos e boletins meteorológicos especiais. O INMET coleta e divulga informações sobre a temperatura, umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento, pressão atmosférica, bem como a precipitação dos locais onde as estações estão instaladas (BRASIL, 2024a).

O quantitativo de estações pluviométricas e meteorológicas do Brasil é relativamente alto, entretanto algumas regiões possuem densidade de estações maiores que outras, por exemplo, a densidade de estações no Norte do país é muito esparsa quando comparada com a região Sudeste (Xavier *et al.*, 2022; Souza, 2023). Além disso, as séries de dados climáticos podem apresentar diversos problemas, como falhas, períodos de observação limitados, erros de medição, incorreções no preenchimento das fichas de campo, danos aos equipamentos de medição, obstruções causadas pelo crescimento da vegetação no local de medição, entre outros (Carvalho *et al.*, 2020; Tucci, 2020).

### 2.3.1. Base de Dados Gradeados

Segundo Mourtzinis *et al.* (2017), os dados gradeados podem ser produzidos por meio de um conjunto de algoritmos empíricos, que, a partir de imagens de satélites ou interpolação de estações meteorológicas, estimam, em grade, parâmetros meteorológicos diários na escala, espaço e resolução desejada. A partir disto, é possível reduzir os problemas encontrados nas séries históricas, pois é ampliado o quantitativo de informações no espaço e tempo (Abreu; Mutti; Lima, 2019).

Grusson *et al.* (2017) utilizaram o modelo *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT) para calcular o balanço hídrico da bacia do rio Garonne, cuja nascente fica na Espanha e tem maior parte da sua extensão na França, e gerar os dados meteorológicos com o intuito de utilizá-los como variável de entrada para o algoritmo SAFRAN, o qual utiliza o modelo de interpolação, para gerar os dados gradeados. Os autores afirmam que o conjunto de dados escolhidos para serem interpolados influenciam diretamente na qualidade do produto final, independentemente da resolução adotada. Portanto, a seleção de um conjunto de dados adequados, que caracterizem bem o local estudado, é fundamental para garantir a qualidade dos dados gradeados.

No estudo desenvolvido por Mourtzinis *et al.* (2017), os autores objetivaram averiguar a precisão das informações disponibilizadas pelo banco de dados meteorológicos, em grade, mais popular dos Estados Unidos, já que a influência do nível de agregação espacial destes dados estava sendo amplamente estudada. Foram utilizadas duas bases de dados gradeados de alta resolução espacial, disponíveis publicamente, sendo estas a *Daily Surface Weather Data on a 1 km Grid for North America* (DAYMET), com resolução espacial de 1 km<sup>2</sup> (Thornton *et al.*, 2022) e *Parameter-elevation Relationships on Independent Slopes Model* (PRISM), que tem resolução de 16 km<sup>2</sup> (NACSE, 2024). Concluiu-se que a qualidade dos dados interpolados está intimamente ligada à densidade e à distribuição da rede de dados utilizada como base para a interpolação.

O *Earth System Research Laboratory* (ESRL) é outro exemplo de base de dados gradeados, a qual disponibiliza para toda América do Sul dados diários de precipitação. A série em questão cobre o espaço de tempo de 1940 a 2012. Os dados brasileiros, utilizados na interpolação, são disponibilizados pela ANA, pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), pela Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) e pelo Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) (Liebmann; Allured, 2005; Souza, 2023).

Para o território nacional, Xavier *et al.* (2022) desenvolveram a *Brazilian Daily Weather Gridded Data* (BR-DWGD), a qual é dotada de informações meteorológicas, em grade, com resolução espacial de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ . Nesta base estão disponíveis os dados de Precipitação (P), Evapotranspiração Potencial (ET), Temperaturas Máximas ( $T_{\max}$ ) e Mínimas ( $T_{\min}$ ), Radiação Solar, Velocidade do Vento a 2 m de altura e a Umidade Relativa, com cobertura diária de janeiro de 1961 a julho de 2020, de todo o território nacional.

Baseada nos dados dos pluviômetros e das estações climatológicas operadas pela ANA e INMET, a versão da BR-DWGD, publicada em 2016, utilizou como método de interpolação a média aritmética, splines, vizinho natural, ponderação de distância inversa, ponderação de distância angular e krigagem ordinária. Na grade de 2022 foram utilizados os métodos que tiveram melhores resultados no estudo de 2016, sendo estes a ponderação da distância angular e a ponderação da distância inversa e foram adicionados dados de relevo. Em ambos os trabalhos, foi utilizada a validação cruzada para a obtenção dos melhores resultados (Xavier *et al.*, 2016; Xavier *et al.* 2022).

Uma das limitações da BR-DWGD, apontada pelos autores, está associada ao espaçamento entre as estações utilizadas como matéria prima dos dados, sendo destacada a região Norte, em especial o estado do Amazonas. Como abordado anteriormente, a distância entre as estações de monitoramento interfere diretamente na qualidade dos dados gradeados. A outra limitação é a ausência de dados de fora da fronteira da região Sul do país, causando viés nos dados desta região (Xavier *et al.* 2022).

A BR-DWGD está sendo utilizada como fonte de dados em diversos estudos recentes. Rasera *et al.* (2023) utilizaram a base para preencher falhas das séries históricas disponibilizadas pelas estações meteorológicas reais a fim de desenvolver modelos agrometeorológicos. Souza (2023), por sua vez, avaliou o comportamento das variáveis hidrometeorológicas em Sergipe e propôs um novo critério de delimitação para o semiárido sergipano. Santos, Justino e Rodrigues (2024) exploraram a relação entre eventos extremos de precipitação na bacia hidrográfica do Rio São Francisco, utilizando esta base de dados e identificaram um padrão sazonal influenciado pelas taxas extremas de precipitação em diversas escalas de tempo. Lima *et al.* (2024), utilizando o *Brazil Gridded Meteorological Data* de Xavier *et al.* (2022), calibraram e validaram o modelo chuva-vazão mensal do SMAP, obtendo valores de coeficiente de eficiência superiores a 70%, o qual é classificado como muito bom, tanto na calibração, quanto na validação.

Outros autores que utilizaram a BR-DWGD foram: Cabral Júnior e Bezerra (2018), que realizaram estudos sobre a evapotranspiração de referência e o IA no NEB; Barros *et al.* (2018), os quais compararam as precipitações diárias anuais registradas em 182 estações, também no NEB; Abreu *et al.* (2019), que analisaram a variabilidade espacial e temporal das chuvas na Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba; e Silva *et al.* (2019), que examinaram índices de extremos climáticos no NEB e na Amazônia para o período de 1980 a 2013.

#### 2.4. COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS

As alterações climáticas são definidas como variações significativas nos valores das médias temporais dos elementos meteorológicos (WMO, 1992). A concentração dos “gases estufa” tem sido um fator preponderante nas mudanças climáticas, uma vez que o metano (CH<sub>4</sub>), o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) tiveram um aumento em 150%, 264% e 125%, respectivamente, em comparação ao ano de 1750 (IPCC, 2023). Como consequência, a temperatura média global aumentou a uma taxa média de 0,15–0,20 °C por década desde 1975, e espera-se que aumente em 1,4–5,8 °C até 2100 (Arora; Goel; Singh, 2005; NASA, 2024). Segundo Friedlingstein *et al.* (2022), um dos responsáveis por essas mudanças é a atividade antrópica, a qual gera o aumento da concentração de gases com efeito de estufa na atmosfera.

O aumento das temperaturas pode amplificar a gravidade das ondas de calor, aumentando a probabilidade de dias e noites extremamente quentes. Foi observado que a temperatura média global da superfície aumentou 1,1°C entre os períodos de 2001–2021 e 1850–1900, com uma taxa que acelerou após a década de 1970 (IPCC, 2021), atingindo a marca de 1,5°C em 2024 (COPERNICUS, 2025). No entanto, o Ártico aqueceu duas vezes mais rápido que a média global nas últimas décadas (Gulev *et al.*, 2021). Li *et al.* (2021) identificaram tendências robustas de aquecimento global em diferentes escalas temporais e observaram que as tendências de aquecimento da temperatura média do ar da superfície global da terra, para o período de 1979–2019, 1951–2019, 1900–2019 e 1850–2019, foram de 0,296, 0,219, 0,119 e 0,081 °C/década, respectivamente. Com esses resultados, além de reforçar a tendência de aumento das temperaturas do ar na superfície, os autores ressaltaram a importância da qualidade e da extensão das séries históricas utilizadas nas estimativas.

A Evapotranspiração é definida como a perda associada da água, pela evaporação da superfície do solo e pela transpiração estomática e cuticular das plantas (Ometto, 1981). Por sua vez, a ET é a quantidade de água transpirada em um determinado tempo, a partir de uma vegetação rasteira e verde, cobrindo totalmente o solo, com altura uniforme e sem jamais sofrer limitações nas condições hídricas (Thornthwaite; Holzman, 1941). Uma vez que, com

temperaturas mais altas, a energia disponível para evaporar a água do solo e das superfícies aumenta e acontece o estímulo da abertura dos estômatos das plantas, aumentando a liberação de vapor d'água pela transpiração, o aumento da temperatura, causado pelo aquecimento global, levará a um aumento geral na evapotranspiração potencial (Trenberth *et al.*, 2014). Além disso, segundo Abram *et al.* (2021), o aumento da evaporação da terra devido ao aquecimento do clima pode agravar as condições de seca, criando um ambiente mais propenso a incêndios florestais e estendendo as suas temporadas.

Segundo Cabral Júnior e Bezerra (2018), P e ET são as variáveis climáticas fundamentais para a compreensão do processo do ciclo hidrológico, pois a primeira representa a principal entrada desse sistema, a perda de água da atmosfera para a superfície da terra e a segunda, a saída, a qual pode devolver à atmosfera cerca de 60% de toda água precipitada. A variação da ET pode influenciar na precipitação e na disponibilidade hídrica (Zhang; Moges; Block, 2016; Jin *et al.*, 2017).

Segundo Trenberth (2011), existe uma influência direta entre o aquecimento global e a precipitação, pois o aumento do aquecimento leva a uma maior evaporação e, portanto, à secagem da superfície, aumentando assim a intensidade e a duração da seca. Porém, há um aumento na capacidade de reter a água do ar, especificamente 7% a cada 1°C de aquecimento, o que leva ao aumento do vapor de água na atmosfera. (Oguntunde; Abiodun; Lischeid, 2011; Yao *et al.*, 2016; Mehta; Yadav, 2022; Shimizu, Anochi; Kayano, 2022; He *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024).

Compreender as alterações das variáveis climatológicas torna possível a identificação de padrões temporais e espaciais que caracterizam a variabilidade climática de uma determinada região (Makarigakis; Jimenez-Cisneros, 2019). Jaramillo e Nazemi (2018) e Chen *et al.* (2019) correlacionam as mudanças sofridas pelas variáveis relativas às mudanças climáticas e/ou a ação humana. Consequentemente, o conhecimento prévio destes comportamentos é crucial para a atividade de gestão, pois auxiliará na tomada de decisão, racionalização, preservação dos recursos hídricos, dimensionamento de estruturas hidráulicas para controle de inundação, drenagem urbana, estudos agrícolas e ambientais e modelagem hidrológica (Silva, 2018; Ribeiro *et al.*, 2021).

As séries hidroclimáticas registram o comportamento das variáveis associadas aos processos estocásticos. As variáveis são descritas por distribuições de probabilidade e consideradas variáveis aleatórias. Utilizando as métricas estatísticas, é possível extrair das amostras informações que sejam válidas para toda a população de dados, dentro de uma

amplitude de confiabilidade (Naghettini; Pinto, 2007). Por exemplo, segundo Silva, Montenegro e Souza (2017), a análise de tendência é uma maneira de identificar a ocorrência de mudanças climáticas, possibilitando a avaliação dos seus impactos nas bacias hidrográficas.

Dada a importância do conhecimento a respeito do estudo das tendências das variáveis hidrometeorológicas, diversos estudos foram desenvolvidos, como o de Amorim *et al.* (2020), que utilizaram a análise de tendência de Mann-Kendall nas séries de precipitação do estado do Rio Grande do Norte e perceberam uma tendência de crescimento no volume de chuva no litoral do estado a partir de 1964. Carvalho *et al.* (2020) analisaram a tendência de chuva e temperatura no NEB. Para tal, foram utilizados os dados de 45 estações do INMET entre 1961 e 2017, aplicando o teste de Mann-Kendall e o de regressão, identificando uma redução no número de dias de chuva na região litorânea e uma queda na precipitação total anual no Nordeste.

Rocha Júnior *et al.* (2020) avaliaram a tendência das séries de evapotranspiração de referência no NEB e observaram que há tendências positivas e significativas em uma grande área no oeste da Bahia e sul do Maranhão e Piauí, além de outra grande área entre o norte da Bahia, oeste de Pernambuco e leste do Piauí. Núcleos menores também foram observados entre Paraíba, Ceará e Maranhão, utilizando igualmente o teste de Mann-Kendall para obter estes resultados.

Holender e Santos (2023), por sua vez, estudaram a tendência dos eventos de precipitação intensa no Sudeste do país. Para isso, foi aplicado o teste de Mann-Kendall nas séries históricas de 454 postos pluviométricos da rede da ANA. Destes, 11 postos apresentaram tendência de crescimento nos eventos de chuva e 21 de decrescimento. A maioria dos postos que apresentaram tendência estavam localizados nos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, com maior ocorrência dos eventos de chuvas intensas no verão. Outro resultado apresentado por esse estudo é que 14 postos apresentaram tendência positiva e 61 negativa para a quantidade de dias sem chuva.

Olmedo *et al.* (2022), utilizando dados de salinidade da superfície do mar obtidos por meio de satélites, destacam o iminente colapso do ciclo hidrológico global devido às mudanças climáticas causadas pelo alto índice de emissão de gases estufa. O estudo demonstra que águas doces estão se tornando ainda mais doces, enquanto águas salinas estão se tornando mais salinas, indicando uma intensificação na estratificação da coluna d'água, especialmente em regiões tropicais e subtropicais. Esse aumento da estratificação oceânica está diretamente relacionado ao aquecimento global, causando impactos nos padrões de circulação oceânica e climática.

## 2.5. INDICADORES DE SECA E ARIDEZ

No NEB, especificamente no seu semiárido, o baixo número de eventos de chuva é um problema crônico e contínuo, e ademais, a seca se intensifica pela elevada taxa de ET característica da região (Marengo *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013). Desde o século XVI até o século XXI, houve 124 períodos de seca severa no Nordeste, sendo que a grande maioria aconteceu em períodos de El Niño (CEPED, 2015).

Segundo Ribeiro e Santos (2016), o semiárido brasileiro é a região árida mais populosa do mundo. Este fato é preocupante, pois, devido aos efeitos das mudanças climáticas, é previsto que tanto as áreas metropolitanas quanto os pequenos municípios sejam diretamente impactados por fenômenos climáticos extremos (picos de temperatura, secas, inundações, deslizamento de terra). Além disso, projeções indicam que o processo de desertificação já afeta 13% desta região, o que é bastante preocupante visto que é esperada uma redução nos padrões de chuva de até 22% (BRASIL, 2007; IPCC, 2014).

Devido a essas circunstâncias, os Índices de Seca e Aridez podem ser um grande aliado, pois possibilitam rastrear os efeitos das mudanças climáticas nos recursos hídricos locais, ajudando no entendimento do clima e sua variabilidade, fornecendo embasamento para a criação de políticas públicas para o uso eficiente da água (Maliva; Missimer, 2012; Cabral Junior; Bezerra, 2018). Segundo Silva e Azevedo (2020), os métodos mais utilizados para esse fim são os Índices de Anomalia de Precipitação (ROI) (Rooy, 1965), de Precipitação Padronizada (SPI) (McKee; Doesken; Kleist, 1993), de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) (Palmer, 1965), de Aridez de Martonne (MIA) (Martonne, 1926) e de Aridez de Thornthwaite (IA) (Thornthwaite, 1948), para avaliação de seca. Ressalta-se que os dois últimos se destacam devido à facilidade de aplicação e confiabilidade (Silva; Azevedo, 2020).

O IA é indicado para calcular o grau de aridez de uma região e está associado a quantidade de chuva  $P$  e da perda por meio da ET.

$$IA = \frac{P}{ET} \quad (1)$$

O valor de IA obtido é interpretado segundo os intervalos descritos nas Tabelas 1 e 2, nas quais estão expostos, respectivamente, os intervalos de suscetibilidade à desertificação e a classificação climática.

**Tabela 1:** Suscetibilidade à desertificação.

<b>Suscetibilidade à desertificação</b>	<b>Índice de Aridez (IA)</b>
Muito Alta	$0,05 \leq IA \leq 0,2$
Alta	$0,21 \leq IA \leq 0,5$
Moderada	$0,51 \leq IA \leq 0,65$

Fonte: Matallo Junior (2003).

**Tabela 2:** Índice de Aridez para as classes climáticas.

<b>Classificação Climática</b>	<b>Índice de Aridez (IA)</b>
Hiperárido	$IA < 0,05$
Árido	$0,05 \leq IA \leq 0,2$
Semiárido	$0,21 \leq IA \leq 0,5$
Subúmido Seco	$0,51 \leq IA \leq 0,65$
Subúmido e Úmido	$IA > 0,65$

Fonte: Matallo Junior (2003).

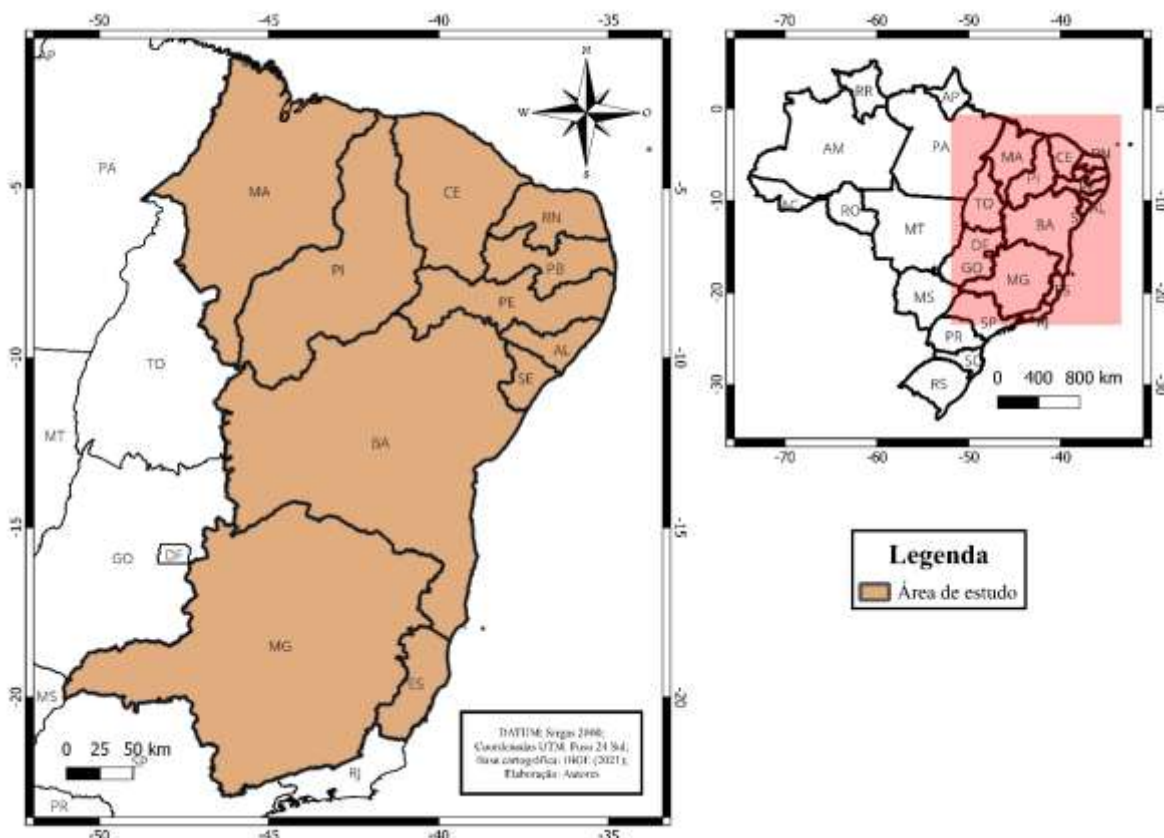
Salienta-se que esta formulação é um dos critérios técnicos e científicos utilizados no Brasil para delimitação da região semiárida segundo a resolução nº150, de 13 de dezembro de 2021 (SUDENE, 2021).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. ÁREA DE ESTUDO

O estudo das variáveis climáticas e a análise da delimitação do semiárido brasileiro, proposto neste trabalho, serão aplicados em todos os estados no NEB, em Minas Gerais e no Espírito Santo (Figura 2), totalizando uma área de 2.190.588 km<sup>2</sup>, e que abriga 79.018.283 habitantes (Brasil, 2022).

**Figura 2:** Área de estudo.



Fonte: Desenvolvida pelo autor

Os nove estados do NEB e Minas Gerais foram escolhidos como objeto de estudo, uma vez que parte de seus territórios estão incluídos na delimitação oficial do semiárido brasileiro. Por outro lado, o estado do Espírito Santo é tema de discussão sobre sua possível inclusão nesta região. De acordo com notas divulgadas pela Assembleia Legislativa do Espírito Santo (ALES, 2015) e pela Confederação Nacional de Municípios (CNM, 2013), alguns municípios capixabas, como Boa Esperança, Ecoporanga, Montanha, Mucurici, Pedro Canário, Pinheiros, Ponto Belo e Vila Pavão enfrentam adversidades climáticas que os caracterizam como pertencentes à região semiárida, porém, de acordo com as delimitações oficiais, o estado não é classificado como semiárido.

Ainda segundo essas instituições, quando o G-2014 divulgou o relatório sobre a delimitação do semiárido, esses municípios apresentavam características semelhantes às das regiões oficialmente reconhecidas como semiáridas. No entanto, na elaboração da legislação que trata dessa delimitação, houve a remoção do Espírito Santo, o que resultou na exclusão de pessoas que vivem com a seca de políticas públicas importantes, como crédito diferenciado para os produtores, seguro safra e taxas de juros mais baixas, além do incentivo financeiro para obras que mitiguem os efeitos do clima semiárido. Devido a essas discussões, o estado do Espírito Santo foi incluído nas análises realizadas neste trabalho.

### 3.2. OBTENÇÃO DOS DADOS

A BR-DWGD tem resolução espacial de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ , sendo composta por uma grade de pixels, que contém informações sobre as variáveis propostas por Xavier *et al.* (2022). Para acessá-las, os autores sugerem uma rotina desenvolvida na linguagem de programação *Python*, a qual utiliza como dados de entrada as coordenadas do centro de cada quadrícula.

No entanto, neste trabalho, foi elaborada uma rotina em ambiente de programação R, que utiliza um *shapefile* dos estados estudados, criado com o auxílio do sistema de informação geográfica QGIS, para extrair as informações necessárias das variáveis da base de dados. Dessa forma, foram adquiridas séries diárias de Temperatura Máxima ( $T_{\max}$ ), Temperatura Mínima ( $T_{\min}$ ), Evapotranspiração Potencial (ET) e Precipitação (P), com cobertura temporal de 1961 a 2020. Ainda no R, foram calculadas as médias anuais de  $T_{\max}$  ( $^\circ\text{C}$ ) e  $T_{\min}$  ( $^\circ\text{C}$ ) e o total anual de ET (mm) e P (mm).

### 3.3. CÁLCULO DO ÍNDICE DE ARIDEZ (IA)

Para o cálculo do IA, foram utilizados os critérios apresentados na equação (1), a qual utiliza a razão entre P e ET para encontrar o IA, a fim de classificar o clima ao longo dos anos, bem como verificar a suscetibilidade à desertificação na região de estudo.

### 3.4. ANÁLISE DA DELIMITAÇÃO DO SEMIÁRIDO

A delimitação oficial do semiárido brasileiro em vigor foi publicada em 2017 (Figura 3). Em 2021, a nova delimitação, uma versão preliminar proposta no relatório do GT-2017, que consideraram dados do período de 1991 a 2020, foi lançada, mas ainda não foi oficializada (SUDENE, 2024). De acordo com a SUDENE (2021), os critérios de inclusão dos municípios utilizados para estas delimitações foram:

- I. Precipitação pluviométrica total anual igual ou inferior a 800 mm;
- II. Índice de Aridez de Thornthwaite (IA) igual ou inferior a 0,5;
- III. Percentual de déficit hídrico igual ou superior a 60% considerando todos os dias do ano.

**Figura 3: Delimitação Oficial do semiárido (2017).**



Fonte: SUDENE (2021).

Para a delimitação oficial de 2017, foram analisados dados referentes ao período de 1980 a 2010. Utilizando os critérios I e II, para este intervalo de tempo, foram identificados os municípios que fazem parte do semiárido. Ressalta-se que, para a inclusão destes, nesta dissertação, foi levado em consideração o texto da Lei nº 4.763 de 1965, ou seja, se um pixel que esteja de acordo com os critérios de inclusão estiver no território deste município, ele será considerado como semiárido.

O critério III, entretanto, não foi aplicado neste estudo devido à dificuldade de sua replicação. Conforme apontado por Souza (2023), a estimativa diária da variação de água no solo necessária para esse cálculo não está disponível em bases de dados públicas, além de possuir múltiplas metodologias de cálculo. Ademais, o documento divulgado pela SUDENE (2021) não esclarece a metodologia adotada para obter esses valores. Também foi analisado o critério I e II para o período de 1990 a 2020 na área estudada e comparado com a delimitação vigente.

### 3.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS SÉRIES TEMPORAIS

Os testes de tendência são ferramentas estatísticas utilizadas para identificar se as séries anuais estudadas apresentam tendência de crescimento, decrescimento ou estacionariedade. Esse teste pode identificar mudanças de comportamento das variáveis e assim identificar possíveis mudanças climáticas, ajudando a construir uma boa gestão dos recursos locais (Naghattini; Pinto, 2017).

A análise estatística das séries temporais foi realizada utilizando-se o teste de tendência de Mann-Kendall nas séries de  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ , P, ET e IA para retirar informações, com um nível de confiança para o entendimento do comportamento destas variáveis ao longo do tempo. Realizou-se ainda o teste de proporção, para avaliar se o aumento das áreas estudadas é estatisticamente relevante. Para os testes foram adotados um nível de significância  $\alpha$  de 5%. Para essa confiabilidade, o valor crítico para a estatística dos testes de proporção unilateral foi  $Z=1,64$ , significando que se os valores de  $Z$  calculados forem maiores, a diferença é significativa.

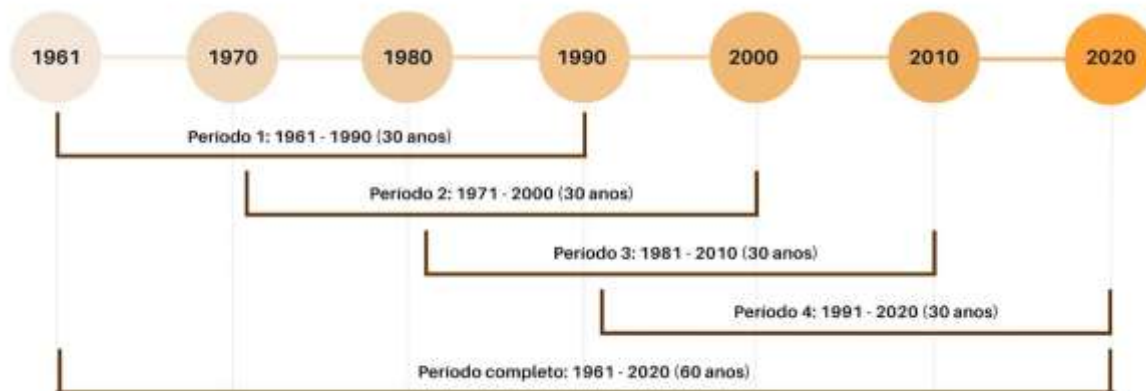
### 3.6. PRODUÇÃO DE MAPAS E *SHAPEFILES*

Os mapas possibilitam a avaliação e a consulta espacial das informações, portanto, sua confecção permitiu comparar diversos cenários climáticos nos estados estudados. Utilizando o QGIS, foram produzidos mapas com os seguintes temas:

- Evolução da  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$ , P, ET, IA, para os intervalos de 1961 a 1990, 1971 a 2000, 1980 a 2010 e 1990 a 2020;
- Áreas que apresentaram tendências significativas nas séries estudadas;
- Uso e ocupação do solo para os anos de 1985 e 2020;
- Comparação da delimitação da região semiárida oficial com os critérios I e II.

Os resultados obtidos de dados médios anuais de  $T_{\max}$  e  $T_{\min}$  e totais de P e ET, dos períodos de 1961 a 2020, foram divididos em períodos de 30 anos, como sugerido pela *World Meteorological Organization* (WMO) para análises de variáveis hidrológicas. Dessa forma, foram selecionados os períodos de 1961 a 1990, 1971 a 2000, 1981 a 2010 e 1991 a 2020 (Figura 4). Em seguida, foi realizada uma classificação dos intervalos de valores para cada variável, sendo essa classificação aplicada aos mapas correspondentes. A partir disso, foi calculada a área ocupada por cada classe em cada período, permitindo observar a evolução espacial e temporal das áreas correspondentes às diferentes classificações de  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$ , P, ET e ao índice de aridez (IA).

**Figura 4:** Períodos utilizados no trabalho.



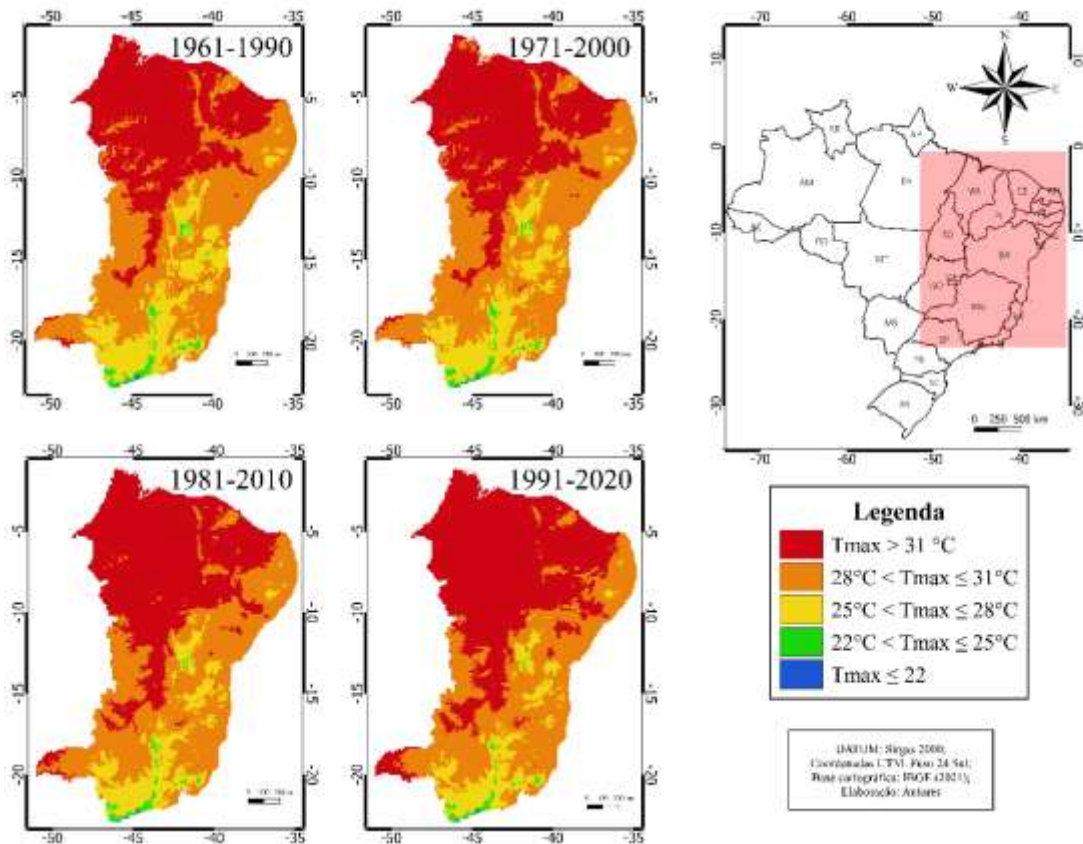
Fonte: Desenvolvida pelo autor.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. TEMPERATURA MÁXIMA E MÍNIMA

Posteriormente a definição dos períodos a serem estudados, foi calculada a média da Temperatura máxima e da Temperatura mínima de cada um deles. Logo após, foi observado o comportamento da  $T_{\max}$  na área de estudo, conforme apresentado na Figura 5

**Figura 5:** Evolução da  $T_{max}$ .



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

Em primeira análise, é possível verificar um aumento de temperatura no recorte estudado, o que pode ser demonstrado através do percentual da área de estudo para cada intervalo de temperatura adotado para a representação espacial, apresentada na Tabela 3.

**Tabela 3:** Porcentagem das áreas correspondentes às  $T_{max}$  média.

Períodos	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
Temperatura Máxima ( $^{\circ}\text{C}$ )	% da área total			
$\geq 31$	39,62	40,56	46,30	51,20
28-31	42,83	43,87	40,77	37,97
25-28	15,93	14,14	11,85	9,95
22-25	1,51	1,35	1,01	0,82
$\leq 22$	0,09	0,08	0,07	0,08

Fonte: Desenvolvida pelo autor.

Observou-se que as áreas em que as  $T_{max}$  médias são maiores de  $31^{\circ}\text{C}$  aumentaram com o passar dos anos. Ao comparar os períodos 1961-1990 e 1991-2020, pois são apenas esses que

têm conjuntos amostrais independentes, observou-se um crescimento significativo dessa área com  $Z=1,65$  (acima do crítico). Outro achado importante foi a redução contínua das áreas com  $T_{\max}$  inferiores a  $28^{\circ}\text{C}$ , destacando uma tendência preocupante de aquecimento na região analisada.

Considerando o aumento das temperaturas, estudiosos têm se debruçado a compreender as potenciais causas para esse fenômeno. Hansen *et al.* (2006), por exemplo, destacam que, nas últimas décadas antes de 2006, houve um aumento de  $0,6^{\circ}\text{C}$  na temperatura do planeta, e em 2024 esse aumento chegou à marca de  $1,5^{\circ}\text{C}$  (COPERNICUS, 2025).

Hansen *et al.* (2006) pontuam que um dos fatores que corroboram para esse fato são as ações humanas, as quais impactam diretamente nos ciclos naturais. Em contrapartida, Zhen-Shan e Xian (2007) argumentam que além da ação humana, outros fatores devem ser colocados em pauta, tais como: fatores naturais no sistema climático (forças motrizes), como atividades solares. As forças naturais e as combinadas costumam apresentar oscilações em diferentes escalas de tempo, resultando em períodos naturais de aquecimento e resfriamento do planeta. No entanto, as observações indicam que essas mudanças estão ocorrendo de forma mais rápida devido às atividades humanas.

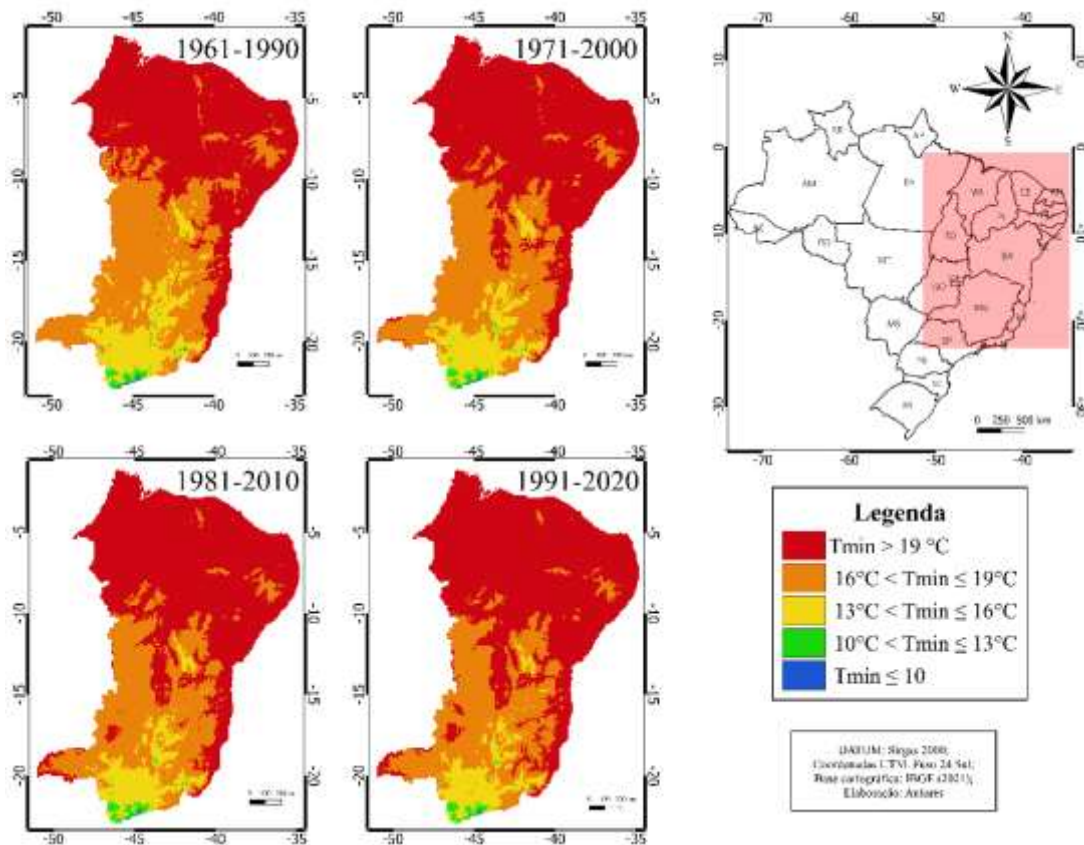
A Figura 5 e a Tabela 3 também mostram o crescimento das temperaturas máximas na região oeste e norte da área de estudo e uma redução das  $T_{\max}$  médias entre  $25$  e  $28^{\circ}\text{C}$ . Comparando o primeiro período com o quarto, observou-se que essa redução não é significativa ( $Z=1,26$ ), entretanto, é um sinal preocupante, pois essas áreas estão perdendo representatividade para áreas com temperaturas maiores, indicando um aquecimento da região. Isso pode causar, possivelmente, alterações pluviométricas, visto que, com aumento da temperatura, mais água irá para atmosfera, causando chuvas mais intensas em determinadas regiões, em detrimento de outras.

A precipitação ocorre de maneira irregular, ou seja, a área com altas temperaturas aumenta o índice de ET, entretanto ela não terá, necessariamente, aumento pluviométrico, pois para a água evaporada e transpirada tornar-se chuva, ela precisará de condições atmosféricas específicas que talvez aquela região não ofereça (Ferreira; Kemenes, 2023). Isso ressalta a importância dos estudos que envolvem o aumento da temperatura, de modo a mitigar os impactos a níveis globais e traçar estratégias para enfrentá-los.

A fim de analisar o comportamento das  $T_{\min}$  médias, realizou-se uma análise semelhante à da  $T_{\max}$  (Figura 6). Como resultado, foi observado que todo o litoral da área estudada apresenta temperaturas mínimas maiores que  $19^{\circ}\text{C}$ . Com o passar dos anos, as áreas costeiras com  $T_{\min} >$

19°C cresceram em direção ao interior. Essa evolução é maior nos estados do Espírito Santo, Bahia e Pernambuco.

**Figura 6:** Evolução da  $T_{\min}$  média.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Foi observado também um crescimento nas áreas de  $T_{\min} > 19^{\circ}\text{C}$  no sul do Maranhão e do Piauí, na região central da Bahia e no norte de Minas Gerais. Em contrapartida, as áreas com temperaturas menores que  $19^{\circ}\text{C}$  estão diminuindo, como pode ser evidenciado na Tabela 4.

**Tabela 4:** Porcentagem das áreas correspondentes às  $T_{\min}$  média.

Períodos	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
Temperatura Mínima (°C)	% da área total			
$\geq 19$	51,16	57,12	59,69	62,11
16-19	36,33	32,43	30,90	29,77
13-16	11,49	9,45	8,50	7,38
10-13	0,90	0,92	0,83	0,68
$\leq 10$	0,113%	0,087%	0,072%	0,046%

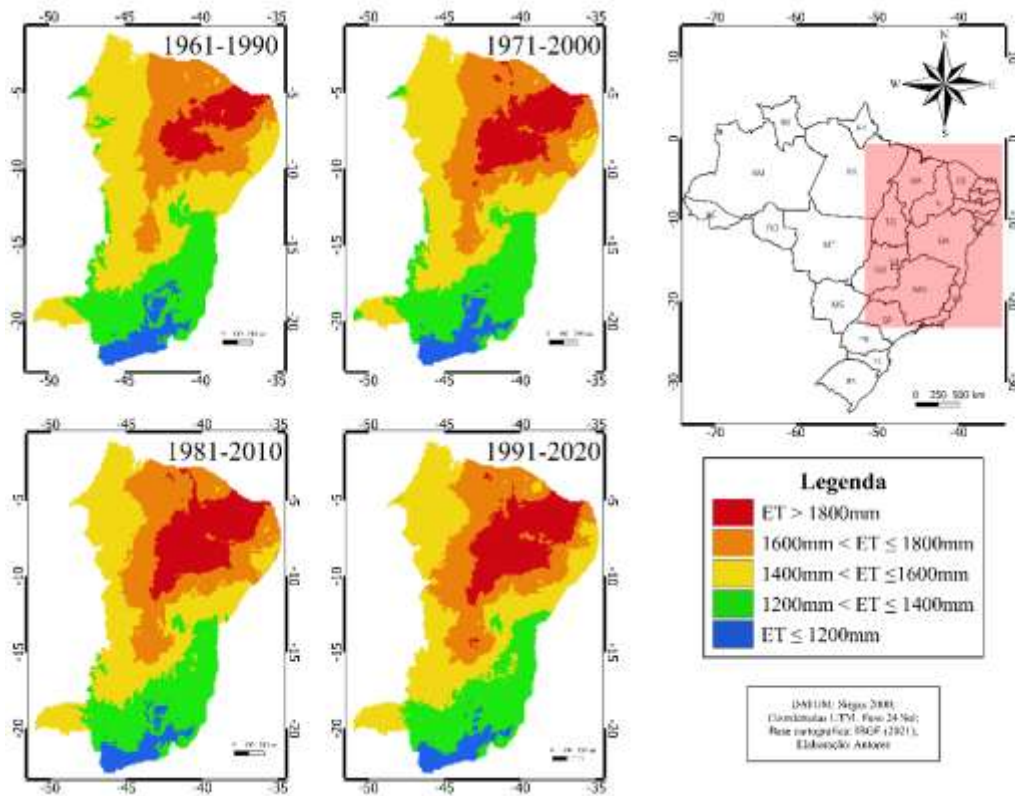
Fonte: Desenvolvida pelo autor.

O aumento da temperatura pode estar ligado ao aumento da emissão de gases do efeito estufa, principalmente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ozônio ( $\text{O}_3$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e vapor de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Esses gases absorvem as radiações térmicas emitidas pela atmosfera e pela superfície terrestre, resultando no aquecimento global. A temperatura média global aumentou na faixa de 1–1,2 °C desde 1850 (Wei *et al.*, 2015; Richie; Roser, 2017). Isso significa que a temperatura tende a aumentar, de modo simultâneo ao acúmulo do  $\text{CO}_2$  na atmosfera (Zhen-Shan; Xian, 2007). Como resultado, o aquecimento global, aliado a outros fatores naturais, tende a impactar eventos climáticos, como é o caso do El Niño e La Niña e do aquecimento das águas no oceano Atlântico. É provável que o aumento das temperaturas intensifique ainda mais a ocorrência de fenômenos naturais decorrentes das alterações climáticas (Hansen *et. al*, 2006).

#### 4.2. EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL

O estudo das séries totais de ET teve como base os períodos definidos previamente e os valores de evapotranspiração potencial total anual médio contido em cada pixel estudado. Desse modo, observaram-se os intervalos de valores de ET para serem representados de forma gráfica, conforme ilustrado na Figura 7.

**Figura 7: Evolução da ET.**



No período 1, os estados que concentravam a maior ET total anual média eram Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. Destacando-se, dentre eles, o Rio Grande do Norte, com mais da metade do estado com pixels apresentando ET maiores que 1800 mm. Nos períodos seguintes, houve um aumento considerável destas áreas, sendo o crescimento mais acentuado nos estados da Bahia, Pernambuco e Piauí.

Pode-se observar que, nos intervalos adotados, não há um padrão comportamental para o crescimento das áreas de ET, conforme exposto na Tabela 5. O teste estatístico de proporção foi aplicado para observar quais mudanças ocorreram em termos de área, em cada intervalo de ET adotado, com a evolução dos períodos e se foram significativas. Através desta análise constatou-se que as mudanças não são estatisticamente relevantes, pois comparando o primeiro período com o último, o aumento da área com  $ET \geq 1800$  mm apresentou  $Z = 1,60$ , e a redução dos demais intervalos resultou nos respectivos valores  $Z$ : 0,57; 0,18; 0,24 e 0,40. Porém, isso não significa que as áreas permanecem estáticas no espaço e tempo, uma vez que se observou uma mudança na distribuição espacial, e algumas áreas que inicialmente apresentavam pixel com valores baixos de ET, com o passar do tempo, começaram a apresentar valores mais elevados.

**Tabela 5:** Evolução da ET na área de estudo.

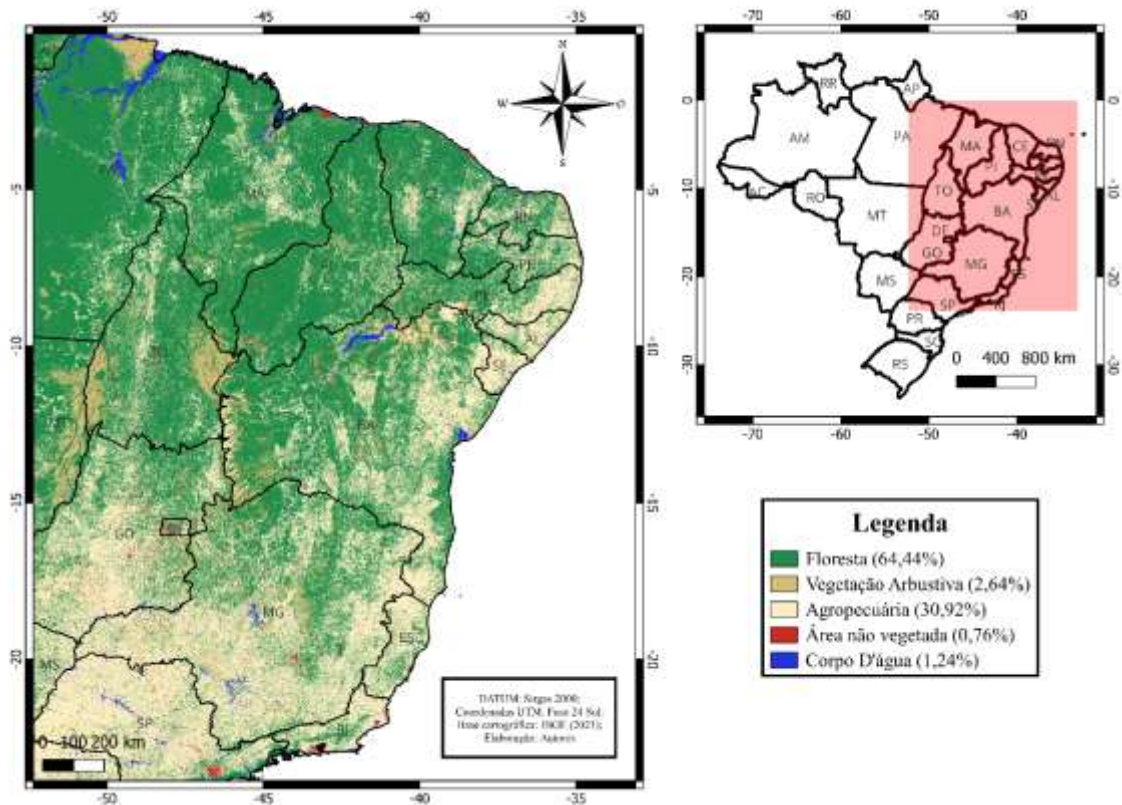
Períodos	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
Evapotranspiração (mm)	% da área total			
$\geq 1800$	8,45	12,95	15,90	15,83
1600-1800	28,89	24,65	25,87	25,25
1400-1600	37,46	35,59	34,70	36,23
1200-1400	20,17	21,55	19,18	18,83
$\leq 1200$	5,03	5,26	4,35	3,85

Fonte: Desenvolvida pelo autor.

Por ser uma região na qual o bioma predominante é a Caatinga, cuja flora evoluiu para perder o mínimo de água possível (Araujo, 2005), esses valores elevados de ET podem estar associados ao aumento da temperatura e a mudança do uso da terra, particularmente por atividades agrossilvopastoris. É sabido que ao devolver a água para a atmosfera, a ET influencia diretamente na disponibilidade hídrica e na alteração do ciclo hidrológico local cuja precipitação pode ocorrer localmente ou não, uma vez que esta última depende de fatores como os movimentos das massas de ar e suas direções bem como da pressão atmosférica. Logo, as variações de ET influenciam também no fluxo de calor latente que afeta o calor sensível e as temperaturas da superfície, podendo provocar mudanças no clima da região (Santos *et al.*, 2020).

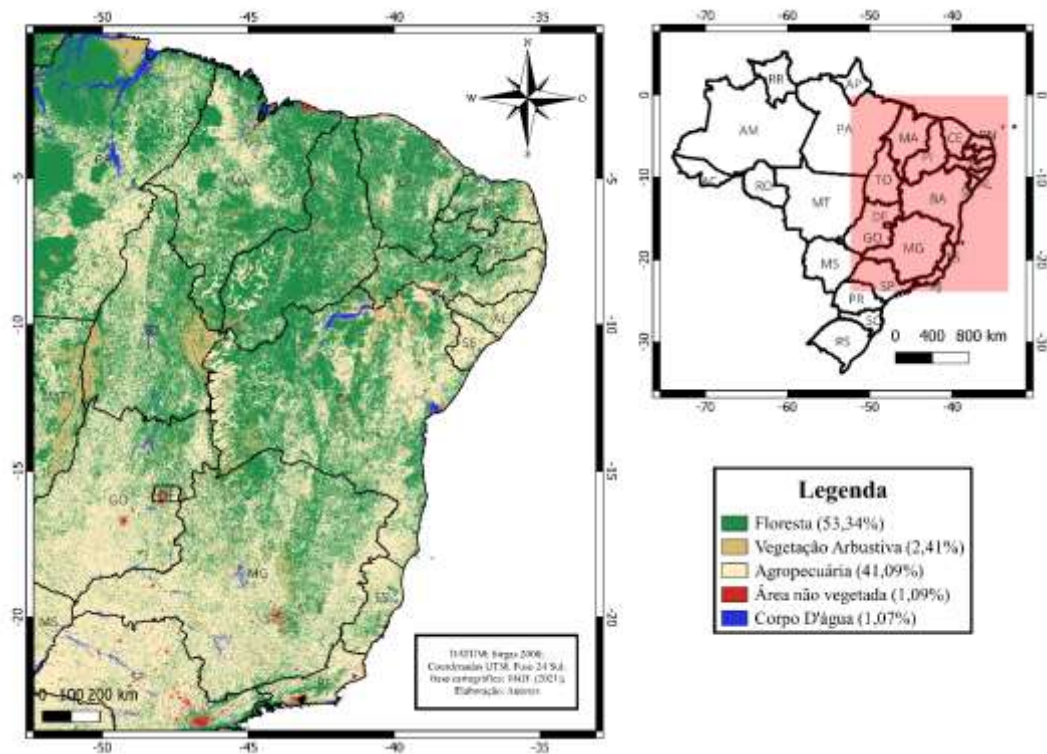
Uma avaliação do uso da terra na área de estudo evidenciou uma redução da área de Floresta do ano de 1985 (Figura 8) ao ano de 2020 (Figura 9), além de um aumento de aproximadamente 10% quando comparada a área de agropecuária desses dois períodos. A mudança no uso da terra influencia diretamente a evapotranspiração, uma vez que esta é geralmente mais intensa em espécies cultivadas do que em xerófitas nativas da Caatinga. Além disso, o uso da irrigação contribui para o aumento da taxa de evaporação. Essa avaliação vai ao encontro do que afirmam Lemos Filho *et al.* (2010) acerca dos elementos que afetam as taxas de ET, além da transpiração característica de cada uma das espécies de plantas, conforme destacado, os autores mencionam também os fatores climáticos e de solo.

Figura 8: Uso e ocupação do solo em 1985.



Fonte: Adaptada do Map Biomas (2024).

Figura 9: Uso e ocupação do solo em 2020.



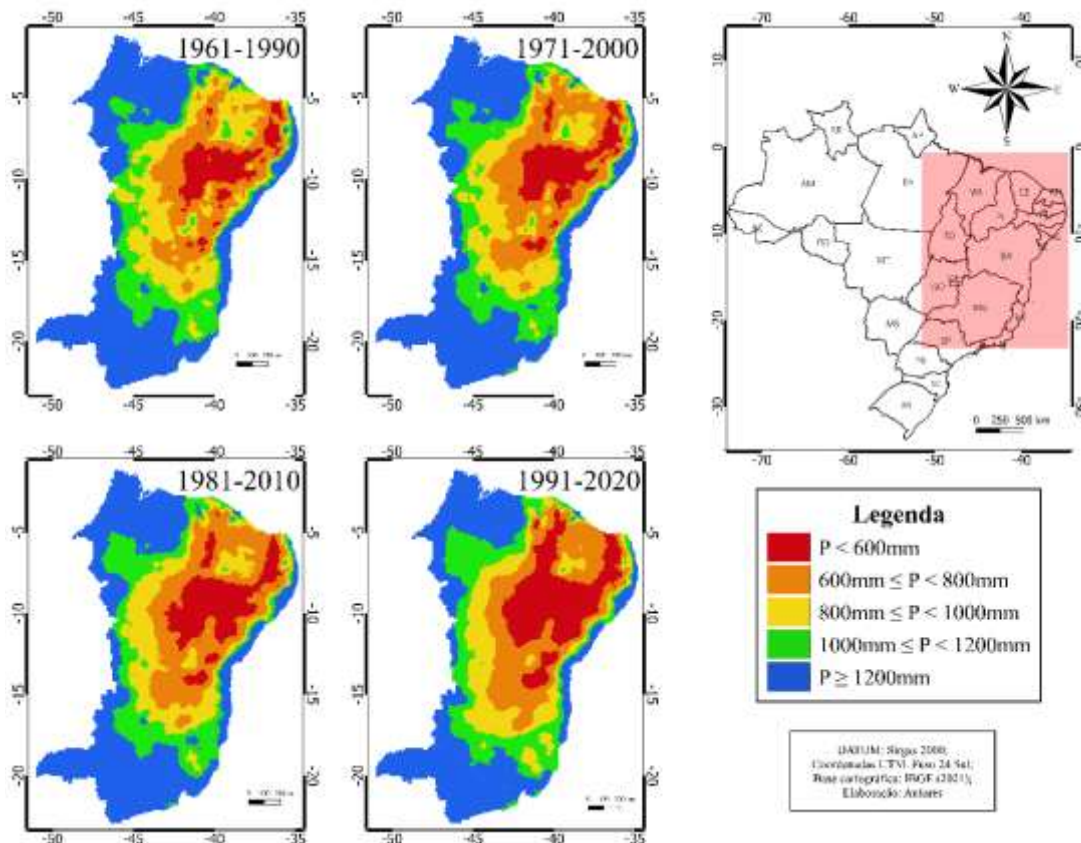
Fonte: Adaptada do Map Biomas (2024).

As áreas que sofreram maiores modificações de uso da terra, estão localizadas nos estados da Bahia, Maranhão e Piauí, locais em que é possível notar o aumento da ET. Onde se verificava anteriormente valores entre 1400 mm a 1600 mm, visualiza-se em 2020 a faixa entre 1600 mm e 1800 mm. Rocha *et al.* (2020), ao estudarem os impactos da ET no NEB, pontuam alguns dos principais resultados ocasionados por esse fenômeno: o aumento da temperatura local e a estimulação do processo de desertificação, intensificação da seca no interior do NEB, bem como oscilações nos períodos chuvosos, tais quais observados nos dados supracitados.

#### 4.3. PRECIPITAÇÃO

Considerando os períodos definidos e a fim de identificar as alterações nos padrões de precipitação ao longo do tempo, foram preestabelecidos intervalos para os valores de P informados em cada pixel, resultando na Figura 10.

**Figura 10:** Evolução temporal de P.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

No período de 1961 a 1990, as áreas que apresentaram precipitação anual total menor que 600 mm eram localizadas predominantemente no norte da Bahia, sul de Pernambuco, leste do Piauí e na região central da Paraíba e Rio Grande do Norte, e apresentavam-se pontualmente nos estados de Alagoas, Ceará e Sergipe. Com a evolução temporal, foi observado um aumento

significativo nas áreas com  $P < 600$  mm ( $Z = 1,84$ ). Alagoas e, em especial, o Ceará, que tinham uma área consideravelmente pequena de  $P < 600$  mm no período 1, apresentaram um aumento significativo no período 4. Além disso, neste mesmo período, mais de 60% do território de Pernambuco apresentou um índice pluviométrico menor que 600 mm anual.

Os impactos causados pela redução na pluviometria desses estados no período 4 foram noticiados em portais de notícias do país, a exemplo da Agência Brasil, atrelado a Empresa Brasileira de Comunicação - EBC (2016), a qual publicou que quase 70% dos municípios de Pernambuco, em 2016, estavam em situação de emergência devido à estiagem severa, que durou mais de quatro anos, segundo a reportagem. Nas cidades de Águas Belas, Alagoinha, Jataúba, Jucati, Jupi, Pedra, Poção, Santa Cruz da Baixa Verde, Taquaritinga do Norte e Venturos não havia água encanada fornecida, sendo abastecidas exclusivamente por carros-pipa. Outras 40 cidades usaram os carros-pipa para reforçar o sistema, aliado a uma política de racionamento.

Durante o período de 2012 a 2017 no Ceará, aconteceu o evento de seca mais longo registrado nos últimos 100 anos. Nos meses de fevereiro a maio, a precipitação média da Normal Climatológica (1981-2010) para o estado foi de 600 mm. Em 2012 a média foi de 302 mm e, de 2013 a 2017, a média pluviométrica continuou abaixo do normal, 364 mm e 460 mm, respectivamente. Os açudes criados após as experiências com as secas ocorridas em 1915 e 1919 acumulavam cerca de 50,2% de sua capacidade total, e em 2013 o acúmulo diminuiu para 33,3%. Ainda com os índices pluviométricos abaixo do normal, os anos de 2016 e 2017 foram os mais críticos, com apenas 5,5% e 4,1%, respectivamente, da capacidade dos reservatórios ocupados (Pereira *et al.*, 2023).

Neste mesmo período, 219 municípios da Bahia decretaram estado de emergência. A estiagem atingiu uma área correspondente a 54,4% da área total do Estado, afetando 4,2 milhões de baianos. A estiagem prolongada atingiu com maior intensidade os municípios que têm como uma das atividades principais a agricultura de subsistência. Nos três primeiros meses de 2017, grande parte do território baiano esteve com volumes de chuva abaixo dos padrões de normalidade. As regiões do estado mais afetadas com a estiagem foram as do norte, nordeste, Recôncavo, Chapada Diamantina e sudoeste (SEI, 2024).

As regiões com chuvas maiores que 600 mm e menores que 800 mm tiveram um crescimento até o período 3 (Tabela 6). Comparando o primeiro com o quarto período, não houve uma redução significativa ( $Z = 0,50$ ) da região com essa característica pluviométrica. Entretanto, com a análise da evolução temporal apresentada na Figura 9, notou-se uma mudança

na distribuição espacial das classes de precipitação. Os pixels, que no período 1 apresentaram valores de precipitação mais elevados, estão apresentando valores menores.

Apesar de não haver um crescimento percentual na área com P maior que 600 mm e menor ou igual a 800 mm, entre o terceiro e quarto período, isso não significa que as áreas permanecem estáticas no tempo. Essa dinâmica indica que houve uma transição espacial, de forma que locais que antes registraram precipitações entre 800 e 1000 mm, por exemplo, passaram a apresentar valores entre 600 e 800 mm e isso se repetiu em todos os intervalos escolhidos. Esse padrão evidencia um deslocamento ou redistribuição das condições de precipitação ao longo do tempo.

**Tabela 6:** Evolução da P na área de estudo.

Períodos	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
<b>Precipitação (mm)</b>	<b>% da área total</b>			
≤ 600	7,3%	8,97	11,14	15,67
600 - 800	16,74	18,86	19,90	19,49
800 - 1000	19,27	16,61	15,59	15,43
1000 - 1200	17,53	17,38	16,34	17,08
≥ 1200	39,10	38,21	37,08	32,40

Fonte: Desenvolvida pelo autor.

Observou-se que, no litoral a leste da área de estudo, os únicos locais com precipitação média anual superior a 1200 mm estão reduzindo sua extensão ao longo do tempo, quando comparado o período 1 com os demais. O padrão de redução de precipitação tem paralelo em outras partes do mundo. No sudoeste da Austrália Ocidental, segundo Feng *et al.* (2010), a diminuição da chuva ocorre principalmente no início e no final do inverno e pode ser atribuída aos efeitos de circulações atmosféricas em larga escala, incluindo o Modo Anular Sul (SAM), o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e o dipolo do Oceano Índico (IOD).

O padrão de redução de precipitação identificado neste estudo foi igualmente relatado por Da Silva *et al.* (2021) em Alagoas, sendo atribuído pelos autores à influência de sistemas atmosféricos de grande escala, especialmente o dipolo do Oceano Atlântico e o ENOS. Andreoli e Kayano (2005) destacam que, durante os eventos de La Niña, há uma tendência de aumento da precipitação na parte norte do NEB, enquanto os eventos de El Niño levam a uma diminuição

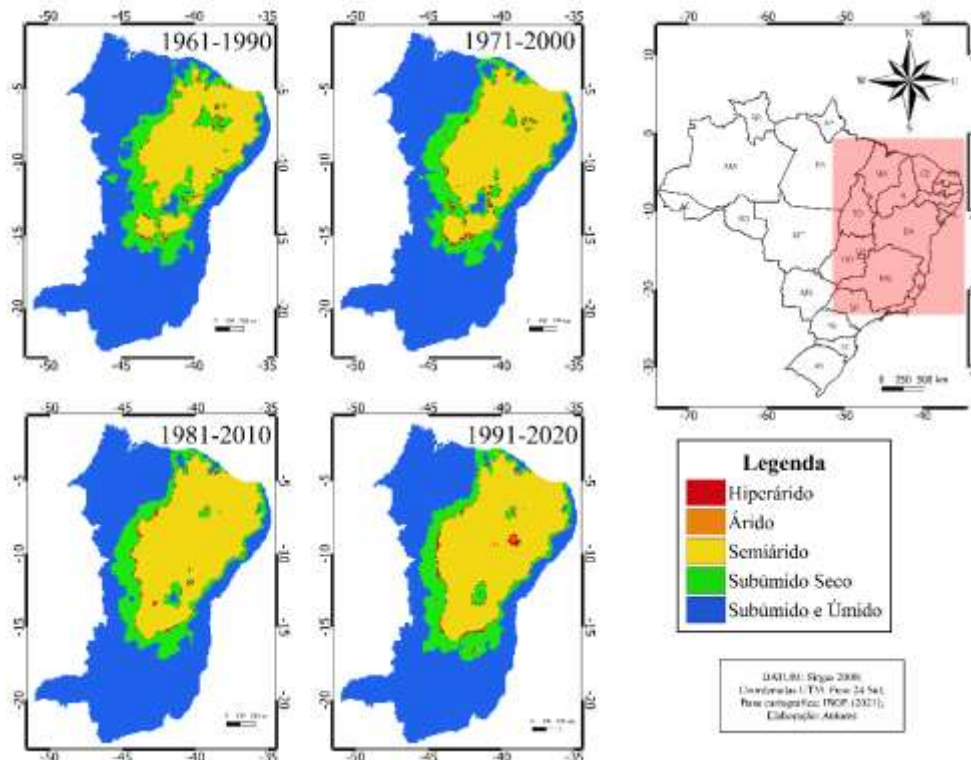
na precipitação. Além disso, o Oceano Atlântico desempenha um papel importante na modulação dessas chuvas. Gradientes de temperatura significativos entre o Atlântico Norte Tropical (ATN) e o Atlântico Sul Tropical (ATS) podem amplificar ou enfraquecer os efeitos de El Niño e La Niña. Por exemplo, anomalias positivas de temperatura (águas mais quentes) no ATS podem enfraquecer os impactos típicos de El Niño sobre o NEB, mostrando que os efeitos combinados dos oceanos Pacífico e Atlântico nem sempre seguem os padrões esperados.

Outro fator crucial no comportamento da precipitação é a posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), uma faixa de convergência de ventos que influencia diretamente os padrões de precipitação. Durante eventos combinados de La Niña e gradientes positivos no Atlântico, a ZCIT tende a deslocar-se para o norte, favorecendo anomalias negativas (menos chuvas) no norte do NEB. Esse padrão é amplificado pela interação entre dipolos de anomalias de temperatura no ATS e no ATN, que podem intensificar ou alterar significativamente as chuvas na região. Esse conjunto de evidências sublinha a complexidade dos sistemas climáticos e a necessidade de considerar múltiplos fatores de larga escala para compreender a variabilidade das precipitações, tanto em escala regional quanto global. Estudos futuros devem explorar com mais profundidade as interações entre os diferentes padrões oceânicos e atmosféricos, com foco em como esses processos influenciam regiões vulneráveis como o NEB (Andreoli; Kayano, 2005).

#### 4.4. INDICE DE ARIDEZ

Com os critérios definidos nas Tabelas 1 e 2, de maneira similar foi feita a análise gráfica da evolução do IA na área de estudo (Figura 11). Nessa subseção, além da classificação climática pelo índice de aridez, descrito na Tabela 2, também foi analisada a suscetibilidade à desertificação (Tabela 7) da região estudada.

**Figura 11:** Evolução temporal de IA.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

No período 1 maior parte dos estados possuíam uma área classificada como semiárida com suscetibilidade alta a desertificação, com exceção do Espírito Santo e Maranhão. Nesse mesmo período, na região sul do Ceará, oeste Paraíba e central da Bahia existiam áreas classificadas como Subúmido seco, com suscetibilidade moderada à desertificação. Salienta-se que, ainda na região central da Bahia, apresentou uma área de clima subúmido e úmido.

Com o passar do tempo, houve um aumento na área semiárida de 38%, quando comparado o primeiro com o quarto período, entretanto o teste de proporção acusou que esse crescimento não é significativo para  $\alpha=5\%$  ( $Z= 1,44$ ), (Tabela 7), e uma redução de 12%, comparando o período 1 com o 4, nas áreas classificadas como Subúmido e Úmido, redução que também não foi considerada significativa pelo teste de proporção ( $Z=1,04$ ). Comportamento semelhante foi percebido em Portugal, onde a área com alta suscetibilidade à desertificação afetou 58% do território do país, considerando dados analisados de 1980 a 2010, enquanto, no período de 1960 a 1990, essa área ocupava apenas 36% desse território (OND, 2024).

**Tabela 7:** Evolução da IA na área de estudo.

Períodos	1961-1991	1970-2000	1980-2010	1990-2020
<b>Classificação climática</b>	<b>% da área total</b>			
Hiperárido	1,24	1,35	0,90	1,27
Árido	0,00	0,00	0,00	0,07
Semiárido	24,63	28,44	32,52	33,91
Subúmido Seco	15,15	13,66	12,58	13,12
Subúmido e Úmido	58,97	56,56	54,00	51,66

Fonte: Desenvolvida pelo autor.

As áreas classificadas como Hiperáridas acompanharam as bordas das áreas semiáridas em todos os períodos estudados. Esse comportamento pode ser atribuído aos efeitos de borda, que podem envolver mudanças nos fatores climáticos ambientais, pois as bordas apresentam maior exposição aos ventos, altas temperaturas, baixa umidade e alta radiação solar (Redding *et al.* 2003).

Outrossim, foi observado o aparecimento da área árida com alta suscetibilidade de desertificação no norte da Bahia, ocupando uma área aproximada de 5.800 km<sup>2</sup>, atingindo os municípios de Abaré, Chorrochó e Macururé, fato também relatado pelo CEMADEN e publicado em nota técnica emitida por Brasil (2023).

A expansão territorial dos climas árido e semiárido, observada na Figura 11 e Tabela 7, está ligada ao aumento das áreas com maiores valores de ET (Figura 7) e menores valores de P (Figura 10), já que essas são as variáveis utilizadas para efetuar o cálculo do IA. Silva *et. al* (2023) compararam as condições atuais do Semiárido brasileiro (1970-2000) com os cenários futuros (2061-2080), e teorizam que, até o final do século, a região do Semiárido brasileiro se tornará significativamente mais seca, com uma intensificação da aridez, de modo que as áreas com altos índices de ET e baixos de P, conseqüentemente, também aumentarão.

Segundo os mesmos autores, no cenário atual, o índice médio de aridez (IA) no SAB é de 0,49, valor típico para regiões semiáridas. No cenário otimista de mudanças climáticas, prevê-se uma redução de 6% em comparação com a média atual. Já no cenário pessimista, espera-se uma redução de 14%, ambos mostrando uma intensificação da aridez. Nos cenários futuros, deverá ocorrer uma expansão nas zonas semiáridas sobre as zonas de clima subúmido

seco, fazendo com que a condição semiárida que domina atualmente 57,79% do semiárido brasileiro evolua, no cenário otimista, para 63,34% e, no cenário mais extremo, para 71,87%.

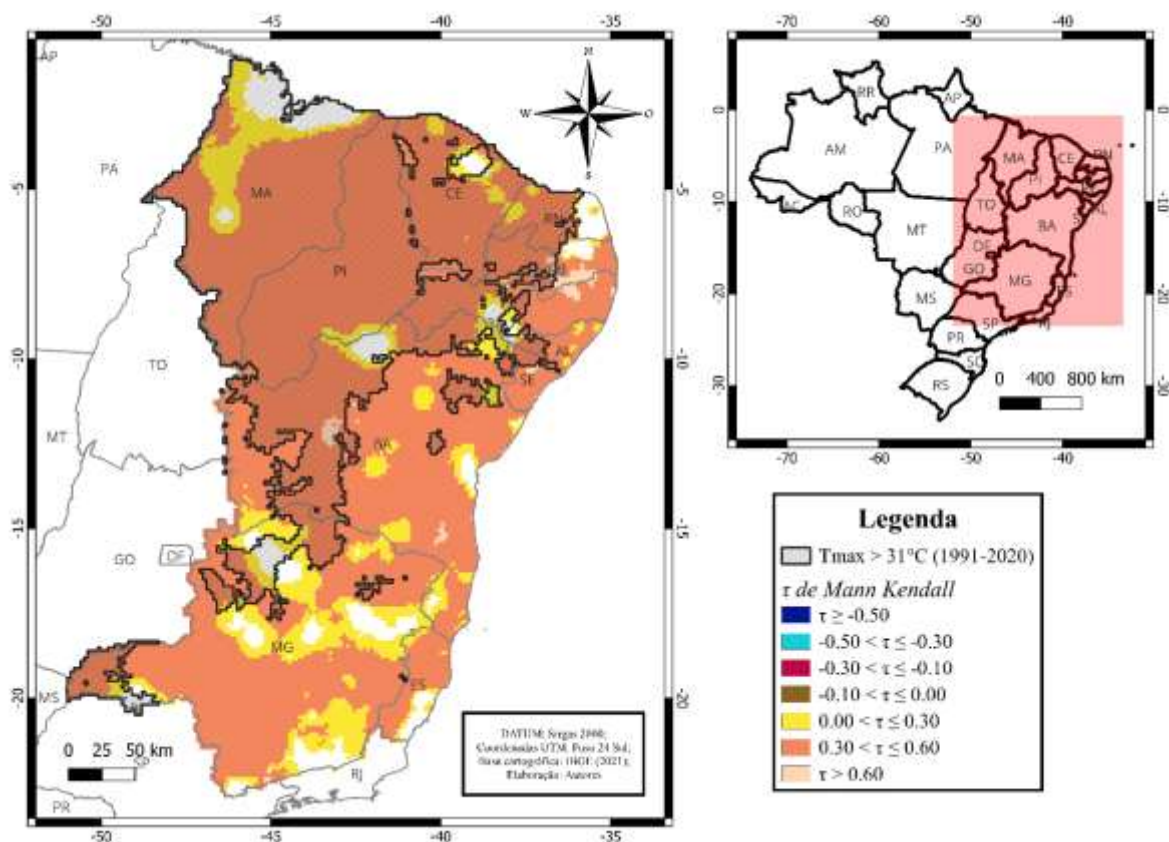
O aumento da aridez em zonas semiáridas deixará essas regiões ainda mais secas até o final do século. Esse avanço contribui para o processo de desertificação, culminando em impactos negativos, como a interrupção dos fluxos socioeconômicos, níveis elevados de pobreza, bem como o aumento das taxas de migração forçada. Outro fator diz respeito à diminuição da capacidade produtiva do território, pois, como resultado desse cenário, ocorre a perda de solos, elevação das taxas de CO<sub>2</sub> e o declínio dos níveis de biodiversidade (Huang *et al.*, 2016; Sanzheev *et al.*, 2020).

#### 4.5. TESTE DE TENDÊNCIA DAS VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS

Foi aplicado o teste de tendência de Mann-Kendall nas séries históricas anuais de T<sub>max</sub> e T<sub>min</sub>, ET, P e IA. As áreas que apresentaram tendências significativas ( $\alpha = 0,05$ ), foram destacadas e classificadas de acordo com os valores do coeficiente  $\tau$  de Mann-Kendall: quanto mais próximos a 1 mais fortes são as tendências de crescimento, enquanto valores próximos a -1 representam tendências de decréscimo (Naghattini; Pinto, 2017). Ressalta-se que os territórios em branco na área de estudo são locais que não apresentaram tendência para 5% de significância

Ao analisar a série de T<sub>max</sub>, (Figura 12) quanto a tendência, foi observado que aproximadamente 90% da área estudada apresenta tendências positivas, ou seja, as temperaturas máximas estão crescendo em todos os 9 estados do NEB, em Minas Gerais e no Espírito Santo. As tendências mais fortes, com  $\tau > 0,60$ , foram notadas na Bahia, Paraíba, Pernambuco e Sergipe. Ressalta-se que, neste último, existem áreas com forte tendência de crescimento de T<sub>max</sub>, estando no limite da área que apresentaram temperaturas máximas maiores a 31°C.

**Figura 12:** Teste de tendência da  $T_{max}$ .



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

No mapa da Figura 12, foi sobreposto ao mapa de tendencia, as áreas que apresentaram temperaturas médias anuais superiores a 31°C no período 4. Com isso, observou-se que, com exceção do norte do Maranhão, norte e oeste de Minas Gerais e leste do Rio Grande do Norte, existe tendência de crescimento de  $T_{max}$  em todo o limite do território hachurado, indicando tendência de crescimento das áreas com temperaturas superiores a 31°C.

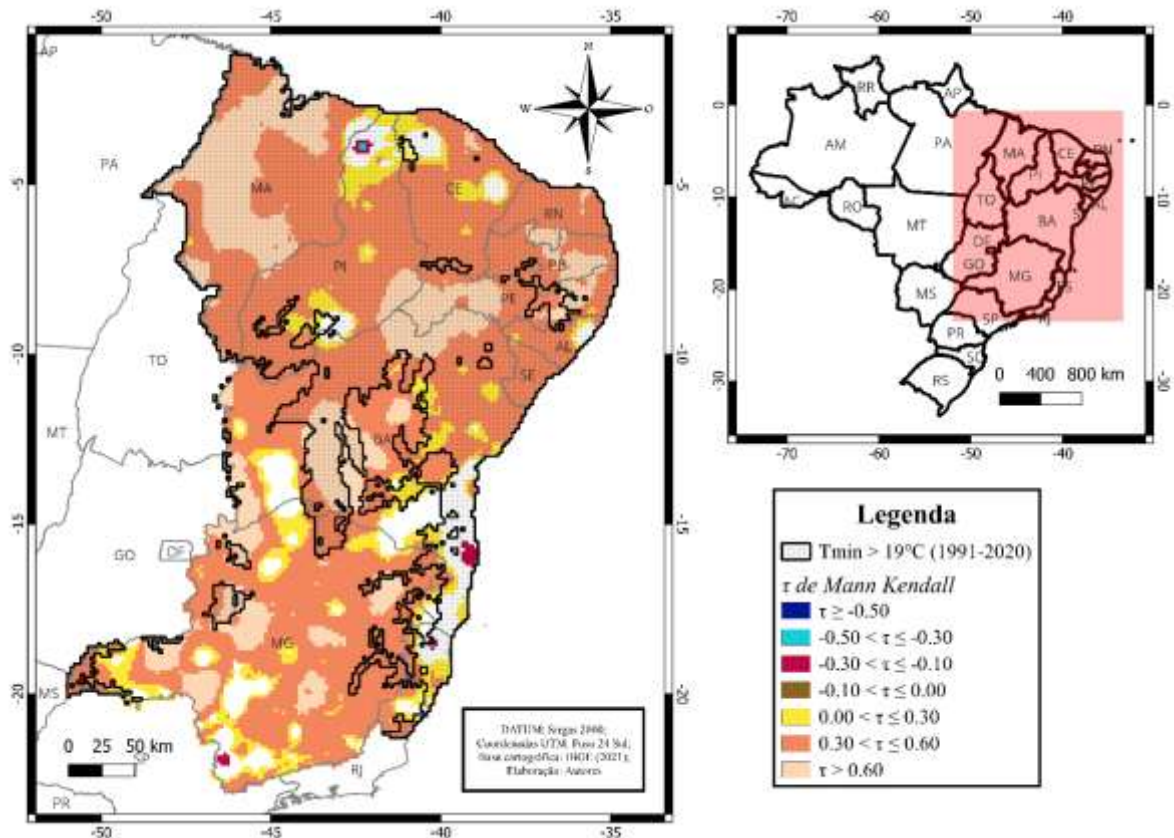
Salienta-se que a tendência de aquecimento é observada em todo o globo. Na Etiópia, esse padrão de aumento das temperaturas foi percebido por Elzopy *et al.* (2020), que aplicaram o teste de Mann-Kendall na série temporal de 1961 a 2015 e constataram a elevação crescente nas temperaturas médias do país. Na Bacia de Narmada, Índia, também foi feita uma análise de tendência quanto  $T_{max}$ , e foi identificada uma tendência de aquecimento da bacia, sendo esta a maior no último século. Como a maioria da área da bacia é dominada por terras agrícolas, as implicações das tendências de temperatura na agricultura são preocupantes (Swain *et al.*, 2022).

Notaram-se áreas de tendência de crescimento na maioria dos estados estudados, com exceção de Sergipe e Piauí, que não apresentaram tendência, entretanto são áreas muito

pequenas quando comparado a toda extensão territorial do estado ao qual estão inseridas. No sul da Nigéria, Agbo e Ekpo (2021) afirmaram que as séries de temperaturas estudadas ( $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$  e Temperatura média) permanecem estacionárias e atribuem esse comportamento à condição climática quase imutável da região, devido a sua proximidade com o Oceano Atlântico. Essa justificativa, contudo, talvez não se aplique ao Brasil, já que o litoral é banhado pelo Oceano Atlântico e sua maior parte apresentou tendência significativa tanto em  $T_{\max}$  quanto em  $T_{\min}$ .

Aplicando o teste de tendência no período completo anual de  $T_{\min}$  (Figura 13), foram identificadas tendências de decréscimo de  $T_{\min}$  em pequenas áreas do norte do Piauí, sul de Minas Gerais, leste do Espírito Santo e leste da Bahia. Isso significa que as temperaturas mínimas, nestes locais, tendem a ficar mais baixas. No restante dos locais que apresentaram tendência, foram de crescimento.

**Figura 13:** Teste de tendência da  $T_{\min}$ .



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

Ao sobrepor a camada do teste de tendência à área correspondente ao conjunto de pixels com  $T_{\min}$  superior a  $19^{\circ}\text{C}$ , observou-se que, na maior parte de seus limites, exceto no leste da Bahia e no norte do Espírito Santo, há uma tendência de aumento das temperaturas. Isso sugere a possível expansão da região com  $T_{\min} > 19^{\circ}\text{C}$ , especialmente na região central da Bahia, em Pernambuco e em Alagoas.

Em Minas Gerais, foram identificadas várias manchas com alta tendência de aumento da temperatura mínima, indicando uma forte possibilidade de aquecimento no estado. No Maranhão, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Piauí e Bahia, áreas que já estavam localizadas na região que a  $T_{\min}$  é maior a  $19^{\circ}\text{C}$ , tendem a ficar ainda mais quentes, com áreas que apresentaram  $\tau$  de Mann-Kendall  $> 0,6$ . Esse padrão de aquecimento também foi observado em outras regiões do sul da América do Sul. Balmaceda-Huarte *et. al* (2021) concordaram com as condições gerais de aquecimento nessa parte do continente, destacando que ele é mais intenso na região da diagonal árida da Argentina e no sudeste da América do Sul.

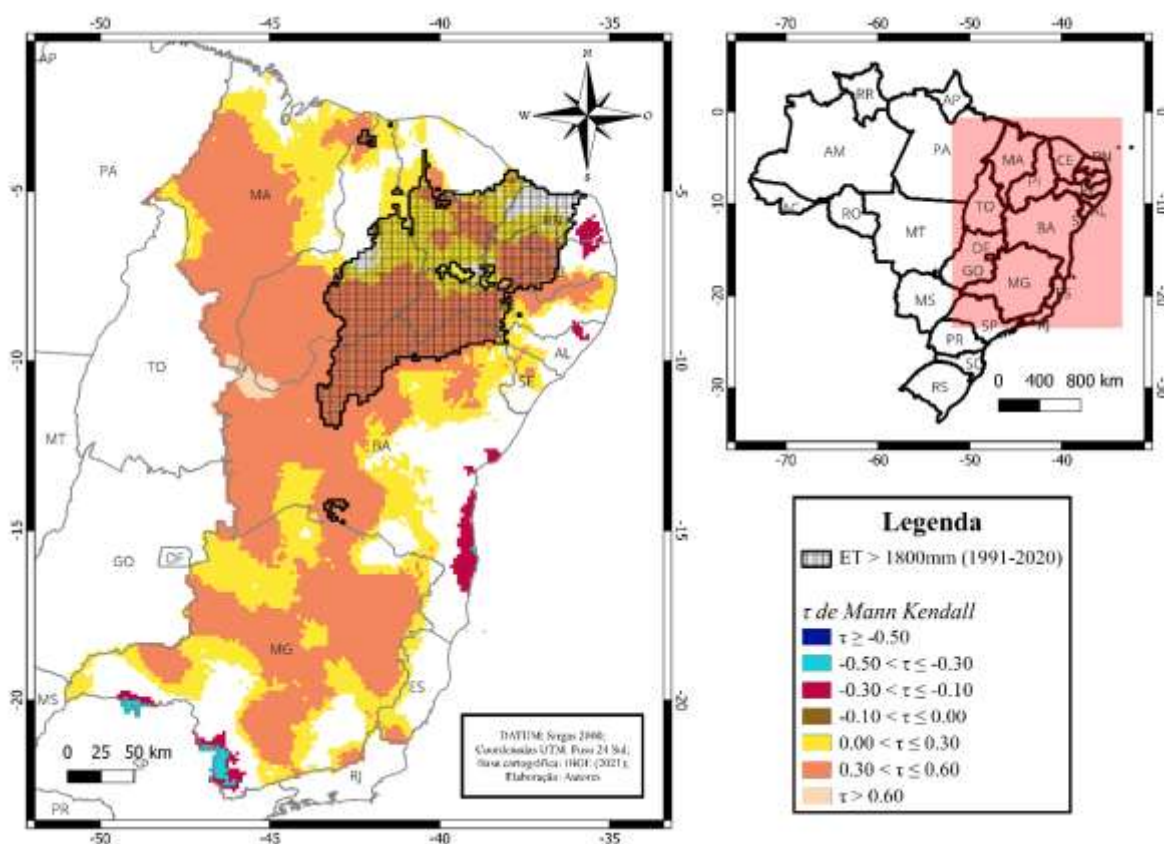
Outros trabalhos também enfatizam esse crescimento da temperatura na região estudada como o de Pereira, Lopes e Nery (2021), que evidenciaram, utilizando o teste de Mann-Kendall,

um aumento significativo das temperaturas máximas e mínimas no estado do Ceará, especialmente em sua região central. Santos *et. al* (2010) observaram que em todo o NEB há indicações de tendências crescentes nas séries temporais de temperatura do ar, estatisticamente significativas, também pelo teste de Mann-Kendall, tanto para o período de 1961 a 2007, como para os cenários de 2050 e 2100. As maiores taxas de aumento foram encontradas para a situação climática atual e para o cenário do ano de 2050, e menor aumento de seus valores entre os cenários de 2050 e 2100. Para o estado de Minas Gerais, Reboita *et. al* (2021) estimam que a temperatura média do ar poderá aumentar em até 5°C em uma previsão até 2095.

Corroborando com os resultados de tendência descritos, o INMET publicou no dia 2 de janeiro de 2025, que o ano de 2024 é o mais quente, no Brasil, desde 1961, com temperatura média de 25,02°C. Ainda na nota, foi verificada tendência de crescimento significativa na temperatura média anual, avaliando uma série temporal de 1961 a 2024 (INMET, 2025).

Quanto às tendências observadas na série de ET (Figura 14), verificou-se uma redução nos valores de evapotranspiração no litoral baiano, na divisa entre os estados de Minas Gerais e São Paulo, no leste do Rio Grande do Norte e da Paraíba, e no nordeste de Alagoas. Ao comparar as Figuras 5, 6, 8, 9 e 15, nota-se que a divisa entre Minas Gerais e São Paulo é amplamente dominada pela agropecuária e apresenta temperaturas máximas frequentemente abaixo de 25°C e mínimas de 13°C. Possivelmente, a tendência de ET observada pode estar ligada a mudança das temperaturas, que afetam diretamente a evapotranspiração e esta é igualmente afetada pela alteração da vegetação nativa por vegetação utilizada nas atividades agrossilvopastoris (Silva *et al.*, (2018). Nas demais áreas, as tendências identificadas foram positivas, indicando um aumento na variável analisada.

**Figura 144:** Teste de tendência da ET.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

Foram observadas tendências positivas de evapotranspiração em quase toda a extensão territorial do Maranhão, com exceção de uma porção ao norte e leste do estado, e no Piauí, exceto na região noroeste. Em Pernambuco, a única região em que não foram identificadas tendências foi na divisa com Alagoas, ao sul do estado, e na Paraíba, no nordeste do seu território. Analisando as Figuras 8 e 9, nota-se uma grande mudança na ocupação do solo do Maranhão e do Piauí. Como as Figuras 5 e 6 mostram que estes são estados com temperaturas muito elevadas, essa mudança pode ter interferido diretamente no crescimento da ET.

Em Minas Gerais, essas tendências foram observadas na maior parte do estado, com exceção do sul e de pequenos núcleos ao norte. Na Bahia, as tendências positivas predominam, exceto na região leste. Adicionalmente, pequenos núcleos de tendência crescentes foram encontrados no centro e norte de Sergipe, na porção sul-ocidental de Alagoas e Rio Grande do Norte. No Espírito Santo, a tendência positiva foi observada em toda a divisa com Minas Gerais e ao sul do seu território. Silva *et al.* (2018) avaliaram a tendência da ET no estado de Alagoas, utilizando o método dos mínimos quadrados e o teste sequencial de Mann-Kendall,

identificando um aumento significativo da variável na porção ocidental do estado. Esse resultado está em consonância com a análise apresentada na Figura 14.

Corroborando com os resultados encontrados, Rocha *et al.* (2020), também utilizando o teste de tendência de Mann-Kendall para a série de ET no período de 1980-2016, identificaram tendências positivas significativas em uma extensa área no oeste da Bahia e no sul do Maranhão e Piauí, bem como em outra grande região abrangendo o norte da Bahia, o oeste de Pernambuco e o leste do Piauí. Além disso, núcleos menores foram observados entre a Paraíba, o Ceará e o Maranhão. Segundo os mesmos autores, áreas com tendências positivas de ET indicam uma maior exposição do ambiente a períodos secos mais prolongados e uma redução das chuvas durante o período chuvoso.

O crescimento da ET também foi observado em algumas partes do mundo, como na região do Lácio, Itália, a qual possui um clima mediterrâneo, caracterizado por verões quentes e secos e invernos amenos e úmidos. Os valores médios mais altos de ET concentraram-se ao longo das áreas costeiras e montanhosas, apresentando tendências crescentes mais acentuadas. Ainda, foram constatadas tendências menos marcantes nas áreas do sopé e dos Apeninos (Di Nuno *et al.*, 2024). Na região do Sahel, que se estende do Senegal à Eritreia, cobrindo dez países, com comprimento de cerca de 8.000 km, uma zona de transição localizada entre o deserto do Saara ao norte e a savana sudanesa ao sul, foi encontrada tendência positiva de ET anual em 90% das bacias hidrográficas da região. A variação dessa variável, 80% das vezes, é influenciada por fatores ambientais e climáticos (Nkiaka *et al.*, 2024).

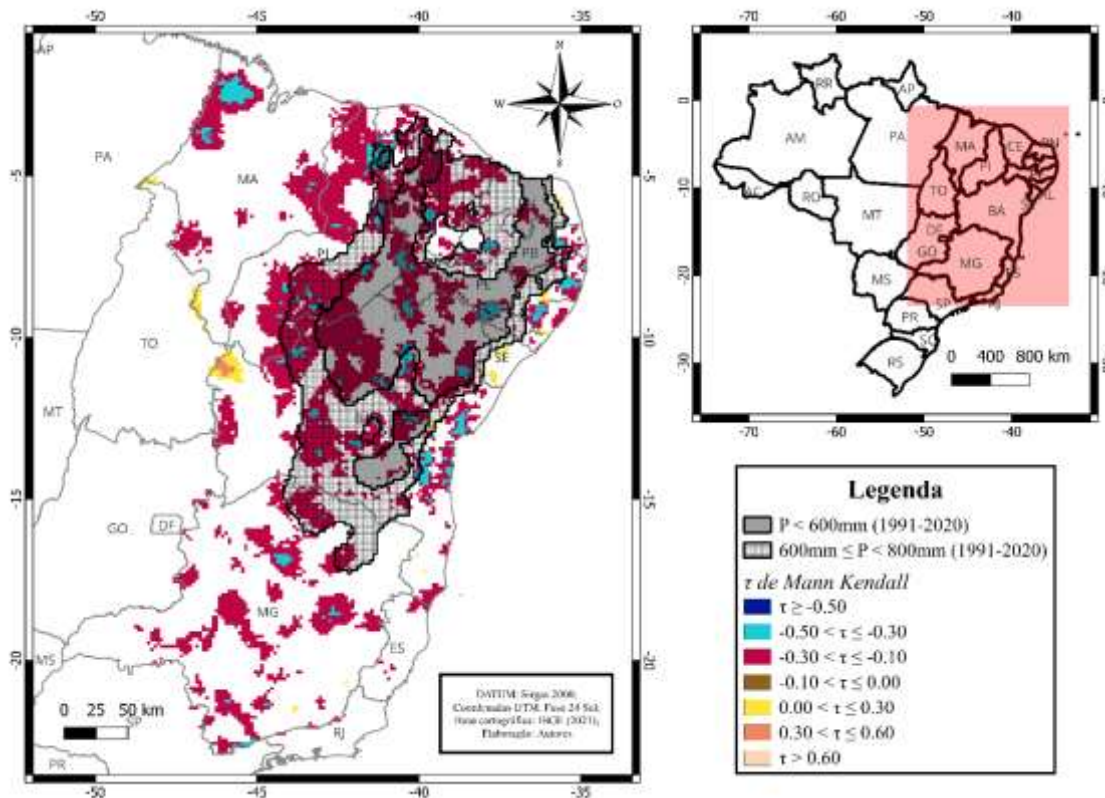
Ainda observando a Figura 14, no sul do Maranhão, do Piauí e o noroeste da Bahia foram as regiões que apresentaram a maior tendência de crescimento da evapotranspiração potencial ( $\tau > 0,6$ ). Além disso, ao sobrepor as áreas com tendências positivas às regiões que registraram  $ET > 1800$  mm no período 4, observa-se que todo o limite localizado nos estados de Alagoas, Bahia e Pernambuco apresenta uma tendência de crescimento, indicando que essa área pode se expandir ao longo do tempo. Já no Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba, parte desse limite está situado em áreas com séries estacionárias de evapotranspiração.

Rocha *et al.* (2020), ao analisarem a série anual de ET no período de 1980-2016, identificaram tendências negativas ao longo do litoral do NEB, abrangendo do Ceará até a Bahia. Segundo os autores, a diminuição da ET pode estar associada ao maior armazenamento de água no solo ou à descontinuidades no ciclo hidrológico devido ao crescimento de zonas urbanas, já que esta região é a que apresenta maior desenvolvimento econômico e social. Saliente-se ainda a necessidade de avaliar o impacto no deflúvio pela utilização de água

subterrânea para irrigação, o que aumentaria as perdas para a atmosfera a depender da tecnologia adotada (aspersão, gotejamento ou subsuperficial). No presente estudo, com a ampliação da série temporal para o período de 1961-2020, foram observadas tendências negativas apenas em núcleos localizados no litoral da Bahia, Alagoas, Paraíba e Rio Grande do Norte, e tendências positivas no litoral norte de Pernambuco e no sul da Paraíba. Nas demais áreas litorâneas, a série apresentou comportamento estacionário.

Após a análise de tendência ET, os testes foram aplicados nas séries de precipitação (Figura 15). Com isso, foi revelado tendência de crescimento de chuva no noroeste da Bahia e em pequenos núcleos no leste, bem como em pontos no leste do Maranhão, no litoral de Sergipe, Alagoas, Pernambuco e Rio Grande do Norte.

**Figura 155:** Teste de tendência de P



Fonte: Desenvolvido pelo autor

Em contraste, as demais tendências encontradas foram negativas, indicando uma redução da precipitação na maior parte da área de estudo. As áreas com tendências negativas de precipitação estão distribuídas por todos os estados analisados. No Maranhão, essas tendências concentram-se no noroeste, próximo à divisa com o Pará, no sudoeste, na divisa com o Tocantins, no leste e em pequenos núcleos no centro do estado. No Piauí e no Ceará, a situação é mais preocupante, com mais de 60% do território apresentando redução nas chuvas. No Rio

Grande do Norte, pequenos núcleos com tendência negativa foram identificados no oeste, na divisa com o Ceará, e no sul do estado.

Na Paraíba, as áreas de tendência negativa de P localizam-se próximas à divisa com Pernambuco e na região leste, próxima ao litoral. Em Pernambuco, essas áreas aparecem em quase todas as divisas do estado, com destaque para a região leste. Em Alagoas, as tendências concentram-se no norte e leste do estado, com pequenos núcleos ao sul. Na Bahia, a distribuição das áreas com tendência negativa de P é irregular, abrangendo diversas regiões do estado. Já em Sergipe, praticamente não há registros significativos, com exceção de uma pequena área no município de Poço Verde. Em Minas Gerais, a maioria das áreas com tendência negativa está localizada na região central, enquanto pequenos núcleos foram identificados no oeste e sudeste do estado. No Espírito Santo, as tendências negativas aparecem em pequenos núcleos no centro e norte do território.

Essa tendência de redução de precipitação no NEB também foi observada por Shimizu, Anochi e Kayano (2022), que destacam tendência de intensificação do ciclo hidrológico no Norte do NEB, aumentando a possibilidade de cheias em uns períodos, e ampliando a eventualidade das secas em outros, isso pode estar associado ao aumento da circulação Hadley, a qual inibe a formação de nuvens nessa região, reduzindo a precipitação. Os autores complementam que a maior parte das mudanças observadas na precipitação nas bacias é atribuída à variabilidade natural do sistema climático, a Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO), o El Niño-Oscilação Sul. Porém, não se descarta a influência dos fatores antropogênicos, especialmente o aumento de gases de efeito estufa, que, provavelmente, estão relacionados às tendências negativas de precipitação.

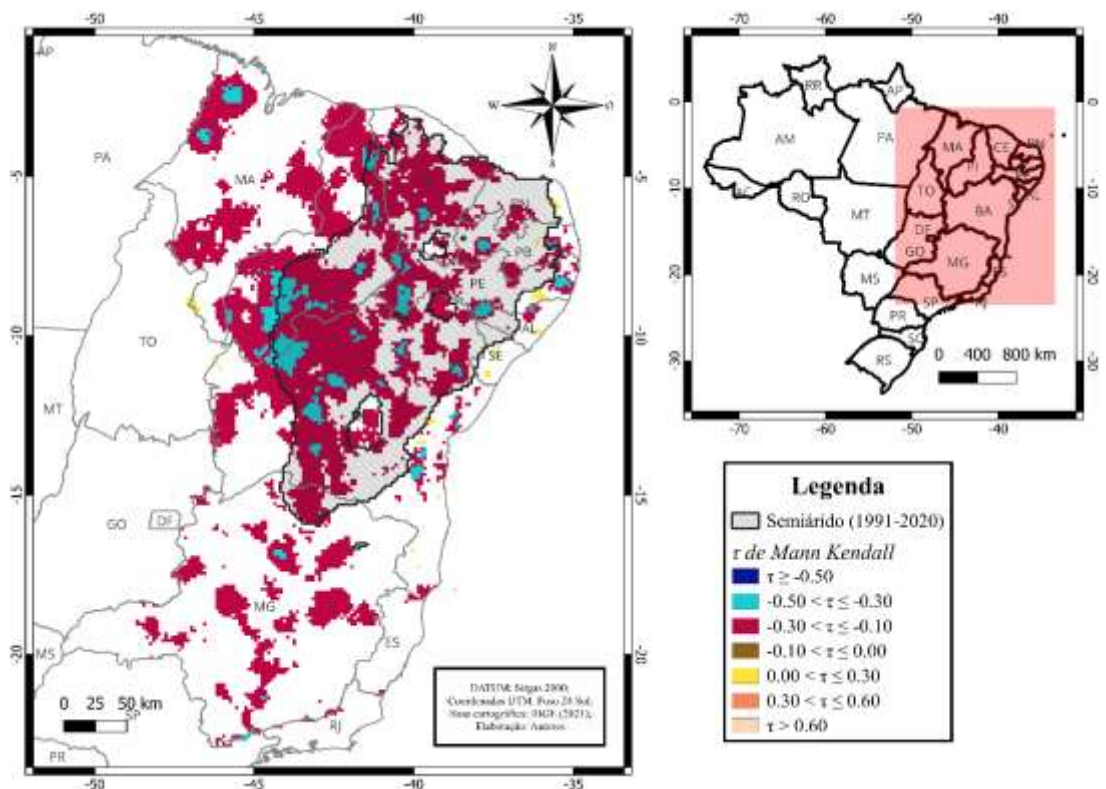
Analisando o limite da área com precipitação inferior a 600 mm, do período 4, sobreposto ao mapa das tendências das séries de precipitação, observou-se que pode haver uma expansão desse limite nas regiões da Bahia, Piauí e Ceará. Esse aumento está associada à coincidência do limite com áreas que apresentam redução significativa na precipitação ao longo do tempo. Da mesma forma, ao sobrepor a área com precipitação entre 600 mm e 800 mm no período 4, observou-se um possível crescimento dessa área ao norte do Ceará, ao leste e sudeste do Piauí, no noroeste e, especialmente, no leste da Bahia, além do sul da área, situada em Minas Gerais.

Na Nigéria, foi observado comportamento semelhante com o encontrado na área de estudo, com 22% do território nigeriano apresentando tendência negativa estatisticamente significativa de precipitação segundo Oguntunde, Abiodun e Lischeid, 2011. O comportamento

das chuvas pode estar associado aos fenômenos climáticos da Oscilação Quase-Bienal, o El Niño-Oscilação Sul, os ciclos de manchas solares e a Oscilação Multidecadal do Atlântico (Oguntunde; Abiodun; Lischeid, 2011). Em contrapartida, foram encontradas tendências de crescimento da precipitação anual na China, onde foi percebido tendência de aumento na temperatura e como consequência houve o aumento da precipitação (Yao *et al.*, 2016; He *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024). Esse comportamento também foi observado nas regiões áridas e semiáridas do Rajastão, Índia (Mehta; Yadav, 2022).

Quanto às séries do IA (Figura 16), foram encontradas tendências de crescimento em núcleos do litoral da Bahia, Sergipe, Alagoas e Rio Grande do Norte, na parte central da Paraíba e de Pernambuco, no sudoeste do Maranhão e no noroeste da Bahia. Observando o comportamento de P e ET no litoral, é compreensível essa tendência positiva, uma vez que nessas regiões foram observadas tendências positivas de chuva e negativas de ET. Na área em que houve crescimento de IA no Maranhão, houve tendência de aumento de chuva, da evapotranspiração e de temperatura, como o IA é uma razão entre as variáveis P e ET, apesar de todas as tendências de crescimento, o volume de chuva está maior que o de ET, fazendo com que o IA tenda a crescer.

**Figura 16:** Tendência da série anual de IA.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

No restante dos locais que apresentaram tendência, estas foram negativas, indicando que os valores do Índice de Aridez poderão ficar cada vez menores. Atendo-se à área árida, que surgiu na Bahia no período 4, observa-se que há tendência de crescimento do seu limite na direção leste, podendo se aproximar de Sergipe e adentrar o oeste de Alagoas, e na direção norte, podendo expandir o território árido pelo sul de Pernambuco.

Em grande parte dos territórios da Bahia, Piauí e Ceará, foi observada uma tendência negativa no IA. No Maranhão, os núcleos de tendência negativa foram identificados no noroeste, sudeste e leste do estado. Em Sergipe, não houve tendência de redução do IA, ao contrário de Pernambuco, Paraíba e Alagoas, que apresentaram núcleos de tendência negativa no oeste e em pontos do leste. No Rio Grande do Norte, a redução foi observada pontualmente no sul e leste do estado. Em Minas Gerais, os núcleos de tendência negativa foram distribuídos ao longo de todo o estado, enquanto no Espírito Santo foram registrados em pequenas áreas no sul e norte.

Sobrepondo as áreas com tendência de decrescimento com a área de IA classificada como semiárido no período 4, percebeu-se que, em todo o oeste do limite da área com IA menor que 0,5, nos estados da Bahia e Piauí, assim como ao norte no estado do Ceará, houve coincidência com as áreas que apresentaram tendência de decrescimento, indicando um aumento do semiárido ao longo do tempo.

Segundo Zarch *et al.* (2017), as áreas áridas e semiáridas têm tendência de expansão global, e as regiões secas, que atualmente ocupam 41% da superfície terrestre, podem aumentar significativamente em extensão. Em suas projeções, os autores estimam, para a situação mais pessimista, que a África será o continente mais impactado, com ampliação das áreas áridas e intensificação da seca tanto no norte quanto no sul do continente. Na América do Sul, destaca-se a expansão das áreas semiáridas no NEB, afetando a disponibilidade hídrica e os ecossistemas locais. Esses resultados corroboram os achados deste trabalho. Além disso, os autores enfatizam que o IA é uma métrica eficaz para avaliar os impactos climáticos em escalas globais e regionais.

Silva *et al.* (2023) também concluíram que a região semiárida brasileira sofrerá um aumento significativo até o fim do século. No cenário otimista acontecerá uma redução na IA de 6%, no pessimista de 14%, ambos os casos indicando intensificação na aridez com significância de 5%, sendo as regiões centro e sul as mais afetadas, adentrando ainda mais no norte de Minas Gerais.

As tendências observadas nesta seção são preocupantes, uma vez que, conforme afirmado por Zhou *et al.* (2021), o processo de desertificação é caracterizado pela redução da precipitação, aumento da temperatura do ar e incremento na evapotranspiração potencial. Além disso, os autores indicam que as regiões áridas e semiáridas serão impactadas pela diminuição da precipitação, associada ao aumento da temperatura e da evapotranspiração potencial, o que resultará em uma redução da disponibilidade hídrica nessas áreas.

#### 4.6. ANÁLISE DA DELIMITAÇÃO DO SEMIÁRIDO

A delimitação vigente do semiárido alcança 1.262 municípios sendo distribuídos pelos 10 estados, como descrito na Tabela 8.

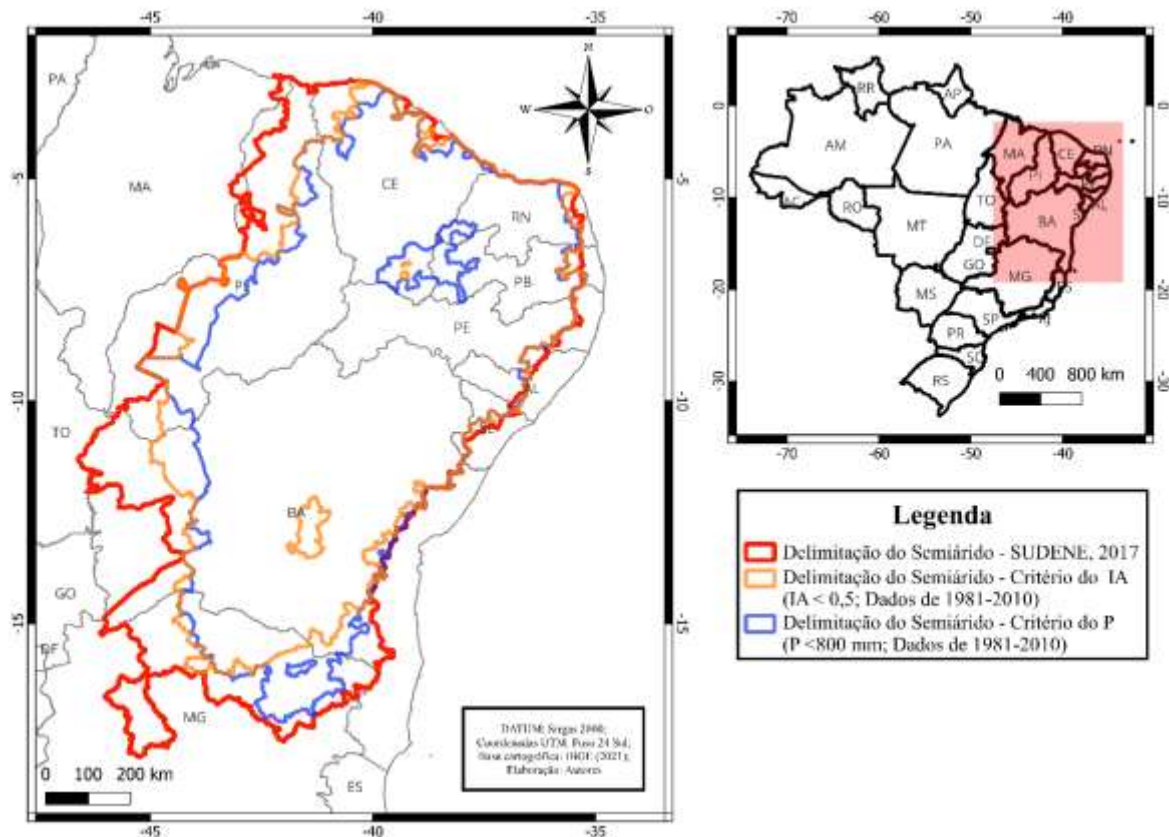
**Tabela 8:** Distribuição de municípios que fazem parte do semiárido oficial

Estado	N.º de Municípios
Alagoas	38
Bahia	278
Ceará	175
Maranhão	2
Minas Gerais	91
Paraíba	194
Pernambuco	123
Piauí	186
Rio Grande do Norte	147
Sergipe	29

Fonte: Adaptado do SUDENE (2021)

Utilizando o mesmo período de referência adotado pela delimitação vigente (período 3: 1981–2010), analisou-se quais municípios, nesse intervalo de tempo, atenderam aos critérios I e II sugeridos pela SUDENE (2021), com o objetivo de verificar a coincidência com a delimitação oficial (Figura 17). Ressalta-se que a Lei nº 4.763 de 1965 estabelece que, caso uma pequena porção do município esteja dentro da área onde os critérios são observados, todo o município deve ser incluído na delimitação. Com base na análise desenvolvida neste trabalho, constatou-se que cinco municípios de Alagoas (Campo Grande, Feira Grande, Olho d'Água Grande, Porto Real do Colégio e São Brás) e dois da Paraíba (Pilar e Sobrado) atendiam aos critérios I e II, com exceção de Porto Real do Colégio, que se enquadrava apenas no critério do IA. Apesar de atenderem aos critérios estabelecidos, esses municípios foram excluídos da delimitação oficial.

**Figura 17:** Comparação da delimitação oficial (2017) do semiárido com os municípios que atendem aos Critérios I e II no período 3.



Fonte: Desenvolvido pelo autor

Para pertencer ao semiárido, é necessário atender a pelo menos um dos critérios escolhidos pela SUDENE. Assim, sobrepondo o limite oficial com o dos municípios com chuva menor a 800 mm e IA menor que 0,5 (ver Figura 17), obtidos neste trabalho, observou-se que nos estados da Bahia, Minas Gerais, Paraíba, Pernambuco, 19, 17, 34 e 1 do total dos municípios escolhidos, respectivamente, atenderam apenas o critério I. Enquanto no Ceará, Alagoas, Piauí e Sergipe, 35, 2, 21, 3 municípios, respectivamente, atenderam o critério II. Apenas o Rio Grande do Norte teve todos os municípios atendendo simultaneamente os dois critérios.

**Tabela 9:** Municípios que pertencem ao semiárido pela Delimitação oficial (2017) e pelos critérios I e II nos anos de 1981 a 2010

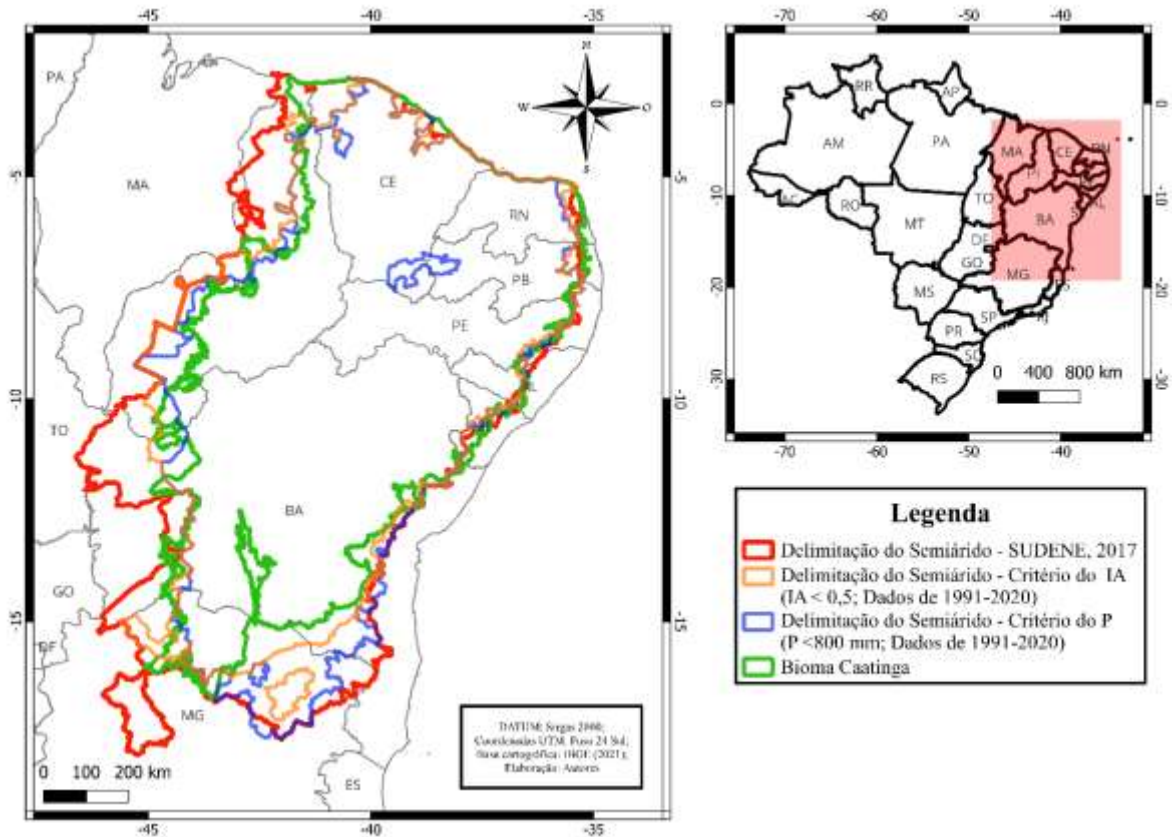
Estado	Delimitação Oficial	Critério I (P < 800 mm)	Critério II (IA < 0,5)	Escolhido apenas no oficial
Alagoas	38	39	41	2
Bahia	278	250	231	22
Ceará	175	104	139	35
Maranhão	2	0	0	2
Minas Gerais	91	44	27	44
Paraíba	194	173	139	24
Pernambuco	123	110	109	13
Piauí	186	100	121	64
Rio Grande do Norte	147	110	110	13
Sergipe	29	15	18	11

Fonte: Desenvolvido pelo autor

Na quinta coluna da Tabela 9, são quantificados os municípios presentes exclusivamente na delimitação vigente. Destaca-se o estado do Maranhão, que inclui apenas municípios classificados como semiáridos segundo o critério oficial. Essas inclusões podem estar relacionadas ao Critério III ou, conforme apontado por Da Silva e Bezerra (2020), à influência e pressão política exercidas pelos estados.

Com o objetivo de avaliar a expansão das áreas com precipitação anual inferior a 800 mm e índice de aridez (IA) menor que 0,5, utilizou-se o período 4 (1990–2020) para comparar com o limite oficial de 2017 (Figura 18). Essa análise permitiu observar as mudanças nos municípios que, com a evolução climática, passaram a fazer parte do semiárido. Ressalta-se que a delimitação de 2021 não foi utilizada nesta comparação, pois ainda está em processo de oficialização.

**Figura 18:** Comparação da delimitação oficial (2017) do semiárido com os municípios que atendem aos Critério I e II no período 4.



Fonte: Desenvolvida pelo autor.

Comparando a delimitação do semiárido de 2017 com os municípios do período 4 que atenderam aos critérios I e II, os limites a leste e oeste do território ficaram, em sua maior parte, muito mais próximos. Quando comparado ao limite do território ocupado pelo bioma da Caatinga em 2019 (Mapbiomas, 2024), característico do semiárido, houve uma grande ocorrência de coincidências no limite leste, oeste e norte do território, e uma redução dos municípios que apareciam apenas na delimitação oficial (Tabela 10), com exceção de Alagoas, que o município de Santana do Ipanema não atendia mais os critérios analisados, e Maranhão, que ainda não apresentou municípios que atendam aos critérios analisados.

**Tabela 10:** Municípios que pertencem ao semiárido pela delimitação oficial (2017) e pelos critérios I e II nos anos de 1991-2020.

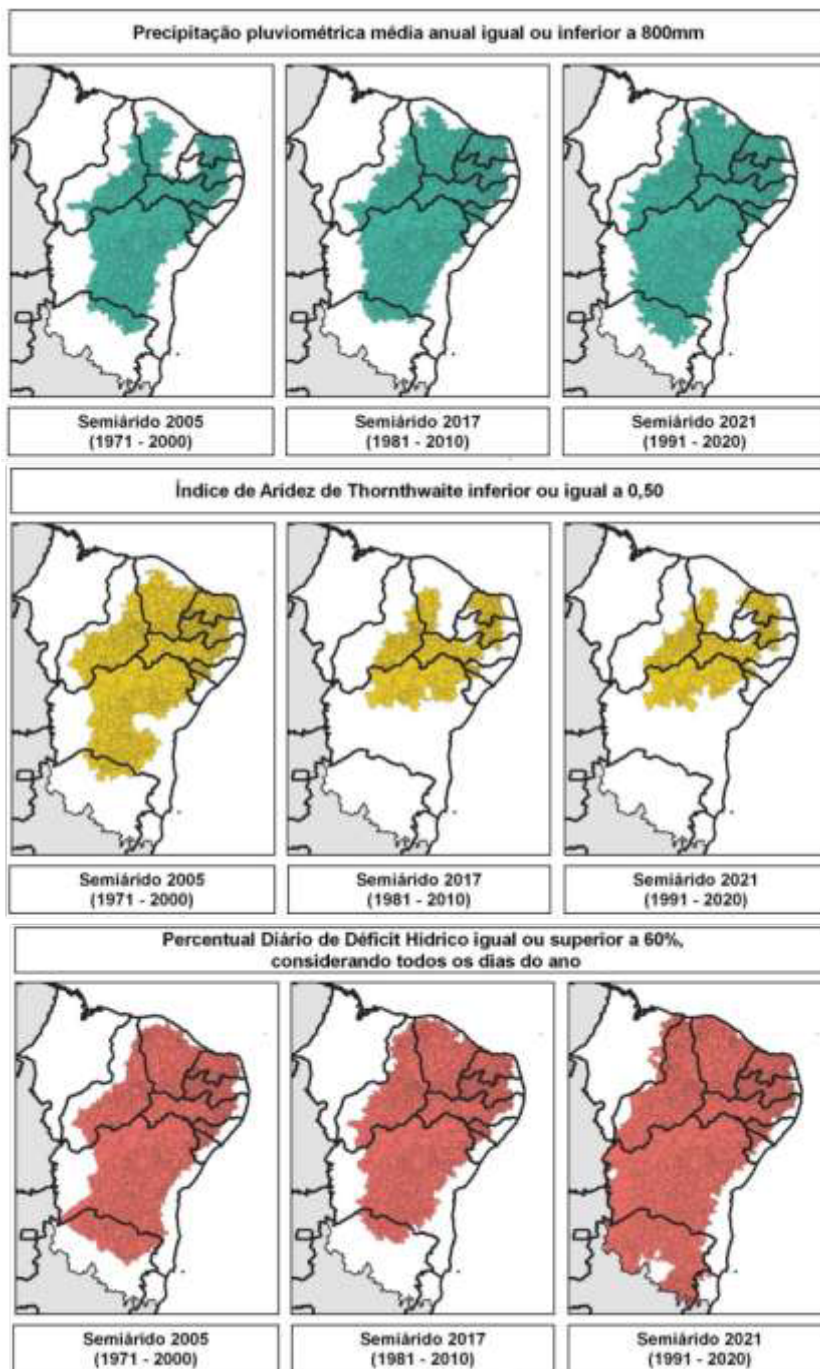
Estado	Delimitação Oficial	Critério I (P < 800 mm)	Critério II (IA < 0,5)	Escolhido apenas no oficial
Alagoas	38	40	39	3
Bahia	278	263	243	16
Ceará	175	148	148	27
Maranhão	2	0	0	2
Minas Gerais	91	60	37	28
Paraíba	194	165	175	22
Pernambuco	123	115	110	12
Piauí	186	115	129	56
Rio Grande do Norte	147	136	139	7
Sergipe	29	18	15	11

Fonte: Desenvolvida pelo autor

Houve algumas mudanças quanto ao número de municípios que respondiam aos critérios I e II, o que era esperado dada a expansão das áreas com  $P < 800\text{mm}$  e  $IA < 0,5$ . Nesta análise os estados que tiveram mais municípios que atendem ao critério da chuva foram Alagoas, Bahia, Minas Gerais, Pernambuco e Sergipe, com, respectivamente, 1, 20, 23, 5, 3 municípios que atendiam apenas ao critério I, e, ao critério de IA, Paraíba, Piauí e Rio Grande do Norte, com respectivamente, 10, 14 e 3 municípios que atendem somente ao critério II. Dessa vez a exceção foi o Ceará, no qual os 148 municípios atendem aos dois critérios.

Fazendo uma comparação com os resultados apresentados na versão preliminar do Semiárido de 2021, observou-se que o critério III foi o que dominou a delimitação (Figura 19). Isso destaca a necessidade de desenvolver estudos acerca deste critério. Ainda analisando a Figura 19 observou-se uma diferença dos resultados obtidos pelo GT-2017 com os obtidos neste trabalho. Isso pode ter ocorrido pela diferente forma de tratamento dos dados de estações meteorológicas utilizado pelo grupo de trabalho, como também da resolução adotada para o gradeamento, sendo ela metade do adotado pelo Xavier *et al.* (2022).

**Figura 19:** Evolução dos municípios que pertencem ao semiárido e os critérios de inclusão (versão preliminar)



Fonte: Adaptado de SUDENE (2022).

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho revelaram que as áreas com temperaturas máximas maiores que 31°C aumentaram significativamente nos últimos 60 anos, o que destaca uma tendência preocupante de aquecimento na região analisada. Quanto à área das temperaturas mínimas maiores que 19°C, foi observado um crescimento em todo o litoral, se expandindo para o interior do Espírito Santo, Bahia e Pernambuco e no sul do Maranhão e do Piauí, na região central da Bahia e no norte de Minas Gerais. Esse aquecimento pode estar ligado ao aquecimento das águas do oceano atlântico e ao aumento da emissão dos gases estufas.

Foi percebido um aumento na área com valores elevados de ET, especialmente acima de 1800 mm. Essa análise temporal é importante para entender como as taxas de evapotranspiração têm mudado e quais estados são mais afetados por esse crescimento (Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, e principalmente, Bahia). A análise comparativa do uso da terra entre 1985 e 2020 revela uma redução da área de floresta e um aumento da área agropecuária, especialmente no Piauí, Bahia e Maranhão. Essa alteração contribui diretamente para o aumento das taxas de evapotranspiração, dado que as áreas agrícolas, com maior uso de irrigação e diferentes tipos de vegetação, geram índices de evaporação mais elevados em comparação com as vegetações nativas da Caatinga.

Além do crescimento da área com maior evapotranspiração, houve uma mudança na distribuição espacial dos valores de ET. Áreas que antes apresentavam valores baixos dessa variável passaram a ter valores mais altos com o tempo, indicando uma transformação na dinâmica da evapotranspiração possivelmente relacionada à ocupação do território com atividades agrícolas.

Relativamente à precipitação, foi observado um aumento na área com precipitações menores que 600 mm, localizadas predominantemente no norte da Bahia, sul de Pernambuco, leste do Piauí e na região central da Paraíba e Rio Grande do Norte, e pontualmente em Alagoas, Ceará e Sergipe. Observou-se que, no litoral a leste da região estudada, as poucas áreas com precipitação anual superior a 1200 mm estão reduzindo sua extensão ao longo dos últimos 60 anos.

A maioria dos estados analisados no primeiro período possuía região classificada como semiárida com suscetibilidade alta a desertificação, com exceção do Espírito Santo e Maranhão. Nesse mesmo período, na região sul do Ceará, oeste da Paraíba e central da Bahia existiam áreas classificadas como subúmido seco, com suscetibilidade moderada à desertificação.

Salienta-se, ainda, que a região central da Bahia possuía uma área de clima subúmido e úmido. Essas áreas reduziram significativamente de tamanho ao passar do tempo.

Também foi observado o aparecimento da área árida com alta suscetibilidade de desertificação no norte da Bahia, atingindo os municípios de Abaré, Chorrochó e Macururé. A expansão territorial do clima árido e semiárido está ligada ao aumento das áreas com maiores valores de ET e menores valores de P, já que essas são as variáveis utilizadas para efetuar o cálculo do IA, e a alteração dessas variáveis está intimamente ligada às mudanças climáticas e a atividades antropogênicas.

O estudo revelou uma tendência de crescimento da temperatura máxima em 90% da área estudada, abrangendo todos os estados do NEB, Minas Gerais e Espírito Santo. Estados com maior intensidade de tendência positiva foram Bahia, Paraíba, Pernambuco e Sergipe. Áreas com temperatura máxima superior a 31°C mostram expansão, exceto no norte do Maranhão, norte e oeste de Minas Gerais e leste do Rio Grande do Norte. Para as temperaturas mínimas, a tendência de aumento é predominante, com algumas exceções de decréscimo (norte do Piauí, sul de Minas Gerais, leste da Bahia e Espírito Santo). Áreas com temperatura mínima acima de 19°C tendem a se expandir, especialmente na Bahia, Pernambuco e Alagoas.

Foram observadas tendências na série de ET, verificando uma redução nos valores de evapotranspiração no litoral baiano, na divisa sul de Minas Gerais, no leste do Rio Grande do Norte e da Paraíba, e no nordeste de Alagoas. Tendências positivas de evapotranspiração foram observadas em quase toda a extensão do Maranhão, Piauí e Pernambuco. Em Minas Gerais, essas tendências foram observadas na maior parte do estado, com exceção do sul e de pequenos núcleos ao norte. Na Bahia, as tendências positivas predominam, exceto na região leste. Entre 1985 e 2020, a substituição de vegetação nativa por atividades agropecuárias alterou a dinâmica climática e a distribuição espacial dos valores de ET, intensificando o impacto ambiental.

O sul do Maranhão, do Piauí e o noroeste da Bahia foram as regiões que apresentaram a maior tendência de crescimento da evapotranspiração potencial. Ademais, as regiões que registraram ET acima de 1800 mm no período 4 podem crescer em todo o limite que coincidem com os estados de Alagoas, Bahia e Pernambuco.

Foram encontrados locais isolados com tendência de crescimento de chuva, sendo eles no noroeste da Bahia e em pequenos núcleos no leste, bem como em dois pontos no leste do Maranhão, no litoral de Sergipe, Alagoas, Pernambuco e Rio Grande do Norte. As tendências negativas de precipitação estão presentes em todos os estados analisados, com destaque para o Piauí e o Ceará, onde mais de 60% do território apresenta redução nas chuvas. No Maranhão,

essas tendências concentram-se no noroeste, sudoeste, leste e pequenos núcleos no centro. No Rio Grande do Norte, aparecem no oeste e sul do estado. Na Paraíba, localizam-se próximas à fronteira com Pernambuco e na região leste. Em Pernambuco, abrangem quase todo o perímetro do território, especialmente na região leste. Em Alagoas, concentram-se no norte, leste e pequenos núcleos ao sul. Na Bahia, a distribuição é irregular, enquanto em Sergipe quase não há registros, exceto em Poço Verde. Em Minas Gerais, predominam na região central, com pequenos núcleos no oeste e sudeste. No Espírito Santo, estão em núcleos no centro e norte.

Nas séries de IA, foram identificadas tendências de crescimento no litoral da Bahia, Sergipe, Alagoas e Rio Grande do Norte, na região central da Paraíba e Pernambuco, no sudoeste do Maranhão e no noroeste da Bahia. Destaca-se a área árida na Bahia, que tende a expandir para o leste, aproximando-se de Sergipe e do oeste de Alagoas, e para o norte, avançando pelo sul de Pernambuco. Em Sergipe, não houve redução do IA, ao contrário de Pernambuco, Paraíba e Alagoas, com núcleos de tendência negativa no oeste e em pontos do leste. No Rio Grande do Norte, a redução foi pontual no sul e leste, enquanto em Minas Gerais e Espírito Santo os núcleos negativos foram amplamente distribuídos e concentrados em pequenas áreas, respectivamente. A sobreposição das áreas com tendência de decréscimo ao semiárido atual revelou coincidências no oeste da Bahia e Piauí e no norte do Ceará, indicando a expansão do semiárido ao longo do tempo.

Na delimitação do semiárido, os municípios de Campo Grande, Feira Grande, Olho d'Água Grande, Porto Real do Colégio e São Brás, em Alagoas, além de Pilar e Sobrado, na Paraíba, atenderam aos critérios I e II, com exceção de Porto Real do Colégio, que se enquadraram apenas pelo critério do IA. Ressalta-se que nenhum município do estado do Maranhão nem do Espírito Santo apareceram na avaliação do critério I e II. Comparando a delimitação de 2017 com os municípios do período 4 que atenderam aos critérios, os limites ficaram mais próximos e apresentaram maior coincidência com o território do bioma Caatinga, característico do semiárido, reduzindo a inclusão de municípios presentes apenas na delimitação oficial. Na versão preliminar do Semiárido de 2021, observou-se que o critério III predominou na delimitação, destacando a necessidade de estudos mais aprofundados sobre esse critério.

Como sugestão para estudos futuros propõe-se a análise do terceiro critério para estimar a água no solo e avaliar o melhor método para essa estimativa, considerando diferentes abordagens e suas implicações nos resultados. Para aprofundar a compreensão das variáveis climáticas, a série anual pode ser dividida em períodos chuvoso e seco, ou nas estações primavera, verão, outono e inverno, permitindo a verificação das tendências das variáveis em

cada fase do ano. Além disso, é importante observar as séries de tempo nos pixels, identificando pontos de inflexão nas curvas e determinando as mudanças nos locais específicos, bem como as causas que levaram a essas alterações. O impacto das mudanças climáticas na ocorrência de eventos extremos também deve ser analisado, avaliando como essas transformações afetam a frequência e intensidade desses eventos. Por fim, o comportamento das correntes marinhas no Oceano Atlântico, que influencia as chuvas na região costeira, deve ser investigado para entender melhor sua relação com os padrões climáticos locais e a variabilidade das precipitações na região.

Ademais, o uso da terra deve ser analisado por meio de uma verificação “in loco” do tipo de vegetação característica ou de plantios, com o objetivo de relacioná-los à evapotranspiração das principais culturas. Também é fundamental avaliar as áreas e culturas irrigadas, considerando o tipo de irrigação empregado, para mensurar a evaporação decorrente e seu impacto no deflúvio. Além disso, é necessário investigar o quanto da água utilizada na agricultura e dessedentação animal provém dos aquíferos, identificando quais são os mais explorados, e, se possível, correlacionar a retirada de água subterrânea com a diminuição da vazão dos rios nas bacias em que esse processo ocorre. Uma abordagem ainda mais detalhada seria a divisão desses dados por bacia hidrográfica, em vez de uma divisão política, permitindo identificar qual bacia está sofrendo maior impacto devido às práticas de uso e ocupação do solo e a exploração dos recursos hídricos.

## REFERÊNCIAS

- ABRAM, N. J.; HENLEY, B. J.; SEN GUPTA, A.; *et al.* Conexões de mudanças climáticas e variabilidade com incêndios florestais grandes e extremos no sudeste da Austrália. *Communications Earth & Environment*, v. 2, p. 8, 2021. DOI:10.1038/s43247-020-00065-8.
- ABREU, L. P. Relâmpagos no Nordeste do Brasil: Ocorrência, Variabilidade espaço-temporal e relação com microfísica das nuvens. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências Climáticas) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.
- ABREU, L. P.; MUTTI, P. R.; LIMA, K. C. Variabilidade espacial e temporal da precipitação na bacia hidrográfica do Rio Parnaíba, Nordeste do Brasil. *Repositório UFRN*, v. 7, n. 2, 2019.
- AGBO, E. P.; EKPO, C. M. Trend analysis of the variations of ambient temperature using Mann-Kendall test and Sen's estimate in Calabar, southern Nigeria. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1734, n. 1, p. 012016, 2021.
- ALEXANDER, L. V. Global observed long-term changes in temperature and precipitation extremes: A review of progress and limitations in IPCC assessments and beyond. *Weather and Climate Extremes*, v. 11, p. 4-16, 2016.
- ALES - ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. Municípios do ES poderão compor região semiárida do país. 2015. Disponível em: <https://www.al.es.gov.br/Noticia/2015/12/29747/municipios-do-es-poderao-compor-regiao-semiarida-do-pais.html>. Acesso em: 25 dez. 2024.
- AMORIM, A. C. B.; LUCIO, P. S.; SILVA, C. M. S. E.; RODRIGUES, D. T.; BRITO, F. A. D. Regionalização e análise da tendência da precipitação do Rio Grande do Norte associados a padrões de TSM. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, n. 2, p. 269-280, 2020.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Portal HIDROWEB. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 9 jun. 2024.
- ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. A importância relativa do Atlântico Tropical Sul e Pacífico Leste na variabilidade de precipitação do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 22, p. 63-74, 2007.
- ARAÚJO, E. L. Estresses abióticos e bióticos como forças modeladoras da dinâmica de populações vegetais da caatinga. *Estresses Ambientais - Danos ou Benefícios em Plantas*, v. 1, p. 50-64, 2005.
- ARORA, M.; GOEL, N. K.; SINGH, P. Evaluation of temperature trends over India/ Evaluation de tendances de temperature en Inde. *Hydrological Sciences Journal*, v. 50, p. 81–93, 2005.
- ASSIS, J. M. O.; SOUZA, W. M.; SOBRAL, M. C. M. Climate analysis of the rainfall in the lower-middle stretch of the São Francisco river basin based on the rain anomaly index. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 2, p. 188-202, 2015.

BALMACEDA-HUARTE, R.; OLMO, M. E.; BETTOLLI, M. L.; POGGI, M. M. Evaluation of multiple reanalyses in reproducing the spatio-temporal variability of temperature and precipitation indices over southern South America. *International Journal of Climatology*, v. 41, n. 12, p. 5572-5595, 2021.

BARROS, A. H. C.; DE ARAÚJO FILHO, J. C.; DA SILVA, A. B.; SANTIAGO, G. A. C. F. Climatologia do estado de Alagoas. Embrapa, 2012.

BARROS, G. V. P.; CRUZ, M. A. S.; SILVA, A. A. G.; AMORIM, J. R. A.; NASCIMENTO, P. S. R. Análise comparativa das precipitações diárias interpoladas e dados de estações na região dos tabuleiros costeiros. *XI Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe*, Sergipe, 2018.

BRASIL. Decreto-Lei n.º 9.857, de 13 de setembro de 1946. Dispõe sobre a modificação no plano systemático da defesa contra os efeitos das secas nos Estados do Norte. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 13 set. 1946. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto-lei/1937-1946/del9857.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1937-1946/del9857.htm). Acesso em: 21 jun. 2024.

BRASIL. Decreto-Lei n.º 63.778, de 11 de dezembro de 1968. Dispõe sobre a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), Polígono Das Secas. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 11 dez. 1968. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/norma/486410/publicacao/15669947>. Acesso em: 21 jun. 2024.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Cidades e Estados: Alagoas. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/al/>. Acesso em: 2 jun. 2024.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Recursos naturais e meio ambiente: uma visão do Brasil. *Anuário Estatístico*, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1993.

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Sobre o INMET. 2024a. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/sobre>. Acesso em: 9 jun. 2024.

BRASIL. Lei n.º 175, de 7 de janeiro de 1936. Dispõe sobre o plano systemático da defesa contra os efeitos das secas nos Estados do Norte. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 7 jan. 1936. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/1930-1949/1175.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1930-1949/1175.htm). Acesso em: 21 jun. 2024.

BRASIL. Lei n.º 1.348, de 10 de fevereiro de 1951. Dispõe sobre a modificação do plano systemático da defesa contra os efeitos das secas nos Estados do Norte. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 10 fev. 1951. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/1950-1969/L4763.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/L4763.htm). Acesso em: 21 jun. 2024.

BRASIL. Lei n.º 4.763, de 30 de agosto de 1965. Dispõe sobre a inclusão, no Polígono das Secas, do município de Vitória da Conquista, no Estado da Bahia, e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 30 ago. 1965. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/11348.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/11348.htm). Acesso em: 21 jun. 2024.

BRASIL. Lei n.º 7.827, de 27 de setembro de 1989. Dispõe sobre a regulamentação do art. 159, inciso I, alínea c, da Constituição Federal, institui o Fundo Constitucional de Financiamento do Norte (FNO), o Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste (FNE) e o Fundo Constitucional de Financiamento do Centro-Oeste (FCO), e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 27 set. 1989. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/17827.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/17827.htm). Acesso em: 21 jun. 2024.

BRASIL. Lei n.º 9.984, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19984.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19984.htm). Acesso em: 9 jun. 2024.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Informação. Nota Técnica: Elaboração dos Mapas de Índice de Aridez e Precipitação Total Acumulada para o Brasil. CEMADEN e INPE, 2023. Disponível em: [https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-  
cemaden/estudo-do-cemaden-e-do-inpe-identifica-pela-primeira-vez-a-ocorrencia-de-uma-regiao-arida-no-pais/nota-tecnica\\_aridas.pdf](https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/estudo-do-cemaden-e-do-inpe-identifica-pela-primeira-vez-a-ocorrencia-de-uma-regiao-arida-no-pais/nota-tecnica_aridas.pdf). Acesso em: 26 jun. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil. Brasília: MMA, 2007.

BRASIL. Monitor de Secas. 2024. Disponível em: <https://monitordesecas.ana.gov.br/mapa?mes=5&ano=2024>. Acesso em: 23 jun. 2024.

BUDYKO, M. I. Climate and Life. Translated from Russian, by D. H. Miller. San Diego, CA: Academic, 1974. p.508.

CABRAL JÚNIOR, B.; BEZERRA, B. G. Análises da evapotranspiração de referência e do índice de aridez para o Nordeste do Brasil. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 4, n. 1, p. 71-89, 2018. DOI: 10.21680/2447-3359.2018v4n1ID14746.

CARDOSO, J. F.; SILVA, I. K. V.; LIMA, E. L. L. L.; COUTINHO, A. P. Estimativa de evapotranspiração no semiárido brasileiro. In: *III Encontro Nacional de Desastres*, 2023. Rio de Janeiro. Anais. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/jobs.php?Event=190>. Acesso em: 23 jun. 2024.

CARVALHO, A. A.; MONTENEGRO, A. A.; SILVA, H. P.; LOPES, I.; MORAIS, J. E. F.; SILVA, T. G. F. Trends of rainfall and temperature in Northeast Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 24, n. 1, p. 15-23, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n1p15-23>.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. Tempo e Clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

CEPED - Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. *1583/2012: histórico de secas no Nordeste do Brasil*. Florianópolis: CEPED, 2015. Disponível em: <http://www.ceped.ufsc.br/historico-de-secas-no-nordeste-do-brasil/>. Acesso em: 13 jun. 2024.

CHEN, Y.; FENG, Y.; ZHANG, F.; WANG, L. Assessing water resources vulnerability by using a Rough Set Cloud Model: A case study of the Huai River basin, China. *Entropy*, v. 21, n. 1, e14, 2019.

COPERNICUS, F.; STUART-SMITH, R.; HARRINGTON, L. Extreme weather impacts of climate change: an attribution perspective. *Environmental Research: Climate*, v. 1, n. 1, p. 012001, 2022.

CNM - Confederação Nacional de Municípios. Semiárido: Comissão da Câmara aprova inclusão de municípios de MG e do ES à região. 2013. Disponível em: <https://cnm.org.br/comunicacao/noticias/semi%C3%A1rido-comiss%C3%A3o-da-c%C3%A2mara-aprova-inclus%C3%A3o-de-munic%C3%ADpios-de-mg-e-do-es-%C3%A0-regi%C3%A3o>. Acesso em: dez. 2024.

CNN BRASIL. Rio Grande do Sul: entre secas e inundações, estado vive eventos extremos com sinais de mudanças climáticas. 2024. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/rio-grande-do-sul-entre-secas-e-inundacoes-estado-vive-eventos-extremos-com-sinais-de-mudancas-climaticas/>. Acesso em: 28 jun. 2024.

COPERNICUS. CLIMATE CHANGE SERVICE. Global Climate Highlights 2024. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024>. Acesso em: 12 jan. 2025.

COSTA, A. C.; SOARES, A. Trends in extreme precipitation indices derived from a daily rainfall database for the South of Portugal. *International Journal of Climatology*, v. 29, p. 1956–1975, 2009.

COSTA, J. A. O fenômeno El Niño e as secas no Nordeste do Brasil. *Revista Científica do IFAL*, v. 1, n. 4, 2012.

CUNHA, A. P. M. A. Avaliação dos impactos das mudanças dos usos e cobertura da terra no clima da região semiárida do Brasil. 181 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013.

DA SILVA, Djane Fonseca; SOUZA NETO, Pedro Fernandes de; SILVA, Sylvania Donato da; *et al.* Identificação das causas climáticas dos eventos extremos e dos impactos dos ENOS Canônico e Modoki nas macrorregiões de Alagoas. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 14, n. 4, p. 1880-1897, 2021. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p1880-1897>.

DA SILVA, F. E. L.; BEZERRA, J. A. Região e Território: um breve olhar sobre a nova delimitação do Semiárido brasileiro. *Revista Homem, Espaço e Tempo*, v. 14, n. 2, p. 66-82, 2020.

DE MARTONNE, E. Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité. *La Météorologie*, v. 2, p. 449–458, 1926.

DI NUNNO, F.; DIODATO, N.; BELLOCCHI, G.; *et al.* Evapotranspiration Analysis in Central Italy: A Combined Trend and Clustering Approach. *Climate*, v. 12, n. 5, p. 64, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/cli12050064>.

DOS PASSOS, M. M. A relação clima-vegetação no semiárido brasileiro: abordagem bioclimática do contato Caatinga/Cerrado no vale do Médio São Francisco – Semiárido do Nordeste brasileiro. *Espaço em Revista*, Goiânia, v. 22, n. 1, p. 42–60, 2020. DOI: 10.5216/er.v22i1.65877.

DOS SANTOS, S. R. Q.; CUNHA, A. P. M. A.; NETO, G. G. R. Avaliação de dados de precipitação para o monitoramento do padrão espaço-temporal da seca no nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 25, 2019.

EBC - EMPRESA BRASIL DE COMUNICAÇÃO. Situação de emergência: estiagem afeta quase 70% dos municípios de Pernambuco. *Agência Brasil*, 2016. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2016-05/situacao-de-emergencia-estiagem-afeta-quase-70-dos-municipios-de-pernambuco>. Acesso em: 30 dez. 2024.

ELZOPY, K. A.; CHATURVEDI, A. K.; CHANDRAN, K. M.; GOPINATH, G. K. N.; SURENDRAN, U. Trend analysis of long-term rainfall and temperature data for Ethiopia. *South African Geographical Journal*, v. 103, n. 3, p. 381-394, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/03736245.2020.1835699>.

FENG, Juan; LI, Jianping; LI, Yun. A monsoon-like southwest Australian circulation and its relation with rainfall in southwest Western Australia. *Journal of Climate*, v. 23, n. 6, p. 1334-1353, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2837.1>.

FERREIRA, Luanny Gabriele Cunha; KEMENES, Alexandre. A influência dos eventos climáticos extremos na climatologia da planície litorânea piauiense. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 32, p. 634-657, 2023.

FOSTER, G.; ROYER, D.; LUNT, D. Forças climáticas futuras potencialmente sem precedentes nos últimos 420 milhões de anos. *Nature Communications*, v. 8, p. 14845, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms14845>.

FRIEDLINGSTEIN, P.; O'SULLIVAN, M.; JONES, M. W.; ANDREW, R. M.; *et al.* Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data*, v. 14, n. 4, p. 1917-2005, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022>.

GULEV, S. K.; THORNE, P. W.; AHN, J.; DENTENER, F. J.; DOMINGUES, C. M.; GERLAND, S.; *et al.* Chapter 2: Changing state of the climate system. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; *et al.* (Ed.). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

HANSEN, James *et al.* Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 103, n. 39, p. 14288-14293, 2006.

HE, X.; MIAO, Z.; TIAN, J.; YANG, L.; ZHANG, Z.; ZHU, B. Temperature, precipitation and runoff prediction in the Yangtze River Basin based on CMIP 6 multi-model. *Journal of Nanjing Forestry University*, v. 48, n. 2, p. 1, 2024.

HOLENDER, B. V.; SANTOS, E. B. Análise de tendência dos eventos de precipitação intensa no sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 32, p. 584-606, 2023.

HUANG, J.; ZHANG, G.; ZHANG, Y.; GUAN, X.; WEI, Y.; GUO, R. Global desertification vulnerability to climate change and human activities. *Land Degradation & Development*, v. 31, n. 11, p. 1380–1391, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3556>.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. 2024 é o ano mais quente da série histórica no Brasil. 2025. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/2024-%C3%A9-o-ano-mais-quente-da-s%C3%A9rie-hist%C3%B3rica-no-brasil>. Acesso em: 3 jan. 2025.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability*. In: Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

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. New York: IPCC, 2014.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Pachauri, R. K.; Meyer, L. A. (Eds.). Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for policymakers. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; *et al.* (Ed.). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

JARAMILLO, P.; NAZEMI, A. Assessing urban water security under changing climate: challenges and ways forward. *Sustainable Cities and Society*, v. 41, p. 907-918, 2018.

JIN, Z.; LIANG, W.; YANG, Y.; ZHANG, W.; YAN, J.; CHEN, X.; LI, S.; MO, X. Separating vegetation greening and climate change controls on evapotranspiration trend over the Loess Plateau. *Scientific Reports*, v. 7, n. 1, p. 1-15, 2017.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Clima da região nordeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; *et al.* (Org.). *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Texto, 2009. p. 2013–234.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate Der Erde*. Gotha: Justus Perthes Verlag, 1928.

LI, Q.; SUN, W.; YAN, Z.; THORNE, P. W.; HUANG, B.; ZHENG, X.; ZHANG, L.; JONES, P.; PARKER, D. An updated evaluation of the global mean land surface air temperature and surface temperature trends based on CLSAT and CMST. *Climate Dynamics*, v. 56, p. 829–849, 2021. DOI: 10.1007/s00382-020-05502-0.

- LEMOS FILHO, L. C. D. A.; CARVALHO, L. G. D.; EVANGELISTA, A. W. P.; CARVALHO, L. M. T. D.; DANTAS, A. A. A. Spatial-time analysis of evapotranspiration reference in the Minas Gerais State, Brazil. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 31, p. 1462-1469, 2007.
- LIMA, R. G. S.; SANTOS, A. L. A.; DOS SANTOS, H. K. S.; DE SOUZA NETO, I. R.; SIQUEIRA, J. Í. P. Application of the SMAP monthly model to the Piauitinga river basin located in the State of Sergipe, Brazil. *Revista Interdisciplinar e do Meio Ambiente (RIMA)*, v. 6, n. 1, p. e236-e236, 2024.
- LIU, X.; ZHANG, D.; LUO, Y.; LIU, C. Spatial and temporal changes in aridity index in northwest China: 1960 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 112, n. 1-2, p. 307-316, 2013.
- LOMAKINA, N. Ya.; LAVRINENKO, A. V. Modern trends of temperature of the atmospheric boundary layer over Siberia. *Atmospheric and Oceanic Optics*, v. 35, n. 4, p. 378-386, 2022. DOI: 10.1134/S102485602204011X.
- MAKARIGAKIS, A. K.; JIMENEZ-CISNEROS, B. E. Unesco's contribution to face global water challenges. *Water (Switzerland)*, v. 11, n. 2, p. 1-17, 2019.
- MALIVA, R.; MISSIMER, T. Arid lands water evaluation and management. Berlin: *Environmental Science and Engineering*, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-29104-3.
- MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. *Estudos Avançados*, v. 22, p. 83-96, 2008.
- MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; BESERRA, E. A.; LACERDA, F. F. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. *Recursos Hídricos em Regiões Áridas e Semiáridas*. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2011.
- MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 129, n. 3-4, p. 1189-1200, 2017.
- MARTONNE, E. Aréisme et indice d'aridité. *Comptes Rendus de L'Academy des Sciences*, v. 182, p. 1395-1398, 1926.
- MATALLO JUNIOR, H. A desertificação no mundo e no Brasil. Brasília: UNESCO, 2003.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California: American Meteorological Society, p. 179-184, 1993.
- MEDEIROS, F. J.; LIMA, K. C.; CAETANO, D. A.; SILVA, F. J. O. Impacto da variabilidade interanual da precipitação nos reservatórios do semiárido do Nordeste do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 41, n. 3, p. 731-741, 2018.
- MEDEIROS, F. J.; OLIVEIRA, C. P.; TORRES, R. R. Climatic aspects and vertical structure circulation associated with the severe drought in Northeast Brazil (2012–2016). *Climate Dynamics*, v. 55, n. 9–10, p. 2327–2341, 2020. DOI: 10.1007/s00382-020-05385-1.

MEHTA, Darshan J.; YADAV, S. M. Long-term trend analysis of climate variables for arid and semi-arid regions of an Indian State Rajasthan. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, v. 13, n. 2, p. 191-214, 2022.

MOURTZINIS, S.; EDREIRA, J. I. R.; CONLEY, S. P.; GRASSINI, P. From grid to field: Assessing quality of gridded weather data for agricultural applications. *European Journal of Agronomy*, v. 82, p. 163-172, 2017. DOI: 10.1016/j.eja.2016.10.013.

NAGHETTINI, Mauro; PINTO, Éber José de Andrade. Hidrologia estatística. Belo Horizonte: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Superintendência Regional de Belo Horizonte, 2007. 552 p. ISBN 978-85-7499-023-0.

NASA Earth Observatory. Goddard Space Flight Centre United States. Disponível em: <[www.earthobservatory.nasa.gov](http://www.earthobservatory.nasa.gov)>. Acesso em: 26 dez. 2024.

NACSE - Northwest Alliance for Computational Science en Engineering. PRISM. Climate Group. Oregon State University. Disponível em: <http://prism.oregonstate.edu>. Acesso em: 10 jun. 2024.

NKIAKA, E.; BRYANT, R. G.; DEMBÉLÉ, M.; YONABA, R.; PRISCILLA, A. I.; KARAMBIRI, H. Quantifying the effects of climate and environmental changes on evapotranspiration variability in the Sahel. *Journal of Hydrology*, v. 642, p. 131874, 2024. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131874.

OLMEDO, E.; TURIEL, A.; GONZÁLEZ-GAMBAU, V.; GONZÁLEZ-HARO, C.; GARCÍA-ESPRIU, A.; GABARRÓ, C.; SCIPAL, K. Increasing stratification as observed by satellite sea surface salinity measurements. *Scientific Reports*, v. 12, n. 1, p. 6279, 2022.  
PALMER, W. C. Meteorological drought. *Research Paper*, n. 45, p. 1-65, 1965.

PAZ, Y. M.; GALVÍNCIO, J. D.; HOLANDA, R. M.; SRINIVASA, R.; JONES, C. A. Análise de sensibilidade e calibração espacial do modelo SWAT aplicado em uma bacia do litoral pernambucano através de dados climáticos observados e de reanálise. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 11, 2018.

PELLICONE, G.; CALOIERO, T.; MODICA, G.; GUAGLIARDI, I. Application of several spatial interpolation techniques to monthly rainfall data in the Calabria region (southern Italy). *International Journal of Climatology*, v. 39, p. 3651-3666, 2018. DOI: 10.1002/joc.5525.

RASERA, J. B.; SILVA, R. F. D.; PIEDADE, S.; MOURÃO FILHO, F. D. A. A.; DELBEM, A. C. B.; SARAIVA, A. M.; MARQUES, P. A. A. Do Gridded Weather Datasets Provide High-Quality Data for Agroclimatic Research in Citrus Production in Brazil? *AgriEngineering*, v. 5, n. 2, p. 924-940, 2023.

REBOITA, M. S.; MARRAFON, V. H. de A.; LLOPART, M.; DA ROCHA, R. P.. Cenários de mudanças climáticas projetados para o estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Climatologia*, [S. l.], v. 1, 2021. DOI: 10.5380/abclima.v1i0.60524.

REDDING, T. E.; HOPE, G. D.; FORTIN, M. J.; SCHMIDT, M. G.; BAILEY, W. G. Spatial patterns of soil temperature and moisture across subalpine forest-clearcut edges in the

southern interior of British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 83, p. 121-130, 2003.

RIBEIRO, M. E.; BERTOLIN, T. A.; MENDES, L. A.; RITA, L. C. S. S. Análises de séries hidrológicas na bacia hidrográfica afluente à usina hidrelétrica Castro Alves, RS. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n. 4, p. 2042-2058, 2021. DOI: 10.26848/rbgf.v14.4.p2042-2058.

RIBEIRO, S. K.; SANTOS, A. S. (Eds.). Mudanças climáticas e cidades: relatório especial do painel brasileiro de mudanças climáticas. Rio de Janeiro: PBMC, COPPE-UFRJ, 2016.

ROCHA JÚNIOR, R. L. D.; SILVA, F. D. D. S.; COSTA, R. L.; GOMES, H. B.; SILVA, M. C. L. D.; PITA-DÍAZ, O. Mudança de longo prazo e regionalização da evapotranspiração de referência no Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, n. spe, p. 891-902, 2020.

ROOY, M. P. V. A rainfall anomaly index independent of time and space. *Notos*, v. 14, p. 43-48, 1965.

SANZHEEV, E. D.; MIKHEEVA, A. S.; OSODOEV, P. V.; BATOMUNKUEV, V. S.; TULOKHONOV, A. K. Theoretical approaches and practical assessment of socio-economic effects of desertification in Mongolia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 11, p. 4068, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17114068>.

SANTOS, C. A. C.; MARIANO, D. A.; NASCIMENTO, F. C. A.; DANTAS, F. R. C.; OLIVEIRA, G.; SILVA, M. T.; SILVA, L. L.; SILVA, B. B.; BEZERRA, B. G.; SAFA, B.; MEDEIROS, S. S.; NEALE, C. M. U. Spatio-temporal patterns of energy exchange and evapotranspiration during an intense drought for drylands in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 85, p. 101982, 2020.

SANTOS, D. N. D.; SILVA, V. D. P.; SOUSA, F. D. A.; SILVA, R. A. Estudo de alguns cenários climáticos para o Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, p. 492-500, 2010.

SANTOS, J.; JUSTINO, F.; RODRIGUES, J. Impact of precipitation extremes on energy production across the São Francisco river basin, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, p. 1-18, 2024.

SEI - SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. SEI analisa impactos da seca no estado da Bahia nos anos de 2016 e 2017. 2024. Disponível em: [https://sei.ba.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2465:sei-analisa-impactos-da-seca-no-estado-da-bahia-nos-anos-de-2016-e-2017&catid=10&Itemid=565&lang=pt](https://sei.ba.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=2465:sei-analisa-impactos-da-seca-no-estado-da-bahia-nos-anos-de-2016-e-2017&catid=10&Itemid=565&lang=pt). Acesso em: 30 dez. 2024.

SHIMIZU, M. H.; ANOCHI, J. A.; KAYANO, M. T. Precipitation patterns over northern Brazil basins: climatology, trends, and associated mechanisms. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 147, p. 767-783, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03841-4>.

SILVA, F. D. S.; COSTA, R. L.; ANTONIO, M. A. V.; AFONSO, E. O.; SANTOS, D. M.; MATEUS, N. P. A.; ANTONIO, J. F. Tendências observadas da evapotranspiração potencial

no estado de Alagoas (1961-2016). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 11, n. 1, p. 28-43, 2018.

SILVA, F. J. B. C. da; AZEVEDO, J. R. G. de. Tendência temporal dos índices de seca e de aridez no semiárido pernambucano para determinação da susceptibilidade a desertificação. *RBRH*, v. 25, p. e32, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190145>.

SILVA, L. A. P. D.; SILVA, C. R. D.; SOUZA, C. M. P. D.; BOLFE, É. L.; SOUZA, J. P. S.; LEITE, M. E. Mapping of aridity and its connections with climate classes and climate desertification in future scenarios—Brazilian semi-arid region. *Sociedade & Natureza*, v. 35, p. e67666, 2023.

SILVA, L. R. S. Monitoramento hidrometeorológico no Brasil: uma análise sob a ótica da coordenação de políticas públicas. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 18, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21168/reg.v18e3>.

SILVA, P. E.; SILVA, C. M. S.; SPYRIDES, M. H. C.; ANDRADE, L. M. B. Análise de índices de extremos climáticos no Nordeste e Amazônia Brasileira para o período entre 1980 a 2013. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 42, p. 137-148, 2019. DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2019\\_2\\_137\\_148](http://dx.doi.org/10.11137/2019_2_137_148).

SOUZA, T. P. de. Uso de base de dados hidrológicos especializada em alta resolução para estudo de indicadores climáticos em Sergipe. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil, 2023.

SUDENE - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Delimitação do semiárido brasileiro: critérios técnicos e resultados do estudo de atualização. Recife: Sudene, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/02semiariadorelatorionv.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2025.

SUDENE - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Nova delimitação do semiárido: relatório técnico preliminar. Recife: Sudene, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/02semiariadorelatorionv.pdf>. Acesso em: 25 dez. 2024.

SWAIN, S.; MISHRA, S. K.; PANDEY, A.; DAYAL, D.; SRIVASTAVA, P. K. Appraisal of historical trends in maximum and minimum temperature using multiple non-parametric techniques over the agriculture-dominated Narmada Basin, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 194, n. 12, p. 893, 2022.

TIMMERMANN, A.; AN, S. I.; KUG, J. S.; JIN, F. F.; CAI, W.; CAPOTONDI, A.; COLLINS, M.; FELDSTEIN, S.; GUZZI, R.; HARRISON, D. E.; LATIF, M.; MCGRATH, R.; RICHMAN, J.; THUAL, S.; WEBSTER, P.; YEH, S. W.; ZHANG, X. El Niño-Southern Oscillation complexity. *Nature*, v. 559, p. 535-545, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0252-6>.

THORNTON, M. M.; SHRESTHA, R.; WEI, Y.; THORNTON, P. E.; KAO, S.; WILSON, B. E. Daymet: daily surface weather data on a 1-km grid for North America, Version 4. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2022.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948. DOI: <http://dx.doi.org/10.2307/210739>.

THORNTHWAITE, C. W.; HOLZMAN, B. Evaporation and transpiration. In: *Climate and Man: Yearbook of Agriculture - 1941*. Washington D.C.: U.S. Department of Agriculture, p. 545-550, 1941.

TRENBERTH, K.; DAI, A.; VAN DER SCHRIER, G.; JONES, P. D.; BARICHIVICH, J.; BRIFFA, K. R.; SHEFFIELD, J. Aquecimento global e mudanças na seca. *Nature Climate Change*, v. 4, p. 17–22, 2014. DOI: 10.1038/nclimate2067.

TRENBERTH, Kevin E. Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, v. 47, n. 1-2, p. 123-138, 2011.

TUCCI, C. E. M. (Org.). Hidrologia: Ciência e aplicação. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2004.

TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. ABRHidro, 2005.

UNESCO. Map of the World Distribution of Arid Regions. *Explanatory Note, Man and Biosphere MAB*. 1979.

WANG, Q.; SUN, Y.; GUAN, Q.; DU, Q.; ZHANG, Z.; ZHANG, J.; ZHANG, E. Exploring future trends of precipitation and runoff in arid regions under different scenarios based on a bias-corrected CMIP6 model. *Journal of Hydrology*, v. 630, p. 130666, 2024.

WEI, T.; YANG, S.; MOORE, J. C.; SHI, P.; CUI, X.; DUAN, Q.; XU, B.; DAI, Y.; YUAN, W.; WEI, X.; *et al.* Developed and developing world responsibilities for historical climate change and CO<sub>2</sub> mitigation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, v. 109, p. 12911–12915, 2012.

WMO - World Meteorological Organization. *International Meteorological Vocabulary*, 2nd ed. Geneva: WMO, 1992.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCALON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). *International Journal of Climatology*, v. 36, p. 2644-2659, 2016. DOI: 10.1002/joc.4518.

XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). *International Journal of Climatology*, p. 1-15, 2022. DOI: 10.1002/joc.7731.

YAO, J.; YANG, Q.; MAO, W.; ZHAO, Y.; XU, X. Precipitation trend–Elevation relationship in arid regions of the China. *Global and Planetary Change*, v. 143, p. 1-9, 2016.

ZARCH, M. A. S.; HANEL, M.; MAHMOODI, M.; VÁCLAVÍK, T.; PECHAROVÁ, E. Future aridity under conditions of global climate change. *Journal of Hydrology*, v. 554, p. 451–469, 2017. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.08.043.

ZHEN-SHAN, Lin; XIAN, Sun. Multi-scale analysis of global temperature changes and trend of a drop in temperature in the next 20 years. *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 95, n. 1, p. 115-121, 2007.

ZHOU, S.; WILLIAMS, A. P.; LINTNER, B. R.; BERG, A. M.; ZHANG, Y.; KEENAN, T. F.; GENTINE, P. Soil moisture–atmosphere feedbacks mitigate declining water availability in drylands. *Nature Climate Change*, v. 11, n. 1, p. 38–44, 2021.

ZHANG, Y.; MOGES, S.; BLOCK, P. Optimal cluster analysis for objective regionalization of seasonal precipitation in regions of high spatial-temporal variability: application to Western Ethiopia. *Journal of Climate*, v. 29, n. 10, p. 3697-3717, 2016.