

Vanessa Karoline Inacio Gomes

**Análise de tendências de índices de mudanças climáticas
na precipitação do estado de Pernambuco**

Recife

27 de fevereiro de 2023



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA

**Análise de tendências de índices de mudanças climáticas na precipitação do estado
de Pernambuco**

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 27/02/2023 pela comissão examinadora.

**Área de concentração: Biometria e
Estatística Aplicada**

**Orientador: Dr. Antonio Samuel Alves
da Silva**

Coorientadora: Dra. Tatijana Stosic

Recife

27 de fevereiro de 2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G633a

Gomes, Vanessa Karoline Inacio

Análise de tendências de índices de mudanças climáticas na precipitação do estado de Pernambuco / Vanessa Karoline Inacio Gomes. - 2023.

64 f. : il.

Orientador: Antonio Samuel Alves da Silva.

Coorientadora: Tatijana Stosic.

Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada, Recife, 2023.

1. Mudanças climáticas. 2. Índices climáticos extremos. 3. Tendência climática. 4. Precipitação. 5. Pernambuco. I. Silva, Antonio Samuel Alves da, orient. II. Stosic, Tatijana, coorient. III. Título

CDD 519.5

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA

**Análise de tendências de índices de mudanças climáticas na precipitação do estado
de Pernambuco**

Vanessa Karoline Inacio Gomes

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 27/02/2023 pela comissão examinadora.

Orientador:

Prof. Dr. Antonio Samuel Alves da Silva
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Banca examinadora:

Profa. Dra. Tatijana Stosic
Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

Prof. Dr. André Luiz de Carvalho
Universidade Federal de Alagoas – UFAL

*Gratidão a Deus por me iluminar durante todos os momentos
e a minha família por todo amor e apoio.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por me permitir realizar tantos sonhos, a Ti devo todas as minhas vitórias. Obrigada por sempre iluminar e direcionar os meus caminhos!

Aos meus pais, Antonio Luiz Gomes e Maria Inacio da Silva por todo amor, carinho e dedicação. Obrigada por acreditarem em mim, me incentivando a ir em busca dos meus objetivos.

A minha irmã Andressa Karine Inacio Gomes, obrigada pelo amor, paciência e pelo incentivo diário. A Eduardo Bezerra Cavalcante Júnior, obrigada por todo companheirismo e amor durante todas as etapas e aos demais familiares por todas as palavras de apoio, minha eterna gratidão.

Aos meus amigos, por todo o apoio e palavras de incentivo. Em especial, a Cáren Beatriz dos Santos Félix da Silva e Jessica de Souza Santos, obrigada por sempre estarem disponíveis a me ouvir, me animar e me encorajar com palavras de carinho.

Agradeço em especial ao meu orientador professor Antonio Samuel Alves da Silva por todo apoio, sempre disponível e disposto a ajudar. Obrigada por toda paciência, pela oportunidade que me foi dada e por tudo que aprendi, obrigada por tudo!

Ao professor Dâmocles Aurélio Nascimento da Silva Alves por todo o incentivo desde a graduação, acreditando no meu potencial.

Agradeço a banca examinadora por disponibilizar de tempo e dedicação a leitura deste trabalho para melhorar a minha formação acadêmica.

Agradeço a Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE e ao Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada - PPGBEA por desenvolver o ideal de formação do pesquisador e dar apoio acadêmico ao longo do curso. Em especial, agradeço a todo corpo docente por todos os ensinamentos que levarei sempre comigo.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo auxílio financeiro.

Por fim, a todos os que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento desta dissertação, os meus sinceros agradecimentos.

*“Consagre ao Senhor tudo o que você faz,
e os seus planos terão bom êxito”.
(Bíblia Sagrada, Provérbios 16, 3)*

Resumo

Numerosos estudos mostram que o aumento da temperatura média do planeta faz com que o ciclo hidrológico se intensifique. Isso poderia ocasionar mudanças nos padrões de chuva, como o aumento da frequência e intensidade de eventos extremos resultando em secas severas e prolongadas em algumas localidades e chuvas excessivas em outras, o que impactaria significativamente a disponibilidade hidrológica de uma região e a qualidade de vida de seus habitantes. Desta forma, se faz necessário estudar a variabilidade e os impactos das mudanças climáticas, possibilitando um melhor conhecimento climático da área para direcionar ações de adaptação e mitigação a essas condições climáticas. Nesse contexto, o presente trabalho objetivou analisar as tendências e magnitudes de 11 índices climáticos extremos recomendados pela *Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices* para o estado de Pernambuco. Para isso, foram utilizados 809 pontos de grade, os quais contém informações a respeito da chuva diária no período de 1961 a 2020 e foram empregados três métodos não paramétricos: o teste de Mann-Kendall para detecção de tendências, o *sen's slope* para estimativa da magnitude da tendência e o teste de Mann-Whitney-Wilcoxon para avaliar se existem diferenças significativas nos valores dos índices de cada região de Pernambuco: Zona da Mata, Agreste e Sertão. Além disso, foi utilizado o interpolador *Inverse Distance Weighting* para realizar a análise espacial da precipitação e dos índices climáticos. Os resultados indicaram uma intensificação da seca em grande parte do estado, com reduções significativas da precipitação total anual, dos dias consecutivos úmidos e aumento dos dias consecutivos secos. As tendências evidenciaram a aceleração no processo de desertificação da região do Sertão, que faz parte do semiárido do Nordeste e já sofre com chuvas escassas e mal distribuídas. Em relação a Zona da Mata, os índices de chuvas extremas apresentaram aumentos significativos, alertando para os desastres naturais que acometem esta região. Já a região Agreste apresentou resultados semelhantes a Zona da Mata, com menor intensidade. Com base nos resultados obtidos é possível inferir que a área de estudo tende a se tornar mais seca, com as chuvas cada vez mais concentradas em períodos de tempo mais curtos, e os períodos de seca intercalados entre esses eventos de chuva estão se tornando mais longos.

Palavras-chaves: Mudanças climáticas, índices climáticos extremos, tendência climática, precipitação, Pernambuco.

Abstract

Many studies shown that the increase in the planet's average temperature causes the hydrological cycle to intensify. This could cause changes in rainfall patterns, such as an increase in the frequency and intensity of extreme events resulting in severe and prolonged droughts in some locations and excessive rainfall in others, which would significantly impact the hydrological availability of a region and the quality of life of its inhabitants. Thus, it is necessary to study the variability and impacts of climate change, enabling a better understanding of the area's climate in order to adapt and mitigate these climatic conditions. In this context, the present work aimed to analyze the trends and magnitudes of 11 extreme weather indices recommended by the *Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices* for the state of Pernambuco. For this, 809 grid points were used, which contain information regarding daily rainfall from 1961 to 2020 and three non-parametric methods were employed: the Mann-Kendall test for trend detection, sen's slope for estimating the magnitude of the trend, and the Mann-Whitney-Wilcoxon test to assess whether there are significant differences in the index values for each region of Pernambuco: Zona da Mata, Agreste, and Sertão. In addition, the *Inverse Distance Weighting* interpolator was used to perform the spatial analysis of precipitation and extreme weather indices. The results indicated an intensification of drought over much of the state, with significant reductions in total annual precipitation, consecutive wet days, and an increase in consecutive dry days. The trends show an acceleration in the desertification process in the Sertão region, which is part of the semi-arid Northeast and already suffers from scarce and poorly distributed rainfall. In relation to the Zona da Mata, the extreme rainfall indices showed significant increases, alerting us to the natural disasters that affect this region. The Agreste region showed similar results to the Zona da Mata, but with less intensity. Based on the results obtained it is possible to infer that the study area tends to become drier, with rainfall increasingly concentrated in shorter periods of time, and the dry periods interspersed between these rainfall events are becoming longer.

Key-words: Climate change, extreme weather indices, climatic trend, precipitation, Pernambuco.

Lista de Figuras

Figura 1 – Localização geográfica do estado de Pernambuco, Brasil, e a distribuição espacial dos pontos de grade estudados.	19
Figura 2 – Distribuição espacial da precipitação média anual de Pernambuco no período de 1961 a 2020.	27
Figura 3 – Acúmulo de chuva anual (1961-2020) para as três regiões de Pernambuco: Sertão (a) , Agreste (b) e Zona da Mata (c)	28
Figura 4 – Médias de chuvas mensais (1961-2020) para as três regiões de Pernambuco.	29
Figura 5 – Médias anuais dos índices climáticos extremos interpoladas para a área de estudo: R10mm (a) , R20mm (b) , R25mm (c) , CDD (d) e CWD (e)	30
Figura 6 – Médias anuais dos índices climáticos extremos interpoladas para a área de estudo: PRCPTOT (a) , Rx1day (b) , Rx5day (c) , R95p (d) , R99p (e) e SDII (f)	30
Figura 7 – Boxplots para os valores dos índices climáticos. Os símbolos “*”, “**”, “***” e “****” indicam que há uma diferença significativa entre as regiões ao nível de significância de 5%, 1%, 0,1% e 0,01%, respectivamente; “ns” significa não significativo: R10mm (a) , R20mm (b) , R25mm (c) , CDD (d) e CWD (e)	33
Figura 8 – Boxplots para os valores dos índices climáticos. Os símbolos “*”, “**”, “***” e “****” indicam que há uma diferença significativa entre as regiões ao nível de significância de 5%, 1%, 0,1% e 0,01%, respectivamente; “ns” significa não significativo: PRCPTOT (a) , Rx1day (b) , Rx5day (c) , R95p (d) , R99p (e) e SDII (f)	33
Figura 9 – Distribuição espacial da tendência dos índices climáticos sobre o estado de Pernambuco, ao nível de significância de 0,05. Os triângulos preenchidos indicam tendências significativas, obtidas pelo teste de Mann-Kendall; PRCPTOT (a) , Rx1day (b) , Rx5day (c) , R95p (d) , R99p (e) e SDII (f)	35
Figura 10 – Distribuição espacial da tendência dos índices climáticos sobre o estado de Pernambuco, ao nível de significância de 0,05. Os triângulos preenchidos indicam tendências significativas, obtidas pelo teste de Mann-Kendall; R10mm (a) , R20mm (b) , R25mm (c) , CDD (d) e CWD (e)	36

Figura 11 – Percentual de tendências significativas para cada índice climático no estado de Pernambuco: PRCPTOT (a), Rx1day (b), Rx5day (c), R95p (d), R99p (e) e SDII (f).	37
Figura 12 – Percentual de tendências significativas para cada índice climático no estado de Pernambuco: R10mm (a), R20mm (b), R25mm (c), CDD (d) e CWD (e).	38
Figura 13 – Distribuição espacial do sen's slope interpolada para o estado de Pernambuco: PRCPTOT (a), Rx1day (b), Rx5day (c), R95p(d), R99p (e) e SDII (f).	41
Figura 14 – Distribuição espacial do sen's slope interpolada para o estado de Pernambuco: R10mm (a), R20mm (b), R25mm (c), CDD (d) e CWD (e).	42

Lista de tabelas

Tabela 1 – Índices climáticos extremos de precipitação.	22
---	----

Lista de abreviaturas e siglas

AB	Alta da Bolívia
ANA	Agência Nacional de Águas
AR4	<i>Fourth Assesment Report</i> , Quarto Relatório de Avaliação (IPCC)
AR5	<i>Fifth Assesment Report</i> , Quinto Relatório de Avaliação (IPCC)
AR6	<i>Sixth Assesment Report</i> , Sexto Relatório de Avaliação (IPCC)
BR-DWGD	<i>Brazilian Daily Weather Gridded Data</i>
CDD	Dias Consecutivos Secos
CO ₂	Dióxido de Carbono
CWD	Dias Consecutivos Úmidos
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
ENSO	El Niño Oscilação Sul
ETCCDMI	<i>Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices</i>
GIS	Sistema de Informação Geográfica
Hidroweb	Sistemas de Informações Hidrológicas
IDW	<i>Inverse Distance Weighting</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
NEB	Nordeste do Brasil
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PRCPTOT	Precipitação Total Anual em Dias Úmidos

R10mm	Contagem anual de dias com precipitação igual ou superior a 10mm
R20mm	Contagem anual de dias com precipitação igual ou superior a 20mm
R25mm	Contagem anual de dias com precipitação igual ou superior a 25mm
R95p	Precipitação anual que excedeu o percentil 95
R99p	Precipitação anual que excedeu o percentil 99
Rx1day	Precipitação máxima mensal em um dia
Rx5day	Precipitação máxima mensal consecutiva em cinco dias
SDII	Precipitação média em dias úmidos
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
VCAN	Vórtice Ciclônico de Alto Nível
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

Sumário

1	Introdução	1
2	Objetivos	4
2.1	Objetivo Geral	4
2.2	Objetivos Específicos	4
3	Revisão de Literatura	5
3.1	Clima no Brasil, no Nordeste e em Pernambuco	5
3.2	Mudanças Climáticas	7
3.3	Variabilidade Climática	8
3.3.1	Variabilidade Sazonal e Intrasazonal	9
3.3.2	Variabilidade Interanual	10
3.4	Índices de Detecção de Mudanças Climáticas	11
3.5	Tendências Climáticas	14
3.6	Interpolação Espacial	15
4	Metodologia	17
4.1	Área de estudo	17
4.2	Dados	18
4.3	Índices Climáticos Extremos	19
4.4	Testes estatísticos	22
4.4.1	Teste de Mann-Kendall	22
4.4.2	Sen's slope	23
4.4.3	Teste de Mann-Whitney-Wilcoxon	24
4.5	Inverse Distance Weighting	25
5	Resultados	27
5.1	Precipitação no estado de Pernambuco	27
5.2	Análise dos índices climáticos extremos	29
5.3	Magnitude e tendência dos índices climáticos extremos	35
6	Conclusão	44
	Referências Bibliográficas	46

1 Introdução

As mudanças climáticas se tornaram um tema bastante discutido entre pesquisadores nos últimos anos, principalmente no que se refere a um possível aumento de eventos de precipitações intensas. O conhecimento da variabilidade espaço temporal, bem como de eventos climáticos extremos é um fator determinante, uma vez que podem impactar negativamente diversos segmentos socioeconômicos de uma localidade, além de poder levar a desastres naturais (REIS et al., 2020).

Eventos climáticos extremos relacionados a precipitação pluviométrica, como déficit ou excesso de chuvas, foram observados em muitos países tropicais. Projeções futuras associadas aos impactos das mudanças climáticas apontam que estes eventos ocorrerão em grande proporção ao longo deste século podendo causar inundações e secas mais severas em diversas partes do planeta (MARENGO et al., 2007). Desta forma, se faz necessário compreender os problemas oriundos das mudanças do clima e os possíveis impactos e, posteriormente, empreender ações de adaptação e mitigação.

Silva, Montenegro e Souza (2017) afirmam que, uma das questões mais importantes relacionadas a estes eventos climáticos é se sua ocorrência está aumentando ou diminuindo com o tempo, isto é, se há uma tendência de acontecerem. Diante disso, a análise de tendências climáticas é de grande valia para apontar modificações nas variáveis meteorológicas. Essa análise permite observar mudanças de comportamento e definir em quais regiões uma determinada variável vem experimentando mudanças ao longo do tempo, possibilitando a avaliação das suas consequências (SILVA et al., 2019).

Para melhor analisar as tendências das mudanças climáticas, a Organização Meteorológica Mundial (OMM), através do grupo *Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices* (ETCCDMI), desenvolveu índices de detecção de mudanças do clima baseados na precipitação e na temperatura. Esses índices fornecem não apenas uma visão ampla de todos os totais de precipitação, mas também uma descrição detalhada da frequência e intensidade de eventos extremos ao longo do ano (ZHANG; YANG, 2004).

Ao analisar as mudanças climáticas sobre o Nordeste do Brasil (NEB) é importante verificar os processos que influenciam o padrão das distribuições pluviométricas, tanto espacial quanto temporal. Diversos fatores podem contribuir para explicar a alta variabilidade da precipitação nesta região. Dentre eles, podem ser citados a migração e intensidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que está associada a variação sazonal, e a flutuação nos valores de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Oceano Pacífico Tropical e do Atlântico, que estão relacionados a conseqüente variações na precipitação

(MARENGO; TORRES; ALVES, 2017).

Para o estado de Pernambuco, localizado na Zona Leste do NEB, a precipitação é uma das variáveis meteorológicas mais importantes, sua variabilidade espaço temporal é determinante para caracterizar o clima local. Nesse contexto, a variabilidade é oriunda da diversificação geográfica e à proximidade com o Oceano Atlântico, apresentando um clima definido como tropical úmido e semiárido, em função da morfologia do estado e, especialmente, por causa da atmosfera ativa dos sistemas esféricos (JARDIM et al., 2021).

O monitoramento adequado dos fatores que influenciam os impactos da variabilidade climática no estado de Pernambuco assume uma significativa importância, visto que, diversas áreas do estado se tornam vulneráveis a graves déficit hídricos, condições semiáridas e inundações. A conscientização e o monitoramento dessas condições contribuem expressamente para uma maior eficiência nas decisões governamentais e para a melhoria da qualidade de vida da população.

O NEB está entre as regiões mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas, visto que, enfrenta graves problemas relacionados a eventos extremos, pois possui um clima semiárido caracterizado por uma alta variabilidade sazonal e interanual de precipitação (SILVA et al., 2020). Em geral, esses eventos estão associados à variabilidade El Niño e La Niña, sendo os eventos El Niño frequentemente associados à ocorrência de secas e La Niña ao excesso de chuvas (CAI et al., 2020).

Alguns trabalhos referentes a análise de eventos climáticos para Pernambuco foram desenvolvidos para alguns locais ou regiões específicas (SILVA; MONTENEGRO; SOUZA, 2017; ASSIS et al., 2021). Autores como Penereiro e Meschiatti (2018), encontraram uma tendência não significativa para a precipitação anual de Pernambuco, no entanto, a análise foi realizada em escala nacional considerando um número limitado de estações meteorológicas. Além disso, os autores ressaltaram que para algumas cidades foram apresentadas falhas nas séries de dados.

Um dos métodos de obtenção dos dados de precipitação pluviométrica é através de estações meteorológicas convencionais, no entanto, este método não contempla uma ampla área de informações, fornecendo valores não representativos para grandes áreas e frequentemente sujeitos a falhas que limitam o seu uso. Desta forma, a utilização de dados estimados via satélite ou através de modelos tornou-se uma alternativa para suprir as falhas e dificuldades na obtenção de dados. Para isso, muitas vezes são utilizados bancos de dados desenvolvidos por diversos autores, entre os quais se destaca o *Brazilian Daily Weather Gridded Data* (BR-DWGD) que foi desenvolvido por Xavier et al. (2022). Neste trabalho, os autores desenvolveram uma grade de alta resolução referente a cinco variáveis meteorológicas (precipitação, vento, temperatura máxima e mínima, umidade relativa do

ar e potencial de evapotranspiração) para todo o território do Brasil.

Diante do exposto, é necessário ressaltar a importância de estudos dessa natureza para o estado de Pernambuco, sobretudo em razão das poucas pesquisas realizadas e das falhas apresentadas em seus dados. Nesse contexto, este estudo tem a finalidade de analisar, de forma mais abrangente, as tendências dos índices climáticos extremos recomendados pela ETCCDMI. Para isso, utilizou-se os dados de precipitação diária presentes no BR-DWGD, possibilitando assim um melhor conhecimento climático da área, além de estimular o desenvolvimento de ações de adaptação e mitigação em relação aos impactos das mudanças climáticas no estado.

2 Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Analisar a presença de possíveis tendências climáticas em dados de precipitação, por meio de uma grade de alta resolução, desenvolvida por [Xavier et al. \(2022\)](#), para o período de 1961 a 2020 no estado de Pernambuco, Brasil.

2.2 Objetivos Específicos

- Calcular índices climáticos para caracterização do comportamento da precipitação no estado ao longo do período estudado.
- Aplicar testes estatísticos com o intuito de identificar tendências e padrões espaciais dos índices climáticos, avaliando sua significância e magnitude.
- Avaliar se a precipitação no estado mostra padrões de variabilidade e identificar possíveis causas para as mudanças climáticas observadas.
- Realizar comparações entre os resultados dos índices de cada região de Pernambuco com o intuito de avaliar se existem diferenças significativas entre seus valores.

3 Revisão de Literatura

3.1 Clima no Brasil, no Nordeste e em Pernambuco

O Brasil situa-se, em grande parte, na faixa intertropical, caracterizado por um clima tropical com temperaturas elevadas e chuvas, principalmente no verão. Contudo, a ação de diversos fatores climáticos, como a altitude, latitude, massa de ar, influenciam muito nesta caracterização, apresentando uma grande variedade de tipos climáticos (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2017). Dessa forma, tem-se áreas com chuvas abundantes durante todo o ano e outras onde há secas severas.

O país é dividido em cinco regiões: Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sul e Sudeste. A região Sul é caracterizada por um clima subtropical, onde a temperatura média anual é de 18°C. Esta região apresenta invernos mais frios e verões mais quentes e a precipitação distribui-se por todos os meses do ano, independente da estação, ocorrendo com maior intensidade no verão. Já o clima predominante da região Sudeste é o tropical, com temperatura média anual de 21°C. Esta região é caracterizada por invernos secos em virtude da ocorrência de chuvas frontais leves e por verões úmidos, os quais apresentam totais anuais de 1200mm a 2000mm (CAVALCANTI, 2016).

Em relação a região Centro-Oeste prevalece o clima tropical semiúmido, com invernos secos e um verão muito quente e chuvoso; a temperatura varia entre 15°C e 24°C. Já o Norte do Brasil apresenta um clima quente e úmido denominado equatorial, com temperaturas médias anuais entre 25°C e 27°C. Ao longo de todo o ano verificam-se intensas e numerosas chuvas que apresentam valores anuais superiores a 2000mm (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2017).

Já o Nordeste do Brasil (NEB) caracteriza-se por apresentar condições climáticas distintas em todo o seu território, apresentando três tipos de clima: tropical, semiárido e tropical úmido. Esta região apresenta distribuição espacial dos totais de precipitação média anual entre 300mm e 2000mm e temperatura média anual entre 24°C e 28°C. As temperaturas também são altas no sertão nordestino, acompanhadas por um período seco. As chuvas no sertão duram, em média, dois meses no ano, além de que algumas áreas passam por longos períodos de estiagem, onde os níveis de precipitação são inferiores a 1000mm. (CAVALCANTI, 2016; MARENGO; TORRES; ALVES, 2017).

Essa variedade de climas no NEB se deve a atuação de diversos sistemas atmosféricos

responsáveis pela distribuição das precipitações na região, como a zona de convergência intertropical, o vórtico ciclônico troposférico superior, os distúrbios de ondas leste, linhas de instabilidade, sistemas frontais e a zona de convergência do Atlântico Sul (OLIVEIRA; SILVA; LIMA, 2017).

Além disso, o NEB apresenta acentuada variabilidade interanual, principalmente referente às chuvas, com alguns anos extremamente secos e outros extremamente chuvosos. Os eventos extremos de chuvas e secas estão associados a fenômenos climáticos como El Niño Oscilação Sul (ENSO) e gradiente meridional de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) (LUCENA et al., 2018).

Pernambuco localiza-se no leste do NEB e apresenta condições climáticas diversificadas em virtude da sua posição geográfica, vegetação e topografia. Neste contexto, o clima é caracterizado como tropical úmido (na faixa litorânea) e semiárido (predominante no interior) em consequência da morfologia do estado e, principalmente, pela atuação dos sistemas atmosféricos ativos (JARDIM et al., 2021; SILVA et al., 2021). Além disso, existem fenômenos climáticos que interferem na variabilidade e na dinâmica dos biomas locais, por exemplo, o ENSO e TSM (ERFANIAN; WANG; FOMENKO, 2017; FILHO et al., 2019).

O estado é dividido em três regiões geográficas: Zona da Mata, Agreste e Sertão. A Zona da Mata apresenta um clima tropical úmido, com temperatura média anual de 25°C, com grande pluviosidade no outono e inverno, devido a sua proximidade com o oceano Atlântico (SILVA et al., 2020). O Agreste se trata de uma zona de transição entre a Zona da Mata e o Sertão, onde a Mata Atlântica mistura-se com a Caatinga (SANTOS et al., 2007). A chuva nesta região é irregular, se concentrando em poucos meses do ano, com temperatura média anual de 23°C. Já o Sertão ocupa a parte central e oeste do estado caracterizado por um clima semiárido com temperatura média anual entre 25°C e 30°C e chuvas irregulares (ASSIS et al., 2021).

Silva et al. (2020) analisaram a variabilidade da precipitação em Pernambuco e constataram que as chuvas não são uniformemente distribuídas: decrescem do litoral para o Sertão. Os maiores valores são observados na Zona da Mata com médias anuais oscilando entre 700mm a 1500mm; no Agreste as médias anuais são entorno de 700mm e no Sertão inferiores a 600mm.

Devido a esta variabilidade climática, Pernambuco sofre tanto secas recorrentes, no Sertão, quanto inundações na região litorânea. Essas condições extremas afetam o estado, pois secas severas levam à deficit de água e riscos para a segurança hídrica e alimentar, enquanto que as chuvas fortes podem aumentar a vulnerabilidade a desastres naturais, como inundações e deslizamentos de terra, o que enfatiza a necessidade de se ter melhor

conhecimento climático para direcionar políticas públicas e ações que visem a adaptação e mitigação a essas condições climáticas.

3.2 Mudanças Climáticas

As mudanças climáticas são um dos maiores desafios do século XXI. Desde o século passado, os níveis de dióxido de carbono (CO_2) estão aumentando constantemente, podendo ocasionar impactos significativos nos setores naturais, sociais e econômicos. Entre os possíveis indicativos destas alterações climáticas estão: o efeito estufa, inversão térmica, ondas de calor e, principalmente, a alteração no ciclo hidrológico, entre outros (SILVA et al., 2019).

Diante da problemática das mudanças climáticas, a Organização Meteorológica Mundial (OMM), em consonância com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) criaram, em 1988, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Desde sua criação, o IPCC tem a função de elaborar relatórios com descrições e previsões do clima global, norteando e fundamentando as pesquisas climáticas em todo o mundo (BECK; MAHONY, 2018).

Acredita-se que as mudanças climáticas alterem a temperatura média e a precipitação, aumentando também a variabilidade dos eventos climáticos extremos. Os cenários descritos no quarto relatório de avaliação do IPCC (AR4) afirmam que o aquecimento da Terra nos últimos 100 anos é de quase $1^\circ C$ e que se tem observado aumentos nas temperaturas do ar, das águas dos oceanos e aumento do nível do mar, resultando em aspectos de climas extremos (IPCC, 2007).

Além disso, em seu quinto relatório de avaliação (AR5), o IPCC afirmou que o aquecimento é evidente e na maioria causado pelo aumento da concentração de CO_2 (IPCC, 2013), concordando com o sexto relatório de avaliação (AR6) que traz um alerta para a necessidade de reduções profundas dos gases do efeito estufa nas próximas décadas, visto que, há indicação de um aquecimento global de $1,5^\circ C$ a $2^\circ C$ acima do período pré-industrial que será excedido durante o século XXI, caso essa diminuição não ocorra (IPCC, 2021).

Uma das consequências das mudanças climáticas devido ao aquecimento global é o aumento tanto na magnitude quanto na frequência de eventos extremos, que estão associados a desastres meteorológicos como secas severas e inundações (BEZERRA et al., 2019). Esses eventos tornaram-se comuns em várias regiões do mundo, principalmente no Brasil, por se tratar de um país vulnerável aos potenciais efeitos das mudanças climáticas.

O AR5 indica para o Brasil, tendência de aumento da temperatura média e maior frequência de extremos de temperatura (máxima e mínima) (IPCC, 2013). Além disso, eventos extremos de precipitação serão mais frequentes nas regiões Sul e Sudeste, enquanto os veranicos podem afetar a Amazônia e o NEB (IPCC, 2014; SILVA et al., 2019).

No que diz respeito aos estudos climáticos sobre o Brasil, as áreas mais vulneráveis são a Amazônia e o Nordeste. Pesquisas recentes indicam tendências de aumento e diminuição em relação aos índices de temperatura e precipitação, respectivamente, além de analisar os cenários climáticos previstos pelo IPCC, destacando a ocorrência mais frequente de eventos extremos, como ondas de calor, secas e inundações nessas regiões (MARENGO et al., 2007; MARENGO; ESPINOZA, 2016; SILVA et al., 2019; COSTA et al., 2020).

Em conformidade com o relatório do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMCI, 2013), o semiárido nordestino terá suas chuvas reduzidas em até 20% por volta de 2040, com aumento de temperatura até 1°C. O relatório também indica que o Brasil terá um aumento de pelo menos 3°C, resultando em um aumento de 30% das precipitações nas regiões Sul e Sudeste e diminuição de até 40% nas regiões Norte e Nordeste.

À vista disso, Marengo et al. (2011) salienta que o Nordeste, em geral, e Pernambuco, em especial, estão vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas devido ao desmatamento e mau uso do ecossistema, ocasionando eventos extremos do clima e sujeitas a um processo de desertificação como consequência da frequência e intensidade da seca. Dessa forma, os eventos extremos em Pernambuco são observados através de cheias na Zona da Mata e secas tanto no Sertão, quanto no Agreste (ALCÂNTARA et al., 2020).

Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de analisar as mudanças climáticas, melhorando a capacidade de monitoramento e projeção das consequências (MARENGO et al., 2010), além de tentar minimizá-las incentivando o desenvolvimento de ações em relação aos impactos naturais, sociais e econômicos causados por tais mudanças.

3.3 Variabilidade Climática

O NEB apresenta acentuada variabilidade interanual, particularmente em relação a precipitação, com anos extremamente secos e outros extremamente chuvosos. Segundo Marengo et al. (2011) esta região é uma das principais da América do Sul onde os sinais de variabilidade intrasazonal são mais perceptíveis.

A acentuada variabilidade climática desta região ocorre devido a sua posição geográfica, características da superfície, relevo e sistemas atmosféricos atuantes (JARDIM et al., 2021). As mudanças climáticas, juntamente com a variabilidade natural, tem incentivado as pesquisas climatológicas em busca da compreensão dos fenômenos atmosféricos associados

a esta variabilidade para a descrição do clima regional.

3.3.1 Variabilidade Sazonal e Intrasazonal

O aquecimento das águas do Oceano Atlântico afeta diretamente a ocorrência de fenômenos no NEB. Dessa forma, tanto o tempo quanto o clima da região dependem muito das condições desse oceano. O clima de verão nos trópicos, particularmente sobre a América do Sul, apresenta fortes padrões de circulação, quase estacionário, denominado de Alta da Bolívia (AB). Se trata de um dos principais sistemas atmosféricos e é responsável por estimular muitas áreas instáveis no Brasil. O giro anticiclônico faz com que os ventos úmidos converjam na superfície da atmosfera, favorecendo a formação de nuvens espessas e provocando chuvas (KOUSKY; GAN, 1981; MORAIS; GAN; YOSHIDA, 2021).

Relacionada a essa circulação, há a existência de um cavado próximo a costa do NEB, que também varia sua intensidade ao longo do verão. Quando o cavado eventualmente se fecha e gira no sentido horário, torna-se um novo sistema atmosférico, intitulado de Vórtice Ciclônico de Alto Nível (VCAN) (REBOITA et al., 2017). Sua inserção no continente também está relacionada à precipitação nesta região.

Segundo [Morais, Gan e Yoshida \(2021\)](#), o VCAN se trata de um sistema de baixa pressão com circulação ciclônica fechada, onde seu centro é mais frio do que seus arredores, ocorrendo principalmente em janeiro e com duração, em média, de 7,1 dias. Além de que, mostra circulação direta, ou seja, o ar frio e seco se move em seu centro e o ar quente e úmido se move para cima, nos arredores. Sendo assim, é importante monitorar continuamente a circulação da AB e seu efeito na posição do VCAN para melhor prever as chuvas no NEB.

Entre os principais sistemas atmosféricos que atuam no NEB, sendo um dos mais responsáveis pelas chuvas nesta região, se encontra a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a qual é formada pela convergência dos ventos alísios nos hemisférios norte e sul, apresentando movimento ascendente, baixa pressão e que seguem, preferencialmente, áreas com temperaturas mais altas da superfície do mar (TSM) ([MARENGO et al., 2011](#)).

Este aquecimento entre o oceano e o continente ajuda a estabelecer um sistema de baixa pressão durante os meses mais quentes do ano (primavera e verão), criando um gradiente de pressão horizontal do oceano ao continente. O ar quente proveniente do oceano entra em contato com o continente quente, que aquece e sobe. À medida que sobe, esfria sem troca de calor e condensa, criando nuvens e provocando assim a precipitação ([OLIVA, 2019](#)).

Desta forma, tem-se que o estado de Pernambuco apresenta uma variabilidade

climática frequentemente associada ao VCAN e ZCIT, que influenciam a ocorrência de eventos extremos de precipitação, podendo causar deslizamentos e inundações. Um exemplo da atuação conjunta entre esses dois sistemas foi observado em 2016 quando fortes chuvas afetaram diversos municípios do estado, desde o litoral até o Sertão, resultando em tempestades, rajadas de vento e até precipitação de granizo em alguns municípios (BEZERRA, 2016; MOREIRA et al., 2017).

3.3.2 Variabilidade Interanual

A variabilidade interanual da precipitação do NEB por outro lado, pode estar associada a anomalias meteorológicas, tanto dentro da própria região quanto em outras partes do mundo, resultando em excessos de chuvas e secas severas. Estes eventos estão frequentemente relacionadas ao ENSO e as anomalias do TSM do Atlântico Tropical, conhecido como Dipolo do Atlântico Sul.

Os eventos do El Niño são definidos pelo aquecimento da superfície do Oceano Pacífico Tropical e pelo enfraquecimento dos ventos alísios equatoriais que podem ocorrer entre 7 a 3 anos (TIMMERMANN et al., 2018). Estas condições são acompanhadas por mudanças na circulação atmosférica e oceânica, afetando o clima local. A alternância de condições quentes de El Niño e frias de La Niña, referida como ENSO, representam a mais forte flutuação ano a ano do sistema climático global.

Segundo Marengo et al. (2011), em anos de El Niño a pressão tende a ser menor no Pacífico e a aumentar em outras partes da região tropical. Os valores mais baixos da pressão, em consonância com a mudança dos ventos alísios, aumentam os movimentos ascendentes, formando mais nuvens e produzindo mais chuvas.

No entanto, movimentos ascendentes acelerados e o calor latente de condensação alteram a circulação geral, resultando em movimentos descendentes anormais em outras regiões da atmosfera tropical. Esses movimentos descendentes impedem a formação de nuvens e reduzem a precipitação com eventos de secas que variam de moderados a fortes, como é o caso do NEB. Já o La Niña é o oposto do El Niño e causa anomalias opostas. Nos anos de La Niña, um centro de baixa pressão se desenvolve no NEB, provocando convecção que tende a mover a ZCIT mais para o sul e trazer tempestades (CAI et al., 2020).

Por sua vez, o dipolo de anomalias do TSM também é um fenômeno responsável pela variação climática no NEB. Se trata de uma mudança anormal na temperatura da água do Oceano Pacífico, influenciando na mudança meridional da atmosfera (ARAGÃO, 1998). Esta mudança resulta no aumento ou inibição na formação de nuvens, o que acarreta

no crescimento ou decrescimento das chuvas.

Quando as águas do Atlântico Tropical Norte estão mais quentes e as águas do Atlântico Tropical Sul mais frias, existem movimentos descendentes que inibem a formação de nuvens e, conseqüentemente, reduzem a precipitação, podendo causar secas (fase positiva do Dipolo). No entanto, quando as águas do Atlântico Tropical Norte são mais frias e as águas do Atlântico Tropical Sul são mais quentes, há um aumento dos movimentos ascendentes sobre essas regiões, o que intensifica a formação de nuvens e eleva os índices pluviométricos (fase negativa do Dipolo) (ARAGÃO, 1998).

Desta forma, a atuação, duração e intensidade do ENOS e do Dipolo Atlântico Sul sobre o NEB determinarão os tempos de secas e chuvas intensas na região. Silva et al. (2022) destacam em sua pesquisa que, no estado de Pernambuco, eventos El Niño são mais intensos e numerosos, enquanto os eventos La Niña são mais raros. Além disso, a maioria dos anos com forte precipitação foram associados ao fenômeno El Niño e/ou à fase negativa do Dipolo e que mesmo com influência do La Niña as chuvas não obtiveram o volume e frequência esperados.

3.4 Índices de Detecção de Mudanças Climáticas

Uma forma de detectar a ocorrência de mudanças climáticas locais e avaliar seus efeitos é analisar séries históricas de dados de precipitação e temperatura. Por muitos anos, numerosos estudos de variabilidade e mudanças climáticas dessas variáveis focaram nas mudanças dos valores médios. No entanto, tornou-se necessário buscar mudanças no comportamento pluviométrico total e médio da precipitação, a fim de identificar a ocorrência de potenciais eventos extremos úmidos ou secos, bem como o comportamento de temperaturas extremas (NÓBREGA; FARIAS; SANTOS, 2015).

De acordo com Barry et al. (2018), diversos autores propuseram muitos indicadores e metodologias para detectar e compreender as variações climáticas para que fossem utilizados na identificação de tendências de mudanças climáticas em regiões com qualquer tipo de clima. Além disso, a maioria dos estudos sobre extremos e variabilidade climática foram desenvolvidos em escala global, não havendo muitos estudos climáticos regionais ou locais.

Para resolver este problema, a OMM criou um grupo de trabalho denominado de *Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices* (ETCCDMI) para desenvolver índices de detecção de mudanças climáticas, visando atender as diversas especificidades de cada país, região ou local. Ao todo, foram definidos 27 índices climáticos extremos, sendo 11 referentes a precipitação e 16 a temperatura do ar (ZHANG; YANG,

2004). Desta forma, pesquisadores de vários países vêm estimando estes índices climáticos, com o objetivo de avaliar as tendências da variabilidade climática.

Ao citar alguns estudos, tem-se que [Barry et al. \(2018\)](#) analisaram os índices climáticos extremos para 13 países da África Ocidental, utilizando 25 índices climáticos referentes tanto a temperatura quanto a precipitação, derivados de dados diários. A análise foi realizada para 166 estações meteorológicas para dois períodos: 1960-2010 e 1981-2010. Os índices relacionados a temperatura indicaram um aquecimento para todas as estações, além disso, dias e noites quentes se tornaram mais frequentes. No entanto, alguns índices de precipitação apresentaram um aumento significativo de dias úmidos.

[Hong e Ying \(2018\)](#) calcularam 26 índices climáticos de temperatura e precipitação para a China. Para isso, utilizaram dados diários de 2419 estações meteorológicas no período de 1961 a 2017, com o objetivo de analisar as características dessas variáveis no ano de 2017. A maioria dos índices de temperatura apresentaram valores extremos históricos desde 1961, indicando um aumento na temperatura tanto no norte quanto no sul da China. No entanto, os índices de precipitação apresentaram uma característica de aumento, indicando um crescente número de dias úmidos no país para 2017.

Para analisar as características climáticas da América do Sul, [Marrafon e Reboita \(2020\)](#) utilizaram 5 índices climáticos referentes a precipitação no período de 1979 a 2019. Os resultados apresentaram uma evidente redução da distribuição temporal da chuva, com os eventos de precipitação mais concentrados. Os autores ressaltaram o risco de grandes problemas sociais, como inundações, alagamentos e deslizamentos de terra.

Numerosos estudos no Brasil também se basearam em estimativas dos índices da OMM para detectar mudanças climáticas regionais e locais. [Reis et al. \(2020\)](#) analisaram 23 índices climáticos de temperatura e precipitação para a região MATOPIBA, que se trata de um acrônimo formado pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Para a análise, utilizaram uma grade de alta resolução, compreendendo um período de 1980 a 2013, abrangendo 963 pontos de grade da região estudada. Os resultados indicaram uma redução significativa da precipitação em algumas partes e aumento em outras. Por outro lado, foi observado um aumento significativo em quase todos os índices de temperatura.

Utilizando a mesma grade de alta resolução para o período de 1980 a 2013, [Silva et al. \(2019\)](#) calcularam e analisaram 21 índices climáticos de temperatura e precipitação para a Amazônia e o NEB. Como resultado, a Amazônia apresentou os maiores índices significativos. Já o NEB apresentou tanto aumento quanto diminuição em relação a temperatura e precipitação, respectivamente.

[Costa et al. \(2020\)](#) também realizaram uma análise de 23 índices climáticos para o

NEB. Os dados foram coletados de 156 estações meteorológicas para o período de 1961 a 2014. Os resultados indicaram uma tendência de aumento de ondas de calor, com o aumento no percentual de noites mais quentes. Além disso, verificou-se um aumento de dias secos e uma redução na precipitação total anual e na frequência de dias chuvosos, o que evidenciam as preocupações com a escassez de recursos hídricos e a ameaça de desertificação da região.

Devida a vulnerabilidade climática do NEB, as análises em escalas locais da detecção dos índices climáticos começaram a ser desenvolvidas com mais intensidade. Diante da importância da bacia do rio São Francisco para esta região, [Bezerra et al. \(2019\)](#) analisaram 11 índices de precipitação extrema definidos pela ETCCDMI, com o objetivo de caracterizar as mudanças nos padrões de precipitação. Os índices foram calculados utilizando dados diários de 59 estações no período de 1947 a 2012. Conforme os resultados obtidos, a maioria dos índices de precipitação apresentaram diminuição em seus valores.

Em relação ao estado de Pernambuco, poucas pesquisas foram desenvolvidas. [Santos, Santos e Coutinho \(2013\)](#) objetivaram estimar e analisar 11 índices climáticos extremos referentes a precipitação. Para isso, utilizaram dados diários de 26 estações meteorológicas no período de 1964 a 2006. Já [Nóbrega, Farias e Santos \(2015\)](#) utilizaram apenas 8 índices extremos de precipitação. Os dados foram obtidos através de estações meteorológicas e uma plataforma de coleta de dados interpolados, nos quais foram extraídos 8 pontos de grade para o estudo, compreendendo um período de 1978 a 2010. Ambas pesquisas encontraram uma diminuição na precipitação, concentrando-se em poucos dias, e um aumento nos dias consecutivos secos.

[Silva, Montenegro e Souza \(2017\)](#) também analisaram índices climáticos para Pernambuco. Os autores utilizaram 75 postos pluviométricos distribuídos uniformemente pelo estado para o período de 1962 a 2011. Foram calculados 11 índices climáticos extremos referentes a precipitação para analisar as tendências de 22 bacias hidrográficas presentes em Pernambuco. Como resultado obtiveram tendências de redução dos índices referentes as bacias Ipanema, Brígida e Garças, localizadas nas regiões Agreste e Sertão, evidenciando o processo de aceleração da aridez. Em contrapartida, tendências de eventos extremos de chuva foram encontradas para as bacias Mundaú, Sirinhaém e Garças, localizadas nas regiões Agreste e Zona da Mata.

Desta forma, nota-se que a maioria dos estudos sobre detecção de mudanças climáticas desenvolvidos em Pernambuco baseiam suas análises em poucos índices climáticos extremos, com períodos curtos e poucas estações meteorológicas ou pontos de grades. Portanto, isto evidencia a necessidade de uma análise mais abrangente das mudanças climáticas no estado, através dos índices recomendados pela ETCCDMI, fazendo uso de

dados coletados ou estimados para uma maior escala temporal e regional.

3.5 Tendências Climáticas

Uma forma para determinar a ocorrência de mudanças climáticas é por meio de uma análise da tendência das séries históricas, tanto de temperatura quanto de precipitação, a qual permite avaliar os efeitos dessa mudança e os possíveis impactos ambientais, sociais e econômicos causados por elas. Existem muitos métodos que podem ser usados para identificar tendências significativas em séries temporais, estes métodos são classificados em paramétricos e não paramétricos (GOCIC; TRAJKOVIC, 2013).

Os métodos paramétricos requerem que os dados sejam independentes e sigam uma distribuição específica, frequentemente uma distribuição normal. No entanto, para muitas séries hidrológicas esses pressupostos não são atendidos, visto que, raramente estas séries seguem uma distribuição normal. Já os métodos não paramétricos não necessitam que os dados sigam uma distribuição específica (HESS; IYER; MALM, 2001).

No Brasil, diversos trabalhos de análises climatológicas optaram por utilizar os métodos não paramétricos, sendo os testes de Mann-Kendall e sen's slope frequentemente utilizados para a detecção de tendências de variáveis meteorológicas. Reis et al. (2020) utilizaram o teste de Mann-Kendall para identificar tendências lineares nos valores mensais, sazonais e anuais de precipitação, temperatura média, máxima e mínima da região da MATOPIBA durante o período de 1980 a 2013. Os resultados evidenciaram alterações nos padrões climáticos em relação as variáveis estudadas.

Para sub-regiões do Nordeste, Oliveira, Silva e Lima (2017) utilizaram o teste não paramétrico de Mann-Kendall para calcular a tendência linear da quantidade e intensidade da chuva para o período de 1972 a 2002. Os resultados indicaram que tendências de aumento da precipitação foram observadas no litoral, enquanto tendências de diminuição foram encontradas na sub-região semiárida.

Em relação ao estado de Pernambuco, Silva et al. (2020) utilizaram o teste de Mann-Kendall para analisar tendências de categorias secas e úmidas e o sen's slope para analisar a magnitude do índice de precipitação padronizado para o período de 1950 a 2012. Os resultados obtidos indicaram tendências negativas significativas para o Sertão de Pernambuco, com magnitude decrescente do oeste para o leste, enquanto tendências positivas significativas foram encontradas para o Agreste e Zona da Mata, com magnitude crescente em direção ao litoral.

3.6 Interpolação Espacial

A compreensão da distribuição espacial e evolução temporal dos dados climáticos é fundamental para o desenvolvimento de políticas públicas que visem a minimização dos impactos ambientais, sociais e econômicos causados pelas mudanças do clima. Os dados de temperatura e precipitação são registrados como dados observacionais por meio de estações meteorológicas. No entanto, os registros, por vezes, são incompletos, devido à falta de dados ou estações insuficientes na região de estudo. Para resolver este problema de dados parciais, dados prováveis podem ser estimados por meio de técnicas de interpolação.

A interpolação espacial é o processo de utilização de pontos com valores conhecidos para estimar os valores em outros pontos desconhecidos. Os métodos de interpolação podem ser classificados em determinísticos ou probabilísticos. Os métodos determinísticos são baseados nos valores medidos pela vizinhança e/ou nas fórmulas matemáticas aplicadas a esses mesmos valores. Já os métodos probabilísticos equivalem aos métodos geoestatísticos, que incluem autocorrelação (CARUSO; QUARTA, 1998; CHEN; LIU, 2012).

Diversos métodos de interpolação estão implementados em software estatísticos e em sistema de informação geográfica (GIS) que cria, gerencia, analisa e mapeia todos os tipos de dados (ArcGIS versão 9.2, Quantum GIS, R e Surfer) e assim, o uso desses métodos estão se tornando cada vez mais comum (SILVA et al., 2019). No entanto, cada método possui vantagens e desvantagens, dependendo das características da área de estudo e do conjuntos de dados. Assim, é importante adotar critérios para verificar qual o método mais adequado.

Muitos estudos foram realizados comparando interpoladores em busca do mais adequado para o objetivo de cada pesquisa. Keblouti, Ouerdachi e Boutaghane (2012) em seu trabalho analisaram três métodos de interpolação: *Inverse Distance Weighting* (IDW), spline e krigagem; com o objetivo de determinar o método mais adequado para a precipitação anual da cidade de Annaba na Argélia. Para selecionar o melhor método, os autores utilizaram uma abordagem de validação cruzada que comparava dados observados com as estimativas interpoladas. Os melhores resultados para caracterizar a distribuição de chuvas foram alcançados com o IDW.

Xavier, King e Scanlon (2016) testaram seis técnicas de interpolação (média aritmética, *thin plate spline*, vizinho natural, IDW, ponderação da distância angular e krigagem), com o objetivo de desenvolver uma grade de alta resolução para cinco variáveis climáticas: precipitação, vento, temperatura máxima e mínima, umidade relativa do ar e potencial de evapotranspiração. Os métodos IDW e ponderação da distância angular obtiveram os melhores resultados através da abordagem da validação cruzada.

Para determinar o melhor método de interpolação de dados de temperatura e precipitação da bacia de Seyhan na Turquia, Hadi e Tombul (2018) avaliaram oito técnicas de interpolação: IDW, polígonos de Thiessen, análise da superfície de tendência, interpolação polinomial local, *thin plate spline* e krigagem (ordinário, universal e simples). O desempenho foi avaliado usando a validação independente. Com base na validação, o método que apresentou menos erros para a maioria dos períodos, tanto para precipitação quanto temperatura foi o IDW.

Na busca do melhor método de interpolação para a precipitação mensal de Pernambuco, Silva et al. (2019) testaram sete métodos : IDW, Shepard modificado, vizinho natural, vizinho mais próximo, função de base radial, krigagem e análise da superfície de tendência. O desempenho de cada método foi avaliado por meio da validação cruzada. Os resultados indicaram que a análise da superfície de tendência produziu os melhores resultados, seguido pelo método do vizinho mais próximo, IDW e krigagem.

Baseando-se nas conclusões destes autores, para o presente trabalho, optou-se por utilizar o método de interpolação IDW por apresentar maior precisão e assim possibilitar uma melhor análise dos dados climáticos. Esta técnica de interpolação auxiliará na identificação das regiões de Pernambuco que apresentam algum padrão de variabilidade para os índices analisados.

4 Metodologia

4.1 Área de estudo

O estado de Pernambuco, localizado na Zona Leste do NEB, é limitado pelos estados de Alagoas e Bahia (sul), Piauí (oeste), Paraíba e Ceará (norte) e ao leste o Oceano Atlântico. O estado está dividido em três regiões geográficas: Zona da Mata, Agreste e Sertão. A Zona da Mata localiza-se na faixa litorânea e é considerada a região mais desenvolvida e com maior densidade demográfica do estado, apresentando um clima tropical quente e úmido. O Agreste se trata de uma zona de transição entre a Zona da Mata e o Sertão, onde o clima varia do úmido ao semiárido. Já a região do Sertão ocupa a parte central e oeste do estado caracterizando-se por um clima semiárido, denominado por uma vegetação arbustiva e florestas tropicais secas (ASSIS et al., 2021).

A Zona da Mata é um região entre o Planalto da Borborema e a costa a qual recebeu este nome por ter sido coberta pela Mata Atlântica, principalmente no topo de morros baixos e canaviais em altitudes mais baixas. A caatinga é um bioma semiárido, dominado por florestas tropicais secas, pastagens e campos agrícolas de subsistência (milho, mandioca e feijão) que cobrem a maior parte da região do Sertão, enquanto que a Mata Atlântica e a Caatinga coabitam na região do Agreste (SANTOS et al., 2007).

Do ponto de vista da climatologia, tanto o Sertão quanto o Agreste se destacam por apresentarem índices pluviométricos anuais muito variáveis, com alguns anos apresentando índices elevados e outros com índices muito abaixo do esperado. No Sertão, a estação chuvosa concentra-se nos meses de janeiro a abril. No entanto, as precipitações no Agreste são menos concentradas do que no Sertão, apresentando o período de maio a julho como os mais chuvosos do ano. Enquanto que a Zona da Mata possui precipitações bem distribuídas, principalmente entre maio e julho (JARDIM et al., 2021).

Por se tratar de uma zona de transição, o Agreste possui grande amplitude térmica, com precipitações pluviométricas anuais escassas entorno de 700mm e temperaturas heterogêneas (LUCENA et al., 2018). Já o Sertão apresenta precipitações pluviométricas anuais escassas e mal distribuídas, inferiores a 600mm e temperaturas altas (ASSIS et al., 2021). Enquanto que, a região da Zona da Mata localiza-se próximo ao mar e possui alto índice pluviométrico no inverno e clima ameno durante todo ano, com precipitações pluviométricas anuais entre 700mm e 1500mm (SILVA et al., 2020).

4.2 Dados

Para entender as tendências das variáveis climáticas e dos extremos climáticos, é cada vez mais crucial ter dados meteorológicos confiáveis e acessíveis. Diante disso, [Xavier, King e Scanlon \(2016\)](#) através de um projeto conjunto entre a Universidade do Texas (Estados Unidos) e a Universidade Federal do Espírito Santo (Brasil) desenvolveram uma grade de dados em alta resolução. Para isso, os autores testaram seis diferentes esquemas de interpolação para criar grades para cinco variáveis. Os dados utilizados foram obtidos por meio do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Agência Nacional de Águas (ANA) e Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), totalizando 3625 pluviômetros e 735 estações meteorológicas.

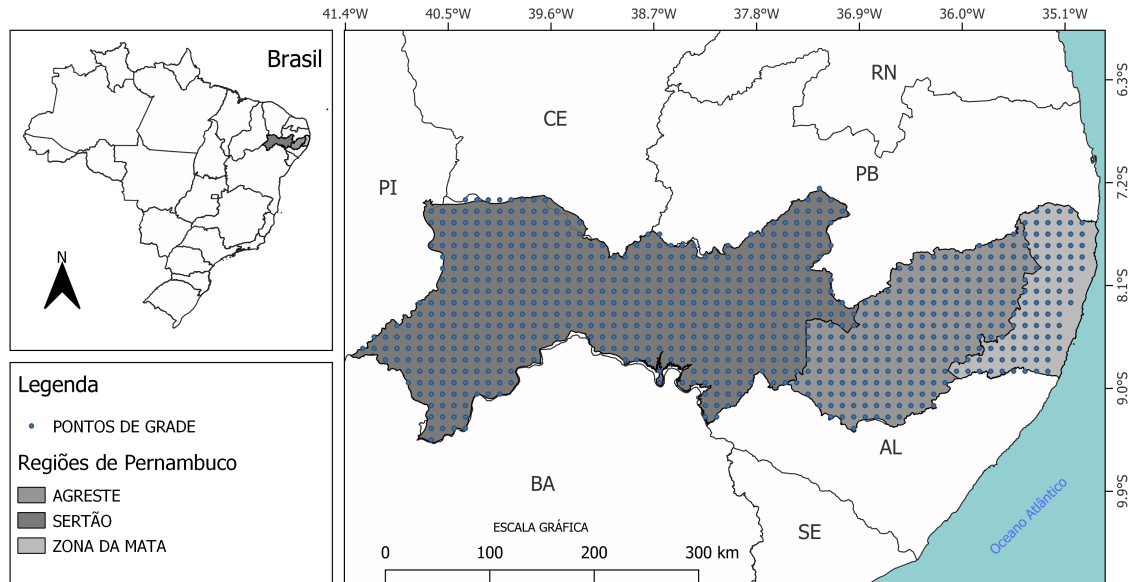
Os autores utilizaram em sua metodologia uma abordagem de validação cruzada para selecionar o melhor método de interpolação, nos quais os métodos ponderação da distância angular e IDW apresentaram os melhores resultados. Os dados estão disponíveis, no período de 1980 a 2013, em uma grade de resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (aproximadamente 25km do Equador) e em resoluções temporais diárias e mensais para cinco variáveis meteorológicas: precipitação, vento, temperatura mínima e máxima, umidade relativa do ar e potencial de evapotranspiração, para todo o território brasileiro.

Os dados de precipitação diária sofreram uma atualização temporal compreendendo um novo período de 1980 a 2015. Para isso, [Xavier, King e Scanlon \(2017\)](#) utilizaram dois métodos de interpolação: ponderação da distância angular e IDW, onde optaram pelo primeiro por fornecer resultados mais precisos. Os dados foram coletados dos Sistemas de Informações Hidrológicas (Hidroweb) e do INMET sendo, respectivamente, 8515 e 744 pluviômetros, contabilizando 9259.

[Xavier et al. \(2022\)](#) objetivaram melhorar esta base de dados aumentando a resolução espacial para $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ e aumentando a escala temporal (1 de janeiro de 1961 a 31 de julho de 2020). Esta nova base de dados foi denominada de *Brazilian Daily Weather Gridded Data* (BR-DWGD) e contém todas as variáveis climáticas da primeira para todo o território brasileiro.

Por meio da validação cruzada, os autores selecionaram o melhor método de interpolação entre os métodos de ponderação da distância angular e IDW, utilizando dados observados de 11473 pluviômetros e 1252 estações meteorológicas. A presente pesquisa fez uso dos dados de precipitação diária do estado de Pernambuco, registrados durante o período de 1 de janeiro de 1961 a 31 de julho de 2020, utilizando 809 pixels (pontos de grade) da base atualizada BR-DWGD ([Figura 1](#)).

Figura 1 – Localização geográfica do estado de Pernambuco, Brasil, e a distribuição espacial dos pontos de grade estudados.



4.3 Índices Climáticos Extremos

Baseado nos dados de precipitação disponíveis, foram calculados e analisados os índices climáticos extremos recomendados pela *Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices* (ETCCDMI). Os índices foram calculados através do *software R Development Core Team* (2013) por meio do pacote *climdex.pcic* (BRONAUGH; HIEBERT; RCPP, 2015) que fornece 27 índices climáticos, sendo relacionados a precipitação e temperatura. Neste estudo, foram analisados 11 índices climáticos referentes a precipitação. A seguir, serão apresentadas as definições e obtenção de cada índice, de acordo com Zhang e Yang (2004):

1. SDII - Precipitação média em dias úmidos (mm/dia): é definida como a soma da precipitação em dias chuvosos (dias com precipitação igual ou superior a 1mm) durante o ano, dividido pelo número de dias chuvosos no ano. Isto é, seja RR_{wj} a quantidade diária de precipitação em dias úmidos tal que, w representa os dias com precipitação igual ou superior a 1mm e j o período analisado, ou seja, o ano e W representa o número de dias úmidos em j , então:

$$SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^W RR_{wj}}{W} \quad (4.1)$$

2. R10mm - Número máximo de dias com precipitação igual ou acima de 10mm (dias): é a quantidade de dias, durante o ano, cujo valor de RR_{ij} , no dia i no período j , é igual ou superior a 10mm, ou seja,

$$\text{Contagem do número de dias em que } RR_{ij} \geq 10\text{mm} \quad (4.2)$$

3. R20mm - Número máximo de dias com precipitação igual ou acima de 20mm (dias): é a quantidade de dias, durante o ano, cujo valor de RR_{ij} , no dia i no período j , é igual ou superior a 20mm, ou seja,

$$\text{Contagem do número de dias em que } RR_{ij} \geq 20\text{mm} \quad (4.3)$$

4. R25mm - Número máximo de dias com precipitação igual ou acima de 25mm (dias): é a quantidade de dias, durante o ano, cujo valor de RR_{ij} , no dia i no período j , é igual ou superior a 25mm, ou seja,

$$\text{Contagem do número de dias em que } RR_{ij} \geq 25\text{mm} \quad (4.4)$$

5. RX1day - Precipitação máxima mensal em 1 dia (mm): são os valores máximos de precipitação mensal em que RR_{ij} , no dia i no período j , é o valor máximo da precipitação mensal em 1 dia, dado por:

$$RX1day_j = \max(RR_{ij}) \quad (4.5)$$

6. RX5day - Precipitação máxima mensal consecutiva em 5 dias (mm): são os valores máximos de precipitação mensal em que RR_{kj} é a quantidade de precipitação terminando em k de um período j para o intervalo de 5 dias, dado por:

$$RX5day_i = \max(RR_{kj}) \quad (4.6)$$

7. CDD - Dias consecutivos secos (dias): é o número máximo de dias consecutivos com precipitação em que RR_{ij} , no dia i no período j , é inferior a 1mm, ou seja,

$$\text{Contagem do número de dias em que } RR_{ij} < 1\text{mm} \quad (4.7)$$

8. CWD - Dias consecutivos úmidos (dias): é o número máximo de dias consecutivos com precipitação em que RR_{ij} , no dia i no período j , é igual ou superior a 1mm, ou seja,

$$\text{Contagem do número de dias em que } RR_{ij} \geq 1\text{mm} \quad (4.8)$$

9. R95p - Precipitação anual que excedeu o percentil 95 (percentil: dias úmidos) (mm): é a soma anual da precipitação em dias em que a precipitação diária excede o percentil 95 no período de estudo. Isto é, seja RR_{wj} a quantidade diária de precipitação em um dia úmido w ($RR \geq 1\text{mm}$) em um período j e seja RR_{wn95} o 95° percentil da precipitação nos dias úmidos no período estudado, tem-se que W representa o número de dias úmidos do período, então:

$$R95p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj}, \quad \text{onde } RR_{wj} > RR_{wn95} \quad (4.9)$$

10. R99p - Precipitação anual que excedeu o percentil 99 (percentil: dias úmidos) (mm): é a soma anual da precipitação em dias em que a precipitação diária excede o percentil 99 no período de estudo. Isto é, seja RR_{wj} a quantidade diária de precipitação em um dia úmido w ($RR \geq 1\text{mm}$) em um período j e seja RR_{wn99} o 99° percentil da precipitação nos dias úmidos do período estudado, tem-se que W representa o número de dias úmidos no período, então:

$$R99p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj}, \quad \text{onde } RR_{wj} > RR_{wn99} \quad (4.10)$$

11. PRCPTOT - Precipitação total anual em dias úmidos (mm): é a soma anual da precipitação em dias úmidos, ou seja, RR_{ij} é a quantidade diária de precipitação no dia i no período j . Se I representa o número de dias em j , então:

$$\text{PRCPTOT}_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij} \quad (4.11)$$

A [Tabela 1](#) apresenta um resumo desses índices.

Tabela 1 – Índices climáticos extremos de precipitação.

Índice	Definição	Unidade
SDII	Precipitação média em dias úmidos, com precipitação ≥ 1 mm	mm/dia
R10mm	Número máximo de dias com precipitação ≥ 10 mm	dias
R20mm	Número máximo de dias com precipitação ≥ 20 mm	dias
R25mm	Número máximo de dias com precipitação ≥ 25 mm	dias
RX1day	Precipitação máxima mensal em 1 dia	mm
RX5day	Precipitação máxima mensal consecutiva em 5 dias	mm
CDD	Dias consecutivos secos < 1 mm (período de seca)	dias
CWD	Dias consecutivos úmidos ≥ 1 mm (período de chuva)	dias
R95p	Precipitação anual que excedeu o percentil 95 (percentil: dias úmidos)	mm
R99p	Precipitação anual que excedeu o percentil 99 (percentil: dias úmidos)	mm
PRCPTOT	Precipitação total anual em dias úmidos (chuva ≥ 1 mm)	mm

4.4 Testes estatísticos

Os testes estatísticos utilizados neste estudo foram obtidos através do *software* R Development Core Team (2013) por meio do pacote `trend` (POHLERT; POHLERT; KENDALL, 2016).

4.4.1 Teste de Mann-Kendall

Para realizar a análise de tendência dos índices foi utilizado o teste de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975). O presente teste se trata de um método estatístico não paramétrico (não requer que os dados sigam uma distribuição específica), utilizado para verificar a existência de tendências crescentes ou decrescentes em séries temporais e tem sido amplamente usado para quantificar as tendências em séries de tempo hidrometeorológicas (NASHWAN; SHAHID, 2019).

O método é baseado na correlação entre os valores das séries temporais e sua ordem temporal, sendo a hipótese nula de que as observações são independentes e identicamente distribuídas, ou seja, sem tendência, e a hipótese alternativa é que há uma tendência monotônica crescente ou decrescente. A estatística do teste de Mann-Kendall é dada da seguinte forma:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i), \quad (4.12)$$

em que x_i e x_j são dados sequenciais para o i -ésimo e j -ésimo termos de uma série histórica, n é o conjunto de dados e sgn é dado por:

$$sgn(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & \text{se } x_j > x_i, \\ 0, & \text{se } x_j = x_i, \\ -1, & \text{se } x_j < x_i. \end{cases} \quad (4.13)$$

Mann (1945) e Kendall (1975) demonstram que, partindo do pressuposto de que os dados são independentes e identicamente distribuídos, a estatística S tem média 0, $E(S) = 0$ e variância dada por:

$$Var(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right], \quad (4.14)$$

em que q é o número de grupos iguais na série e t_p é o número de observações no p -ésimo grupo. Assim, calcula-se a estatística Z baseada nos valores de S e $Var(S)$, onde Z segue uma distribuição normal:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}, & S > 0, \\ 0, & S = 0, \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}}, & S < 0. \end{cases} \quad (4.15)$$

Um valor positivo de Z indica que há uma tendência crescente e um valor negativo indica uma tendência decrescente. Para fins de teste, o p -valor (pv) é calculado da seguinte forma:

$$pv = 2 \min(\Phi(Z), 1 - \Phi(Z)), \quad (4.16)$$

onde $\min(\cdot, \cdot)$ denota o mínimo e $\Phi(\cdot)$ é a função de distribuição acumulada da distribuição normal padrão. A hipótese nula é rejeitada quando o valor de pv é menor que o nível de significância escolhido. Desse modo, diz-se que a tendência é crescente se Z for positivo e decrescente se Z for negativo, e o pv for menor que um nível de significância α .

4.4.2 Sen's slope

Para realizar a análise da magnitude de tendências foi utilizado o estimador de Sen. Sen (1968) desenvolveu um estimador não paramétrico baseado no Coeficiente de

Correlação Tau de Kendall denominado de sen's slope, que permite quantificar tendências de aumento ou diminuição, bem como a magnitude das mesmas (POHLERT, 2016). As inclinações de todos os pares de valores de dados são calculados como

$$Q_{i,j} = \frac{(x_j - x_i)}{j - i}, i = 1 \dots, n - 1 ; j = i + 1, \dots, n, \quad (4.17)$$

em que, i e j são as posições amostrais ocupadas por x_i e x_j , respectivamente, sendo que $i < j$. Se a série analisada tem n valores, então o número de pares $Q_{i,j}$ é $N = \frac{n(n-1)}{2}$. A estimativa de Sen (1968) é calculada como a mediana de $Q_{i,j}$ (Q_{med}): o sinal da inclinação reflete a tendência dos dados (para cima ou para baixo), enquanto seu valor indica a inclinação da tendência.

Portanto, a magnitude corresponde a uma taxa de variação linear. Quanto maior o valor de Q_{med} , maior será a taxa de variação e, conseqüentemente, maior será a magnitude da tendência. Do mesmo modo, quanto menor o valor de Q_{med} , menor será a taxa de variação e, conseqüentemente, menor será a magnitude da tendência.

4.4.3 Teste de Mann-Whitney-Wilcoxon

Para realizar as comparações entre os valores dos índices para cada região de Pernambuco, identificando se existem diferenças significativas, foi utilizado o teste de Mann-Whitney-Wilcoxon (MANN; WHITNEY, 1947; WILCOXON, 1947). O método se trata de um teste de hipóteses não paramétrico usado para verificar se duas amostras independentes, contendo os elementos n_1 e n_2 , correspondem ou não a mesma distribuição.

A estatística W , de Mann-Whitney-Wilcoxon, é calculada da seguinte forma: as observações $n_1 + n_2$ das duas amostras independentes são combinadas em um único conjunto de dados. Os elementos desse conjunto de dados são classificados do menor para o maior. Se houver empates no conjunto de dados combinados, serão consideradas a média das classificações dessas observações. A estatística W é calculada como a soma das classificações da amostra com o menor tamanho amostral. Sob a hipótese nula, a esperança e a variância de W são, respectivamente,

$$\mu_W = \frac{n_1(n_1 + n_2 + 1)}{2} \quad \text{e} \quad \sigma_W^2 = \frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}. \quad (4.18)$$

Para n_1 e n_2 maiores que 10, a distribuição da estatística $T = \frac{W - \mu_W}{\sigma_W}$ pode ser aproximada por uma distribuição normal com esperança zero e variância igual a um. No caso de empates, a variância precisa ser modificada para a aproximação gaussiana. Seja n_t o número de grupos com empates e n_k o número de empates no grupo k , então

$$\sigma_W^2 = \frac{n_1 n_2}{12} \left[n_1 + n_2 + 1 - \sum_{k=1}^{nt} (t_k^3 - t_k / ((n_1 + n_2)(n_1 + n_2 - 1))) \right]. \quad (4.19)$$

Sob a suposição, o p -valor (pv) é calculado como

$$pv = 2 \left[1 - \Phi \left(\frac{|w - \mu_W|}{\sigma_W} \right) \right], \quad (4.20)$$

onde w denota o valor da estatística de soma de classificação na amostra e $\Phi(\cdot)$ é a função de distribuição acumulada da distribuição normal padrão. Para um nível de significância específico $\alpha \in (0, 1)$, a hipótese nula é rejeitada sempre que $pv < \alpha$.

4.5 Inverse Distance Weighting

Para a realização da análise espacial da precipitação e dos índices climáticos foi utilizado o interpolador desenvolvido por Shepard (1968), conhecido como *Inverse Distance Weighting* - IDW (Ponderação pelo Inverso da Distância, em português). Se trata de um método determinístico para interpolação de dados no qual assume que quanto mais distante a posição de uma observação estiver da posição da estimativa, menor será a influência no valor interpolado.

Denotado por $r \equiv (x, y)$ a posição de um ponto arbitrário dentro da região a ser interpolada, tem-se que, a fórmula do IDW é dada por:

$$F(r) = \sum_{k=1}^N W(r_k) f(r_k), \quad (4.21)$$

em que $F(r)$ é o valor interpolado em r , N é o número de observações (pontos de grades), $f(r_k)$ é o valor observado na i -ésima estação na posição $r_k \equiv (x_k, y_k)$ e $W(r_k)$ é o peso dessa estação (contribuição relativa para o valor interpolado) dado por:

$$W(r_k) = \frac{d_k(r)^{-p}}{\sum_{k=1}^N d_k(r)^{-p}}, \quad (4.22)$$

onde $d_k(r) \equiv \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}$ é a distância euclidiana entre os pontos r e r_k e p é o único parâmetro do modelo que determina a taxa de decaimento da influência das observações com a distância: valores mais altos de p implicam em decaimento mais rápido da influência com a distância.

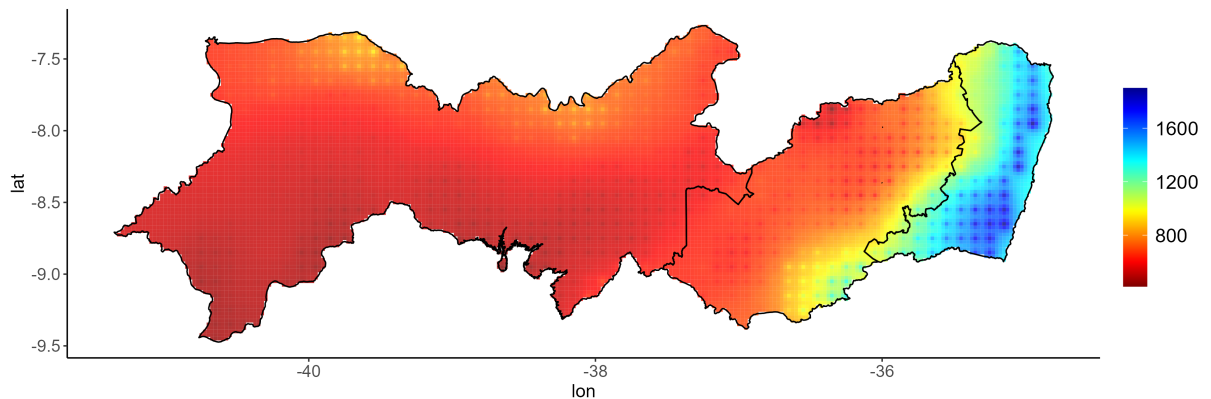
A interpolação por IDW da precipitação e dos índices climáticos foram obtidas através do *software* R Development Core Team (2013) por meio do pacote `gstat` (PEBESMA; GRAELER; PEBESMA, 2015).

5 Resultados

5.1 Precipitação no estado de Pernambuco

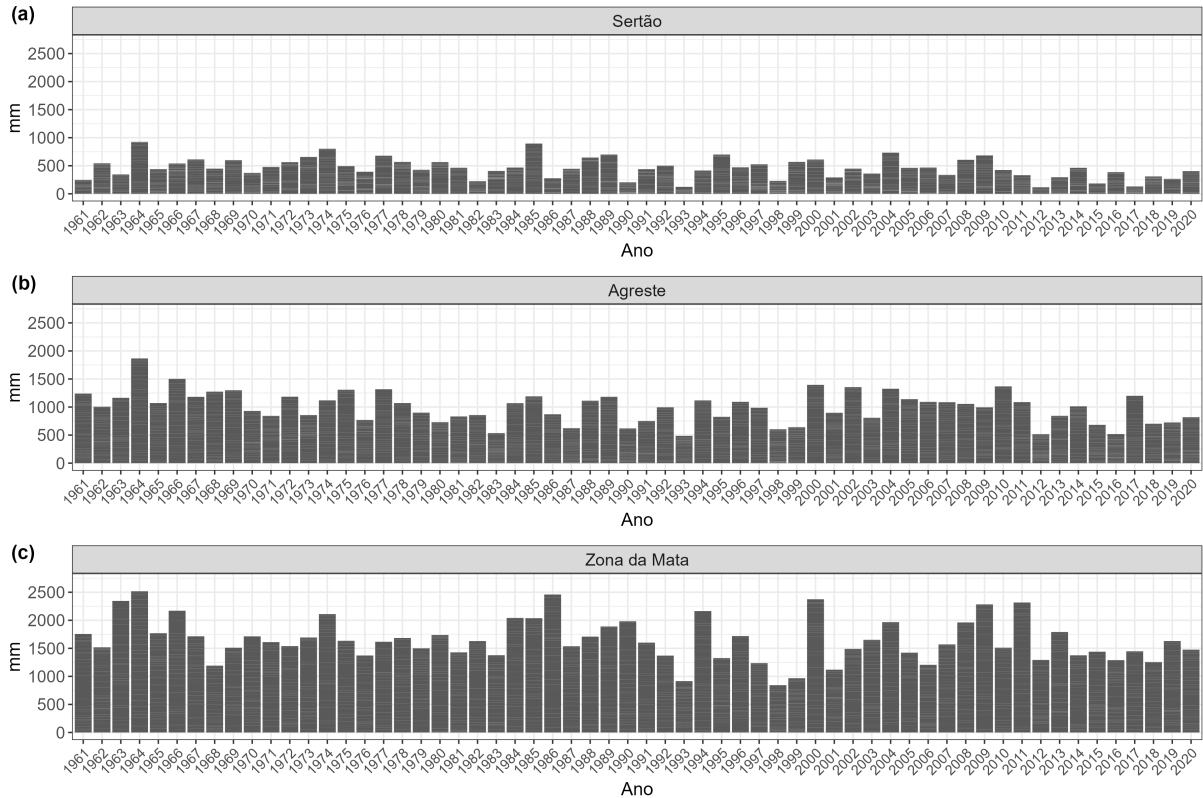
Ao analisar a distribuição média anual da precipitação no estado de Pernambuco percebe-se que não é uniforme: os maiores valores são registrados próximo ao litoral e vão reduzindo a medida que se afastam dessa região (Figura 2). Os maiores valores médios de precipitação são encontrados na Zona da Mata, oscilando em média entre 1200mm e 1900mm; no Agreste encontra-se valores médios variando entre 400mm a 1200mm e o Sertão apresenta uma distribuição média inferior a 900mm.

Figura 2 – Distribuição espacial da precipitação média anual de Pernambuco no período de 1961 a 2020.



O comportamento do acúmulo de chuva anual para as regiões do Sertão, Agreste e Zona da Mata de Pernambuco está ilustrado na Figura 3. Observa-se que os maiores valores de precipitação para as três regiões foram registrados no ano de 1964. Neste ano, houve a ocorrência do fenômeno El Niño associado a fase negativa do dipolo, o que favoreceu a atuação da ZCIT no Nordeste resultando em precipitação intensa (ALVES et al., 2014; NOAA, 2022).

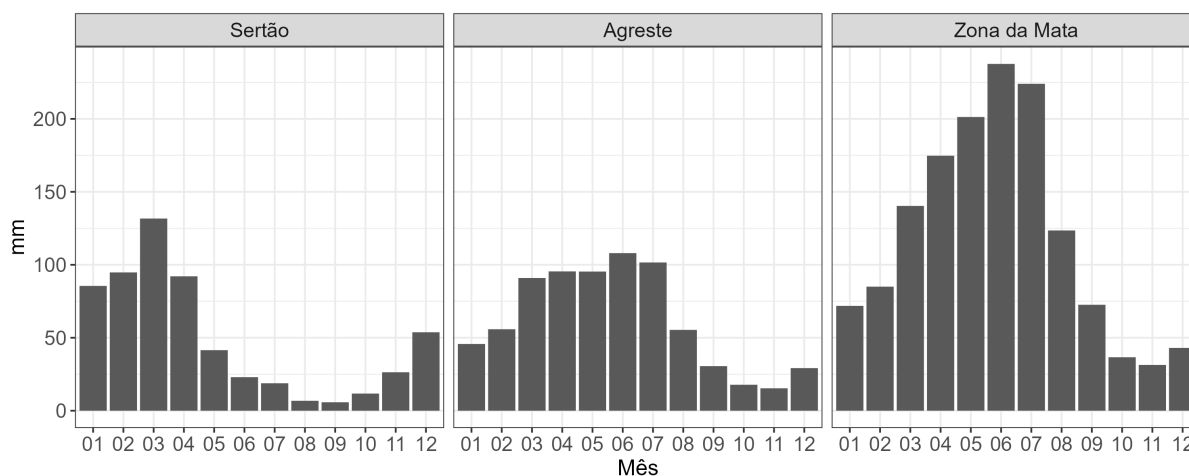
Figura 3 – Acúmulo de chuva anual (1961-2020) para as três regiões de Pernambuco: Sertão (a), Agreste (b) e Zona da Mata (c).



Em contrapartida, os anos com menor precipitação foram registrados em 2012 para o Sertão, 1993 para o Agreste e 1998 para a Zona da Mata, cujos valores foram inferiores a 120mm, 486mm e 843mm, respectivamente. Vale ressaltar que houve a ocorrência do fenômeno La Niña de intensidade forte a moderada nestes anos com fase neutra do dipolo para os anos de 1993 e 1998 e fase positiva para 2012. Segundo [Jardim et al. \(2021\)](#), estes anos foram os mais críticos, levando a danos aos recursos naturais, sociais e econômicos de cada região.

No Sertão, as chuvas iniciam em dezembro e estão associadas ao VCAN. A partir de fevereiro ou março, dependendo do ano, a ZCIT passa a atuar em toda a região, caracterizando sua principal estação de chuva, enquanto que o período seco é igual ou superior a 6 meses por ano ([OLIVA, 2019](#)). Já o Agreste e Zona da Mata apresentam uma distribuição da sua precipitação semelhante, o período chuvoso é mais concentrado entre maio e julho, associado a ZCIT, e o período intenso de seca entre setembro e dezembro ([Figura 4](#)).

Figura 4 – Médias de chuvas mensais (1961-2020) para as três regiões de Pernambuco.



Baixos níveis de precipitação são observados na região do Sertão, a qual é caracterizada por um clima semiárido. Este fato pode ser explicado pela distribuição irregular das chuvas na região, com precipitações mensais inferiores a 100mm, tornando-se uma estação seca, com chuvas concentradas no verão. Em contrapartida, precipitações intensas são encontradas na Zona da Mata em virtude da sua posição geográfica. Esta região recebe grandes massas de ar úmido provenientes do Oceano Atlântico, resultando em altos índices pluviométricos (JARDIM et al., 2021; SILVA et al., 2022).

5.2 Análise dos índices climáticos extremos

As Figura 5 e Figura 6 apresentam a média diária dos 11 índices climáticos analisados para todo o estado. Em relação a PRCPTOT nota-se que esse índice revelou uma diminuição acentuada a medida que se afasta do leste do estado, indicando uma redução na precipitação, principalmente para as regiões Agreste e Sertão, as quais apresentaram, em sua maioria, valores médios inferiores a 900mm por ano. Os maiores valores médios encontrados para este índice foram 1879,30mm, 1366,72mm e 940,69mm para a Zona da Mata, Agreste e Sertão, respectivamente; já os menores valores médios foram: 931,94mm para a Zona da Mata, 398mm para o Agreste e 396,90mm para o Sertão.

Figura 5 – Médias anuais dos índices climáticos extremos interpoladas para a área de estudo: R10mm (a), R20mm (b), R25mm (c), CDD (d) e CWD (e).

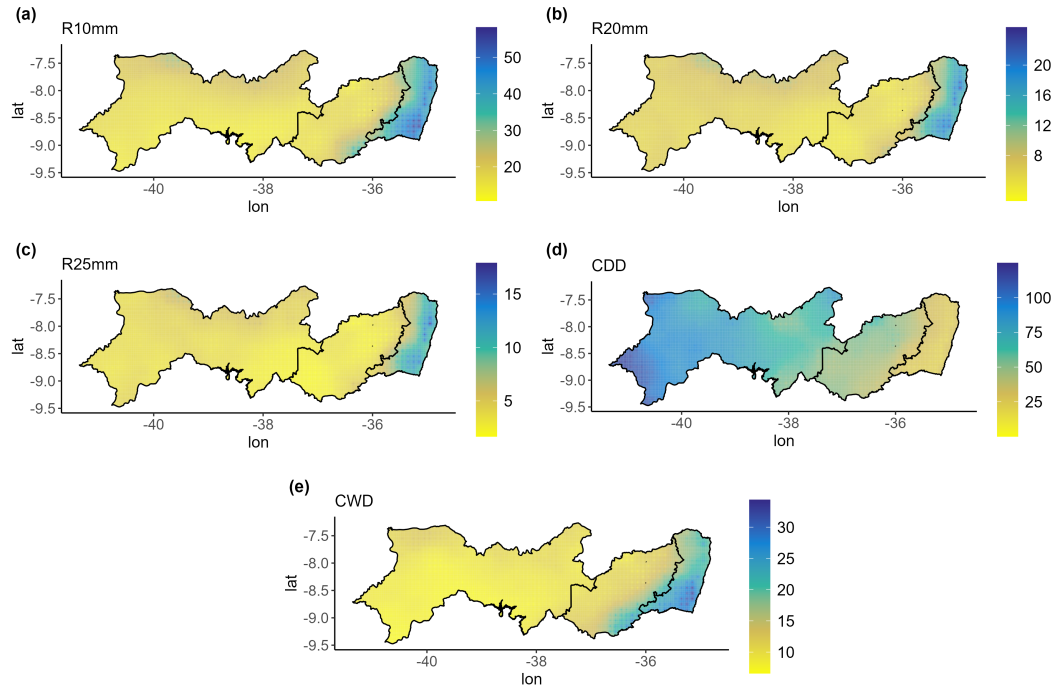
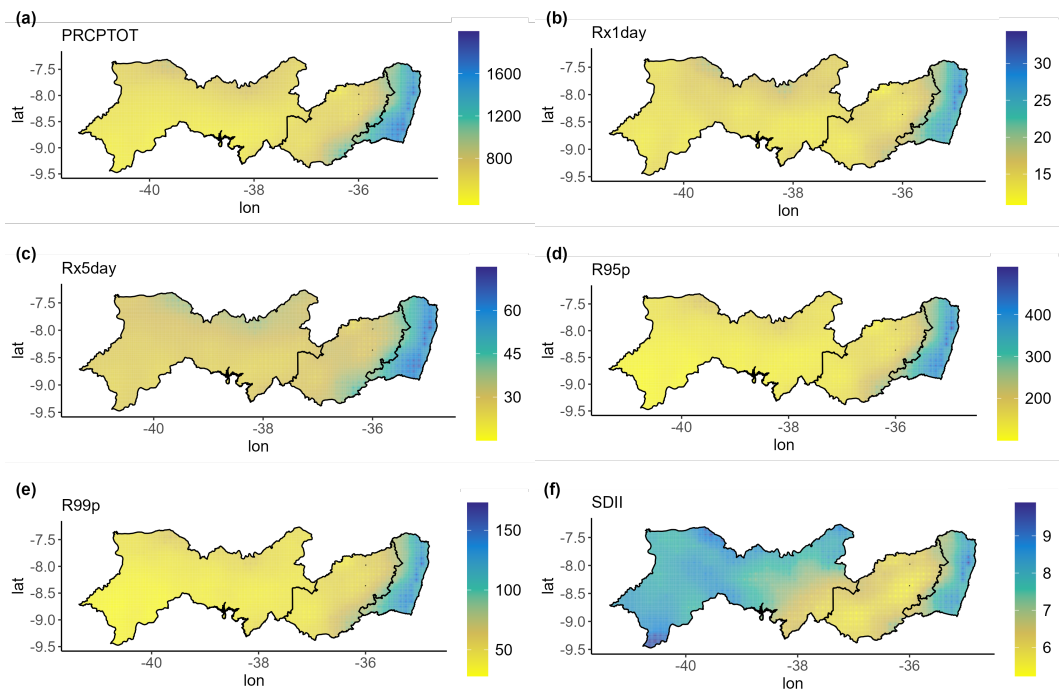


Figura 6 – Médias anuais dos índices climáticos extremos interpoladas para a área de estudo: PRCPTOT (a), Rx1day (b), Rx5day (c), R95p (d), R99p (e) e SDII (f).



Os demais índices, com exceção da SDII e CDD, apresentaram os maiores valores médios para a Zona da Mata. Para a SDII os maiores valores médios encontrados foram 9,77mm/dia, 7,45mm/dia e 9,89mm/dia para a Zona da Mata, Agreste e Sertão, respectivamente. No entanto, os menores valores médios são encontrados no Agreste, apresentando, em sua maioria, resultados inferiores a 7mm/dia, enquanto que o Sertão e Zona da Mata apresentaram valores médios superiores. Isto se explica em razão de que, para o período estudado, o Sertão apresentou um número menor de dias com chuva, porém, com maior intensidade. Os menores valores médios foram: 6,09mm/dia para a Zona da Mata, 5,23mm/dia para o Agreste e 5,6mm/dia para o Sertão. Santos, Santos e Coutinho (2013) encontraram resultados similares, nos quais os maiores valores médios para a SDII foram encontrados para o leste e oeste de Pernambuco.

Já o CDD apresentou um comportamento divergente da maioria dos índices, os maiores valores médios são encontrados no oeste e vão diminuindo a medida que se aproximam do leste do estado, indicando um aumento de dias consecutivos secos nestas regiões, ultrapassando 100 dias de seca na maior parte do Sertão. Os maiores valores médios encontrados foram 35,22 dias, 78,42 dias e 121,37 dias para a Zona da Mata, Agreste e Sertão, respectivamente. Já os menores valores médios foram: 17 dias para a Zona da Mata, 23,68 dias para o Agreste e 45,56 dias para o Sertão. Nóbrega, Farias e Santos (2015) investigaram os índices climáticos extremos para o estado de Pernambuco de 1978 a 2010 e concluíram que as chuvas estão cada vez mais se concentrando em menos dias ao longo do ano, principalmente no Sertão.

Observa-se que a Zona da Mata e parte do Agreste apresentaram os maiores valores médios para o índice CWD. Os maiores valores médios foram 34,37 dias para a Zona da Mata e 29,80 dias para o Agreste. Já o Sertão apresentou 13,54 dias consecutivos úmidos. No entanto, os menores valores médios encontrados foram 6,61 dias, 7,36 dias e 14,83 dias para o Sertão, Agreste e Zona da Mata, respectivamente. Oliveira, Silva e Lima (2017) analisaram a ocorrência e intensidade de eventos extremos de precipitação para o Nordeste no período de 1972 a 2002 e constataram que o semiárido nordestino (parte que engloba o Sertão de Pernambuco) apresentou diminuição em todos os tipos de eventos, favorecendo a ocorrência de períodos secos nesta região.

Ao observar as médias dos índices que contabilizam o número de dias no ano com volumes de chuvas iguais ou acima de 10mm, 20mm e 25mm no estado de Pernambuco percebe-se que os maiores valores médios são registrados na Zona da Mata: 58,19 dias para R10mm, 24,05 dias para R20mm e 17,90 dias para R25mm. Os maiores valores médios destes índices para o Agreste e Sertão, foram, respectivamente: 41,92 dias e 30,70 dias para o R10mm, 12,14 dias e 11,85 dias para o R20mm e 7,10 dias e 8,07 dias para o R25mm. Já

os menores valores médios para a Zona da Mata foram 26,17 dias para R10mm, 7,10 dias para R20mm e 3,88 para R25mm. Os menores valores médios para o Agreste e Sertão, foram, respectivamente: 10,71 dias e 11,19 dias para o R10mm, 3,05 dias e 3,52 dias para o R20mm e 1,68 dias e 2,02 dias para o R25mm.

Analisando os índices R95p e R99p nota-se que as áreas mais afastadas do oceano apresentam os valores médios mais baixos, enquanto as regiões mais próximas do mar apresentam os valores médios mais elevados. Isto acontece por ser uma área fortemente influenciada pela ZCIT, a qual contribui com eventos pluviométricos intensos, principalmente na Zona da Mata (JARDIM et al., 2021). Os maiores valores médios registrados para o R95p e R99p, foram, respectivamente: 513,94mm e 162,23mm para a Zona da Mata, 302,47mm e 97,50mm para o Agreste, e 221,32mm e 67,55mm para o Sertão; enquanto que os menores valores médios para o Sertão foram 99,82mm e 28,56mm, para o Agreste 100,32mm e 31,83mm e para a Zona da Mata 226,28mm e 71,52mm, para o R95p e R99p, respectivamente.

Comportamento semelhante é observado para os índices mensais Rx1day e Rx5day, nos quais os maiores valores são apresentados próximo ao litoral. Os maiores valores médios destes índices para a Zona da Mata, Agreste e Sertão, foram, respectivamente: 34,32mm, 20,83mm e 20,68mm para o Rx1day e 74,80mm, 50,87mm e 40,82mm para o Rx5day. Já os menores valores médios foram: 16,80mm, 10,84mm e 11,95mm para o Rx1day e 39,51mm, 20,95mm e 22,73mm para o Rx5day para a Zona da Mata, Agreste e Sertão, respectivamente.

Para avaliar se existem diferenças significativas dos valores dos índices climáticos entre cada uma das três regiões de Pernambuco foi aplicado o teste de Mann-Whitney-Wilcoxon. As Figura 7 e Figura 8 ilustram a distribuição e comparação de cada índice por região. A análise evidencia alguns padrões: a maioria dos índices apresentam os maiores valores a medida que se aproximam do leste do estado. Percebe-se esse comportamento tanto para a PRCPTOT e CWD quanto para índices de eventos extremos (R95p e R99p). Devido à sua localização geográfica, a Zona da Mata recebe quantidades substanciais de ar quente do Oceano Atlântico, o que resulta em altos índices pluviométricos (JARDIM et al., 2021) e justifica os valores para esses índices.

Figura 7 – Boxplots para os valores dos índices climáticos. Os símbolos “*”, “**”, “***” e “****” indicam que há uma diferença significativa entre as regiões ao nível de significância de 5%, 1%, 0,1% e 0,01%, respectivamente; “ns” significa não significativo: R10mm (a), R20mm (b), R25mm (c), CDD (d) e CWD (e).

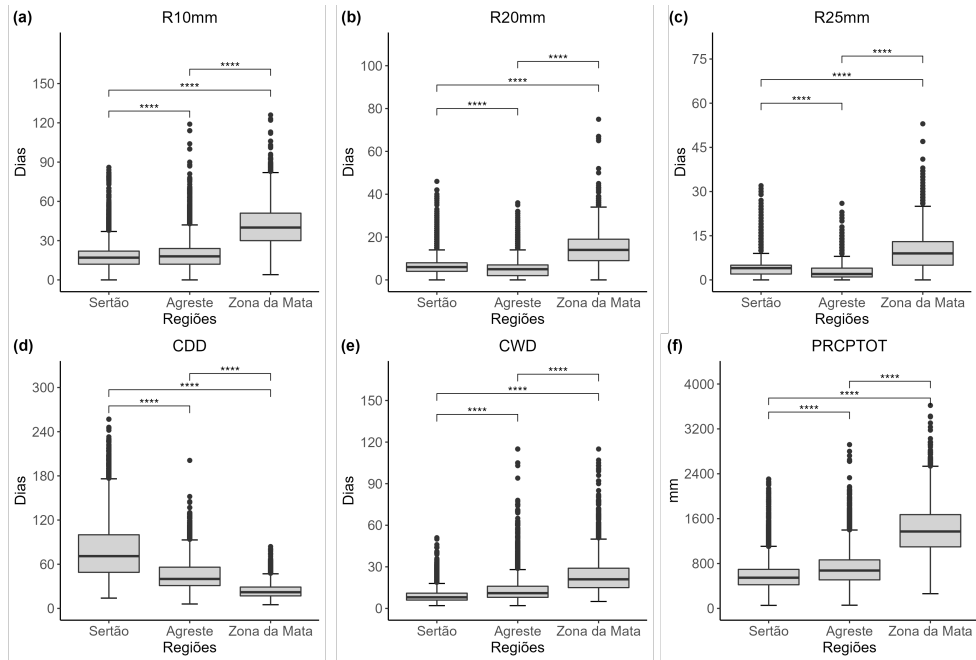
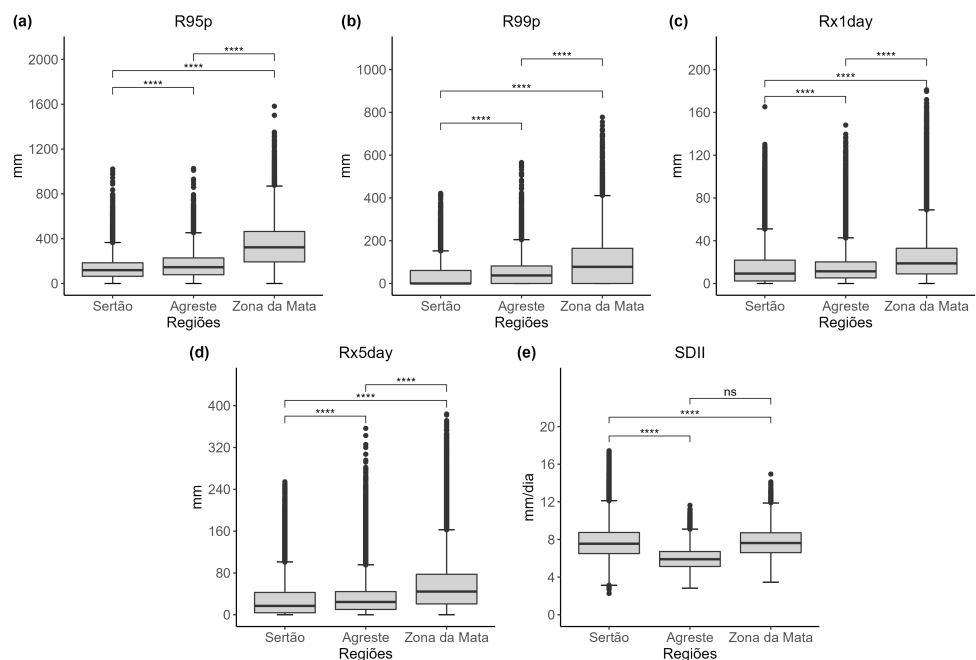


Figura 8 – Boxplots para os valores dos índices climáticos. Os símbolos “*”, “**”, “***” e “****” indicam que há uma diferença significativa entre as regiões ao nível de significância de 5%, 1%, 0,1% e 0,01%, respectivamente; “ns” significa não significativo: PRCPTOT (a), Rx1day (b), Rx5day (c), R95p (d), R99p (e) e SDII (f).



Os índices R10mm, R20mm, R25mm, Rx1day e Rx5day também apresentaram o mesmo comportamento, mas ocorreu uma redução na diferença entre Sertão e Agreste, apresentando medianas muito próximas. Para o Agreste e Sertão as medianas foram, respectivamente, 18 dias e 17 dias para o R10mm, 5 dias e 6 dias para o R20mm, 2 dias e 4 dias para o R25mm. Já para os índices mensais, o Agreste apresentou as medianas 11,39mm e 24,48mm para Rx1day e Rx5day, respectivamente, enquanto que o Sertão apresentou 9,28mm para Rx1day e 16,97mm para Rx5day.

A menor variabilidade apresentada pelos índices R10mm, R10mm, R20mm, R25mm, Rx1day e Rx5day entre o Agreste e Sertão podem estar associadas aos vários fatores e sistemas atmosféricos responsáveis pelas chuvas nestas regiões, como o relevo, posicionamento da ZCIT, atuação do VCAN, entre outros, que tem sua ocorrência variável ao longo dos anos (SILVA; MONTENEGRO; SOUZA, 2017).

Para o índice CDD o padrão apresentado é oposto: os menores valores são encontrados a medida que há um deslocamento para o leste. Aumentos de CDD indicam que há um agravamento de secas mais pronunciados para o oeste do estado. Os valores mais drásticos foram apresentados por um ponto de grade localizado no município de Ouricuri, Sertão de Pernambuco, que chegou a registrar 257 dias consecutivos secos em 2012, ano de seca extrema para o NEB (MARENGO; TORRES; ALVES, 2017). O Sertão apresenta a maior mediana de 71 dias, seguido por 40 dias para o Agreste e 22 dias para a Zona da Mata, que apresenta os menores valores para este índice.

Já o SDII mostra uma notável diferença entre o Sertão e o Agreste. A Zona da Mata apresenta mediana de 7,62mm/dia e o Sertão 7,54mm/dia, enquanto que o Agreste apresenta mediana inferior de 5,90mm/dia. Como o índice SDII é definido como a razão entre a quantidade da PRCPTOT e a quantidade de dias úmidos é necessário que a PRCPTOT esteja diminuindo ou a quantidade de dias úmidos esteja aumentando para que este índice apresente diminuição.

Além disso, o teste de Mann-Whitney-Wilcoxon indica que há uma diferença significativa entre o Sertão e Agreste, e entre o Sertão e a Zona da Mata para todos os índices analisados, refletindo a singularidade da variabilidade pluviométrica na região do Sertão. No entanto, os resultados indicam que há uma diferença significativa entre o Agreste e a Zona da Mata para todos os índices, exceto para a SDII, que não apresentou significância estatística.

Silva et al. (2022) analisaram a regularidade das séries temporais mensais de precipitação durante o período de 1953 a 2012 para o estado de Pernambuco. Ao comparar dois subperíodos de 30 anos (1953-1982 e 1983-2012) os autores encontraram que no segundo período o regime de chuva diminuiu no Sertão e Agreste e aumentou na Zona da

Mata, e que as regiões Agreste e Zona da Mata tornaram-se mais semelhantes no que diz respeito à regularidade da dinâmica das chuvas.

5.3 Magnitude e tendência dos índices climáticos extremos

As Figura 9 e Figura 10 mostram a distribuição espacial das tendências positivas e negativas encontradas pelo teste de Mann-Kendall para cada índice em relação aos pontos de grade estudados. Nota-se que as tendências significativas para a PRCPTOT se distribuem de maneira desuniforme por todo o estado, concentrando-se na Zona da Mata e principalmente, na parte oeste do Sertão. A maioria das tendências significativas para o estado de Pernambuco no período de 1961 a 2020 para este índice foram negativas.

Figura 9 – Distribuição espacial da tendência dos índices climáticos sobre o estado de Pernambuco, ao nível de significância de 0,05. Os triângulos preenchidos indicam tendências significativas, obtidas pelo teste de Mann-Kendall; PRCPTOT (a), Rx1day (b), Rx5day (c), R95p (d), R99p (e) e SDII (f).

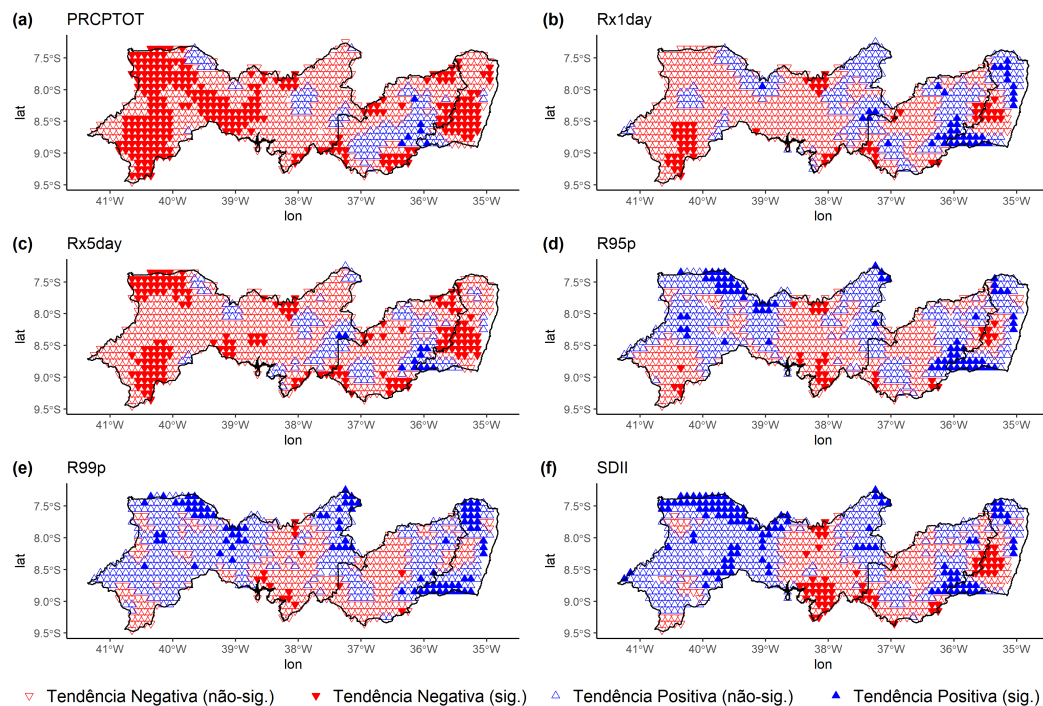
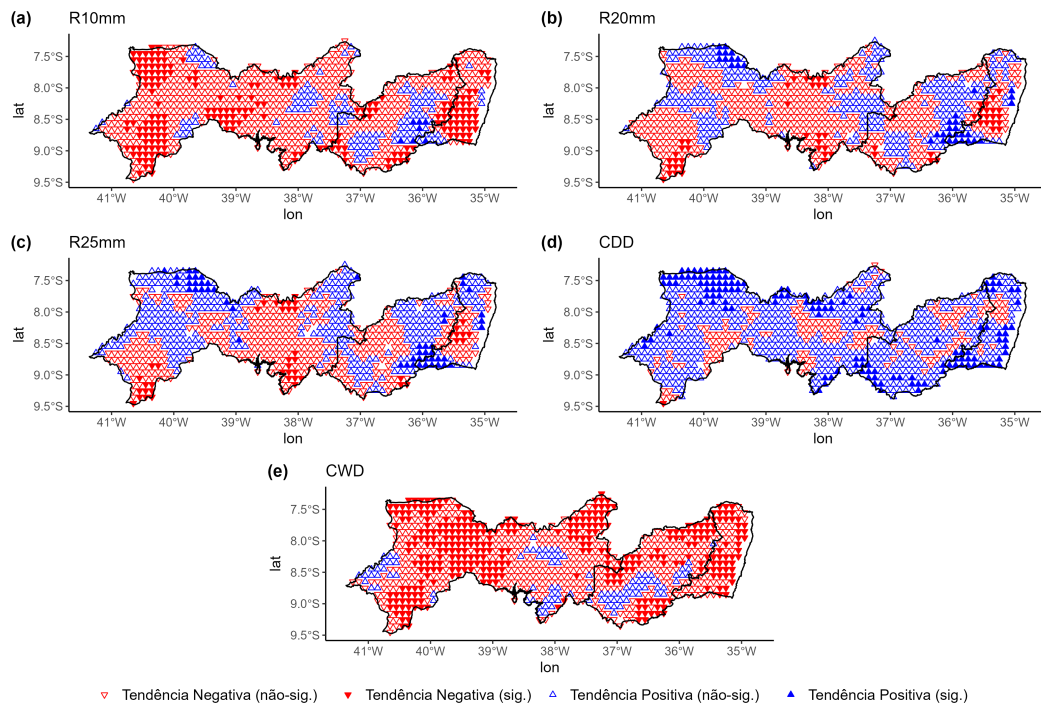


Figura 10 – Distribuição espacial da tendência dos índices climáticos sobre o estado de Pernambuco, ao nível de significância de 0,05. Os triângulos preenchidos indicam tendências significativas, obtidas pelo teste de Mann-Kendall; R10mm (a), R20mm (b), R25mm (c), CDD (d) e CWD (e).



Além disso, observa-se que as tendências significativas encontradas aqui para a SDII nem sempre são acompanhadas por tendências significativas do índice PRCPTOT. Algumas tendências positivas significativas da SDII ocorrem em pontos de grade nos quais foram detectados tendências negativas significativas da PRCPTOT. Essa discrepância sugere que, apesar de não ter sido observado aumento geral da precipitação nessas regiões, houve uma diminuição significativa no número de dias chuvosos, corroborando a teoria de que os eventos chuvosos têm se concentrado em eventos mais curtos ao longo do tempo (NÓBREGA; FARIAS; SANTOS, 2015).

A distribuição dos índices mensais ligados às chuvas mais intensas (Rx1day e Rx5day) são equilibradas entre tendências positivas e negativas ao longo de todo o estado, no entanto, a maioria das tendências não são significativas. Tendências positivas para o Rx1day são encontradas mais ao leste do estado, enquanto que o Rx5day apresenta algumas tendências negativas significativas para cada região. Quanto aos dias úmidos (R95p) e extremamente úmidos (R99p) observou-se um comportamento correlato, as regiões apresentaram algumas tendências significativas tanto positivas quanto negativas.

Já a distribuição dos dias consecutivos úmidos (CWD) demonstram reduções significativas em grande parte do estado. Enquanto que, os dias consecutivos secos (CDD)

apresentam tendências positivas distribuídas de maneira desuniforme para cada região, indicando uma intensificação das secas em Pernambuco.

Para os três índices baseados em valores mínimos específicos de chuva diária (R10mm, R20mm e R25mm) percebe-se uma distribuição de tendências positivas e negativas em todo o estado, onde a maioria indica uma tendência de redução. Esses índices apresentaram-se diretamente proporcionais a precipitação total anual e aos dias consecutivos úmidos, uma vez que, quando a PRCPTOT diminui e o CDD aumenta a precipitação torna-se menos intensa, dessa forma, dias com chuvas moderadas são cada vez mais raros.

A Figura 11 e Figura 12 apresentam o percentual de tendências significativas, positivas e negativas, de acordo com o teste de Mann-Kendall. Observa-se que as tendências da PRCPTOT, em sua maioria, mostraram diminuição nas três regiões de Pernambuco, onde 210 pontos de grade apresentaram resultados significativos para o Sertão (40,23%), 47 para o Agreste (22,93%) e 36 para a Zona da Mata (43,90%). No Agreste e Zona da Mata também foram encontradas tendências significativas de aumento, 2,44% e 1,22%, respectivamente. No entanto, o Sertão não apresentou tendências positivas significativas, indicando uma diminuição da PRCPTOT nesta região que já sofre com chuvas escassas e mal distribuídas.

Figura 11 – Percentual de tendências significativas para cada índice climático no estado de Pernambuco: PRCPTOT (a), Rx1day (b), Rx5day (c), R95p (d), R99p (e) e SDII (f).

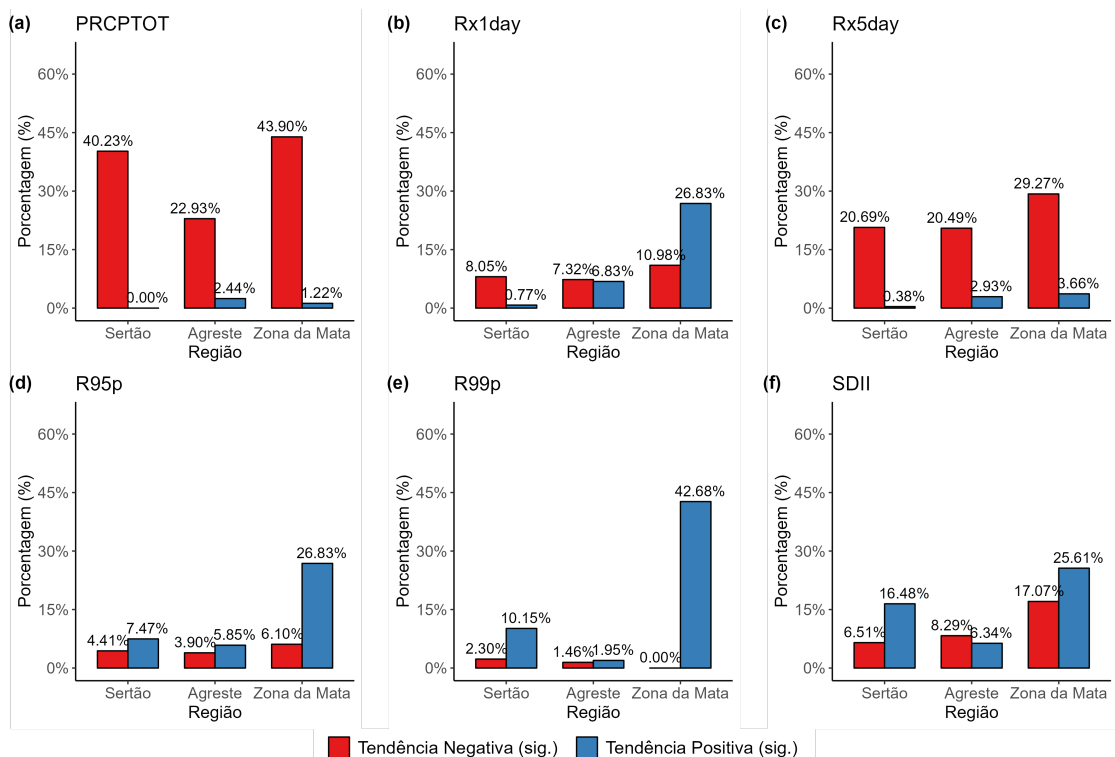
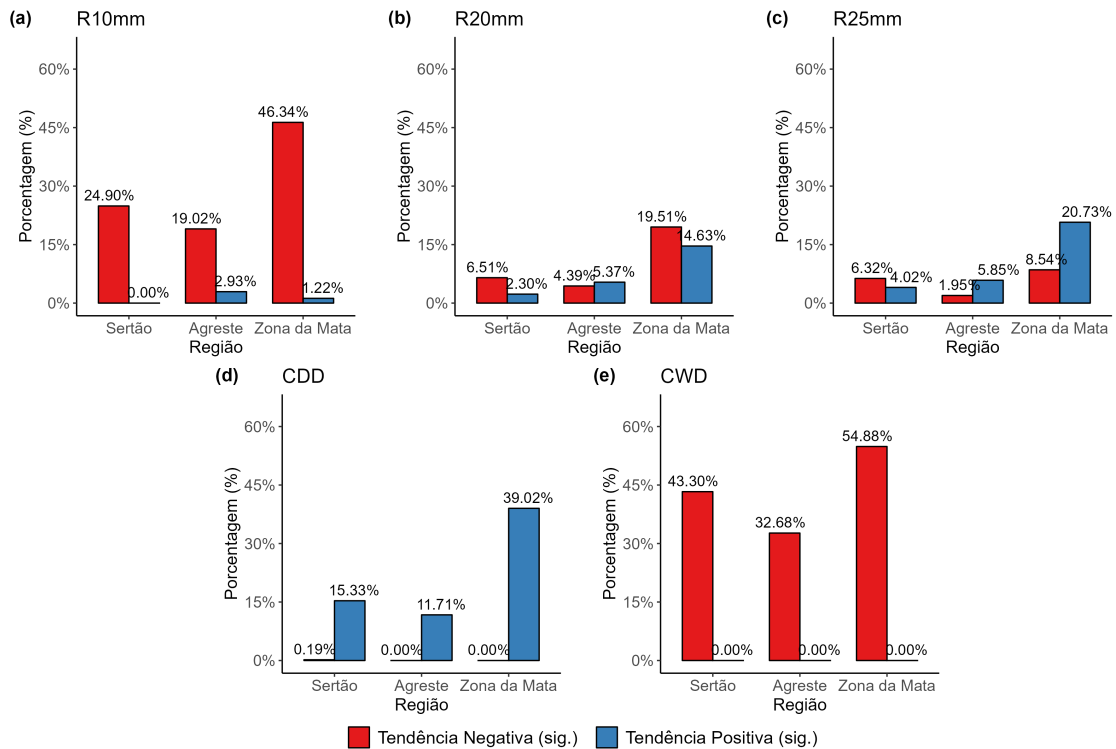


Figura 12 – Percentual de tendências significativas para cada índice climático no estado de Pernambuco: R10mm (a), R20mm (b), R25mm (c), CDD (d) e CWD (e).



Santos, Santos e Coutinho (2013) também encontraram tendências de diminuição deste índice para todo o estado de Pernambuco, onde os maiores valores foram apresentados para o oeste do estado. A redução da precipitação total anual no Sertão corrobora no histórico de escassez hídrica que vem afetando o semiárido do Nordeste, podendo apresentar maiores problemas quanto ao acesso de água e ampliação do processo de desertificação da área.

Verificou-se que 66 pontos de grade (8,16%), 9 na Zona da Mata, 15 no Agreste e 42 no Sertão, demonstraram uma tendência de diminuição na precipitação máxima mensal em um dia (Rx1day), enquanto 40 pontos (4,94%), 22 na Zona da Mata, 14 no Agreste e 4 no Sertão, demonstraram uma tendência de aumento desse índice.

Em relação a precipitação máxima mensal consecutiva em 5 dias (Rx5day) observou-se que a quantidade de tendências negativas apresentaram-se em maior quantidade em relação as positivas, visto que, 174 pontos (21,5%), 24 na Zona da Mata, 42 no Agreste e 108 no Sertão, indicaram uma tendência de aumento do Rx5day, enquanto que 11 pontos (1,36%), 3 na Zona da Mata, 6 no Agreste e 2 no Sertão, demonstraram tendência de diminuição. Estes resultados complementam ao índice PRCPTOT, pois à medida que a precipitação total anual diminui, o mesmo ocorrerá com a quantidade de precipitação em

um e cinco dias consecutivos.

Santos e Brito (2007) ao analisarem os índices climáticos extremos para o semiárido do Brasil, utilizaram 44 postos pluviométricos localizados nos estados do Rio Grande do Norte e Paraíba para o período de 1935 a 2000. Em relação aos índices Rx1day e Rx5day verificaram tendências negativas e positivas, no entanto as tendências positivas foram predominantes, coincidindo com o aumento do índice PRCPTOT, indicando um aumento de dias úmidos nestas localidades.

Quanto aos dias úmidos (R95p) e extremamente úmidos (R99p) notou-se que 36 pontos (4,45%), 5 na Zona da Mata, 8 no Agreste e 23 no Sertão, apresentaram tendência de diminuição do índice R95p, enquanto que 73 pontos (9,02%), 22 na Zona da Mata, 12 no Agreste e 39 no Sertão, apresentaram tendência de aumento. Para o índice R99p tem-se que apenas 15 pontos (1,85%), 3 no Agreste e 12 no Sertão, apresentaram tendência de diminuição, enquanto que 92 pontos (11,4%), 35 na Zona da Mata, 4 no Agreste e 53 no Sertão, apresentaram tendências de aumento.

Ao analisarem o estado de Pernambuco Nóbrega, Farias e Santos (2015) evidenciaram um aumento na ocorrência de eventos extremos, com exceção da Zona da Mata que apresentou tendência de redução. Estes resultados indicam que as chuvas extremas estão se tornando menos frequentes nesta região e mais frequentes em outras partes do estado. No entanto, Silva, Montenegro e Souza (2017) observaram que mesmo indicando tendência de diminuição da precipitação e de eventos extremos na Zona da Mata, o R99p apresentou tendência de aumento na bacia do Rio Sirinhaém que está inserida nesta região. Além disso, os autores ressaltaram a ocorrência de possíveis desastres naturais, como cheias e inundações.

A precipitação média em dias úmidos (SDII) apresentou tendência de diminuição no estado para 322 pontos de grade (39,8%), dentre estes, 65 pontos (8,03%), 14 na Zona da Mata, 17 no Agreste e 34 no Sertão, apresentaram tendência significativa. Verificou-se que, dentre os 65 pontos que apresentaram tendência significativa para a SDII, 39 pontos (4,82%), 14 na Zona da Mata, 15 no Agreste e 10 no Sertão, apresentaram tendência de diminuição do índice PRCPTOT, evidenciando a redução na precipitação total anual.

Resultados semelhantes foram encontrados por Assis et al. (2021) em estudo no estado de Pernambuco para o período de 1964 a 2016, no qual avaliaram índices de detecção de mudanças climáticas. Os autores identificaram uma tendência de diminuição da precipitação média em dias úmidos e da precipitação total anual da bacia do rio Pajeú. Costa et al. (2020) ao analisarem os índices climáticos para o Nordeste, no período de 1961 a 2014, também encontraram tendências de diminuição da PRCPTOT e da SDII, indicando um redução da precipitação nesta região.

No entanto, verificou-se que 120 pontos de grade (14,8%) indicaram uma tendência significativa de aumento da SDII, sendo 86 pontos (16,48%) no Sertão, 13 (6,34%) no Agreste e 21 (25,61%) na Zona da Mata. No trabalho realizado por [Silva et al. \(2019\)](#) para a Amazônia e o Nordeste do Brasil, foram avaliados os índices recomendados pela ETCCDMI. Os autores indicaram tendências de aumento da SDII para quatro sub-regiões: Amazônia Ocidental e Oriental e Litoral Norte e Sul do Nordeste; eles ressaltam que o aumento da SDII para o Nordeste está relacionada a ZCIT e outros sistemas atmosféricos importantes que atuam nesta região.

Em relação aos dias consecutivos secos (CDD), observa-se que 136 pontos de grade (16,81%), 32 na Zona da Mata, 24 no Agreste e 80 no Sertão, indicaram uma tendência de aumento, enquanto que apenas um ponto (0,19%) apresentou uma tendência significativa de diminuição deste índice no Sertão. Em relação aos dias consecutivos úmidos (CWD) foram encontrados 338 pontos (41,78%), 45 na Zona da Mata, 67 no Agreste e 226 no Sertão, que indicaram tendência significativa de diminuição. No entanto, não foram encontradas tendências significativas de aumento para este índice. Dentre os 475 pontos (58,71%) que apresentaram alguma tendência significativa para os índices CDD e CWD, 73 pontos (15,37%) apresentaram tendências opostos, os quais 18 pontos foram encontrados na Zona da Mata, 8 no Agreste e 47 no Sertão.

O aumento do CDD e a diminuição do CWD indicam não apenas menos chuvas na área de estudo, como é mostrado pelo índice PRCPTOT, mas também uma concentração de precipitação em um período de tempo mais curto. De acordo com projeções climáticas futuras para o Nordeste do Brasil, os dias consecutivos secos indicam uma tendência de aumento, o que sugere uma maior frequência e/ou intensidade da seca e possível aridificação desta região ([MARENGO; TORRES; ALVES, 2017](#)).

Para o R10mm (dias com precipitação igual ou superior a 10mm), 207 pontos de grade (25,6%) apresentaram tendência de diminuição; destes, 130 pontos (24,90%) foram encontrados no Sertão, 39 (19,02%) no Agreste e 38 (46,34%) na Zona da Mata. No entanto, apenas 7 pontos (0,87%) apresentaram tendência positiva significativa, nos quais 6 pontos de grade (2,93%) foram encontrados no Agreste e 1 ponto (1,22%) na Zona da Mata. Com isso, verifica-se uma tendência de diminuição nos eventos de precipitação diária iguais ou superiores a 10mm para o Sertão de Pernambuco.

Já os índices que representam eventos de precipitação forte (R20mm e R25mm) nota-se tendências significativas mais equilibradas. Para o R20mm (dias com precipitação igual ou superior a 20mm) foram encontrados 59 pontos de grade (7,29%) indicando tendência de diminuição, nos quais 16 pontos (19,51%) foram encontrados na Zona da Mata, 9 (4,39%) no Agreste e 34 (6,51%) no Sertão. No entanto, 35 pontos (4,33%), 12

para a Zona da Mata, 11 para o Agreste e 12 para o Sertão, indicaram tendência de aumento deste índice. Em relação ao R25mm (dias com precipitação igual ou superior a 25mm), 44 pontos (5,44%) demonstraram uma redução, 33 pontos na Zona da Mata, 4 no Agreste e 7 no Sertão, enquanto que 50 pontos (6,18%), 21 na Zona da Mata, 12 no Agreste e 17 no Sertão, indicaram uma tendência de aumento.

O sen's slope foi utilizado para mensurar as magnitudes das tendências encontradas pelo teste de Mann-Kendall. Os resultados estão expostos na [Figura 13](#) e [Figura 14](#) para cada índice estudado. Observa-se que algumas variações se tornam negativas à medida que se aproximam do litoral leste do estado. Percebe-se esse comportamento claramente para a PRCPTOT, CWD, R10mm e Rx5day, onde os resultados apontam para variações mais acentuadas. Grande parte da Zona da Mata apresentou uma diminuição de até 15,20 mm/ano para a PRCPTOT. Os pontos de grade localizados no Agreste e Sertão apresentaram reduções de até 13,75mm/ano e 5,77mm/ano, respectivamente, para este índice.

Figura 13 – Distribuição espacial do sen's slope interpolada para o estado de Pernambuco: PRCPTOT (a), Rx1day (b), Rx5day (c), R95p(d), R99p (e) e SDII (f).

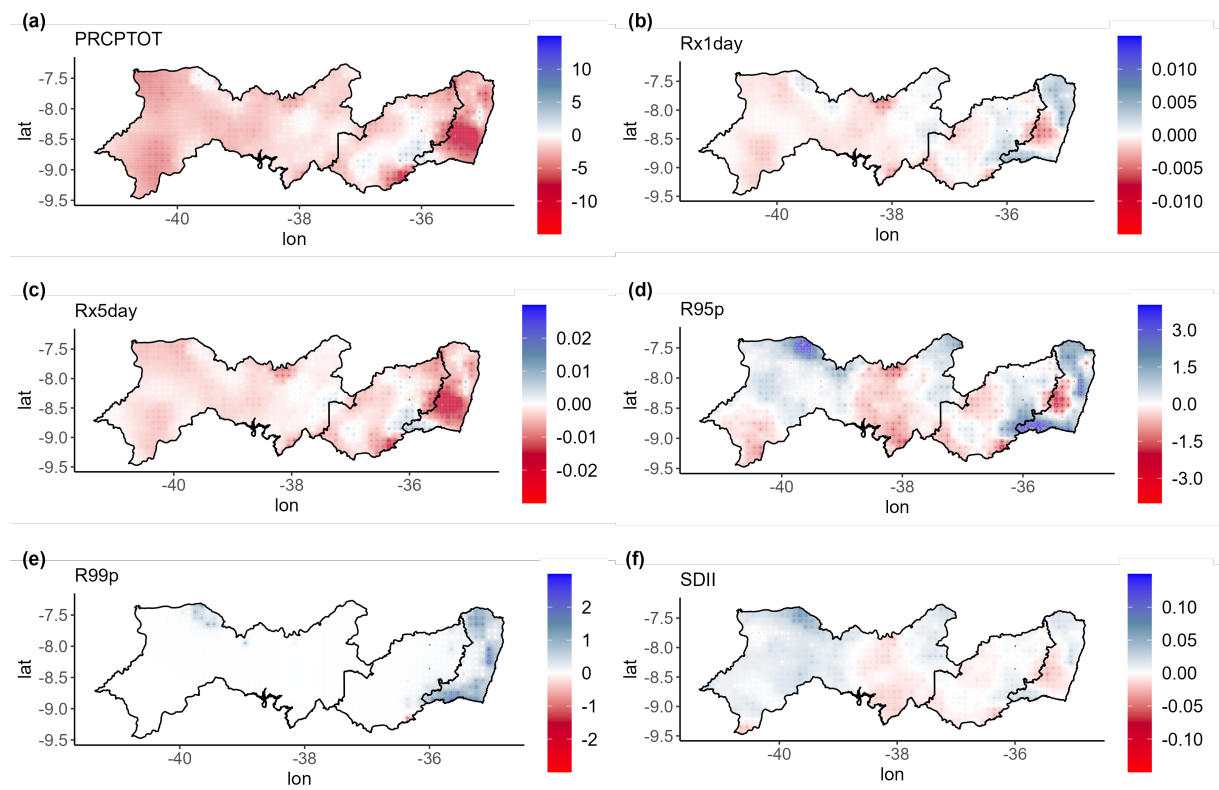
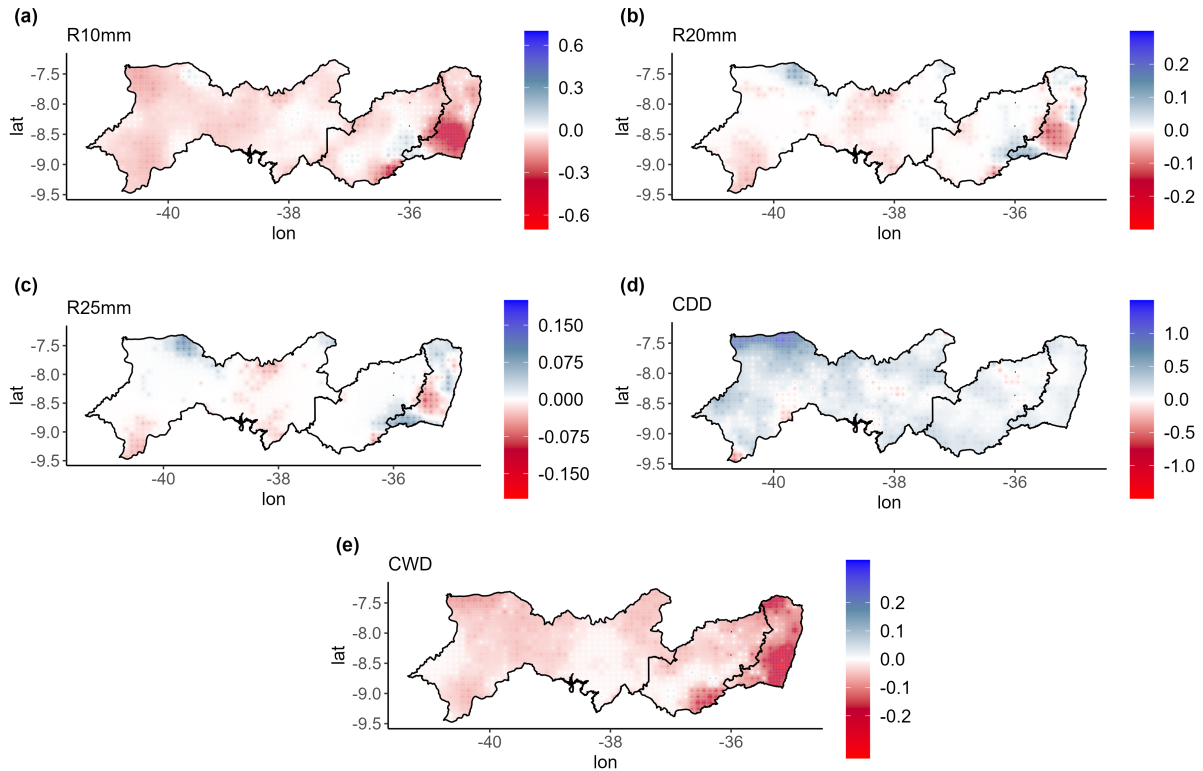


Figura 14 – Distribuição espacial do sen's slope interpolada para o estado de Pernambuco: R10mm (a), R20mm (b), R25mm (c), CDD (d) e CWD (e).



Marengo, Torres e Alves (2017) encontraram em seus modelos de projeções futuras para o Nordeste reduções na precipitação de 0,5mm/dia a 1,0mm/dia. Estes resultados indicam quedas nos totais pluviométricos, sugerindo a ocorrência de mais estiagens e aumento na frequência e intensidade da seca. Todas essas condições podem aumentar a evaporação de reservatórios e lagos, afetando a irrigação e agricultura. Diante disso, este fato confirma a necessidade de melhoria na gestão de recursos hídricos nessas áreas.

Em relação aos episódios extremos de chuva registrados em um dia (Rx1day) e em cinco dias consecutivos (Rx5day) as magnitudes apontam para reduções em praticamente todo o estado, com pequenas exceções. O Rx1day apresenta reduções de até 0,009mm/ano e o Rx5day de até 0,03mm/ano. A intensidade da precipitação média (SDII) apresentou valores tanto positivos quanto negativos de suas magnitudes, variando entre -0,04mm/dia/ano a 0,11mm/dia/ano.

O índice R95p também apresentou magnitudes tanto positivas quanto negativas para todo o estado, variando entre -4,42mm/ano a 6,67mm/ano. Já o R99p apresenta a maior parte de suas magnitudes igual a zero. Estes resultados ocorrem devido ao fato de em regiões muito secas o valor desta variável assumir frequentemente o valor zero, pois chuvas muito intensas não são tão comuns (ASSIS et al., 2021). Vale ressaltar que tal

comportamento não impede que o teste de Mann-Kendall identifique tendências positivas em alguns pontos.

Para o CDD encontra-se, em sua maioria, magnitudes positivas para todo o estado. Aumentos do CDD indicam que há um agravamento da seca mais ao oeste de Pernambuco. A Zona da Mata apresenta um aumento de até 0,37dia/ano, seguido pelo Agreste com 0,43dia/ano. Já o Sertão apresenta um aumento de 1,36dia/ano.

A grande maioria das variações do CWD é de ordem negativa, no entanto, as reduções são mais expressivas para a Zona da Mata (0,36dia/ano) e parte do Agreste (0,26dia/ano). Os resultados do CDD e CWD são consistentes; há um aumento no número de dias consecutivos secos e, conseqüentemente, uma redução no número de dias consecutivos úmidos. Isto indica um aumento na escassez hídrica na área, contribuindo com secas prolongadas.

As magnitudes associadas aos episódios de chuvas moderadas (R10mm) revelam uma diminuição em quase todo o estado, os maiores valores são encontrados na Zona da Mata de até 0,67dia/ano. Já os episódios de chuvas intensas (R20mm e R25mm) mostram variações tanto positivas quanto negativas de suas magnitudes variando entre -0,58dia/ano a 0,21dia/ano. Estes resultados são consistentes com [Silva et al. \(2022\)](#) que encontraram reduções em dias com precipitações iguais ou superiores a 10mm e 20mm.

6 Conclusão

O desenvolvimento de pesquisas climáticas que identifiquem a frequência e intensidade de episódios extremos de precipitação em regiões específicas é de fundamental importância, principalmente para tomadas de decisões que precisam de informações qualificadas e precisas. Desta forma, é necessário investigar e avaliar possíveis mudanças climáticas, bem como suas características, magnitudes, efeitos e consequências.

Portanto, a partir de 11 índices climáticos extremos, recomendados pela ETCCDMI, e métodos estatísticos não paramétricos, foram analisadas as séries de precipitação diária referentes ao estado de Pernambuco. Esta região é especialmente suscetível a severas crises hídricas em suas áreas mais secas, enquanto eventos de precipitação intensa acometem com frequência áreas chuvosas, ocasionando inundações e deslizamentos.

A análise da precipitação bem como dos índices climáticos extremos mostraram mudanças no padrão e comportamento. Ao longo dos 59 anos analisados (1961-2020) foi possível identificar tanto aumento nos valores de alguns índices quanto diminuição em outros. Através dos resultados foi possível concluir que há uma intensificação da seca em grande parte de Pernambuco (principalmente no Sertão que já sofre com escassez de chuva), com as chuvas cada vez mais concentradas em períodos de tempo mais curtos, e os períodos de seca intercalados entre esses eventos de chuva estão se tornando mais longos.

De acordo com as tendências, verificou-se evidências de aceleração no processo de desertificação da região do Sertão e um aumento nos dias úmidos e extremamente úmidos da Zona da Mata, o que merece atenção especial devido aos recorrentes desastres associados a fortes precipitações nesta região, que podem ocasionar enchentes e inundações. Já as magnitudes identificaram que há decréscimos na precipitação de Pernambuco, favorecendo a ocorrência de mais estiagens e aumento na frequência e intensidade da seca. Além disso, foi possível concluir que a comparação entre os valores dos índices de cada região indicaram diferenças significativas entre seus valores.

Em relação a espacialização da precipitação conclui-se que a variabilidade climática de Pernambuco está relacionada aos sistemas atmosféricos que atuam no estado, como a ZCIT e VCAN, além da sua localização geográfica, vegetação e topografia, os quais em regiões com característica de clima tropical úmido apresentam estação chuvosa de maio a julho (Zona da Mata e Agreste) e em clima semiárido (Sertão) a maior pluviosidade é registrada de janeiro a março.

Entre as medidas de adaptação e mitigação aos impactos causados pelas mudanças climáticas em Pernambuco, enfatiza-se a possibilidade de criar mecanismos que facilitem o uso otimizado da água, evitando o desperdício e reduzindo as perdas. Além disso, sugerem-se que algumas iniciativas governamentais poderiam ser adotadas e ampliadas para lidar com as consequências das mudanças climáticas em curso, como o desenvolvimento de programas de reflorestamento que abranjam todos os biomas, da Caatinga a Mata Atlântica, nas áreas rurais e urbanas. Em relação aos impactos causados pelas fortes precipitações que causam cheias e deslizamentos de terra se faz necessário avaliar os locais de riscos e aplicar medidas adaptativas, como zoneamento e mudanças no padrão de ocupação.

Espera-se que os resultados obtidos neste trabalho ajudem na melhor compreensão dos eventos de precipitação em Pernambuco no período analisado. Portanto, recomenda-se incluir outras localidades da região do Nordeste em estudos futuros e/ou utilizar outras variáveis meteorológicas.

Referências Bibliográficas

- ALCÂNTARA, L. R. P. de et al. Mudanças climáticas e tendências do regime pluviométrico do recife. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 3, p. e178932583–e178932583, 2020.
- ALVES, J. M. B. et al. Modelos acoplados do ipcc-ar4 e o gradiente meridional de temperatura da superfície do mar no atlântico tropical: relações com a precipitação no norte do nordeste do brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 29, p. 568–578, 2014.
- ARAGÃO, J. O. R. d. O impacto do enso e do dipolo do atlântico no nordeste do brasil. **Bulletin de l’Institut Français d’Études Andines**, Persée-Portail des revues scientifiques en SHS, v. 27, n. 3, p. 839–844, 1998.
- ASSIS, J. O. M. de et al. Methods to analyze spatio-temporal rainfall variability: application to the pajéu river basin, pernambuco, brazil. **Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)**, v. 56, n. 4, p. 577–588, 2021.
- BARRY, A. et al. West africa climate extremes and climate change indices. **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 38, p. e921–e938, 2018.
- BECK, S.; MAHONY, M. The ipcc and the new map of science and politics. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, Wiley Online Library, v. 9, n. 6, p. e547, 2018.
- BEZERRA, B. G. et al. Changes of precipitation extremes indices in são francisco river basin, brazil from 1947 to 2012. **Theoretical and Applied Climatology**, Springer, v. 135, n. 1, p. 565–576, 2019.
- BEZERRA, J. F. dos S. Análise do desenvolvimento e atuação do vórtice ciclônico de altos níveis em janeiro de 2016 no agreste meridional, pernambuco. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 2, p. 491–499, 2016.
- BRONAUGH, D.; HIEBERT, M. J.; RCPP, L. Package ‘climdex. pcic’. 2015.
- CAI, W. et al. Climate impacts of the el niño–southern oscillation on south america. **Nature Reviews Earth & Environment**, Nature Publishing Group, v. 1, n. 4, p. 215–231, 2020.
- CARUSO, C.; QUARTA, F. Interpolation methods comparison. **Computers & Mathematics with Applications**, Elsevier, v. 35, n. 12, p. 109–126, 1998.
- CAVALCANTI, I. F. **Tempo e clima no Brasil**. [S.l.]: Oficina de textos, 2016.

CHEN, F.-W.; LIU, C.-W. Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (idw) in the middle of taiwan. **Paddy and Water Environment**, Springer, v. 10, n. 3, p. 209–222, 2012.

COSTA, R. L. et al. Analysis of climate extremes indices over northeast brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, Elsevier, v. 28, p. 100254, 2020.

ERFANIAN, A.; WANG, G.; FOMENKO, L. Unprecedented drought over tropical south america in 2016: significantly under-predicted by tropical sst. **Scientific reports**, Nature Publishing Group, v. 7, n. 1, p. 1–11, 2017.

FILHO, W. L. F. C. et al. Rainfall variability in the brazilian northeast biomes and their interactions with meteorological systems and enso via chelsa product. **Big Earth Data**, Taylor & Francis, v. 3, n. 4, p. 315–337, 2019.

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Analysis of changes in meteorological variables using mann-kendall and sen's slope estimator statistical tests in serbia. **Global and Planetary Change**, Elsevier, v. 100, p. 172–182, 2013.

HADI, S. J.; TOMBUL, M. Comparison of spatial interpolation methods of precipitation and temperature using multiple integration periods. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, Springer, v. 46, n. 7, p. 1187–1199, 2018.

HESS, A.; IYER, H.; MALM, W. Linear trend analysis: a comparison of methods. **Atmospheric environment**, Elsevier, v. 35, n. 30, p. 5211–5222, 2001.

HONG, Y.; YING, S. Characteristics of extreme temperature and precipitation in china in 2017 based on etccdi indices. **Advances in Climate Change Research**, Elsevier, v. 9, n. 4, p. 218–226, 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability: Contribution of working group ii to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate change 2013: The physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. part b: Regional aspects. contribution of working group ii to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **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, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2021.

- JARDIM, A. M. d. R. F. et al. Spatiotemporal climatic analysis in pernambuco state, northeast brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Elsevier, v. 223, p. 105733, 2021.
- KEBLOUTI, M.; OUERDACHI, L.; BOUTAGHANE, H. Spatial interpolation of annual precipitation in annaba-algeria-comparison and evaluation of methods. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 18, p. 468–475, 2012.
- KENDALL, M. G. Rank Correlation Methods. Charles Griffin: London, 1975.
- KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical south atlantic. **Tellus**, Taylor & Francis, v. 33, n. 6, p. 538–551, 1981.
- LUCENA, L. R. R. de et al. Lacunarity analysis of daily rainfall data in pernambuco, brazil. **Acta Scientiarum. Technology**, Universidade Estadual de Maringá, v. 40, 2018.
- MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica: Journal of the econometric society**, JSTOR, p. 245–259, 1945.
- MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **The annals of mathematical statistics**, JSTOR, p. 50–60, 1947.
- MARENGO, J. A. et al. Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no brasil e américa do sul para o século xxi: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais. **Relatório**, v. 5, p. 495–516, 2007.
- MARENGO, J. A. et al. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**, Instituto Nacional do Semiárido Campina Grande, v. 1, p. 385–422, 2011.
- MARENGO, J. A. et al. Future change of climate in south america in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, Springer, v. 35, n. 6, p. 1073–1097, 2010.
- MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 36, n. 3, p. 1033–1050, 2016.
- MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in northeast brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, Springer, v. 129, n. 3, p. 1189–1200, 2017.
- MARRAFON, V. H.; REBOITA, M. S. Características da precipitação na américa do sul reveladas através de índices climáticos. **Revista brasileira de climatologia**, v. 26, 2020.
- MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. [S.l.]: Oficina de textos, 2017.
- MORAIS, M. D. C. de; GAN, M. A.; YOSHIDA, M. C. Features of the upper tropospheric cyclonic vortices of northeast brazil in life cycle stages. **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 41, p. E39–E58, 2021.

- MOREIRA, A. B. et al. Eventos extremos e a cidade: estudo de caso dos impactos causados por um evento climático em área urbana. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 06, p. 1730–1745, 2017.
- NASHWAN, M. S.; SHAHID, S. Spatial distribution of unidirectional trends in climate and weather extremes in Nile river basin. **Theoretical and applied climatology**, Springer, v. 137, n. 1, p. 1181–1199, 2019.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION - NOAA. **Climate Prediction Center**.: North atlantic oscilation (NAO)(1950-2022). 2022. <https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php>. Acessado em 20 de setembro de 2022.
- NÓBREGA, R. S.; FARIAS, R. F. d. L.; SANTOS, C. A. C. d. Variabilidade temporal e espacial da precipitação pluviométrica em pernambuco através de índices de extremos climáticos. **Revista brasileira de meteorologia**, SciELO Brasil, v. 30, p. 171–180, 2015.
- OLIVA, F. G. Climatologia e variabilidade dos principais sistemas meteorológicos atuantes no brasil, relação com chuvas intensas e impactos relacionados. **GeoPUC, Rio de Janeiro**, v. 12, n. 23, p. p74–99, 2019.
- OLIVEIRA, P. T.; SILVA, S. e; LIMA, K. C. Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of northeast brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Springer, v. 130, n. 1, p. 77–90, 2017.
- PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS - PBMC. Primeiro relatório de avaliação nacional do painel brasileiro de mudanças climáticas. **Sumário Executivo do GT2**, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.
- PEBESMA, E.; GRAELER, B.; PEBESMA, M. E. Package ‘gstat’. **Comprehensive R Archive Network (CRAN)**, p. 1–0, 2015.
- PENEREIRO, J. C.; MESCHIATTI, M. C. Tendências em séries anuais de precipitação e temperaturas no Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 23, p. 319–331, 2018.
- POHLERT, T. Non-parametric trend tests and change-point detection. **CC BY-ND**, v. 4, 2016.
- POHLERT, T.; POHLERT, M. T.; KENDALL, S. Package ‘trend’. **Title non-parametric trend tests and change-point detection**, 2016.
- REBOITA, M. S. et al. Análise sinótica e numérica de um vcan no nordeste do brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 1, p. 41–59, 2017.
- REIS, L. C. D. et al. Analysis of Climate Extreme Indices in the MATOPIBA Region, Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, Springer, v. 177, n. 9, p. 4457–4478, 2020.
- SANTOS, A. M. M. et al. Biogeographical relationships among tropical forests in north-eastern brazil. **Journal of biogeography**, Wiley Online Library, v. 34, n. 3, p. 437–446, 2007.

- SANTOS, C. A. C. d.; BRITO, J. I. B. d. Análise dos índices de extremos para o semi-árido do brasil e suas relações com tsm e ivdn. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 22, p. 303–312, 2007.
- SANTOS, P. V. D.; SANTOS, R. dos; COUTINHO, M. D. L. Detecção de mudanças climáticas através de índices pluviométricos diários no estado de pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 4, p. 713–731, 2013.
- SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American statistical association**, Taylor & Francis, v. 63, n. 324, p. 1379–1389, 1968.
- SHEPARD, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: **Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference**. [S.l.: s.n.], 1968. p. 517–524.
- SILVA, A. S. A. d. et al. Spatial and temporal variability of precipitation complexity in northeast brazil. **Sustainability**, MDPI, v. 14, n. 20, p. 13467, 2022.
- SILVA, A. S. A. da et al. Comparison of interpolation methods for spatial distribution of monthly precipitation in the state of pernambuco, brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 24, n. 3, p. 04018068, 2019.
- SILVA, A. S. Alves da et al. Trends and persistence of dry–wet conditions in northeast brazil. **Atmosphere**, MDPI, v. 11, n. 10, p. 1134, 2020.
- SILVA, M. V. da et al. Spatial modeling of rainfall patterns and groundwater on the coast of northeastern brazil. **Urban Climate**, Elsevier, v. 38, p. 100911, 2021.
- SILVA, P. E. D. et al. Precipitation and air temperature extremes in the amazon and northeast brazil. **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 39, n. 2, p. 579–595, 2019.
- SILVA, R. O. B. d.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SOUZA, W. M. d. Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de Pernambuco. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 22, p. 579–589, 2017.
- SILVA, T. R. B. F. et al. Climate indices-based analysis of rainfall spatiotemporal variability in pernambuco state, brazil. **Water**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 14, n. 14, p. 2190, 2022.
- TEAM, R CORE. **R: A language and environment for statistical computing**. **R Foundation for Statistical Computing**,: Vienna, austria. <http://www.R-project.org/>, 2013.
- TIMMERMANN, A. et al. El niño–southern oscillation complexity. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 559, n. 7715, p. 535–545, 2018.
- WILCOXON, F. Probability tables for individual comparisons by ranking methods. **Biometrics**, JSTOR, v. 3, n. 3, p. 119–122, 1947.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. An update of Xavier, King and Scanlon (2016) daily precipitation gridded data set for the Brazil. In: **Anais XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto –SBSR**. Santos/SP: [s.n.], 2017. p. 0562–0569. ISBN 978-85-17-00088-1.

XAVIER, A. C. et al. New improved brazilian daily weather gridded data (1961-2020). **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, 2022.

ZHANG, X.; YANG, F. Rclimdex (1.0) user manual. **Climate Research Branch Environment Canada**, v. 22, 2004.