



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

IGOR GUSTAVO SANTOS DE ALMEIDA

**PLUVIOMETRIA DA BACIA DO RIO PAJEÚ: ANÁLISE
COMPARATIVA COM ERA5-LAND, SPI E TESTES DE
TENDÊNCIA**

Recife

2024

IGOR GUSTAVO SANTOS DE ALMEIDA

**PLUVIOMETRIA DA BACIA DO RIO PAJEÚ: ANÁLISE COMPARATIVA COM
ERA5-LAND, SPI E TESTES DE TENDÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Pernambuco, Centro
de Tecnologia e Geociências, como requisito
parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. D.Sc. Leidjane Maria Maciel de Oliveira

Coorientadora: Prof^a. M.Sc. Haylla Rebeka de Albuquerque Lins Leonardo

Recife

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Almeida, Igor Gustavo Santos de.

Pluviometria da bacia do Rio Pajeú: Análise comparativa com ERA5-LAND, SPI e testes de tendência / Igor Gustavo Santos de Almeida. - Recife, 2024.

56 p. : il., tab.

Orientador(a): Leijdane Maria Maciel de Oliveira

Cooorientador(a): Haylla Rebeka de Albuquerque Lins Leonardo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2024.

1. Precipitação. 2. ERA5-Land. 3. Índice de seca. I. Oliveira, Leijdane Maria Maciel de. (Orientação). II. Leonardo, Haylla Rebeka de Albuquerque Lins. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

IGOR GUSTAVO SANTOS DE ALMEIDA

**PLUVIOMETRIA DA BACIA DO RIO PAJEÚ: ANÁLISE COMPARATIVA COM
ERA5-LAND, SPI E TESTES DE TENDÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Pernambuco, Centro
de Tecnologia e Geociências, como requisito
parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovado em: 03 de abril de 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. D.Sc. Leidjane Maria Maciel de Oliveira (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. M.Sc. Haylla Rebeka de Albuquerque Lins Leonardo (Coorientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. D.Sc. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. M.Sc. Débora Natália Oliveira de Almeida (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

*“Riacho do Navio
Corre pro Pajeú
O Rio Pajeú vai despejar
No São Francisco
O rio São Francisco
Vai bater no meio do mar “*
Luiz Gonzaga do Nascimento

AGRADECIMENTOS

De início, não poderia deixar de agradecer a Deus, principalmente pelo seu cuidado nos momentos mais difíceis, quando não me deixa perder de vista os meus objetivos.

À minha família, em especial à minha mãe, que nunca deixou de incentivar seus filhos a irem em busca dos seus sonhos. Com ela, aprendi que a família vem sempre em primeiro lugar. Ao meu irmão, por todos os momentos em que teve paciência para me orientar na jornada da vida. Você assumiu um papel muito importante para mim e, principalmente, despertou o meu lado engenheiro. Você foi e é uma inspiração para mim. Aos meus avós, Seu Manoel (In Memoriam), que, em 15 anos de convivência, não mediu esforços para me incentivar a seguir meus sonhos, bem como a me ensinar os maiores valores da vida. À dona Di, você foi minha segunda mãe, não à toa temos tanto carinho e cuidado um pelo outro. Obrigado por cada momento que já desfrutamos juntos. Aos meus tios, Denilson e Dora, obrigado por sempre investirem e acreditarem em mim. Vocês têm uma grande parcela no meu crescimento pessoal e profissional.

À Maria Eduarda, você foi responsável pelos meus maiores dias de inspiração no desenvolvimento desse trabalho. Seu apoio, críticas e sugestões foram de grande valia. Ademais, te agradeço por proporcionar os melhores dias de lazer durante essa jornada da graduação. Você não imagina o quanto amo viver e colecionar momentos ao seu lado.

Aos meus professores da graduação, deixo aqui o meu mais sincero obrigado. Sem vocês, eu não saberia 1% do mundo da engenharia. À Leijdane e Haylla, agradeço imensamente pelas dicas, insights e puxões de orelha durante a jornada de produção desse estudo.

Aos meus amigos, sobretudo Eduardo, Pedro, Enio e Mateus, meu muito obrigado pelo companheirismo, risadas e distrações ao longo da jornada até aqui. Por fim, obrigado a todos que de alguma forma contribuíram para a minha formação como Engenheiro Civil. Muitos foram demasiadamente importantes, principalmente os que estavam comigo nos dias mais difíceis desse árduo percurso.

RESUMO

A investigação da variabilidade da precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú é de importância crucial, dado o impacto direto dos eventos climáticos extremos na sociedade e no meio ambiente. A compreensão das dinâmicas climáticas locais ao longo do tempo é essencial para a gestão sustentável dos recursos hídricos e o desenvolvimento de estratégias adaptativas. Este estudo tem como propósito analisar as variações pluviométricas na referida bacia, empregando dados de precipitação extraídos de uma estação pluviométrica localizada na área da pesquisa, imagens de satélite e procedimentos estatísticos. A avaliação da precipitação englobou duas séries de dados: uma oriunda de uma estação pluviométrica sob responsabilidade da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e outra proveniente do conjunto de dados do ERA5-Land. A metodologia adotada neste estudo abrangeu diversas etapas. Inicialmente, foi realizado o cálculo do Índice de Precipitação Padronizado (SPI) para analisar os déficits de precipitação em diferentes escalas temporais. Em seguida, uma análise estatística abrangente foi conduzida, incluindo o teste de estacionariedade de Spearman, o teste de tendência de Mann-Kendall, o teste sazonal e a abordagem de Pettitt para detectar mudanças abruptas nos dados. Além disso, para avaliar a precisão dos dados do ERA5-Land, foram utilizados o coeficiente de correlação (R) e o Erro Médio Absoluto (MAE). A pesquisa na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú revelou uma variabilidade significativa na precipitação ao longo de 37 anos. Mediante os dados do ERA5-Land e análises estatísticas robustas, constatou-se uma tendência positiva na série temporal, ressaltando-se os anos de 1993, 1998 e 2012 como os mais secos. O Índice de Precipitação Padronizado (SPI) indicando, portanto, um R de 0,88 entre os dados observados e do ERA5-Land, com um MAE de 0,28. Os testes de estacionariedade confirmaram a estabilidade temporal das séries, proporcionando uma base sólida para análises subsequentes.

Palavras-chave: precipitação; ERA5-Land; índice de seca.

ABSTRACT

The investigation of precipitation variability in the Pajeú River Basin is of crucial importance, given the direct impact of extreme weather events on society and the environment. Understanding local climate dynamics over time is essential for sustainable water resource management and the development of adaptive strategies. This study aims to analyze precipitation variations in the basin, employing precipitation data extracted from a rain gauge station located in the research area, satellite imagery, and statistical procedures. Precipitation assessment encompassed two data series: one from a rain gauge station under the responsibility of ANA and another from the ERA5-Land dataset. The methodology adopted in this study comprised several stages. Initially, the Standardized Precipitation Index (SPI) calculation was performed to analyze precipitation deficits at different temporal scales. Subsequently, a comprehensive statistical analysis was conducted, including the Spearman's rank correlation test, Mann-Kendall trend test, seasonal test, and Pettitt's approach to detect abrupt changes in the data. Additionally, to assess the accuracy of ERA5-Land data, the coefficient of correlation (R) and Mean Absolute Error (MAE) were used. Research in the Pajeú River Basin revealed significant precipitation variability over 37 years. Based on ERA5-Land data and robust statistical analyses, a positive trend in the time series was observed, with the years 1993, 1998, and 2012 standing out as the driest. The Standardized Precipitation Index (SPI) indicated an R of 0.88 between observed and ERA5-Land data, with an MAE of 0.28. Stationarity tests confirmed the temporal stability of the series, providing a solid foundation for subsequent analyses.

Keywords: precipitation; ERA5-Land; drought index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Pajeú.	21
Figura 2 – Municípios abrangidos pela bacia hidrográfica do Rio Pajeú.....	22
Figura 3 – Localização da área de estudo.....	23
Figura 4 – Interface de extração dos dados do ERA5-Land.....	25
Figura 5 – Fluxograma das etapas de análise deste trabalho.	26
Figura 6 – Interface do <i>software</i> RStudio.....	27
Figura 7 – Fluxograma das etapas estatísticas.....	28
Figura 8 – Precipitação anual média (mm) para a bacia hidrográfica do Rio Pajeú de 1984 a 2021.	31
Figura 9 – Precipitação mensal média (mm) para a bacia hidrográfica do Rio Pajeú de 1984 a 2021.	33
Figura 10 – Recorte da precipitação média mensal (mm) para o ano de 1985.....	34
Figura 11 – Precipitação anual vs média ao longo da série temporal, dos dados observados. .	36
Figura 12 – Precipitação anual vs média ao longo da série temporal, dos dados do ERA5-Land.	36
Figura 13 – SPI vs precipitação com base nos dados extraídos da Estação 838000 operada pelo SGB/CPRM.	37
Figura 14 – SPI vs precipitação com base nos dados extraídos do ERA5-Land.	38
Figura 15 – SPI mensal da estação de referência vs ERA5-Land.	39
Figura 16 – SPI anual da estação de referência vs ERA5-Land.	40
Figura 17 – Dispersão para as séries utilizadas no estudo.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aplicação do Índice de Precipitação Padronizado (SPI).	18
Tabela 2 – Dados do posto pluviométrico Airi (Rochedo), utilizado no estudo.	24
Tabela 3 – Dados utilizados do ERA5.	25
Tabela 4 – Categoria seca/umidade em relação ao Índice de Precipitação Padronizado (SPI).	26
Tabela 5 – Anos com registros da ocorrência do <i>El Niño</i> e da <i>La Niña</i> no Brasil.	31
Tabela 6 – Maiores valores de precipitação para a estação observada.	35
Tabela 7 – Menores valores de precipitação para a estação observada.	35
Tabela 8 – Maiores valores de precipitação para o ERA5-Land.	35
Tabela 9 – Menores valores de precipitação para o ERA5-Land.	35
Tabela 10 – Teste da série temporal para os dados da estação pluviométrica de referência.	42
Tabela 11 – Teste sazonal para os dados da estação pluviométrica de referência	43
Tabela 12 – Teste da série temporal para os dados pluviométricos extraídos do ERA5-Land.	44
Tabela 13 – Teste Sazonal para os dados pluviométricos extraídos do ERA5-Land.	44
Tabela 14 – Teste de Estacionariedade, dados da estação pluviométrica de referência.	45
Tabela 15 – Teste de Estacionariedade, dados pluviométricos extraídos do ERA5-Land.	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
SGB/CPRM	Serviço Geológico do Brasil
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
NBR	Norma Brasileira
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SPI	<i>Standardized Precipitation Index</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	13
1.2	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	ANÁLISE DA PLUVIOMETRIA	15
2.2	DADOS DO ERA5-LAND	15
2.3	ÍNDICE DE SECA	16
2.4	TESTES DE HIPÓTESES E TENDÊNCIAS	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1	ÁREA DE ESTUDO	21
3.2	CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA	24
3.3	PROCESSAMENTO DOS DADOS	25
3.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	28
4	RESULTADOS	31
4.1	PRECIPITAÇÃO	31
4.2	ÍNDICE DE SECA	36
4.3	AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA	41
4.3.1	Testes de tendências	42
4.3.2	Testes de hipóteses.....	45
5	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm ocasionado transformações nos microclimas naturais, com notável ênfase na alteração dos padrões de precipitação. Segundo Jacobi e Trani (2019), as mudanças climáticas podem ser o maior desafio da humanidade nos próximos anos, os autores afirmam que efeitos previstos para décadas futuras já estão acontecendo. De acordo com um estudo de Seneviratne *et al.* (2012), mudanças nos padrões de precipitação têm sido associadas a períodos prolongados de seca em várias regiões do mundo.

O aumento da frequência e intensidade das secas, muitas vezes associado a padrões de precipitação irregulares, tem impactos substanciais nos ecossistemas terrestres e aquáticos (COOK; AULT; SMERDON, 2015). Essas mudanças nos regimes de seca têm implicações profundas na distribuição de espécies, na composição de comunidades e nos serviços ecossistêmicos.

De acordo com Silva *et al.* (2020), nas últimas décadas os eventos extremos destacam-se devido aos impactos socioambientais em inúmeras cidades. O Brasil apresenta uma heterogeneidade marcante em seus padrões de chuva, influenciada por fatores geográficos, topográficos e climáticos, em conformidade com Marengo *et al.* (2012). Regiões como a Amazônia, por exemplo, exibem altos índices pluviométricos anuais, enquanto o Nordeste é caracterizado por sua variabilidade interanual e pela ocorrência de secas prolongadas.

Eventos climáticos globais, como o *El Niño* e *La Niña*, têm o potencial de desencadear variações nos padrões de precipitação, resultando em anos de chuvas excepcionalmente abundantes ou períodos prolongados de seca. Neste âmbito, Nóbrega, Santiago e Soares (2016) destacaram que as anomalias térmicas dos oceanos Pacífico (*El Niño/La Niña*) e Atlântico Tropical (Padrão Dipolo) exercem influência sobre a ocorrência de chuvas acima ou abaixo da média na região Nordeste do Brasil. De tal forma que compreender essa variação é fundamental para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos e para a adaptação às mudanças climáticas em diferentes regiões do país.

No Nordeste brasileiro, segundo Ferreira, Corrêa e Cirilo (2022), a análise das mudanças climáticas se faz necessária com a ótica dos processos que influenciam o padrão das distribuições de chuva, tanto temporal quanto espacial. É importante destacar, nesse contexto, o fator de irregularidade na distribuição dos índices pluviométricos, além disso, de acordo com Marengo *et al.* (2020) a região está localizada em grande parte na região semiárida, caracterizada por uma grande variabilidade espacial e temporal das chuvas.

A variação de chuva e seca no Semiárido Nordestino tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores brasileiros. Portanto, compreender as complexas dinâmicas climáticas

dessa região é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação dos impactos socioambientais dessas variações.

Uma importante ferramenta a ser aplicada para esses estudos é o Sensoriamento Remoto, uma técnica que viabiliza a aquisição de informações e dados através de imagens obtidas por satélites, proporcionando uma análise precisa dos ambientes terrestres (Silva; Zaidan, 2011). Essa metodologia desempenha um papel crucial na análise de secas, permitindo a monitorização de padrões de vegetação, umidade do solo e distribuição espacial da seca ao longo do tempo.

Essa análise é amplamente facilitada pelo uso de índices como o SPI (*Standardized Precipitation Index*). O SPI, conforme explorado por McKee, Doesken e Kleist (1993), quantifica anomalias de precipitação em relação à média histórica, fornecendo uma medida padronizada da severidade da seca.

Além da aplicação de índices, têm-se a utilização de base de dados e modelos espaciais, entre eles destaca-se o modelo ERA5-Land, desenvolvido pelo ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), que incorpora dados de solo, vegetação e outras variáveis em um sistema de reanálise, fornecendo informações detalhadas sobre condições climáticas e hídricas, como discutido por Muñoz-Sabater *et al.* (2021). A escolha do modelo espacial ERA5-Land é justificada pela sua alta resolução espacial e temporal, o que permite uma análise mais detalhada e precisa das condições pluviométricas em diferentes regiões geográficas. Essas ferramentas desempenham um papel crucial na análise precisa das secas e na elaboração de estratégias de mitigação.

A compreensão das dinâmicas climáticas locais é vital para a gestão sustentável dos recursos hídricos e a implementação de estratégias adaptativas. As alterações nos padrões de precipitação impactam ecossistemas e têm implicações socioeconômicas, como evidenciado em eventos extremos em cidades recentes. No Brasil, a heterogeneidade nos padrões de chuva, especialmente no Nordeste, destaca a necessidade de uma abordagem regionalizada. A análise das mudanças climáticas nessa região semiárida é importante para desenvolver estratégias de adaptação e mitigação. Ferramentas como sensoriamento remoto, índices como SPI e modelos espaciais como o ERA5-Land são essenciais para monitorar e analisar a variabilidade climática, proporcionando *insights* cruciais para o planejamento e a gestão eficazes diante das mudanças climáticas.

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

A realização de estudo com enfoque na investigação dos índices de seca e pluviometria na região da Bacia do Rio Pajeú, situada no Semiárido pernambucano, é de grande relevância.

Essa área é excepcionalmente sensível às flutuações climáticas, enfrentando períodos recorrentes de escassez hídrica que afetam diretamente a vida das comunidades locais e os ecossistemas. A análise meticulosa desses índices, incluindo o SPI e outros parâmetros relacionados à precipitação, proporcionará uma avaliação precisa da vulnerabilidade à seca neste contexto específico.

Além disso, a Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú desempenha um papel crucial no abastecimento de água e na sustentabilidade da agricultura na região, destacando a necessidade premente de uma compreensão aprofundada das condições climáticas e de sua influência direta sobre a disponibilidade de recursos hídricos.

1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O escopo deste estudo consiste em analisar as variações pluviométricas na bacia do Rio Pajeú por meio da utilização de dados de pluviômetro e de satélite meteorológico. O intuito principal é realizar uma comparação sistemática da eficácia entre dois métodos distintos de extração de dados aplicados na análise de índice de seca, além da aplicação de testes estatísticos para avaliação de hipóteses e identificação de tendências relevantes. Em relação aos objetivos específicos, teve-se:

- Comparar os dados da série histórica de precipitação coletados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú com os dados de precipitação extraídos do ERA5-Land;
- Avaliar a correlação pluviométrica através do índice de seca (SPI);
- Aplicar testes de hipóteses e tendências visando identificar padrões significativos, comportamentos cíclicos ou tendências temporais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ANÁLISE DA PLUVIOMETRIA

Os dados pluviométricos coletados por estações meteorológicas desempenham um papel fundamental na compreensão das mudanças climáticas e no monitoramento de secas em diferentes regiões. Como ressaltado por Knippelberg (2019), as estações meteorológicas são capazes de indicar mudanças bruscas na precipitação, temperatura e umidade do ar, além de poder detectar a velocidade e direção do vento.

Esses dados são extremamente relevantes quando se trata de avaliar os impactos das mudanças climáticas. O relatório do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) de 2018 enfatiza que as mudanças climáticas estão causando alterações nos padrões de precipitação em todo o mundo, tornando essencial o acompanhamento preciso das tendências de precipitação (IPCC, 2018)

Wilhite (2000) destaca que a análise de séries históricas de dados de precipitação pode revelar padrões de seca, como a frequência e a intensidade desses eventos. Essas informações são fundamentais para avaliar a vulnerabilidade de uma região às secas e para o desenvolvimento de estratégias de adaptação. Também para detectar e avaliar essas secas, os dados pluviométricos são cruciais. Como afirma McNeeley (2012), o registro e a análise de dados pluviométricos desempenham um papel central na detecção de eventos de seca e na compreensão de suas causas e impactos.

Além disso, os dados pluviométricos também são utilizados no cálculo de índices de seca, como o SPI (*Standardized Precipitation Index*). Esse índice permite quantificar a severidade das secas e avaliar o impacto nos recursos hídricos (MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993; KOGAN, 2002).

2.2 DADOS DO ERA5-LAND

A extração de dados pluviométricos do ERA5-Land é um procedimento de grande relevância na pesquisa climática e na obtenção de informações meteorológicas confiáveis. Conforme destacado por Hersbach (2020), o ERA5 Land, desenvolvido pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), é uma fonte de dados climáticos amplamente utilizada para uma variedade de aplicações, incluindo análises climáticas e estudos de mudanças climáticas.

O processo de extração de dados pluviométricos do ERA5-Land envolve a utilização de ferramentas de análise de dados climáticos e linguagens de programação, como *Python*, R ou outras, para acessar e processar as informações de precipitação. Como mencionado por França

(2023), o ERA5-Land é um conjunto de dados de reanálise que fornece uma visão consistente da evolução das variáveis de terreno ao longo de várias décadas com uma resolução aprimorada em comparação com o ERA5.

A qualidade dos dados pluviométricos extraídos do ERA5-Land é essencial para garantir a confiabilidade das análises climáticas. Portanto, é importante seguir procedimentos padrão de validação e qualidade de dados, a fim de garantir que as informações de precipitação obtidas sejam precisas e adequadas para uso em estudos científicos e aplicações práticas.

Para calcular a acurácia da reanálise utilizando os dados do ERA5-Land, foram utilizados dois indicadores: o MAE (*Mean Absolute Error*) e o coeficiente de correlação (R). Essas métricas são extensamente utilizadas para avaliar modelos de regressão neste tipo de problema.

O MAE é um indicador que fornece uma medida direta da magnitude média dos erros entre os valores observados e os previstos pelo modelo. Segundo Qi *et al.* (2020), é importante levar em consideração a relevância da magnitude dos erros e a sensibilidade a *outliers* (pontos extremos) ao selecionar a métrica mais adequada para a tarefa de avaliação.

O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida do grau de relacionamento linear entre duas variáveis aleatórias, enfatizando a predição do grau de dependência entre elas (BRITO, 2007). Este coeficiente varia de -1 a 1, sendo considerado aceitável se estiver entre 0,36 e 0,75, e bom se for superior a 0,75 (COLLISCHONN, 2001).

2.3 ÍNDICE DE SECA

A seca é um evento natural que pode manifestar-se em várias regiões climáticas, não apresentando um ponto de início específico. Tais fases prolongadas de baixa precipitação exercem impactos substanciais tanto na sociedade quanto no meio ambiente (MISHRA e SINGH, 2010). Entretanto, adquirir uma base de dados abrangente e confiável para pesquisas de modelagem, agricultura, gestão de recursos hídricos, monitoramento de secas, inundações e outros propósitos pode ser um desafio, especialmente em áreas semiáridas, como a região da Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú.

Como consequência dessas dificuldades, segundo Tavares *et al.* (2023), os dados provenientes de produtos de Sensoriamento Remoto têm se mostrado cada vez mais úteis para preencher essas lacunas e aprimorar a compreensão dos componentes climáticos, visto que esses produtos oferecem uma alternativa viável. Com sua aplicação, torna-se possível impulsionar estudos científicos e ampliar o conhecimento sobre o clima e suas interações (SANTOS, CUNHA E RIBEIRO-NETO, 2019; ANDRADE *et al.*, 2022; FUNK *et al.*, 2015).

O *Standardized Precipitation Index*, Índice de Precipitação Padronizado, ou simplesmente SPI, é um índice de seca desenvolvido por McKee, Doesken e Kleist (1993), no intuito de contribuir com a definição objetiva de secas e avançar sobre estudos de seu comportamento no tempo e no espaço. Seu cálculo é baseado em *quantis* da distribuição Normal Padrão (distribuição normal com média igual a zero e desvio padrão igual a um) e nas probabilidades associadas a esses *quantis* (SANTOS, 2011).

A integração entre a análise da precipitação e a avaliação das condições de seca é fundamental para compreender a dinâmica hidrológica de uma determinada região. Ao investigar os padrões de precipitação ao longo do tempo, é possível identificar variações significativas na quantidade e distribuição das chuvas, bem como períodos de escassez. Esses dados são essenciais para caracterizar as condições climáticas locais e avaliar os impactos das mudanças no regime de chuvas sobre os recursos hídricos disponíveis. Atualmente, uma ampla variedade de métodos e índices foram desenvolvidos para a avaliação e mensuração da seca, levando em consideração diversas variáveis, como precipitação, temperatura, evapotranspiração e umidade do solo. Entre esses índices, o SPI se destaca como um dos mais utilizados para avaliar a seca (VICENTE-SERRANO; BERGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2010).

O processamento do índice de seca SPI representa uma etapa fundamental na análise climática e na avaliação da vulnerabilidade à seca em determinada região. Conforme elucidado por McKee, Doesken e Kleist (1993), o SPI é um índice meteorológico desenvolvido para quantificar o déficit de precipitação em relação à média histórica, fornecendo uma medida padronizada da severidade da seca.

O SPI está disponível nas escalas de tempo de 1, 3, 6, 12, 24 e 48 meses, significando o período durante o qual se acumula o valor de precipitação. Essa variedade de escalas permite a identificação tanto de secas de curto prazo quanto de longo prazo, tornando o SPI uma ferramenta versátil na análise de eventos de seca.

Para calcular o SPI, realiza-se um balanço hídrico climático, acumulando déficits ou excedentes de precipitação ao longo do período de interesse, conforme explicado por McKee, Doesken e Kleist (1993). Isso possibilita determinar o quão abaixo ou acima da média histórica os valores de precipitação se encontram, utilizando o desvio-padrão da série de dados como referência. Na Tabela 1 é apresentado diversos usos do SPI.

Tabela 1 – Aplicação do Índice de Precipitação Padronizado (SPI).

Autor(es)	Uso do SPI
McKee, Doesken e Kleist (1993)	Desenvolveram o SPI para quantificar o déficit de precipitação em relação à média histórica e medir a severidade da seca.
Sousa Júnior, Sausen e Lacruz (2010)	Utilizaram o SPI com uma classificação que considera valores menores ou iguais a -1 como indicativos de eventos de seca em suas pesquisas.
Vicente-Serrano, Begueria e López-Moreno (2010)	Aplicaram o SPI em séries temporais de precipitação para avaliar a ocorrência de secas em diferentes regiões.

Fonte: Autor (2024).

O SPI é calculado a partir de dados históricos de precipitação, sendo essencial para monitorar as condições de seca, identificar períodos críticos e avaliar a vulnerabilidade das regiões a eventos de seca. O conjunto de dados resultante do somatório das precipitações ao longo dos meses é em seguida ajustado a uma função densidade de probabilidades, originalmente formulado por McKee, Doesken e Kleist (1993) sendo utilizada a função de distribuição de probabilidades Gama (Equações 1 e 2).

$$f_x(x) = \frac{\left(\frac{x}{\theta}\right)^{\eta-1} \exp\left(-\frac{x}{\theta}\right)}{\Theta \Gamma(\eta)} \quad \text{para } x, \theta \text{ e } \eta > 0 \quad (1)$$

$$F_x(x) = \int_0^x \frac{\left(\frac{x}{\theta}\right)^{\eta-1} \exp\left(-\frac{x}{\theta}\right)}{\Theta \Gamma(\eta)} dx \quad \text{para } x, \theta \text{ e } \eta > 0 \quad (2)$$

Além disso, ele desempenha um papel fundamental na gestão de recursos hídricos, na agricultura e na pesquisa climática, proporcionando informações valiosas para a tomada de decisões e a mitigação dos impactos da seca. Portanto, o processamento desse índice requer uma análise cuidadosa, e o uso de ferramentas de *software* especializadas, pode facilitar esse entendimento, como as disponíveis em linguagens de programação como R ou *Python*, para calcular e interpretar os resultados de maneira adequada.

2.4 TESTES DE HIPÓTESES E TENDÊNCIAS

A aplicação de testes de hipóteses e análises de tendências é uma prática essencial na pesquisa climática e meteorológica, permitindo a avaliação de padrões e mudanças significativas nos dados. De acordo com Hirakata, Mancuso e Castro (2019), o teste de hipóteses envolve a investigação da validade de uma afirmação com um nível de risco máximo de erro associado. Ainda, o teste de hipótese consiste na avaliação da veracidade de uma afirmação, levando em consideração um nível máximo de erro, conforme descrito por Hirakata, Mancuso e Castro (2019).

O termo “estacionariedade” refere-se ao fato que, excluídas as flutuações aleatórias, as observações amostrais são invariantes, com relação a cronologia de suas ocorrências. Os tipos

de não-estacionariedades incluem tendências, ‘saltos’ e ciclos, ao longo do tempo. Em um contexto hidrológico, os “saltos” estão relacionados a alterações bruscas em uma bacia ou trecho fluvial, tais como, por exemplo, a construção de barragens. Os ciclos, por sua vez, podem estar relacionados a flutuações climáticas de longo período, sendo de difícil detecção. As tendências temporais, em geral, estão associadas a alterações graduais que se processam na bacia, tais como, por exemplo, uma evolução temporal lenta da urbanização de uma certa área geográfica (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Para verificar a estacionariedade de séries de dados climáticos, o teste de hipótese de Spearman é frequentemente utilizado. Conforme Naghettini e Pinto (2007), esse teste busca eliminar flutuações aleatórias, tornando as observações amostrais invariantes em relação à sua cronologia de ocorrência.

A detecção de tendências nas séries temporais de dados climáticos é realizada com testes não paramétricos, como o teste de tendência de Mann-Kendall, que é amplamente empregado para esse fim, conforme destacado por Naghettini e Pinto (2007). Esse teste compara cada valor da série com os valores restantes em ordem sequencial, buscando identificar tendências monotônicas.

Hirakata, Mancuso e Castro (2019) ressaltam que a hipótese nula nos testes de tendência afirma que os dados são independentes e distribuídos de maneira idêntica, enquanto a hipótese alternativa sugere a presença de tendências na série temporal. A significância do teste é avaliada com base em valores críticos, como $[Z] < 1,96$, que correspondem a um nível de significância de 5%. Além disso, conforme Naghettini e Pinto (2007), a utilização de testes de tendência não paramétricos ajuda a identificar tendências monótonas nas séries de dados climáticos.

A análise da tendência na série temporal foi executada comparando-se cada valor da série com os demais valores em ordem sequencial. A hipótese nula baseou-se na premissa de que os dados são independentes e distribuídos de maneira idêntica. Por outro lado, a hipótese alternativa afirmou a presença de tendência monótona na série. Para um valor de $[Z]$ menor que 1,96, com um nível de significância de 5%, a hipótese correspondente é aceita como nula.

O método de *Sen's Slope* é uma técnica não paramétrica utilizada para estimar a inclinação da tendência em uma série temporal de pares de dados. A metodologia baseia-se na ordenação de todas as diferenças possíveis entre os valores de uma variável dependente correspondentes a todos os pares de observações. A inclinação da tendência é então estimada como a mediana dessas diferenças ordenadas. Alcântara *et al.* (2019) define o teste *Sen's Slope* como um método insensível a *outliers* (valor atípico) e dados ausentes, sendo mais rigoroso do que a curvatura da regressão linear, provendo de uma medida mais realista da série temporal.

A abordagem após Pettitt (1979) é comumente aplicada para detectar um único ponto de mudança em séries hidrológicas ou séries climáticas com dados contínuos, testando a hipótese nula. As N variáveis seguem uma ou mais distribuições que têm o mesmo parâmetro de localização (não mudança), contra a alternativa: existe um ponto de mudança. O teste tem como hipótese nula (H_0), quando não há existência de mudança brusca na série e alternativa H_1 quando há existência de mudança brusca na série. Segundo Sena, Azevedo Filho e Lucena (2016), o teste de Pettitt tem a finalidade de localizar o ponto de ruptura (*change point*) de uma série temporal, indicando a provável data e sua respectiva significância estatística em que ocorreu uma mudança brusca na média de valores de uma série.

A aplicação desses testes é realizada com o auxílio de *software* estatístico, como o RStudio, utilizando a linguagem de programação R, como mencionado por Hirakata, Mancuso e Castro (2019). Os testes de hipóteses e análises de tendências desempenham um papel crucial na pesquisa climática, permitindo a detecção de mudanças e a validação de resultados, contribuindo assim para uma compreensão mais precisa das condições climáticas e tendências a longo prazo.

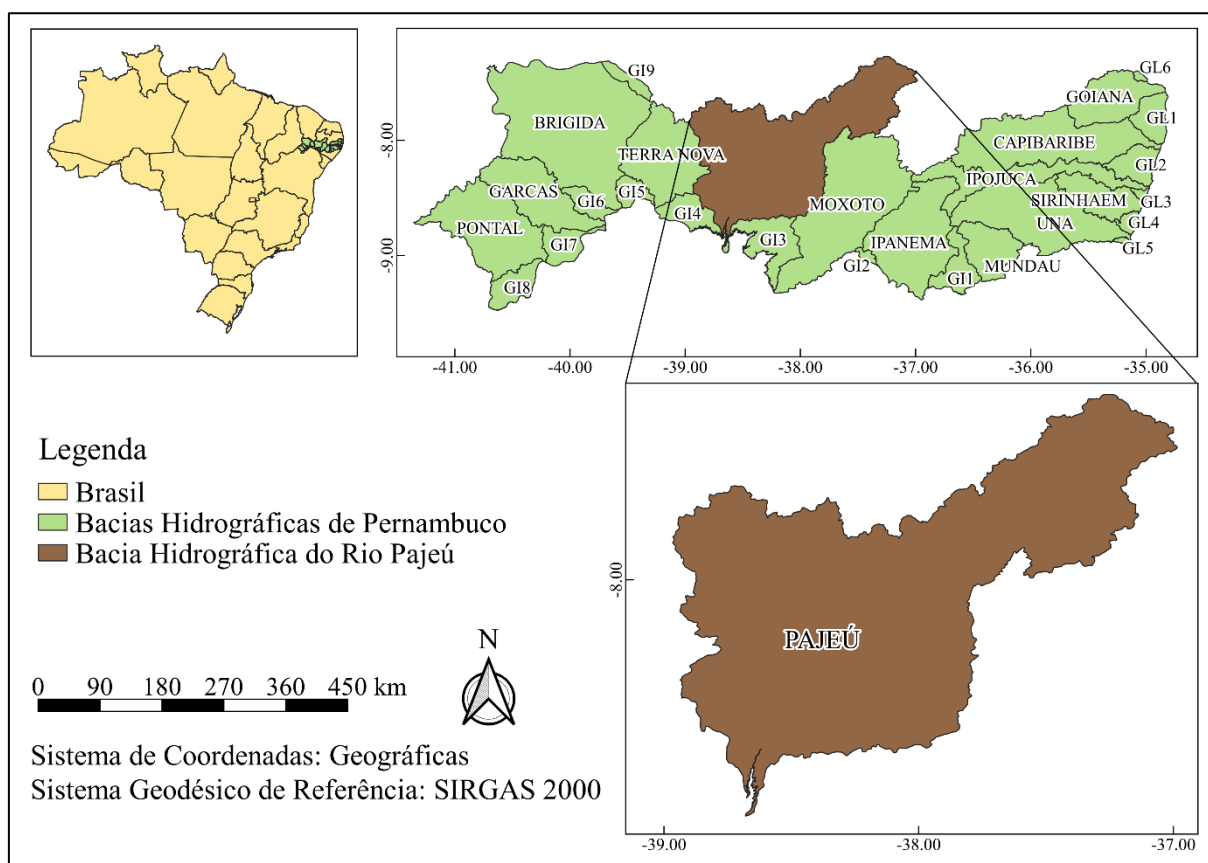
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, será abordado o procedimento metodológico executado neste estudo, apresentando as ferramentas utilizadas para sua realização. Abordou-se os materiais e métodos em quatro principais subtópicos: Área de estudo; Caracterização meteorológica; Processamento dos dados; Análise estatística.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Rio Pajeú, localizada no Estado de Pernambuco, com localização entre as coordenadas geográficas $07^{\circ}16'20''$ e $08^{\circ}56'01''$ de latitude sul, e $36^{\circ}59'00''$ e $38^{\circ}57'45''$ de longitude oeste. É uma região de extrema importância tanto em termos econômicos quanto ambientais. Com uma área de drenagem que abrange cerca de 16.685,63 km² (APAC, 2023), cerca de 17% do total do estado, essa bacia desempenha um papel crucial na vida das comunidades locais e na dinâmica socioeconômica da região (Figura 1). A bacia limita-se ao norte com os estados da Paraíba e Ceará, ao sul com a bacia do Rio Moxotó e bacias de pequenos rios interiores (GI3), ao leste com o Estado da Paraíba e a bacia do rio Moxotó, e, por fim, ao oeste com a bacia do Rio Terra Nova e as bacias de pequenos rios interiores 4 (GI4).

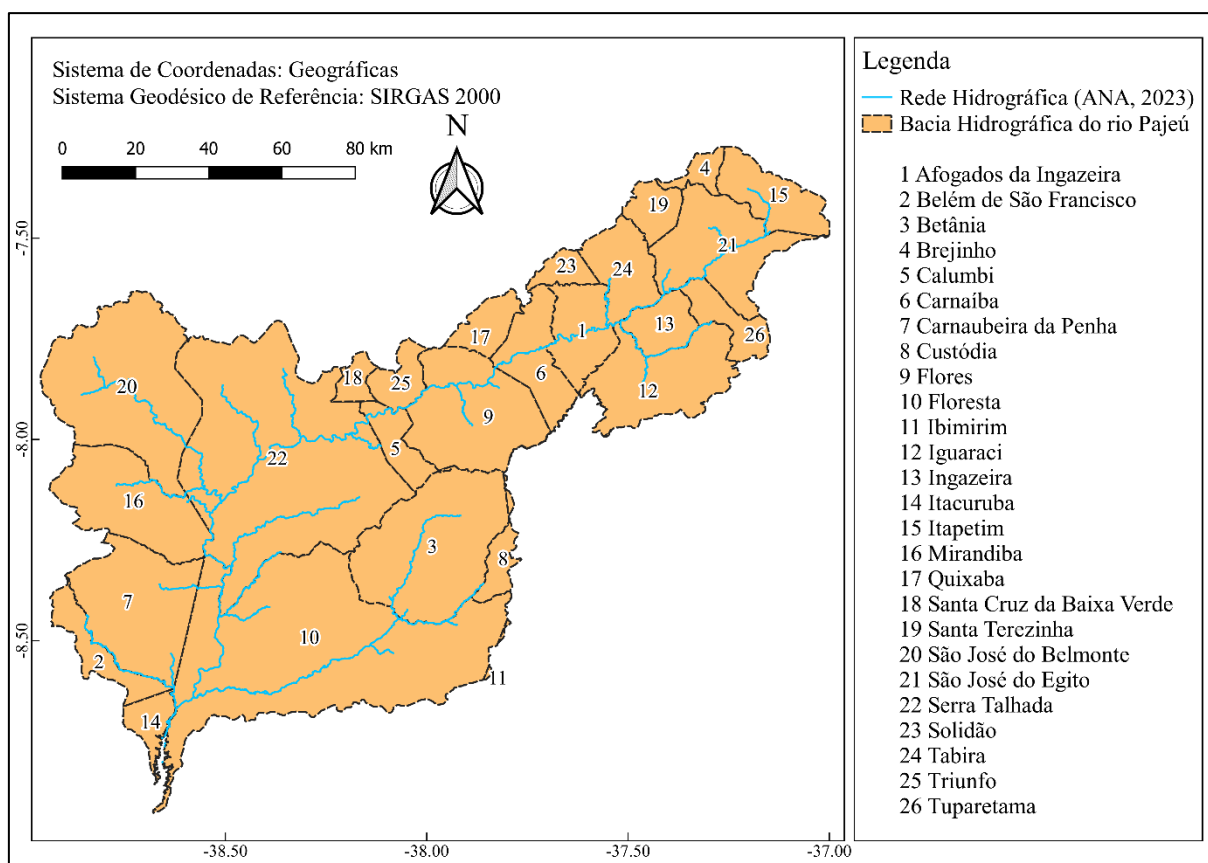
Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Pajeú.



Fonte: Autor (2024).

O Rio Pajeú tem um regime fluvial intermitente e sua bacia hidrográfica é composta por diversos municípios, conforme Figura 2, entre eles Itapetim, Tuparetama, Ingazeira, Afogados da Ingazeira, Carnaíba, Flores, Calumbi, Serra Talhada e Floresta, que estão inseridos nessa área (APAC, 2023). A população local está envolvida nas atividades agrícolas, pecuárias e em outras atividades econômicas que sustentam a região.

Figura 2 – Municípios abrangidos pela bacia hidrográfica do Rio Pajeú.



Fonte: Autor (2024).

A área de drenagem da bacia envolve 27 municípios, desses 7 estão com suas sedes inseridas na bacia (APAC, 2023). De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), a população dos municípios da bacia varia, com destaque para Serra Talhada, que é um dos maiores centros urbanos da região.

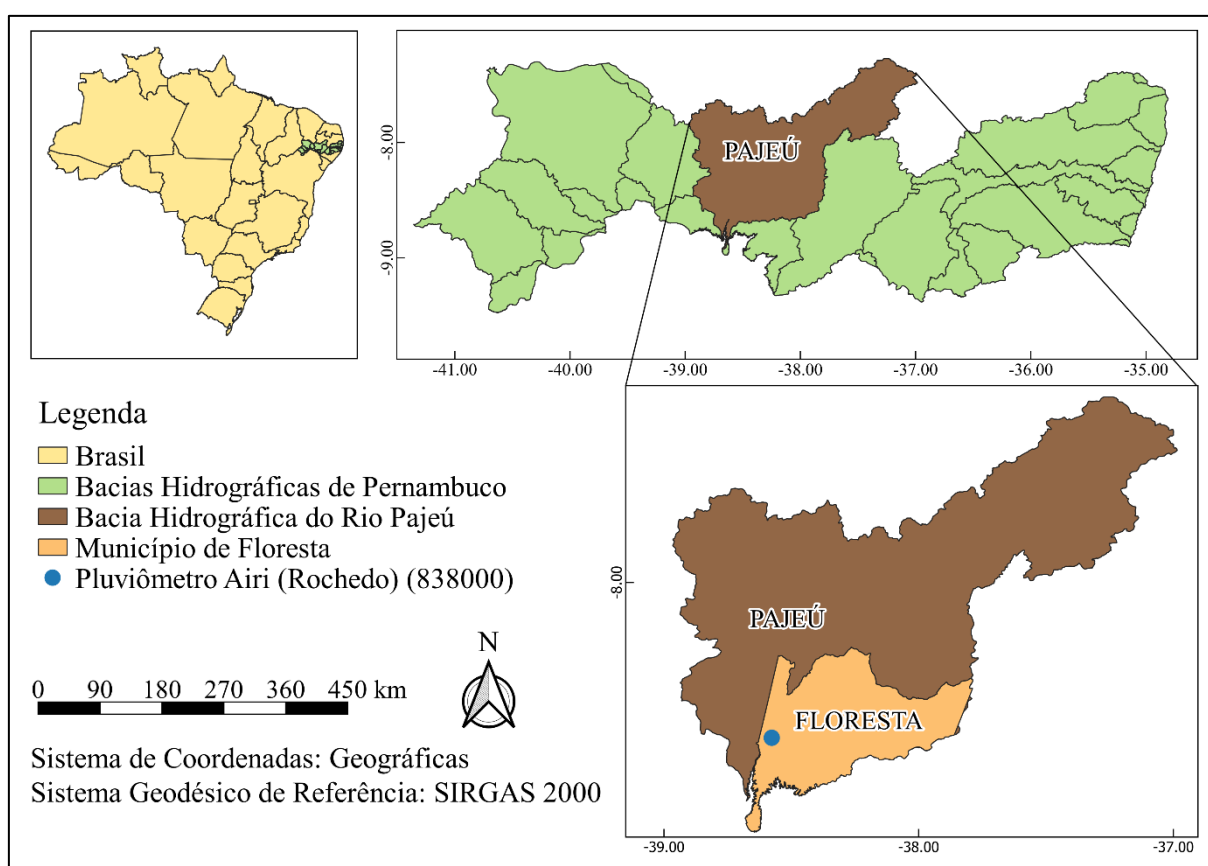
A bacia hidrográfica do Rio Pajeú, desempenha um papel crucial na regulação da variação hídrica na área. Sua extensão abrange uma diversidade de ecossistemas, contribuindo significativamente para a oferta de recursos hídricos na região. Além de ser vital para as atividades agrícolas locais e abastecimento humano, a bacia do Rio Pajeú desempenha um papel

fundamental na manutenção do equilíbrio ambiental, influenciando diretamente a qualidade de vida das comunidades circunvizinhas.

Para a seleção do pluviômetro de referência, foram examinadas as estações existentes dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú. A escolha da estação pluviométrica Airi (Rochedo), de Código 838000, foi baseada na análise das relações dos equipamentos presentes e nos dados de chuva por eles armazenados. Este pluviômetro foi escolhido devido à disponibilidade de uma série de dados mais recente e contínua, sem lacunas no intervalo de tempo de 1984 a 2021, proporcionando maior eficiência aos resultados obtidos no estudo.

O pluviômetro encontra-se situado no município de Floresta, conforme Figura 3. Essa estação desempenha um papel fundamental ao fornecer dados para a série histórica e servir como ponto de referência para a extração das informações pluviométricas do ERA5-Land. Ambas as fontes de dados desempenham um papel crucial nesta pesquisa, permitindo uma análise abrangente das variações pluviométricas na área em questão.

Figura 3 – Localização da área de estudo.



Fonte: Autor (2024).

3.2 CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA

Para a análise da precipitação pluviométrica, utilizou-se valores de duas séries de dados. A primeira foi construída com a obtenção de dados de precipitação provenientes de uma estação monitorada, a estação pluviométrica (Código 838000) situada no município de Floresta, os quais foram extraídos do banco de dados do HIDROWEB. Essa estação, conforme Tabela 2, está sob a responsabilidade da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e operada pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). Uma análise da consistência dos *quantis* de chuva foi conduzida para avaliar possíveis falhas dentro do intervalo de dados disponíveis (1934 a 2022). Com base nessa avaliação, optou-se pela utilização da série temporal de 1984 a 2021, pois durante esse período não foram identificadas falhas nos registros do pluviômetro selecionado.

Tabela 2 – Dados do posto pluviométrico Airi (Rochedo), utilizado no estudo.

Dados da Estação	
Código	838000
Nome	Airi (Rochedo)
Bacia	Rio São Francisco
Sub-bacia	Rio Pajeú
Estado	Pernambuco
Município	Floresta
Responsável	ANA
Operadora	SGB/CPRM
Latitude	-8,5392
Longitude	-38,1928
Altitude	361

Fonte: Adaptado da ANA (2023).

Os dados pluviométricos do ERA5-Land foram extraídos por meio do banco de dados da plataforma *Copernicus Climate Data Store*, disponibilizada pelo Centro Europeu de Previsão Meteorológica de Médio Prazo (ECMWF), com informações disponíveis desde 1950 até o presente (Figura 4). Utilizando o *software* RStudio, recortou-se a área de estudo, limitando-a à estação pluviométrica Airi (Rochedo) localizada na cidade de Floresta. Dessa forma, utilizando a mesma ferramenta, os *quantis* de precipitação foram extraídos da série histórica em análise.

O ERA5 representa a quinta iteração do sistema de reanálise desenvolvido pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), conforme documentado por Hersbach (2020). Para esta pesquisa, foram adquiridos dados com uma resolução temporal mensal, considerando a extensão geográfica da área de estudo, abrangendo uma variável

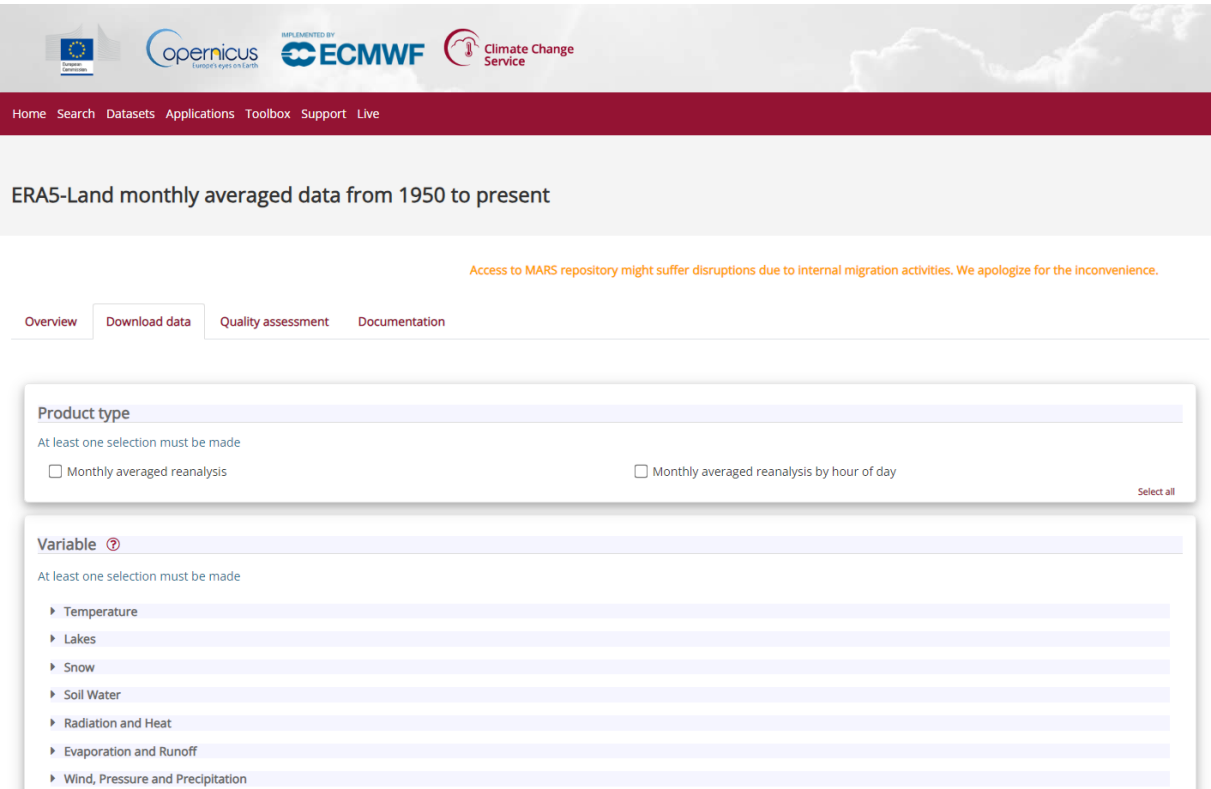
essencial: precipitação. A Tabela 3 apresenta de maneira concisa as informações pertinentes à aquisição dos dados utilizados nesta análise.

Tabela 3 – Dados utilizados do ERA5.

Variável	Fonte	Resolução Horizontal	Período de estudo
Precipitação	ERA5-Land	0,1°x 0,1°	1984 a 2021

Fonte: Autor (2024).

Figura 4 – Interface de extração dos dados do ERA5-Land.



Fonte: ECMWF (2023).

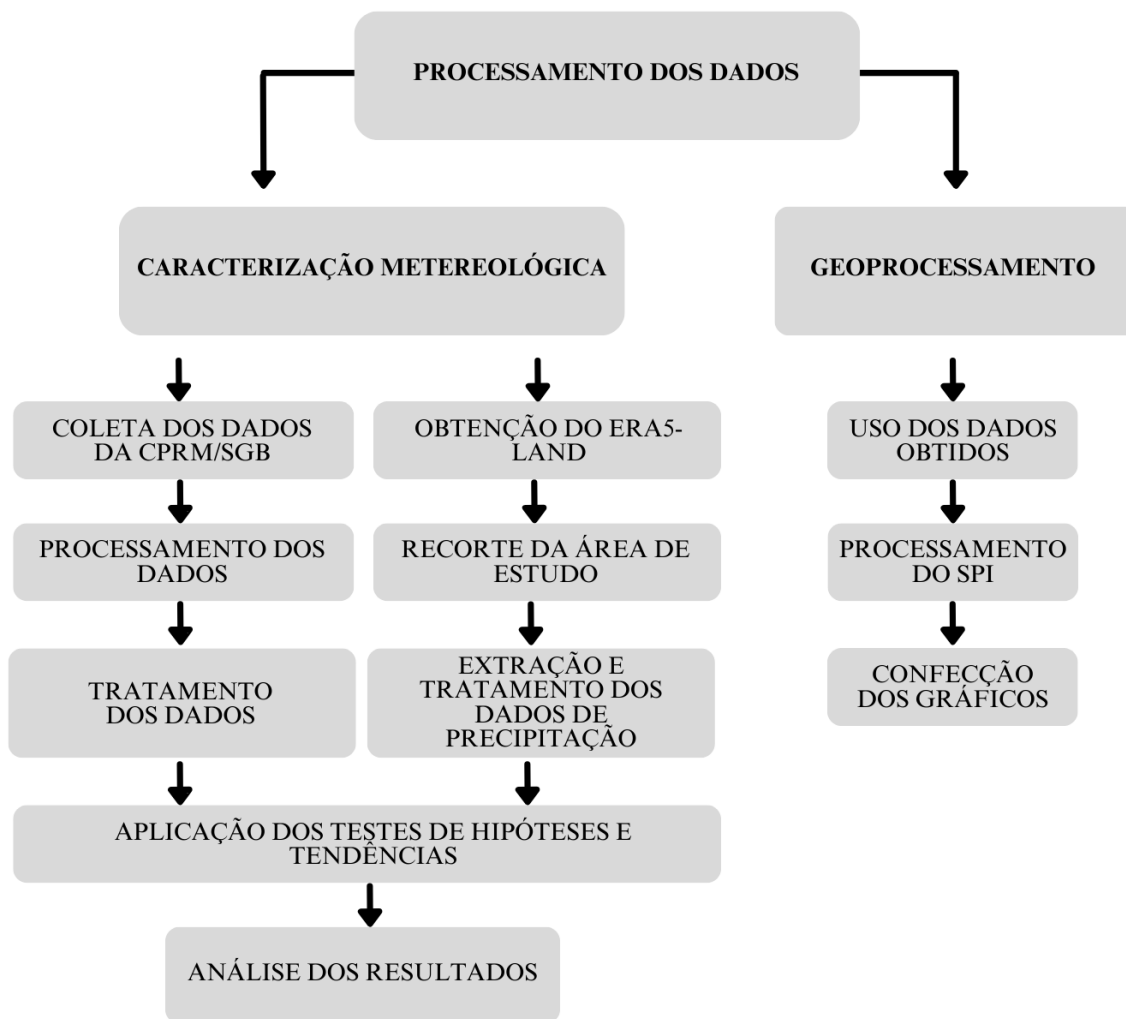
3.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS

A partir da caracterização meteorológica, cujo processo foi descrito no tópico anterior, o processamento dos dados foi realizado conforme as etapas ilustradas no fluxograma da Figura 5.

Com base nos dados de precipitação obtidos tanto do posto pluviométrico quanto do ERA5-Land, procedeu-se ao processamento do Índice de Precipitação Padronizado (SPI), sendo desenvolvido por McKee, Doesken e Kleist (1993). Aplicou-se o SPI para quantificar os déficits de precipitação em diferentes escalas temporais, refletindo, assim, o impacto das secas na disponibilidade de recursos hídricos diversos. A análise abrangeu o período de 1984 a 2021, com foco em uma escala temporal de 6 meses. Adicionalmente, foi adotado a classificação do

SPI conforme apresentada por Sousa Júnior, Sausen e Lacruz, (2010), considerando a ocorrência de eventos de seca quando o SPI é igual ou inferior a -1, como detalhado na Tabela 4. O cálculo do índice foi realizado por meio de código desenvolvido em linguagem R, através do *software* RStudio.

Figura 5 – Fluxograma das etapas de análise deste trabalho.



Fonte: Autor (2024).

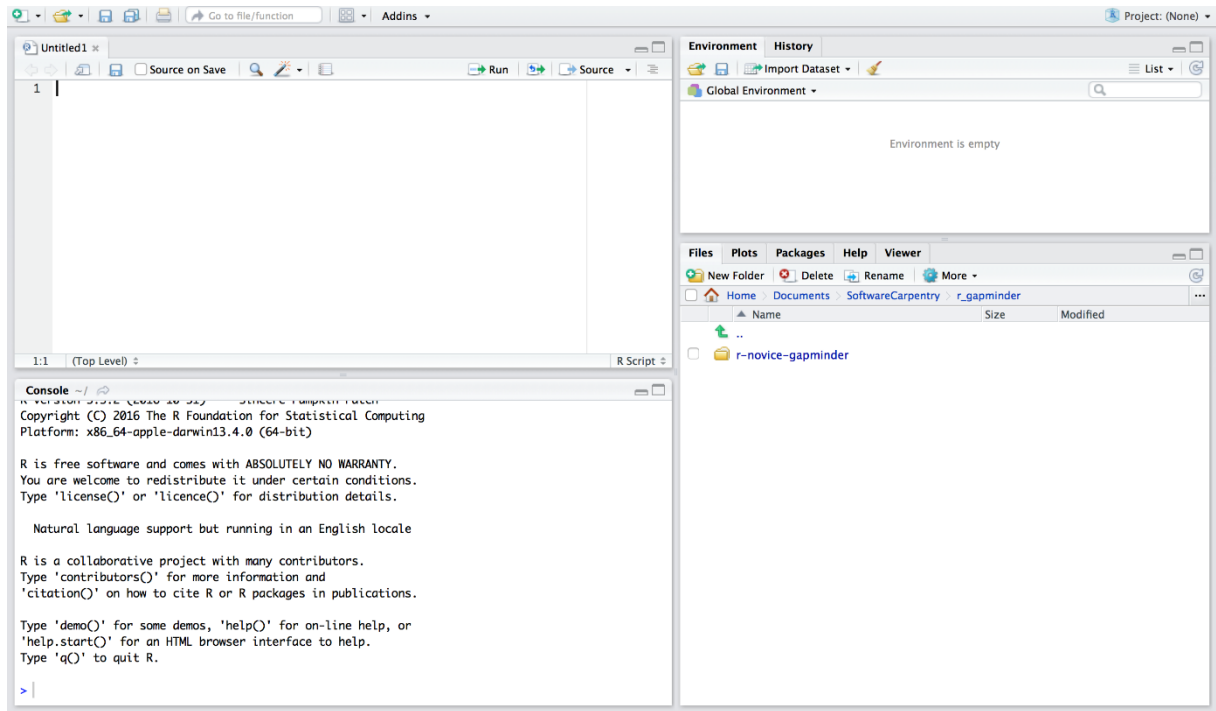
Tabela 4 – Categoria seca/umidade em relação ao Índice de Precipitação Padronizado (SPI).

Valor do SPI	Categoria da Seca
$\geq 2,00$	Extremamente úmido
+1,50 a +1,99	Muito úmido
+1,00 a +1,49	Moderadamente úmido
-0,99 a +0,99	Próximo a normal
-1,00 a -1,49	Moderadamente seco
-1,50 a -1,99	Severamente seco
$\leq -2,00$	Extremamente seco

Fonte: Sousa Júnior, Sausen e Lacruz (2010).

Esse procedimento permitiu a análise dos períodos de seca e chuva na região, viabilizando, assim, a investigação da possível correlação entre os dois conjuntos de dados pluviométricos empregados. Subsequentemente, aplicaram-se os testes estatísticos de Mann-Kendall, *Sen's Slope* e Pettitt, utilizando o *software* RStudio, com sua interface apresentada na Figura 6, visando identificar eventuais tendências nos dados e, caso positivas, determinar se são de caráter ascendente ou descendente. Adicionalmente, por meio do *Microsoft Excel*, conduziu-se o teste de estacionariedade de Spearman, proporcionando informações acerca da variabilidade pluviométrica na área de estudo.

Figura 6 – Interface do *software* RStudio.



Fonte: RStudio (2024).

Por fim, através da análise do coeficiente de correlação (R) e o Erro Médio Absoluto (MAE, *Mean Absolute Error*), se fez possível identificar a correlação entre os valores obtidos para o SPI, de modo a avaliar a acurácia da utilização dos dados pluviométricos do ERA5-Land para cálculo do índice de seca. A fórmula para o MAE e o R estão descritas nas Equações 3 e 4, respectivamente.

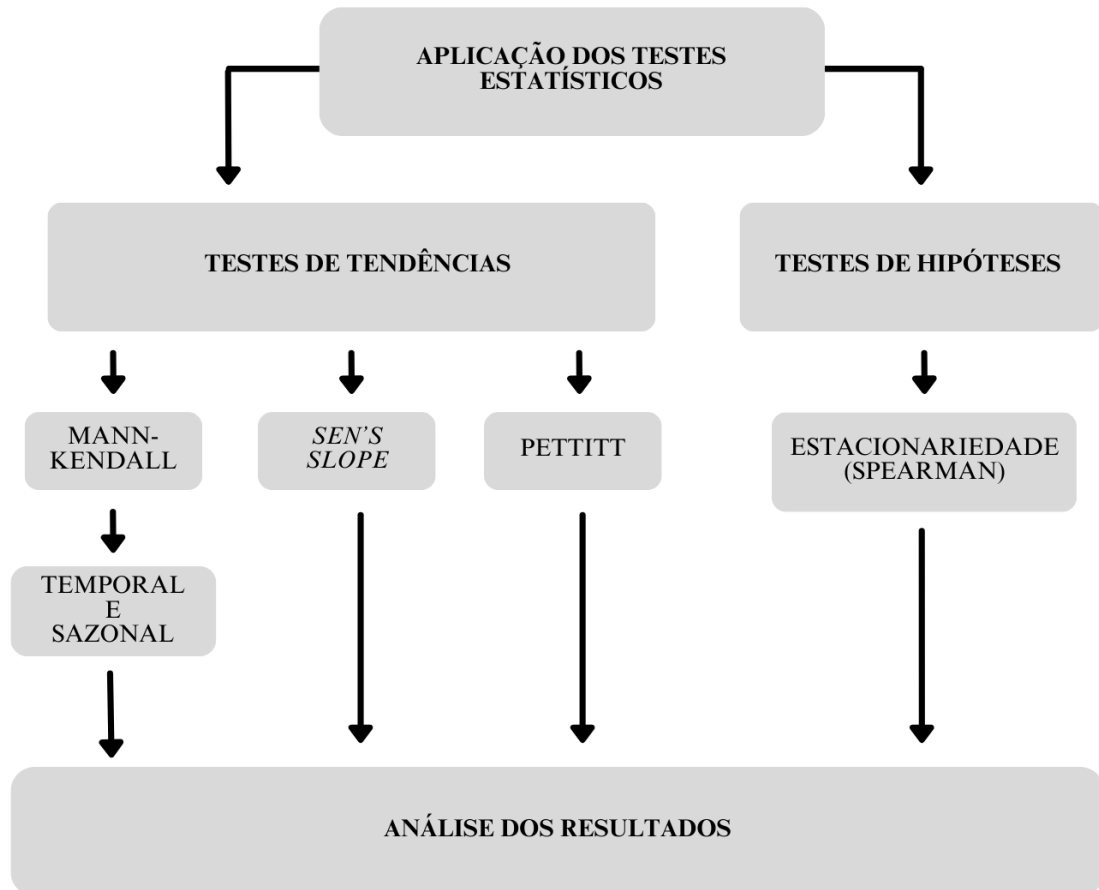
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_j - \hat{y}_j| \quad (3)$$

$$R^2(y, \hat{y}) = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Com base na caracterização meteorológica, a manipulação dos dados, para a análise estatística, foi conduzida seguindo as fases delineadas no fluxograma apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma das etapas estatísticas.



Fonte: Autor (2024).

Foram conduzidas análises estatísticas para investigar tendências temporais e sazonais, empregando métodos específicos para cada propósito. O teste de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975), dedicado à identificação de tendências monotônicas, foi implementado para avaliar a presença de padrões temporais significativos. Neste teste, considera-se que, na hipótese de estabilidade de uma série de dados, a sucessão de valores ocorre de forma independente e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma (série aleatória simples).

O método considera uma série X_i de N termos a ser analisada ($1 \leq j \leq N$). Inicialmente, utilizou-se a Equação 5, esta corresponde ao número de termos m_i da série, relativo ao valor X_i cujos termos precedentes ($j < i$) são inferiores ao mesmo ($Y_j < Y_i$). Para séries com grande número de termos (N), sob a hipótese nula (H_0) de ausência de tendência, t_n apresentará uma

distribuição normal com média e variância dada, respectivamente, pelas Equações 6 e 7. Testou-se a significância estatística de t_n para a hipótese nula, usando um teste bilateral, esta pode ser rejeitada para grandes valores da série estatística $U(t_n)$ por meio da Equação 8.

$$S = \sum_{i=1}^N m_i \quad (5)$$

$$E[t_n] = \frac{n(n-1)}{4} \quad (6)$$

$$\text{Var}[t_n] = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (7)$$

$$U(t_n) = \frac{[t_n - E(t_n)]}{\sqrt{\text{Var}[t_n]}} \quad (8)$$

Adicionalmente, empregou-se o método *Sen's Slope*, uma abordagem não paramétrica que permite estimar a inclinação das tendências em séries temporais. A curvatura de *Sen* foi obtida pelo cálculo dos pares de valores da série $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ com a aplicação da Equação 9. Ao qual S_e representou o valor da curvatura de *Sen*, onde o acréscimo ou decréscimo em função do tempo é cedido pela função $f(t) = S_e \cdot t + B$, sendo B uma constante (FERRARI, 2012).

$$S_e = \frac{X_j - X_i}{j - i} \quad (9)$$

A análise de Pettitt (1979) foi realizada com o intuito de detectar possíveis mudanças abruptas nos dados, oferecendo uma compreensão mais aprofundada das dinâmicas temporais em estudo e identificar o ponto de descontinuidade em uma série temporal. O procedimento consistiu em avaliar se a série temporal, submetida a um teste de homogeneidade de duas subamostras, Y_1, Y_t e $Y_{t+1}, \dots, Y_T$, pertencem à mesma população. Para tanto, a série foi ordenada de 1 a N de acordo com sua posição de observação t . Uma contagem do número de vezes que um membro da primeira amostra é maior que o membro da segunda foi realizado por intermédio do cálculo da Equação 10.

$$U_{t,T} = U_{t-1,T} + \sum_{j=1}^T \text{sinal}(Y_t - Y_j) \quad (10)$$

Onde:

$$\text{sinal}(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x > 0; \\ 0, & \text{se } x = 0; \\ -1, & \text{se } x < 0. \end{cases} \quad (11)$$

A estatística $U_{t,T}$ foi então calculada para valores de $1 \leq t \leq T$, sendo que a estatística $K(t)$ do teste fornece o máximo valor absoluto de $U_{t,T}$, por meio da Equação 12 (PETTITT, 1979). A estatística assim desenvolvida localizou o ponto em que houve uma mudança brusca na média de uma série, o valor para t onde ocorre o máximo de K_T , como indica a Equação 13.

$$K_T = \max_{1 \leq t \leq T} |U_{t,T}| \quad (12)$$

$$K_{crit.} = \pm \sqrt{\frac{-\ln(\frac{p}{2}) \times (T^3 + T)}{6}} \quad (13)$$

O teste possui como hipótese nula (H_0) a não existência de mudança brusca na série enquanto a hipótese alternativa (H_1) existir. Para haver rejeição o valor crítico de K_T é determinado para um nível de significância α_0 por meio da Equação 13, no qual $K_{crit.}$ está relacionado ao instante em que ocorreu a mudança brusca (t). Neste trabalho admitiu-se o nível de insignificância de 95%. Todas essas análises foram realizadas utilizando o *software* RStudio e a linguagem de programação R.

A partir dos resultados obtidos para os testes de tendências, realizou-se o teste de hipótese de estacionariedade de Spearman, cujo propósito é remover flutuações aleatórias, tornando as observações amostrais invariáveis em relação à sua ordem cronológica. A estatística do teste de Spearman tem como base o coeficiente r_s (14), Para $N > 10$ e sob a hipótese nula de que não há correlação entre m_t e T_t , demonstra-se que a distribuição de r_s pode ser aproximada por uma normal de média igual a $E[r_s]$ (15) e variância $Var[r_s]$ (16). Desta maneira, se a hipótese nula é a amostra não apresenta tendência temporal, então o teste de Spearman pode ser formulado como T (17), onde T segue uma distribuição normal padrão, por se tratar de um teste bilateral.

$$r_s = 1 - \frac{6 \times \sum_{i=1}^N (m_t - T_t)^2}{N^3 - N} \quad (14)$$

$$E[r_s] = 0 \quad (15)$$

$$Var[r_s] = \frac{1}{N-1} \quad (16)$$

$$T = \frac{r_s}{\sqrt{Var[r_s]}} \quad (17)$$

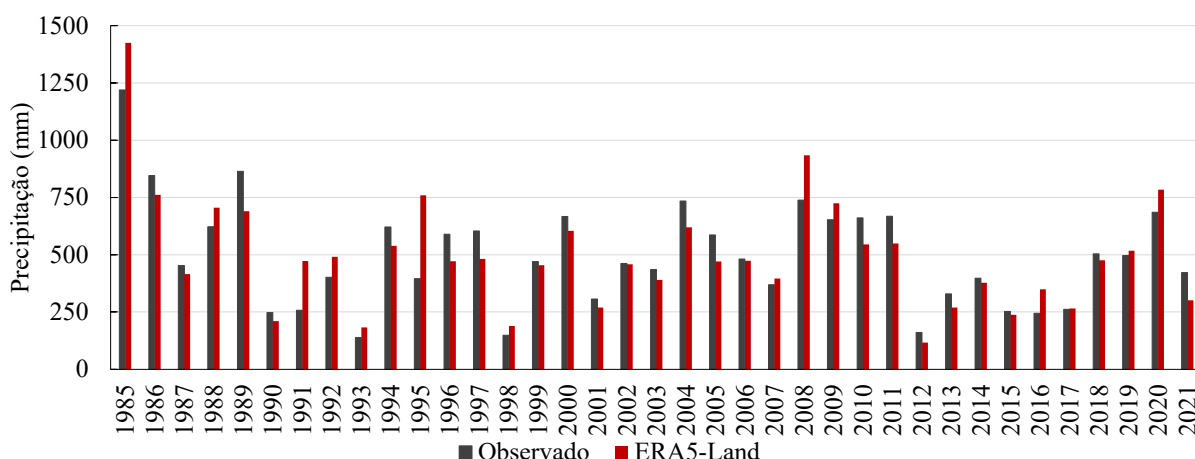
A aplicação dos testes estatísticos mencionados possibilitou a identificação de tendências temporais e a determinação de suas inclinações, além de detectar eventuais mudanças abruptas nas séries de dados. Esses resultados contribuem significativamente para uma compreensão mais aprofundada das mudanças climáticas na área de estudo.

4 RESULTADOS

4.1 PRECIPITAÇÃO

A Figura 8 apresentou a variação anual da precipitação (mm) ao longo do período de 37 anos (1984-2021), comparando os dados observados na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú com o produto obtido através da extração de dados pluviométricos do ERA5-Land. Foi possível constatar que houve a variabilidade na distribuição temporal nos dados do ERA5 comparado aos dados observados. Detectaram-se diferenças consideráveis nos valores de precipitação anual nos anos de 1991 e 1995, em que o valor dos dados observados foi superior ao registrado pelos dados do ERA5-Land em 364,49 mm e 214,74 mm, respectivamente. Em seguida, na Tabela 5, são apresentados os anos em que foram registrados impactos do *El Niño* e *La Niña* no Brasil, permitindo assim a associação de que nos anos de 1991 e 1995, o fenômeno climático global *El Niño* estava influenciando a região

Figura 8 – Precipitação anual média (mm) para a bacia hidrográfica do Rio Pajeú de 1984 a 2021.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 5 – Anos com registros da ocorrência do *El Niño* e da *La Niña* no Brasil.

El Niño		La Niña	
1986-1988	1991-1992	1984-1985	1988-1989
1994-1995	1997-1998	1995-1996	1998-2001
2002-2003	2004-2005	2005-2006	2007-2009
2006-2007	2009-2010	2010-2012	2016-2018
2014-2016	2018-2019	2020-2021	

Fonte: Lopes *et al.* (2021).

Os anos de 1993, 1998 e 2012 destacaram-se como os mais secos ao longo de toda a série temporal, registrando 138,30, 148,00 e 160,90 milímetros de precipitação anual, respectivamente. De acordo com as constatações de Ribeiro (2016), um extenso período de seca (1990 a 2001) foi observado, influenciado pelo fenômeno *El Niño*, sendo os anos de 1993 e

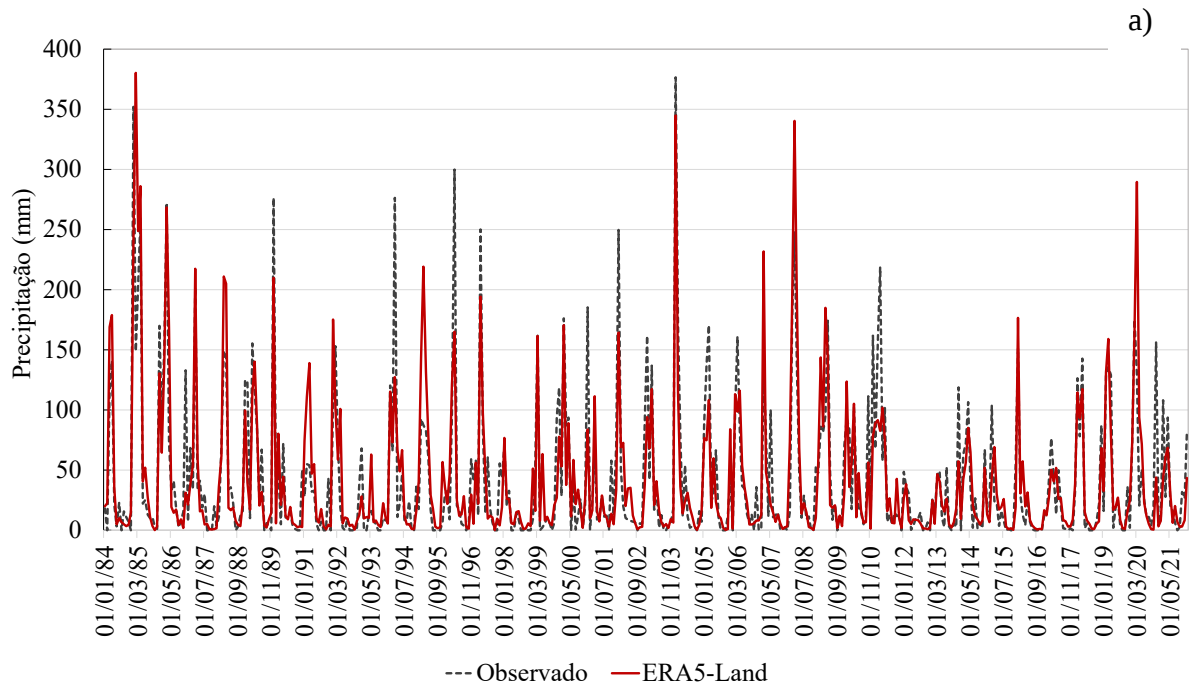
1998 os de menor precipitação. Dessa forma, no contexto dos dados observados, destacou-se o ano de 1993 por apresentar o menor índice pluviométrico anual, com 138 mm, em contrapartida o ano de 1985 apresentou a maior precipitação anual, totalizando 1.218 mm.

No que concerne aos dados derivados do ERA5-Land, observou-se que o ano de maior precipitação também foi 1985, com um total acumulado de 1.424 mm, enquanto o ano caracterizado pela menor quantidade de chuva foi 2012, totalizando 116 mm, em comparação aos 161 mm registrados pela estação de referência nesse mesmo ano. Para o ano de 1993, o ERA5-Land registrou uma precipitação de 183 mm, 45 mm superior ao valor registrado nos dados da estação pluviométrica.

Marengo, Druyan e Hastenrath (1993) postularam que durante períodos de *El Niño*, a Zona de Convergência Intertropical desloca-se de maneira anormalmente mais ao norte de sua posição usual. Isso resulta em ventos alísios de SE e NE soprando com menor intensidade, ocasionando uma redução na umidade que penetra na região Nordeste do Brasil. Em contrapartida, em anos de *La Niña*, observa-se, de maneira geral, um aumento das precipitações nesta área (Kayano e Andreoli, 2009)

A Figura 9 ilustra a precipitação mensal média, abordando uma comparação entre a precipitação observada e a extraída através do ERA5-Land. Notou-se um leve atraso na quantificação da chuva obtida pelo sensoriamento remoto em comparação com a proveniente da estação operada pelo SGB/CPRM. Na mesma análise, foi possível constatar que os dados observados apresentaram precipitações mais elevadas, enquanto no ERA5-Land houve a distribuição mais ampla dessa chuva, este fenômeno foi também destacado por Tavares *et al.* (2023), cujo estudo avaliou a eficácia de produtos de sensoriamento remoto na avaliação de períodos de seca na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú durante o intervalo de 1981 a 2018.

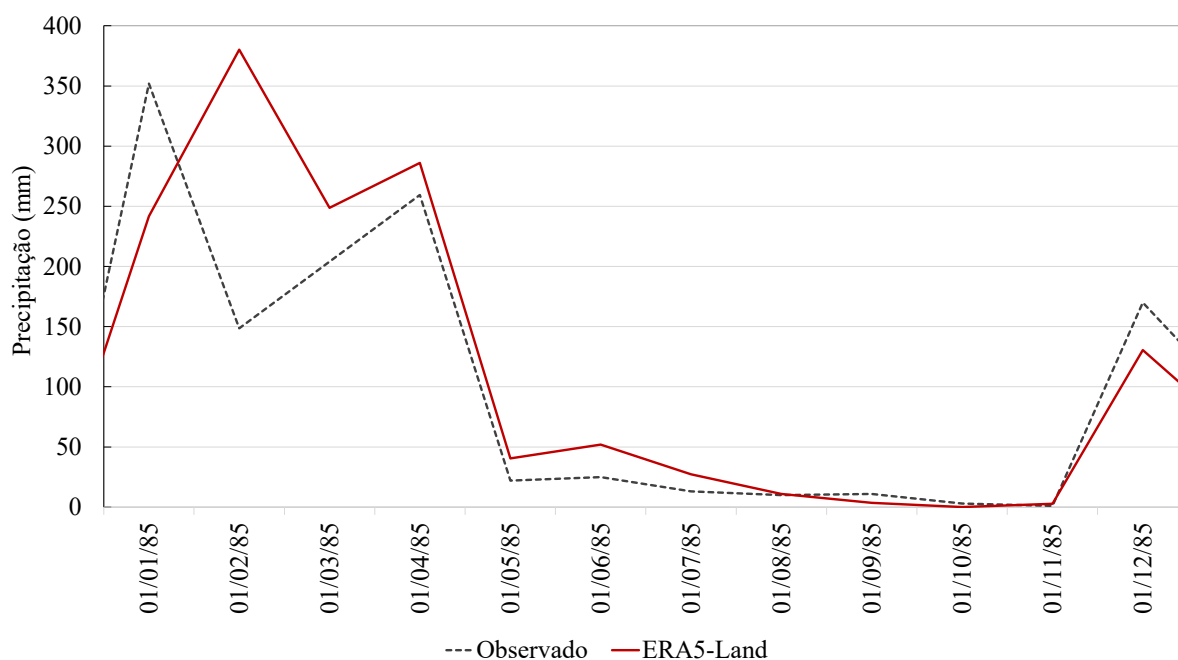
Figura 9 – Precipitação mensal média (mm) para a bacia hidrográfica do Rio Pajeú de 1984 a 2021.



Fonte: Autor (2024).

Para a estação de referência, observou-se o ápice de precipitação em janeiro de 2004, totalizando 376,40 mm, enquanto o ERA5-Land registrou 344,68 mm para o mesmo período. Durante 77 meses, compreendidos entre janeiro de 1984 e dezembro de 2021, não foram registrados valores pluviométricos no pluviômetro observado. No caso do ERA5-Land, o ápice de precipitação ocorreu em fevereiro de 1985, atingindo 380,17 mm, em contraste com a estação observada, que registrou 148,6 mm para o mesmo mês, conforme apresentado na Figura 10. Essa disparidade pode ser atribuída a um atraso no registro dos dados para o ERA5-Land, conforme observado também por Tavares *et al.* (2023). Por outro lado, setembro de 1997 destacou-se como o mês mais seco, com apenas 0,10 mm registrados no ERA5-Land, enquanto o pluviômetro de referência permaneceu com registros nulos. Essa diferença pode ser explicada pela metodologia de cálculo do ERA5-Land, que integra múltiplas fontes de dados e utiliza modelos para estimar a precipitação, resultando em uma série contínua de valores, ao contrário do pluviômetro de referência, que pode registrar períodos sem precipitação.

Figura 10 – Recorte da precipitação média mensal (mm) para o ano de 1985.



Fonte: Autor (2024).

A abordagem integrada de dados observados na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú e os extraídos do ERA5-Land oferece uma perspectiva abrangente sobre a variabilidade da precipitação ao longo de 37 anos. As diferenças notáveis em anos específicos, como 1995 e 1991, destacam a importância de considerar múltiplas fontes de dados para uma avaliação precisa. A identificação dos anos de 1993 e 1998 como os mais secos, influenciados pelo fenômeno *El Niño* durante um período de seca mais amplo (1990 a 2001), ressalta a complexidade climática na região.

O contraste entre os dados observados e do ERA5-Land, como evidenciado na Figura 10, enfatiza a necessidade de compreensão detalhada para aplicações específicas, enquanto a utilização de produtos de Sensoriamento Remoto, como sugerido por Tavares *et al.* (2023), emerge como uma solução valiosa para preencher lacunas e aprimorar a compreensão dos componentes climáticos, impulsionando estudos científicos e ampliando o conhecimento sobre o clima e suas interações.

Com base nos dados de precipitação extraídos da estação utilizada, verificou-se que os anos com maiores índices pluviométricos foram 1985, 1989 e 1986, enquanto os anos de 1993, 1998 e 2012 registraram as menores chuvas. Na Tabela 6 observou-se as maiores precipitações para os anos em destaque, enquanto a Tabela 7 apresentou as menores precipitações. Em contrapartida, para os dados do ERA5-Land, as maiores precipitações ocorreram em 1985, 2008 e 2020, enquanto os anos de 2012, 1993 e 1998 apresentaram as menores chuvas, conforme

apresentado nas Tabelas 8 e 9, respectivamente. Assim, ao analisar os anos com maiores pluviometrias, observa-se que apenas o ano de 1985 coincide entre as duas fontes analisadas, enquanto para os anos de menores chuvas, evidencia-se uma correlação entre os dados.

Tabela 6 – Maiores valores de precipitação para a estação observada.

Ano	Precipitação (mm)
1985	1.218,80
1989	863,80
1986	846,00

Fonte: Autor (2024).

Tabela 7 – Menores valores de precipitação para a estação observada

Ano	Precipitação (mm)
1993	138,30
1998	148,00
2012	160,90

Fonte: Autor (2024).

Tabela 8 – Maiores valores de precipitação para o ERA5-Land.

Ano	Precipitação (mm)
1985	1.424,59
2008	934,02
2020	783,87

Fonte: Autor (2024).

Tabela 9 – Menores valores de precipitação para o ERA5-Land.

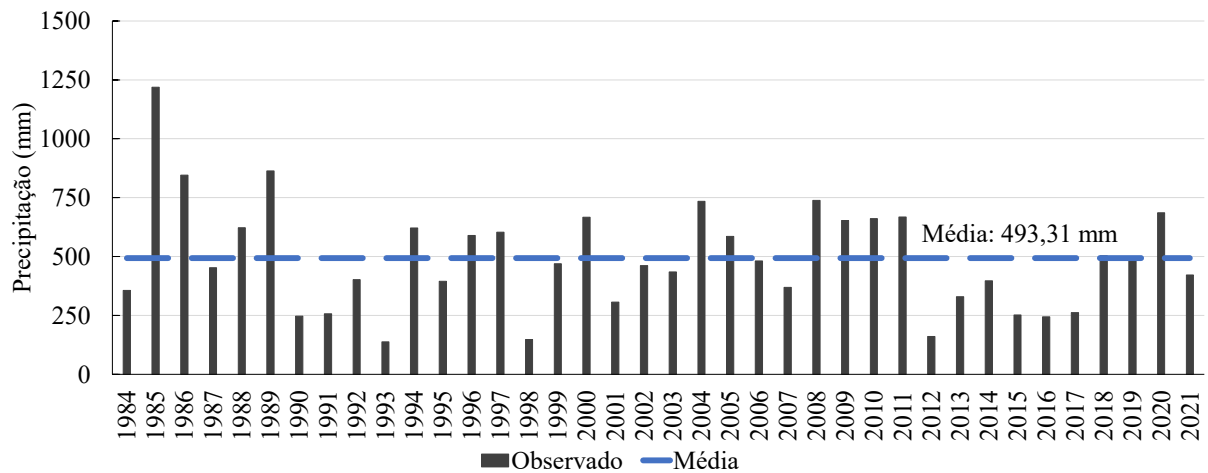
Ano	Precipitação (mm)
2012	155,95
1993	182,68
1998	188,40

Fonte: Autor (2024).

Nas Figuras 11 e 12 observou-se, para os dados observados e extraídos do ERA5-Land, respectivamente, o comparativo da precipitação anual com a média, para cada conjunto de dado, ao longo da série temporal analisada (1984 a 2021).

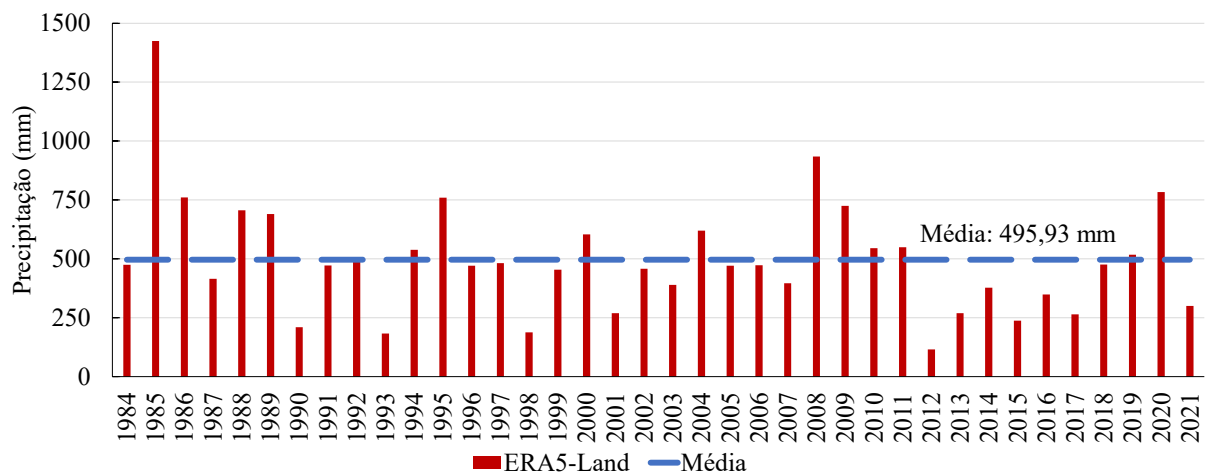
A partir dos resultados obtidos na reanálise dos dados pluviométricos do ERA5-Land com a estação de referência, pode-se evidenciar que há correlação entre os valores encontrados. Deste modo, conforme Araújo (2022), os dados de precipitação pluviométrica total gerados pela reanálise do ERA5-Land podem substituir dados de estações meteorológicas de superfície quando houver limitação de disponibilidade de dados.

Figura 11 – Precipitação anual vs média ao longo da série temporal, dos dados observados.



Fonte: Autor (2024).

Figura 12 – Precipitação anual vs média ao longo da série temporal, dos dados do ERA5-Land.

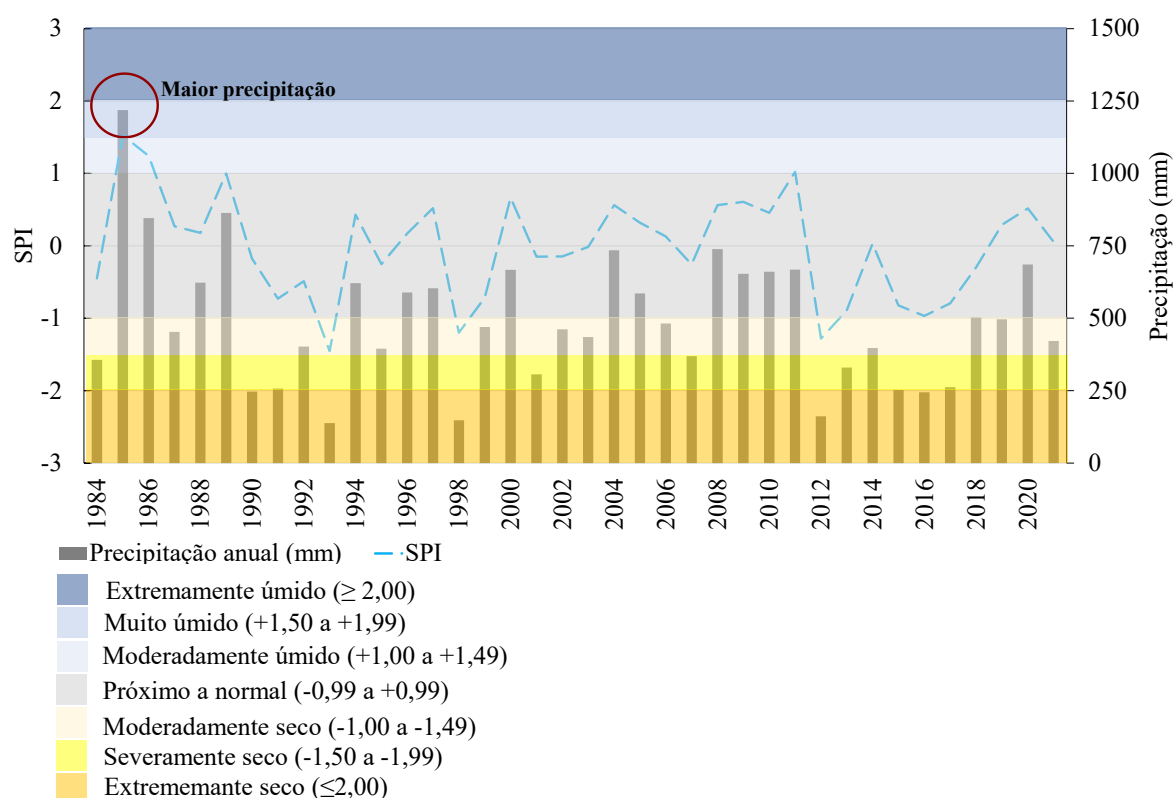


Fonte: Autor (2024).

4.2 ÍNDICE DE SECA

Os resultados do SPI calculados com base nos valores de precipitação extraídos da estação pluviométrica automática (Código 838000) foram apresentados na Figura 13. Com base na Tabela 4 se fez possível analisar a correlação dos resultados do índice com a precipitação.

Figura 13 – SPI vs precipitação com base nos dados extraídos da Estação 838000 operada pelo SGB/CPRM.

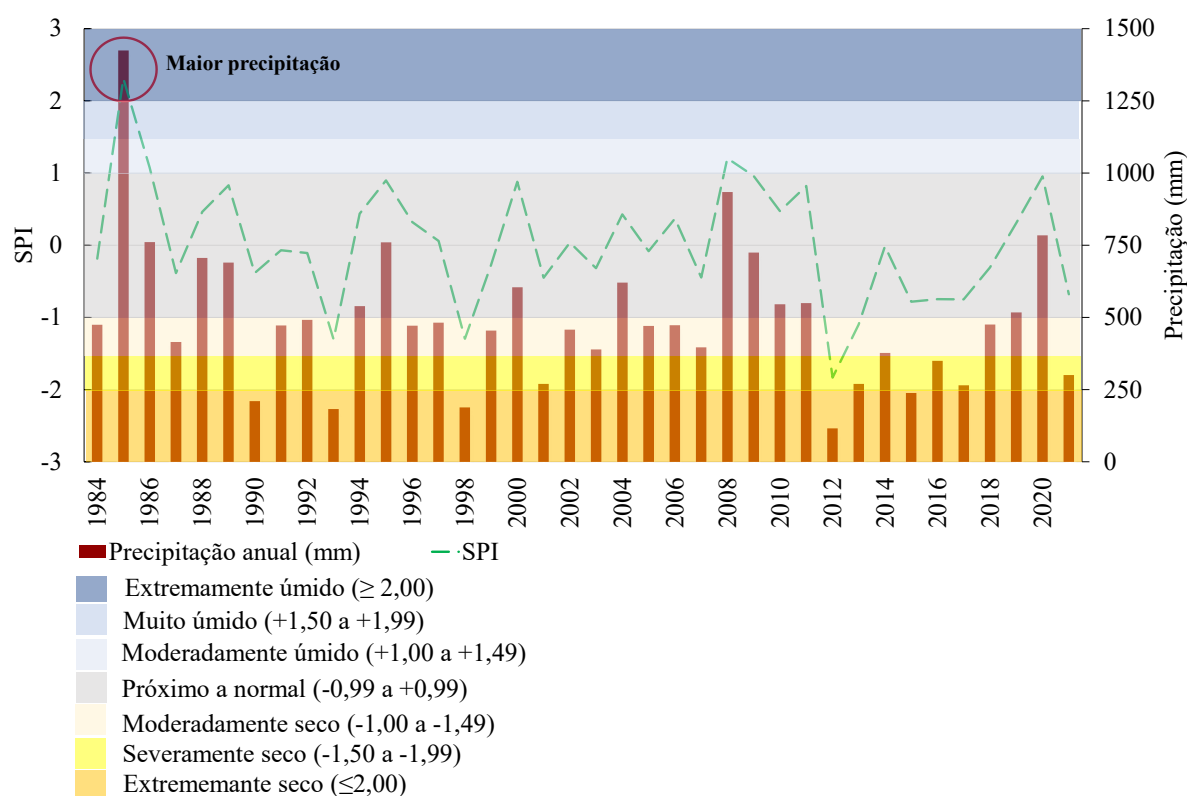


Fonte: Autor (2024).

Considerando os dados analisados para o Índice de Precipitação Padronizado (SPI), observou-se uma predominância de resultados negativos, com uma média de -0,01. Conforme indicado na Tabela 4, esse valor está próximo ao padrão normal (-0,99 a 0,99). Para o ano de 1993, destacou-se o menor valor do índice (-1,45), indicando um ano moderadamente seco. Neste cenário, conforme Inocêncio (2019), que avaliou eventos extremos nas bacias hidrográficas dos rios Pajeú, Ipojuca, Una, Tracunháem e Tapacurá, constatou, o período de maior severidade de seca ocorreu em 1993. Em contraste, para o ano de 1985, caracterizado pela maior precipitação (1.218,8 mm), o SPI aponta para um ano considerado muito úmido (1,52).

Já para os dados pluviométricos extraídos do ERA5-Land, a Figura 14 apresenta os resultados obtidos para o SPI calculado.

Figura 14 – SPI vs precipitação com base nos dados extraídos do ERA5-Land.



Fonte: Autor (2024).

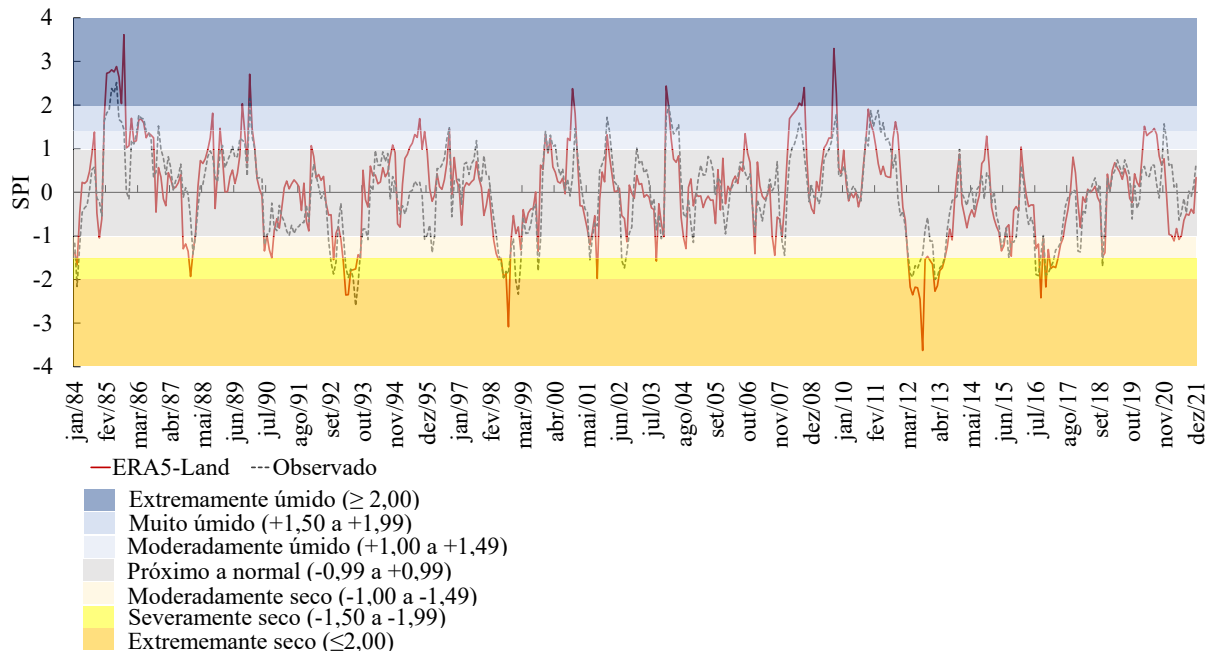
Com base nos valores apresentados, ressaltou-se uma predominância de valores positivos, com valor médio de 0,03, indicando um índice pluviométrico próximo do padrão normal. O ano de 2012 registrou a menor precipitação, apresentando um resultado moderadamente seco (-1,83). Em estudo realizado por Tavares *et al.* (2023) na bacia hidrográfica do Rio Pajeú, o período de 2012 a 2017 destacou-se como um dos períodos em que a região registrou os valores mais baixos durante análises de períodos secos. Em contraste, o ano de 1985 destacou-se como o de maior precipitação, com o SPI indicando um ano extremamente úmido (2,31).

Na análise do impacto dos eventos de seca na vegetação da Caatinga no Nordeste Brasileiro (NEB), Barbosa *et al.* (2019) empregaram o Índice de Precipitação Padronizado (SPI) no intervalo de 1901 a 2016. O estudo revelou que os anos em que o SPI registrou valores abaixo de -1 foram: 1991, 1992, 1993, 1998, 2007, 2012 e 2016. Esses resultados corroboraram com os obtidos neste estudo, onde os anos de 1993, 1998 e 2012 manifestaram valores inferiores a -1, baseando-se nos dados de precipitação extraídos da estação pluviométrica.

Para uma análise anual da variação do SPI, pôde-se observar que há uma variância entre os resultados encontrados para os dados da estação de referência e para a pluviometria obtida do ERA5-Land, conforme Figura 16. Para o ano de 1985, o SPI para os dados do modelo

espacial é de 2,31, indicando um ano extremamente úmido, enquanto para os dados da estação de referência é de 1,52, o que indicando um período muito úmido.

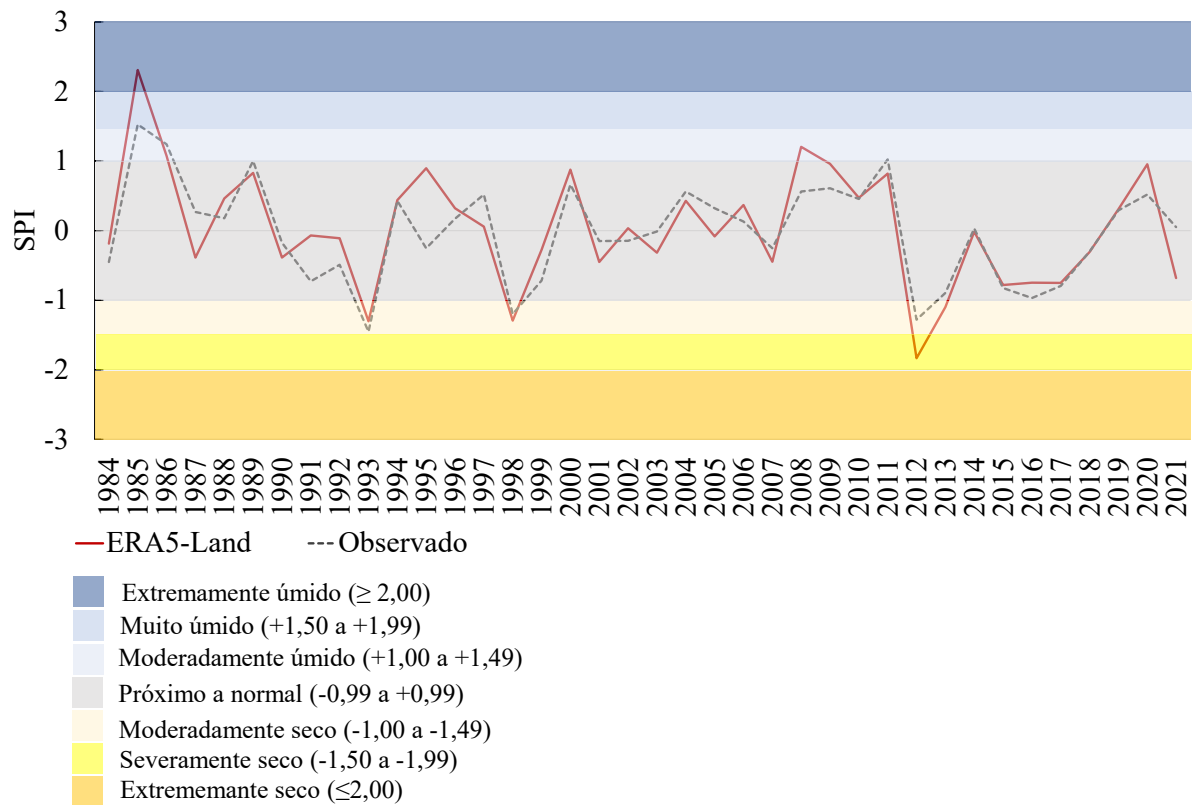
Figura 15 – SPI mensal da estação de referência vs ERA5-Land.



Fonte: Autor (2024).

Já para o ano de 1995, conforme Figura 16, o Índice de Precipitação Padronizado para os dados do pluviômetro foi de -0,25, apontando um período de chuvas próximo do normal, bem como o ERA5-Land registrou 0,90, todavia há uma diferença considerável nos valores apontado, portanto, a análise indicou uma disparidade em favor dos dados de satélite. Essas variações nos resultados destacam a importância de analisar as discrepâncias sazonais entre as fontes de dados, fornecendo *insights* valiosos para a compreensão das dinâmicas climáticas na região de estudo.

Figura 16 – SPI anual da estação de referência vs ERA5-Land.

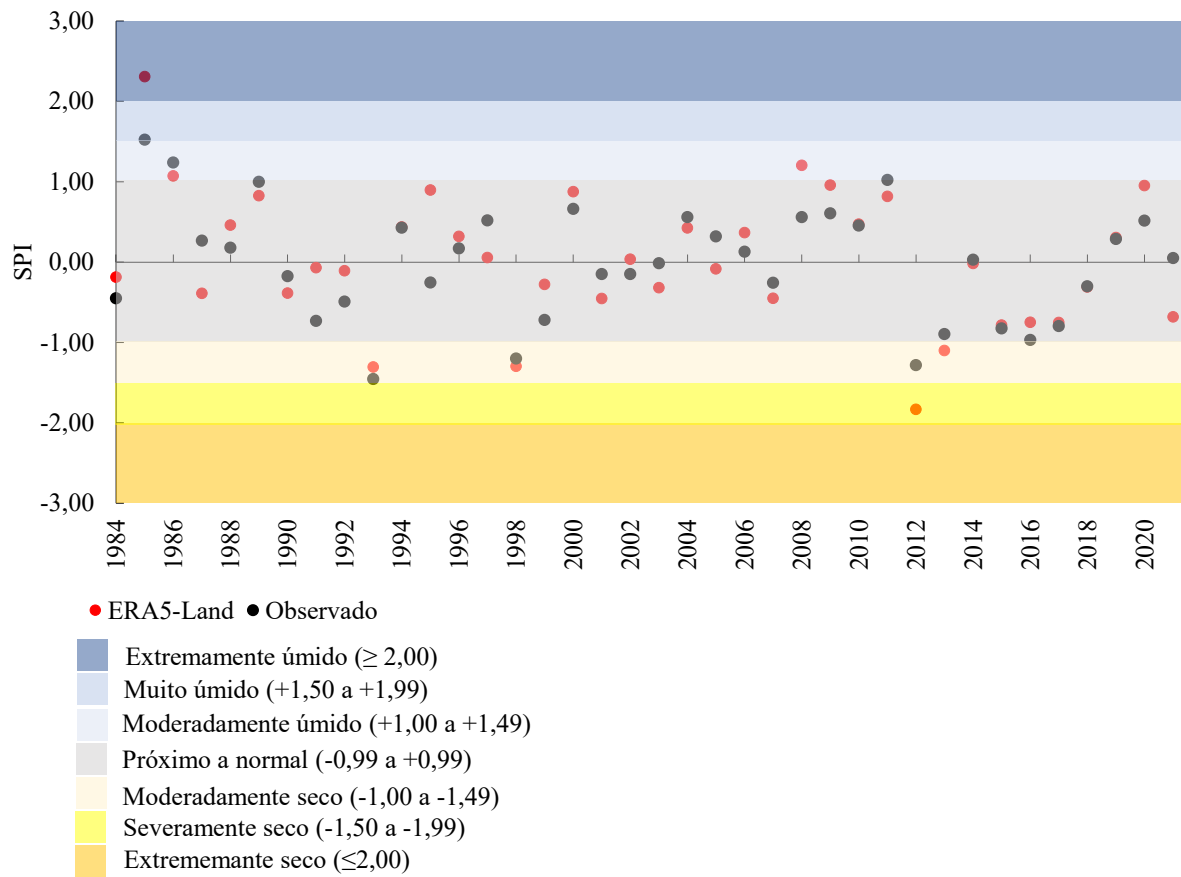


Fonte: Autor (2024).

A fim de quantificar a medida de erros entre os dados observados e extraídos do ERA5-Land, procedeu-se à análise do Erro Médio Absoluto (MAE, do inglês *Mean Absolute Error*), calculado como a média dos erros absolutos. Essa métrica representa a média da diferença absoluta entre os valores previstos, extraídos da estação pluviométrica, e os valores observados, coletados do ERA5-Land. Foi calculado um MAE de 0,28, indicando que o modelo tem uma tendência a subestimar ou superestimar o valor do Índice de Precipitação Padronizado (SPI) em 0,28.

A verificação do coeficiente de correlação (R) para avaliar a correlação entre os valores observados e extraídos e do ERA5-Land, resultou no valor de $R=0,88$. A Figura 17 apresentou o gráfico de dispersão para os valores das duas séries de dados utilizados no estudo. Na metodologia, o valor ideal do R é 1. Portanto, observou-se um bom resultado, indicando uma correlação entre as duas séries de dados analisadas.

Figura 17 – Dispersão para as séries utilizadas no estudo.



Fonte: Autor (2024).

Isso ressaltou a necessidade da utilização dos dados do ERA5-Land em conjunto com outra base de dados para análises específicas de seca na bacia hidrográfica do Rio Pajeú. Esse resultado está em conformidade com Andrade *et al.* (2022), cujo estudo indicou que as métricas estatísticas obtidas ao validar os dados de precipitação do ERA5-Land para o Nordeste brasileiro foram de aproximadamente 0,80, indicando que o desempenho dos produtos de satélites depende das características de cada bioma e do sistema de precipitação.

4.3 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA

As variações climáticas induzem implicações significativas tanto econômicas quanto socioambientais, como afirmado por Gonçalves (2019). Isso requer uma gestão eficaz que permita acomodar os usos múltiplos da água, garantindo o equilíbrio adequado entre quantidade e qualidade da água em um contexto de intermitência hídrica.

A aplicação dos testes estáticos de tendência e hipóteses permite avaliar de maneira mais precisa os dados estudados, contribuindo para uma maior compreensão das variações hídricas ocorridas na região

4.3.1 Testes de tendências

Conforme Naghettini e Pinto (2007), o teste não paramétrico de Mann-Kendall é comumente empregado para detectar monotonia de tendências em séries de dados ambientais, dados climáticos ou dados hidrológicos. Para os parâmetros extraídos da estação pluviométrica de referência, os valores calculados estão apresentados nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 – Teste da série temporal para os dados da estação pluviométrica de referência.

Parâmetro	Valor
Z	3,37
n	456
p-value	7,63E-04
S	1,09E+04
varS	1,06E+07
tau	1,05E-01

Fonte: Autor (2024).

Evidenciou-se que o valor absoluto de Z encontrado foi superior ao valor de 1,96, logo conclui-se que não se aceita a hipótese nula, portanto a série de precipitação segue uma tendência. No que se refere ao teste sazonal, apresentado na Tabela 11, todos os meses apresentaram valor absoluto de Z superior ao valor de 1.96, neste caso pode-se concluir que os dados apresentam tendência monotônica. O resultado obtido não mostrou claramente a distinção entre os períodos de chuva e estiagem ao longo do ano, ao contrário do que foi observado por Mousinho *et al.* (2024) ao aplicarem o mesmo teste na cidade de Caruaru, no Agreste pernambucano, onde identificaram padrões claros de chuva e estiagem.

Os resultados corroboraram com o evidenciado por Bezerra *et al.* (2019), os autores concluíram que as tendências para chuvas são menos significativas e tem um padrão espacial menos definidos quando comparado às tendências de chuva, por exemplo, em vista da maior variabilidade espacial e temporal da natureza dos dados de precipitação.

Tabela 11 – Teste sazonal para os dados da estação pluviométrica de referência

Parâmetros		S	varS	tau	z	Pr(> z)
Janeiro	S = 0	703	6327	1	8,825	2,22E-16
Fevereiro	S = 0	703	6327	1	8,952	2,22E-16
Março	S = 0	703	6327	1	8,952	2,22E-16
Abril	S = 0	703	6327	1	8,825	2,22E-16
Maio	S = 0	703	6327	1	8,825	2,22E-16
Junho	S = 0	703	6327	1	8,825	2,22E-16
Julho	S = 0	703	6327	1	8,825	2,22E-16
Agosto	S = 0	703	6327	1	8,825	2,22E-16
Setembro	S = 0	703	6327	1	8,825	2,22E-16
Outubro	S = 0	703	6327	1	8,825	2,22E-16
Novembro	S = 0	703	6327	1	8,825	2,22E-16
Dezembro	S = 0	703	6327	1	8,825	2,22E-16

Fonte: Autor (2024).

O *Sen's Slope* estima a inclinação da tendência na amostra de N pares de dados. Os valores para inclinação (*trend*) é de 0,0829 e o "*intercept*" é de 125,197. O que corrobora com Limeira *et al.* (2012), que, através da aplicação dos mesmos testes estatísticos, verificaram uma tendência positiva para três cidades localizadas na região do Cariri da Paraíba. Portanto, com base nos dados analisados, há uma tendência positiva, indicada pela inclinação positiva de 0,0829. Isso implica que, em média, espera-se um aumento na variável dependente conforme a variável independente aumenta

O teste de Pettitt é uma técnica estatística utilizada para detectar mudanças abruptas em séries temporais. Os resultados foram: $U^* = 594$, $p\text{-value} = 0,2582$ *alternative hypothesis: two.sided sample estimates: probable change point at time* $K_{222} = (444+222) = 666$. Conforme a análise dos dados, há a ocorrência de uma mudança abrupta na série temporal em junho de 1989.

Em sequências, nas Tabelas 12 e 13 foram apresentados os resultados para o teste não paramétrico de Mann-Kendall em relação aos dados extraídos do ERA5-Land.

Notou-se que, assim como o resultado para os dados observados, o valor absoluto de Z excedeu 1,96, sinalizando a rejeição da hipótese nula e, conseqüentemente, permite inferir que a série de precipitação manifesta uma tendência. No tocante ao teste sazonal, como exposto na Tabela 13, cada mês exibiu um valor absoluto de Z superior a 1,96. Nesse contexto, inferiu-se igualmente que os dados evidenciaram uma tendência monotônica.

Tabela 12 – Teste da série temporal para os dados pluviométricos extraídos do ERA5-Land.

Parâmetro	Valor
Z	3,68
n	459
p-value	2,33E-04
S	1,21E+04
varS	1,08E+07
tau	1,15E-01

Fonte: Autor (2024).

Tabela 13 – Teste Sazonal para os dados pluviométricos extraídos do ERA5-Land.

Parâmetros		S	varS	tau	z	Pr(> z)
Janeiro	S = 0	741	6833,7	1	8,952	2,22E-16
Fevereiro	S = 0	741	6833,7	1	8,952	2,22E-16
Março	S = 0	741	6833,7	1	8,952	2,22E-16
Abril	S = 0	703	6327	1	8,825	2,22E-16
Mai	S = 0	703	6327	1	8,825	2,22E-16
Junho	S = 0	703	6327	1	8,825	2,22E-16
Julho	S = 0	703	6327	1	8,825	2,22E-16
Agosto	S = 0	703	6327	1	8,825	2,22E-16
Setembro	S = 0	703	6327	1	8,825	2,22E-16
Outubro	S = 0	703	6327	1	8,825	2,22E-16
Novembro	S = 0	703	6327	1	8,825	2,22E-16
Dezembro	S = 0	703	6327	1	8,825	2,22E-16

Fonte: Autor (2024).

Segundo Cabral Júnior e Lucena (2020), após utilizar a metodologia para análise da cidade de Caicó, afirmaram que essa variabilidade de chuva é uma característica inerente a condições diversas típicas da região (condições atmosféricas, localização geográfica e influência oceânica) de clima tropical semiárido e não, necessariamente, a mudança de comportamento da chuva, havendo, portanto, anos mais chuvosos e outros menos, com grande variabilidade temporal mensal e anual.

O *Sen's Slope* estima a inclinação da tendência na amostra de N pares de dados. Os valores para inclinação (*trend*) é de 0,0833 e o "*intercept*" é de 124,779. Neste caso, o resultado para a inclinação sugere um aumento moderado na variável dependente conforme a variável independente aumenta. Enquanto o valor de 124,779 é o ponto onde a linha de tendência cruza o eixo y quando x é igual a zero. Os valores foram semelhantes e corroboraram com o resultado obtido na análise da série temporal de dados observados da estação pluviométrica.

Para o teste de Pettitt (1979), os resultados foram: $U^* = 6288$, $p\text{-value} = 0,173$ *alternative hypothesis: two.sided sample estimates: probable change point at time* $K\ 246 = (444+246) = 690$. Indicando a ocorrência de uma mudança abrupta na série temporal em junho de 1991.

Portanto, pode-se afirmar que há uma correlação nos resultados dos testes de tendência entre os dados da estação de referência e do ERA5-Land, indicando uma tendência monotônica para a série temporal examinada. De acordo com Cabral Júnior e Lucena (2020), esses resultados são uma característica intrínseca de regiões com clima tropical semiárido e não necessariamente indicam uma mudança no padrão de precipitação.

4.3.2 Testes de hipóteses

Conforme Ribeiro, Bortolin e Mendes (2019), a detecção de tendência em séries de vazão e precipitação apresenta expressiva importância para a gestão de recursos hídricos e ela pode ser feita por meio de testes estatísticos não paramétricos. Os valores encontrados para os parâmetros calculados com relação aos dados extraídos da estação pluviométrica de referência estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Teste de Estacionariedade, dados da estação pluviométrica de referência.

Parâmetro	Valor
rs	-0,001
E[V]	0
Var[V]	0,00219
T	-0,022
T (abs)	0,022
α	5%
$Z_{1-\alpha/2}$	1,96

Fonte: Autor (2024).

Evidenciou-se que o valor absoluto de T (T (abs)) encontrado foi inferior ao valor de $Z_{1-\alpha/2}$ adotado, logo conclui-se que se aceita a hipótese nula, portanto a série de precipitação é estacionária. Isso implica que as propriedades estatísticas da série não mudam significativamente ao longo do tempo, fornecendo uma base sólida para análises e previsões futuras. Conforme estudo de Terceiro (2022) realizado na região hidrográfica do rio Poti, foi encontrado um resultado unânime indicando estacionariedade das séries.

Os valores encontrados para os parâmetros calculados com relação aos dados pluviométricos extraídos do ERA5-Land são observados na Tabela 15

Tabela 15 – Teste de Estacionariedade, dados pluviométricos extraídos do ERA5-Land.

Parâmetro	Valor
rs	-0,046
$E[V]$	0
$Var[V]$	0,00219
T	-0,992
T (abs)	0,992
α	5%
$Z_{1-\alpha/2}$	1,96

Fonte: Autor (2024).

Evidenciou-se que o valor absoluto de T (T (abs)) encontrado foi inferior ao valor de $Z_{1-\alpha/2}$ adotado, logo com base nos resultados apresentados na Tabela 15, a conclusão é que a série temporal de precipitação derivada dos dados do ERA5-Land é estacionária. Conforme estudo realizado por Ribeiro, Bortolin e Mendes (2019) entre 1945 e 2017 na bacia de contribuição da UHE Castro Alves, foi encontrado mudança de estacionariedade a partir de 1970, onde o período referente a 1970 a 2017 foi caracterizado como estacionário e apresentou um aumento significativos nas médias comparado a anos anteriores a 1970.

Desta maneira, evidencia-se que, tanto para os dados da estação de referência quanto para as informações pluviométricas do ERA5-Land, houve uma tendência de estacionariedade da precipitação entre os anos de 1984 e 2021, uma vez que os resultados dos testes de hipóteses indicaram este fato com nível de significância de 95%.

5 CONCLUSÃO

No presente estudo, foi conduzida uma análise da variabilidade da precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú ao longo de 37 anos, combinando o uso de dados pluviométricos de uma estação de referência, reanálise de dados do ERA5-Land, cálculo de índices de seca e aplicação de testes estatísticos. Essa abordagem possibilita uma compreensão aprofundada da dinâmica da precipitação na região, aproveitando a representação geoespacializada oferecida pelo ERA5-Land em contraste com a natureza pontual dos postos pluviométricos, destacando o potencial de contribuição na análise de grandes áreas.

A abordagem integrada dos dados observados e do ERA5-Land proporcionou uma visão abrangente da variabilidade da precipitação, destacando a importância de compreensão detalhada para aplicações específicas. A utilização de produtos de Sensoriamento Remoto surge como uma solução valiosa para preencher lacunas e aprimorar a compreensão dos componentes climáticos, impulsionando estudos científicos e ampliando o conhecimento sobre o clima e suas interações.

Os resultados evidenciaram diferenças notáveis em anos específicos, como 1991 e 1995, enfatizando a necessidade de uma abordagem multidisciplinar para investigações climáticas e hidrológicas. A identificação dos anos de 1993 e 1998 como os mais secos, influenciados pelo fenômeno *El Niño* durante um período de seca mais amplo (1990 a 2001), destaca a complexidade climática na região.

A aplicação do Índice de Precipitação Padronizado (SPI) revelou padrões de seca, com um desempenho do modelo indicando uma correlação significativa entre os dados observados e do ERA5-Land, como no ano de 1993, com o menor valor do índice, -1,45 e -1,30 respectivamente, indicando um ano moderadamente seco. A comparação entre os conjuntos de dados, obtidos tanto da estação de referência quanto do ERA5-Land, sublinha a importância de considerar a estacionariedade ao analisar séries temporais de precipitação, proporcionando uma base sólida para análises futuras.

Os testes estatísticos aplicados, como Mann-Kendall, *Sen's Slope* e Pettitt, confirmaram a presença de tendências na precipitação, tanto na estação de referência quanto nos dados do ERA5-Land. Além disso, é importante destacar que ao comparar os valores encontrados para o SPI nas duas séries de dados, observou-se um coeficiente de correlação (R) de 0,88 e um Erro Médio Absoluto (MAE) de 0,28. Esses resultados indicam uma boa concordância entre os dados observados e os dados do ERA5-Land, reforçando a confiabilidade da análise e a robustez do modelo utilizado.

Diante disso, conclui-se que as análises realizadas possibilitaram significativa compreensão das variações climáticas na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú, fornecendo

resultados que podem ser aplicados para uma eficiente gestão dos recursos hídricos e a tomada de decisões em uma região sujeita a eventos climáticos extremos.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, L. R. P.; COSTA, I. R. A.; BARROS, V. H. O.; SANTOS NETO, S. M.; COUTINHO, A. P.; ANTONINO, A. C. D. Análise de tendência para dados pluviométricos no município de Toritama-PE. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 130–139, 2019. DOI: 10.24221/jeap.4.2.2019.2377.130-139.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas**. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em 12 set. 2023.

ANDRADE, J.M.; RIBEIRO NETO, A.; BEZERRA, U.A.; MORAES, A.C.C.; MONTENEGRO, S.M.G.L. A. Comprehensive Assessment of Precipitation Products: Temporal and Spatial Analyses over Terrestrial Biomes in Northeastern Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**. 28, 100842, 2022.

APAC. Agência Pernambucana de Água e Clima. **Bacias Hidrográficas – Rio Pajeú**. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/169-bacias-hidrograficas-rio-pajeu/202-bacia-do-rio-pajeu>. Acesso em: 8 set. 2023.

ARAÚJO, C. S. P. **Balanço hídrico climatológico via reanálise ERA5-Land no estado de Pernambuco**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 85 f., 2022.

BARBOSA, H.A.; KUMAR, T. V. L.; PAREDES, F.; ELLIOTT, S.; AYUGA, J.G. Assessment of Caatinga response to drought using Meteosat-SEVIRI Normalized Difference Vegetation Index (2008–2016). **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 148, p. 235–252, 2019. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.12.014.

BEZERRA, B. G.; SILVA, L. L.; SILVA, C. M. S.; CARVALHO, G. G. Changes of precipitation extremes indices in São Francisco River Basin, Brazil from 1947 to 2012. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 135, n. 1, p. 565-576, 2019. DOI: 10.1007/s00704-018-2396-6.

BRITO, J. L. N. S.; COELHO FILHO, L. C. T. **Fotogrametria Digital**. 1 ed. Rio de Janeiro: EDUERJ, 2007.

CABRAL JÚNIOR, J. B.; LUCENA, R. L. Análises das Precipitações pelos Testes Não Paramétricos de Mann-Kendall e Kruskal-Wallis. **Mercator**, v.19, 2020. DOI: 10.4215/rm2020.e19001.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Tese de Doutorado. IPH – UFRGS, 2001.

COOK, B. I.; AULT, T. R.; SMERDON, J. E. Unprecedented 21st century drought risk in the American Southwest and Central Plains. **Science Advances**, v.1, n.1, 2015. DOI: 10.1126/sciadv.1400082.

ECMWF. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. **ERA5-Land: description**. Disponível em: <https://confluence.ecmwf.int/pages/viewpage.action?pageId=74764925>. Acesso em: 17 set. 2023

FERRARI, A. L. **Variabilidade e tendência da temperatura e pluviosidade nos municípios de Pirassununga, Rio Claro, São Carlos e São Simão (SP): estudo sobre mudança climática de curto prazo em escala local**. Tese, Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, 2012.

FERREIRA, T. S. G.; CORRÊA, S. S.; CIRILO, J. A. Caracterização de Índices de Seca na Bacia do Rio Brígida Utilizando Dados do Era5. XVI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2022, Caruaru-PE. **In Anais**. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=14161>. Acesso em: 12 set. 2023.

FRANÇA, L. **Site Geo One**. Séries temporais meteorológicas com o ERA5-Land. 2023. Disponível em: <https://geoone.com.br/era5-land/>. Acesso em: 26 set. 2023.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELLD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWNLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for

monitoring extremes. **Scientific Data** 2, 150066, 2015. DOI: 10.1038/sdata.2015.66. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>. Acesso em 13 set. 2023.

GONÇALVES, M. L. A. **Governança das águas na bacia hidrográfica do Rio Pajeú, Pernambuco, Brasil: percepção dos atores e desempenho dos colegiados**. Dissertação. Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 170 p. 2019.

HERSBACH, H. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020. DOI: 10.1002/qj.3803. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/qj.3803>. Acesso em 14 set. 2023.

HIRAKATA, V. N.; MANCUSO, A. C. B.; CASTRO, S. M. J. Teste de hipóteses: perguntas que você sempre quis fazer, mas nunca teve coragem. **Clinical & Biomedical Research**, v. 39, n. 2, 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama da cidade de Serra Talhada**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/serra-talhada/panorama>. Acesso em 10 nov. 2023.

INOCÊNCIO, T. M. **Avaliação de eventos extremos no Estado de Pernambuco**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 108f., 2019.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Global warming of 1.5°C**. Incheon, South Korea. 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/>. Acesso em: 15 set. 2023.

JACOBI, P. R.; TRANI, E. **Planejando o futuro hoje: ODS 13, Adaptação e Mudanças Climáticas em São Paulo**. São Paulo: IEE-USP, 2019.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Clima da Região Nordeste do Brasil. In: **Tempo e clima no Brasil**. Cavalcanti, I. F. de A. (Org). São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Measures**. Charles Griffin, Londres, 1975.

KNIPPELBERG, F. M. Estações meteorológicas: Funcionamento e a sua importância na agricultura. 10ª Mostra de Extensão, Cuiabá-MT. **In Anais**. Universidade Federal de Mato Grosso, 2019. Disponível em: https://evento.ufmt.br/download/sub_fd6e78251792ea16591cd8ca2c063ba1.pdf. Acesso em 25 fev. 2024.

KOGAN, F. World droughts in the new millennium from AVHRR-based vegetation health indices. **EOS, Transactions, American Geophysical Union**, v. 83, n.48, p. 557-572, 2002. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2002EO000382?src=getftr>. Acesso em: 13 set. 2023.

LIMEIRA, R.C.; SOUSA, F. A. S.; SILVA, V. P. R.; OLIVEIRA, P.T. Tendência das chuvas no Estado da Paraíba. **Revista Hispeci&Lema On Line**, ano III, n.3, 2012.

LOPES, A. B.; VIEIRA, M. R. S.; LIMA FILHO, A. A.; SILVESTRE, E. G.; SILVESTRE, F. G. Anomalias na precipitação de quatro municípios do Amazonas, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 14, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/21766>. Acesso em: 07 abr. 2024.

MANN, H. B. Non-parametric testes Against trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245-259, 1945.

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; SOARES, W. R.; ALVES, L. M.; NOBRE, C. A. Extreme climatic events in the Amazon basin. **Theoretical and Applied Climatology**, v.107, p. 73-85, 2012.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P. M. A.; NOBRE, C. A.; RIBEIRO NETO, G. G.; MAGALHAES, A. R.; TORRES, R. R.; SAMPAIO, G.; ALEXANDRE, F.; ALVES, L. M.; CUARTAS, L. A.; DEUSDARÁ, K. R. L.; ÁLVALA, R. C. S. Assessing drought in the drylands of Northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C. **Natural Hazards**, v. 103, p. 2589-2611, 2020.

MARENGO, J.; DRUYAN, L.; HASTENRATH, S. Observational and modelling studies of Amazonia interannual climate variability. **Climatic Change**, v. 23, p.267-286, 1993.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. **In: Conference on Applied Climatology**, v. 8, Anaheim, CA: American Meteorological Society, 1993.

MCNEELEY, S. M. Examining barriers and opportunities for sustainable adaptation to climate change in Interior Alaska. **Climatic Change**, v. 111, p. 835-857, 2012.

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal of Hydrology**, v. 391, n. 1–2, p. 202–216, 2010.

MOUSINHO, F. H. G.; LIMA, J. M. S.; PEREIRA, M. M. A.; PESSOA, J. O., OLIVEIRA, L. M. M.; SANTOS, S. M.; PAIVA, A. L. R. Caracterização pluviométrica dos últimos 50 anos em Caruaru - PE, com análise de tendências, máximas diárias, Curvas IDF e distribuição Gumbel. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 17, n.2, p. 958–973, 2024.

MUÑOZ-SABATER, J.; DUTRA, E.; AGUSTI-PARANEDA, A.; ALBERGEL, C.; ARDUINI, G.; BALSAMO, G.; BOUSSEETTA, S.; CHOULGA, M.; HARRIGAN, S.; HERBACH, H.; MARTENS, B.; MIRALLES, D.; PILES, M.; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, N.; ZSOTER, E.; BUONTEMPO, C.; THÉPAUT, J. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. **Earth System Science Data**, v. 13, n. 9, 2021.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. CPRM, Belo Horizonte, 561p., 2007.

NÓBREGA, R. S.; SANTIAGO, G. A. C. F.; SOARES, D. B. Tendências do controle climático oceânico sob a variabilidade temporal da precipitação no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, p.276-292, 2016.

PETTITT, A. N. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. **Applied Statistics**, v. 28, n. 2, p. 126-135, 1979.

QI, J.; DU, J.; SINISCALCHI, S. M.; MA, X.; LEE, C. H. On mean absolute error for deep neural network based vector-to-vector regression. **IEEE Signal Processing Letters**, 27, 1485-1489, 2020.

RIBEIRO, E. P. **Mudanças ambientais e desertificação na bacia hidrográfica do Rio Pajeú**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 180 f., 2016.

RIBEIRO, M. E.; BORTOLIN, T. A.; MENDES, L. A. Análise da Estacionariedade e Homogeneidade de Séries Hidrológicas na Bacia de Contribuição da UHE Castro Alves, RS. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2019, Foz do Iguaçu-PR. In **Anais**. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=5798>. Acesso em: 09 jan. 2024.

SANTOS, M.S. **Caracterização espaço-temporal de secas utilizando ondaletas e o standardized precipitation index: uma aplicação para a parcela mineira da bacia do rio São Francisco**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. 2011.

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

SENA, A. S.; AZEVEDO FILHO, A. C.; LUCENA, W. G. L. O Anúncio de Ofertas Subsequentes De Ações E Seu Efeito No Preço das Ações: uma Abordagem com Base no Teste de Pettitt. **Revista Universo Contábil**, v. 12, n. 1, p. 144–161, 2016. DOI: 10.4270/ruc.2016108.

SENEVIRATNE, S. I.; NICHOLLS, N.; EASTERLING, D.; GOODESS, C. M.; KANAE, S.; KOSSIN, J.; ZHANG, X. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**, p. 109-230, 2012.

SILVA, J. X.; ZAIDAN, R. T. **Geoprocessamento & Análise Ambiental: Aplicações**, Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011.

SILVA, D.F.; LIMA, M.J.S.; NETO, P.F.S.; GOMES, H.B.; SILVA, F.D.S.; ALMEIDA, H.R.R.C.; PEREIRA, M.P.S.; COSTA, R.L. 2020. Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no Índice Padronizado de Precipitação Para o Leste do

Nordeste. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.13, n. 2, p. 449-464, 2020. DOI: 10.266848/rbgf.v13.2.p449-464.

SOUSA JÚNIOR, M. A.; SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P. **Monitoramento de estiagem na Região Sul do Brasil utilizando dados EVI/MODIS no período de dezembro de 2000 a junho de 2009**. São José dos Campos: INPE, 134 p, 2010

TAVARES, D. M. F.; FARIAS, V. E. M.; ANDRADE, J. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Avaliação do desempenho de produtos de sensoriamento remoto para análise de seca na bacia hidrográfica do Rio Pajeú. XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2023, Aracaju. **In Anais**. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=15780>. Acesso em 04 jan. 2024.

TERCEIRO, A. D. M. **Análise de estacionariedade das séries de precipitações da região hidrográfica cearense do rio Poti utilizando testes estatísticos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Campus de Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2022. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/69930>. Acesso em: 09 jan. 2024.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERIA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. A. Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. **Journal of Climate**, v. 23, n. 7, p. 1696–1718, 2010.

WILHITE, D.A. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. pp.3-18. In Drought: A Global Assessment. Routledge Publishers. **Drought: A Global Assessment**. v.1, p. 3-18, 2000.