



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE**

ELISABETH REGINA ALVES CAVALCANTI SILVA

**ANÁLISE DA DINÂMICA CLIMÁTICA EM BACIAS SEMIÁRIDAS NO
EIXO NORTE DO PROJETO DE TRANSPOSIÇÃO DO RIO SÃO
FRANCISCO: contribuições para o cumprimento dos Objetivos do
Desenvolvimento Sustentável**

**Recife
2020**



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E
MEIO AMBIENTE**

ELISABETH REGINA ALVES CAVALCANTI SILVA

**ANÁLISE DA DINÂMICA CLIMÁTICA EM BACIAS SEMIÁRIDAS NO
EIXO NORTE DO PROJETO DE TRANSPOSIÇÃO DO RIO SÃO
FRANCISCO: contribuições para o cumprimento dos Objetivos do
Desenvolvimento Sustentável**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para obtenção do título de doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Área de concentração: Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Josiclêda Domiciano Galvêncio.

Coorientador: Prof. Dr. Lucivânio Jatobá

**Recife
2020**

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria do Carmo de Paiva, CRB4-1291

S586a Silva, Elisabeth Regina Alves Cavalcanti.

Análise da dinâmica climática em bacias semiáridas no Eixo Norte do Projeto de Transposição do Rio São Francisco : contribuições para o cumprimento dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável / Elisabeth Regina Alves Cavalcanti Silva. – 2020.
222 f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Josiclêda Domiciano Galvêncio.

Coorientador: Prof. Dr. Lucivânio Jatobá.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, CFCH.

Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Recife, 2020.

Inclui referências e apêndices.

1. Gestão ambiental. 2. Mudanças climáticas. 3. Desenvolvimento sustentável. 4. Recursos hídricos. 5. São Francisco, Rio, Bacia. I. Galvêncio, Josiclêda Domiciano (Orientadora). II. Jatobá, Lucivânio (Coorientador). III. Título.

363.7 CDD (22. ed.)

UFPE (BCFCH2021-050)

ELISABETH REGINA ALVES CAVALCANTI SILVA

**ANÁLISE DA DINÂMICA CLIMÁTICA EM BACIAS SEMIÁRIDAS NO
EIXO NORTE DO PROJETO DE TRANSPOSIÇÃO DO RIO SÃO
FRANCISCO: contribuições para o cumprimento dos Objetivos do
Desenvolvimento Sustentável**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a
obtenção do título de Doutor em Desenvolvimento e
Meio Ambiente.

Aprovada em: 15/09/2020

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Josiclêda Domiciano Galvêncio (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Prof. Dr. Inajá Francisco de Souza (UFS) - Examinador Interno

Profa. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro - Examinadora Externa

Profa. Dra. Alzira Gabrielle Soares Saraiva Souza - Examinadora Externa

Prof. Dr. Ygor Cristiano Brito Moraes - Examinador Externo

À minha mãe Sandra Maria Alves Cavalcanti (in memorian) e minha avó Maria Cleonice Alves Cavalcanti (in memorian), que não puderam vivenciar este momento, mas que sempre vibraram com todas as minhas conquistas e sempre acreditaram que eu poderia ser bem melhor do que eu era. Um dia nos encontraremos... Com amor e saudades.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, porque sem Ele eu não chegaria até aqui, e nele deposito minha fé, minha confiança e meu amor.

À minha mãe e minha avó agradeço por todo o amor incondicional que tiveram comigo nos poucos e saudosos anos em que viveram ao meu lado.

À minha orientadora Prof^a. Dra. Josiclêda Domiciano Galvêncio, todo o meu respeito, carinho e admiração pela disponibilidade e paciência em me orientar da graduação até o doutorado, pelas oportunidades na vida acadêmica, assim como pelo aprendizado que adquiri ao longo desses anos, tendo proporcionado a realização desta pesquisa. Muito obrigada.

Ao meu coorientador Lucivânio Jatobá, pelo aprendizado e disponibilidade durante o doutorado. Muito obrigada.

Agradeço às pessoas que direta ou indiretamente ajudaram-me no trabalho como os amigos do Grupo de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto (SERGEO): Pedro Paulo, Tony, Luciana Mayla, Jadson, Carlos, Josimar, Sidney, Rodrigo Zimmerle e Pedro Ferreira que de algum modo auxiliaram na pesquisa, e principalmente à Henrique Ferreira e ao professor Francisco Wellery pelas contribuições metodológicas ao trabalho.

Agradeço aos meus antigos amigos pela amizade que me ofereceram durante a minha trajetória. Em especial ao meu amigo José Gustavo que sempre me ajudou durante toda a graduação. Agradeço também ao meu amigo Pedro Paulo por anos de amizade e carinho, com certeza será alguém que levarei no meu coração durante toda a minha vida.

Ao laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento SERGEO, por ceder os programas e licenças fundamentais para execução deste trabalho e aos seus integrantes. Ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco, pela oportunidade de desenvolvimento do projeto.

Ao IFMA Campus Alcântara pelo apoio institucional e pela concessão do afastamento para a finalização do doutorado, contribuindo para meu crescimento profissional e pessoal.

À FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco) pelo financiamento desta pesquisa, com a disponibilização de uma bolsa de estudos mensal, por meio do processo IBPG-1644-9.25/15.

À APAC pelo financiamento desta pesquisa, com a disponibilização de uma bolsa de estudos mensal, por meio do processo BCT-0166-1.07/16.

Porque Ele vê as extremidades da terra; e vê tudo o que há debaixo dos céus. Quando deu peso ao vento, e tomou a medida das águas; quando prescreveu leis para a chuva e caminho para o relâmpago dos trovões; estabeleceu-a e também a esquadrinhou. E disse ao homem: Eis que o temor do Senhor é a sabedoria, e apartar-se do mal é a inteligência (Jó 28:24-28). Pois, que adiantará ao homem ganhar o mundo inteiro e perder a sua alma? (Marcos 8:36)

RESUMO

No último século as discussões sobre a modificação dos padrões climáticos têm suscitado inúmeros debates e pesquisas relevantes sobre o impacto, a intensidade e as previsões de cenários futuros de mudança climática em diversas regiões do globo. A compreensão das relações que constituem a dinâmica do clima requer uma abordagem interdisciplinar mais ampla e profunda, por essa razão, a complexidade inerente à temática das mudanças climáticas está inserida no escopo dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos com o amparo da Organização das Nações Unidas (ONU). Os ODS fornecem uma janela de oportunidade para a criação de abordagens operacionais multidimensionais para a adaptação às mudanças climáticas. Nesse sentido, a complexidade inerente à análise das séries hidroclimáticas, devido à heterogeneidade regional, e à formulação de modelos capazes de representar a dinâmica das bacias hidrográficas do semiárido, representam um desafio na busca de metodologias que possam salientar aspectos de interesse e prover uma base de dados confiável para estudos de previsibilidade em relação à dinâmica climática no semiárido do Nordeste. Para o entendimento das atuais tendências de variação da precipitação pluviométrica no semiárido pernambucano, análises estatísticas que indicam a variabilidade da intensidade e frequência da ocorrência de chuvas são importantes indicadores de modificação nos padrões climáticos. Desse modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar a dinâmica das chuvas no semiárido do Submédio São Francisco nas Bacias do Pajeú, Terra Nova e Brígida, que são as bacias receptoras do Eixo Norte da transposição do Rio São Francisco em Pernambuco, utilizando as *wavelets*. Foram utilizados dados diários de precipitação pluviométrica em 12 estações nas bacias estudadas, nos quais foram analisadas as séries mensais, trimestrais e anuais da precipitação, a ocorrência de dias com chuvas acima de 1, 10 e 20mm, o número de dias no ano com precipitação acima de 5, 10, 20 e 30mm, bem como os métodos de análise de regressão linear e teste não paramétrico de Kendall-tau para verificar a tendência linear da quantidade e intensidade dos eventos de chuva nas séries de precipitação avaliadas através do software Climap 3.0. Para análise correlacional da influência das anomalias de TSM sobre a variabilidade da precipitação estudada foram utilizadas a *wavelet* contínua e *wavelet* de coerência, processados através do Matlab, com base em índices climáticos e em dados pluviométricos. Foram comparadas duas normalizações diferentes dos dados, uma com base na razão entre o desvio padrão e a média global da série, e outra com base no desvio padrão e média mensal, resultando em diferenças marcantes da frequência em relação à escala de tempo. Os resultados do trabalho sugeriram uma tendência de diminuição no volume e da ocorrência de chuvas nos postos analisados, principalmente na década de 1970 e meados da década de 1980. A frequência de precipitações abaixo da média histórica tem se intensificado nas Bacias do Eixo Norte da Transposição do Rio São Francisco, principalmente após a década de 1990, o que é um indicativo da tendência de aumento dos eventos de seca na região, que coincide com o aumento da frequência do El Niño e da influência das anomalias de TSM sobre a variabilidade da precipitação. As oscilações de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Atlântico apresentaram maior coerência em relação a precipitação do que os índices formulados no Pacífico Tropical, o que foi possível analisar através de índices pouco analisados. O estudo foi interessante por evidenciar as relações entre as variabilidades locais dos dados de precipitação pluviométrica e os mecanismos atmosféricos regionais e de larga escala.

PALAVRAS-CHAVE: Mudanças climáticas. Tendência; Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). Índices climáticos. *Wavelets*.

ABSTRACT

In the last century, as a title on the modification of climate patterns, it has incited several discussions and relevant research on the impact, intensity and predictions for future climate change scenarios in distinct regions of the globe. Understanding the relationships that are related to the climate dynamics requires a broader and deeper interdisciplinary approach. For this reason, the complexity inherent to the theme of climate change is within the framework of the 17 Sustainable Development Goals (SDGs) proposed with the support of United Nations (UN). The SDGs provide a range of opportunities for creating multidimensional and operational approaches to adapt to the climate change. In this sense, the complexity related to the analysis of the hydroclimatic series, coming from the regional heterogeneity, and from the information of models capable of representing the dynamics of the hydrographic basins of the semiarid region, represent a challenge in the research for methodologies that highlight interesting aspects and provides basis to obtain reliable data for predictability studies in relation to climatic dynamics in the semi-arid region of the Brazilian Northeast. To understand the current trends of variation in rainfall in the semiarid region of Pernambuco, statistical analyzes have been made that indicate the variability in the intensity and frequency of the occurrence of rainfall are important indicators of changes in weather patterns. Thus, the objective of this work was to evaluate the dynamics of the rains in the semi-arid of the Submid of São Francisco river in the Pajeú, Terra Nova and Brígida Basins, which are the receiving basins of the Northern Axis of the transposition of the São Francisco River in Pernambuco, using as waves. Daily rainfall data were used in 12 data collecting stations in the studied basins, which were analyzed monthly, quarterly and historical occurrence series, the occurrence of days with rains above 1, 10 and 20mm, the number of days in the year with rainfall above 5, 10, 20 and 30mm, as well as the methods of linear regression analysis and non-parametric Kendall-tau test to verify the linear trend of the quantity and intensity of rain events in the evaluation series evaluated using the Climap 3.0 software . For correlational analysis of the influence of SST anomalies on the variability of the studied separation, the continuous wavelet and coherence wavelet were used, processed through Matlab, based on climatic indexes and rainfall data. Two different normalizations of the data were compared, one based on the ratio between the standard deviation and the global mean of the series, and the other based on the standard deviation and monthly mean, remarkable differences in frequency in relation to the time scale are observed. The results of this work suggested a tendency of decrease in the volume and of the occurrence of rain in the workstation, mainly in the 1970s and has revealed in the 1980s as well. The frequency of rainfall below the historical average has intensified in the Northern Axis Basins of the Transposition of the São Francisco River, mainly after the 1990s, which is an indicative of the tendency of increasing drought events in the region, which coincides with the increase in the frequency of El Niño and the influence of SST anomalies on the variability of formation. Oscillations of Sea Surface Temperature (TSM) in the main Atlantic coherence in relation to forming the indices formulated in the Tropical Pacific, if it is possible to analyze the indices little formed. The study was interesting because it showed the relationship between local variability in rainfall protection data and atmospheric and large-scale components.

KEYWORDS: Climate change. Trend. Sustainable Development Goals (SDGs). Climatic indices; *Wavelets*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Zoneamento das anomalias no Oceano Atlântico.....	38
Figura 2 -	Resolução tempo -frequência da abordagem wavelet.	43
Figura 3 -	Citações sobre as wavelets por área.....	44
Figura 4 -	Número de citações sobre wavelets na área de recursos hídricos.	45
Figura 5 -	Citações com a utilização das wavelets em estudos que envolvem a dinâmica da precipitação, por área de estudo.....	46
Figura 6 -	Número de citações de trabalhos que utilizaram as wavelets para estudo da precipitação.....	47
Figura 7 -	Localização da Área de Estudo.....	48
Figura 8 -	Declividade das Bacias Hidrográficas do Brígida, Terra Nova e Pajeú.	49
Figura 9 -	Interpolação dos dados de precipitação nas Bacias estudadas.....	62
Figura 10 -	Média histórica e DPP do trimestre de maior precipitação pluviométrica na estação de Itapetim -PE.	65
Figura 11 -	Média histórica anual e DPP da estação de Itapetim -PE.....	66
Figura 12 -	Dias com chuva =>1 mm, dias com chuva =>10 mm e dias com chuva =>20 mm diários.	67
Figura 13 -	Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Itapetim -PE.	68
Figura 14 -	Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963 -2019 em Itapetim-PE.	69
Figura 15 -	Média histórica e DPP do trimestre de maior precipitação pluviométrica na estação de São José do Egito-PE.	71
Figura 16 -	Média histórica anual e DPP da estação de São José do Egito-PE.....	71
Figura 17 -	Dias com chuva =>1 mm, dias com chuva =>10 mm e dias com chuva =>20 mm diários em São José do Egito-PE.....	72
Figura 18 -	Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em São José do Egito-PE.....	73
Figura 19 -	Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963-2019 em São José do Egito-PE.	74
Figura 20 -	Média histórica e DPP do trimestre de maior precipitação pluviométrica na estação de Tuparetama.....	75
Figura 21 -	Média histórica anual e DPP da estação de Tuparetama-PE.	76
Figura 22 -	Dias com chuva =>1 mm, dias com chuva =>10 mm e dias com chuva =>20 mm diários em Tuparetama-PE.	77
Figura 23 -	Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Tuparetama.	78
Figura 24 -	Precipitação Total, Regressão Linear anual e Teste Sequencial de Mann-Kendall de 1963-2019 em Tuparetama-PE.	79
Figura 25 -	Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall nos meses de fevereiro-março-abril de 1963-2019 em Tuparetama-PE.	80
Figura 26 -	Média histórica do trimestre FMA e DPP da estação de Iguaraci-PE.....	81
Figura 27 -	Média histórica anual e DPP da estação de Iguaraci-PE.	81
Figura 28 -	Dias com chuva =>1 mm, dias com chuva =>10 mm e dias com chuva =>20 mm diários em Iguaraci-PE.	82

Figura 29 -	Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Iguaraci-PE.	83
Figura 30 -	Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963-2019 em Iguaraci-PE.	84
Figura 31 -	Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall nos meses de fevereiro-março-abril de 1963-2019 em Iguaraci-PE.	85
Figura 32 -	Média histórica do trimestre FMA e DPP da estação de Ibimirim-PE.	86
Figura 33 -	Precipitação total anual e DPP da estação de Ibimirim-PE.	87
Figura 34 -	Dias com chuva =>1 mm, dias com chuva =>10 mm e dias com chuva =>20 mm diários em Ibimirim-PE.	87
Figura 35 -	Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Ibimirim -PE.	88
Figura 36 -	Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963-2019 em Ibimirim-PE.	89
Figura 37 -	Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall nos meses de fevereiro-março-abril de 1963-2019 em Ibimirim-PE	90
Figura 38 -	Média histórica do trimestre FMA e DPP da estação de Floresta-PE.	91
Figura 39 -	Média histórica anual e DPP da estação de Floresta-PE.	92
Figura 40 -	Dias com chuva =>1 mm, dias com chuva =>10 mm e dias com chuva =>20 mm diários em Floresta-PE.	92
Figura 41 -	Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Floresta-PE.	93
Figura 42 -	Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963-2019 em Floresta -PE.	94
Figura 43 -	Média histórica do trimestre FMA e DPP da estação de Serra Talhada-PE....	95
Figura 44 -	Média histórica anual e DPP da estação de Serra Talhada -PE.	96
Figura 45 -	Dias com chuva =>1 mm, dias com chuva =>10 mm e dias com chuva =>20 mm diários em Serra Talhada-PE.	97
Figura 46 -	Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e 30mm em Serra Talhada.	98
Figura 47 -	Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall nos meses de fevereiro-março-abril de 1963-2019 em Serra Talhada-PE.	99
Figura 48 -	Média histórica do trimestre FMA e DPP da estação de Salgueiro-PE.	100
Figura 49 -	Média histórica anual e DPP da estação de Salgueiro-PE.	101
Figura 50 -	Dias com chuva =>1 mm, dias com chuva =>10 mm e dias com chuva =>20 mm diários em Salgueiro-PE.	101
Figura 51 -	Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Salgueiro.	102
Figura 52 -	Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963-2019 em Salgueiro-PE.	103
Figura 53 -	Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall nos meses de fevereiro-março-abril de 1963-2019 em Salgueiro-PE.	104
Figura 54 -	Média histórica do trimestre FMA e DPP da estação de Parnamirim de 1963 a 2019.	105
Figura 55 -	Média histórica anual e DPP da estação de Parnamirim de 1963 a 2019.	106
Figura 56 -	Dias com chuva =>1 mm, dias com chuva =>10 mm e dias com chuva =>20 mm diários em Parnamirim-PE.	106

Figura 57 -	Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Parnamirim.	107
Figura 58 -	Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963-2019 em Parnamirim-PE.....	108
Figura 59 -	Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall nos meses de fevereiro-março-abril de 1963-2019 em Parnamirim-PE.	109
Figura 60 -	Média histórica do trimestre FMA e DPP da estação de Santa Maria da Boa Vista-PE de 1963 a 2019.	110
Figura 61 -	Média histórica anual e DPP da estação de Santa Maria da Boa Vista-PE de 1963 a 2019.	111
Figura 62 -	Dias com chuva $\Rightarrow$ 1 mm, dias com chuva $\Rightarrow$ 10 mm e dias com chuva $\Rightarrow$ 20 mm diários em Santa Maria da Boa Vista-PE.	112
Figura 63 -	Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Santa Maria da Boa Vista-PE.....	113
Figura 64 -	Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963-2019 em Santa Maria da Boa Vista-PE.	114
Figura 65 -	Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall nos meses de fevereiro-março-abril de 1963-2019 em Santa Maria da Boa Vista- PE.....	115
Figura 66 -	Média histórica do trimestre FMA e DPP da estação de Exu-PE.....	116
Figura 67 -	Média histórica anual e DPP da estação de Exu-PE.....	117
Figura 68 -	Dias com chuva $\Rightarrow$ 1 mm, dias com chuva $\Rightarrow$ 10 mm e dias com chuva $\Rightarrow$ 20 mm diários em Exu-PE.....	117
Figura 69 -	Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Exu-PE...	118
Figura 70 -	Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963-2019 em Exu-PE.	119
Figura 71 -	Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall nos meses de fevereiro-março-abril de 1963-2019 em Exu-PE.....	120
Figura 72 -	Média histórica do trimestre FMA e DPP da estação de Araripina-PE.....	121
Figura 73 -	Média histórica anual e DPP da estação de Araripina-PE.	122
Figura 74 -	Dias com chuva $\Rightarrow$ 1 mm, dias com chuva $\Rightarrow$ 10 mm e dias com chuva $\Rightarrow$ 20 mm diários em Araripina-PE.....	123
Figura 75 -	Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Araripina.	124
Figura 76 -	Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963-2019 em Araripina-PE.	125
Figura 77 -	Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall nos meses de fevereiro-março-abril de 1963-2019 em Araripina-PE.	126
Figura 78 -	Interpolação das estações pluviométricas na Bacia do Pajeú	135
Figura 79 -	Interpolação das estações pluviométricas na Bacia do Terra Nova.....	135
Figura 80 -	Interpolação das estações pluviométricas na Bacia do Brígida.	136
Figura 81 -	Normalizações de Cazzelles (a) e Kayano (b) nas estações a Leste do Pajeú.	142
Figura 82 -	Normalizações de Cazzelles (a) e Kayano (b) nas estações a Oeste do Pajeú.	143
Figura 83 -	Análise da precipitação a Leste da Bacia do Pajeú através da wavelet contínua, com a normalização utilizada por Cazzelles.....	144

Figura 84 -	Análise da precipitação a Oeste da Bacia do Pajeú através da wavelet contínua, com a normalização utilizada por Cazzelles.....	146
Figura 85 -	Análise da precipitação da Bacia do Pajeú, Terra Nova e Brígida através da wavelet contínua, com a normalização utilizada por Kayano.	147
Figura 86 -	Localização da Área de Estudo.....	152
Figura 87 -	Interpolação dos dados de precipitação nas Bacias estudadas.....	154
Figura 88 -	Zoneamento do índice de El Niño no Oceano Pacífico.	155
Figura 89 -	Temperatura da superfície do mar (cores - vermelho, aquecimento; azul, resfriamento), anomalias dos ventos na superfície associados ao SAOD (vetores) e pressão média do nível do mar (contornos).....	158
Figura 90 -	Análise temporal de potência do El Nino.	164
Figura 91 -	Análise temporal de potência do SOI.	166
Figura 92 -	Análise temporal da potência de índices de TSM no Oceano Atlântico.	167
Figura 93 -	Análise temporal da potência de índices de TSM no Oceano Atlântico Norte.	168
Figura 94 -	Análise temporal da potência de índices utilizados globalmente.	169
Figura 95 -	Análise temporal da coerência das estações estudadas com o El Niño.	170
Figura 96 -	Análise temporal da coerência das estações analisadas com índices mais estudados no Nordeste.	172
Figura 97 -	Análise temporal da coerência numa estação do Pajeú com índices pouco estudados no Nordeste.	173
Figura 98 -	Análise temporal da coerência numa estação do Pajeú na periodicidade de 10-12 anos com índices provenientes do Atlântico.	175
Figura 99 -	Análise temporal da coerência numa estação do Pajeú na periodicidade de 10-12 anos com o El Nino.	176
Figura 100 -	Análise temporal da coerência das estações estudadas com o TPI.....	177
Figura 101 -	Análise temporal da coerência das estações estudadas com a ODP.....	178
Figura 102 -	Análise temporal da coerência das estações estudadas com o NAO.	179
Figura 103 -	Análise temporal da coerência das estações estudadas com o TSA.	180
Figura 104 -	Análise temporal da coerência das estações estudadas com o SAODI	182

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Dados pluviométricos da Bacia do Pajeú-PE.....	60
Tabela 2 -	Dados pluviométricos da Bacia do Terra Nova-PE.....	61
Tabela 3 -	Dados pluviométricos da Bacia do Brígida-PE.....	61
Tabela 4 -	Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade de 1963 a 2019 em Itapetim.....	66
Tabela 5 -	Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade em São José do Egito- PE.....	70
Tabela 6 -	Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade em Tuparetama.....	76
Tabela 7 -	Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade em Iguaraci-PE.....	82
Tabela 8 -	Média, mediana e desvio padrão mensal de Ibimirim-PE.....	86
Tabela 9 -	Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade de 1963 a 2019 de Floresta-PE.	90
Tabela 10 -	Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade de 1963 a 2019 de Serra Talhada-PE.....	96
Tabela 11 -	Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade em Salgueiro-PE.	100
Tabela 12 -	Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade de 1963 a 2019 de Parnamirim-PE.	104
Tabela 13 -	Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade de 1963 a 2019 de Santa Maria da Boa Vista-PE.	110
Tabela 14 -	Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade de 1963 a 2019 de Exu-PE.....	116
Tabela 15 -	Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade de 1963 a 2019 de Araripina-PE.....	121
Tabela 16 -	Testes estatísticos de tendência dos postos pluviométricos analisados do Submédio São Francisco.	126
Tabela 17 -	Dados pluviométricos das Bacias do Pajeú, Terra Nova e Brígida.....	136
Tabela 18 -	Escalas de tempo usadas nos espectros de ondeletas.	141
Tabela 19 -	Dados pluviométricos das Bacias do Pajeú, Terra Nova e Brígida.....	153

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMO	<i>Atlantic Multidecadal Oscillation</i>
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CCM	Complexos convectivos de mesoescala
ENSO	<i>El Niño – Southern Oscillation</i>
LI	Linhas de instabilidade
NAO	<i>North Atlantic Oscillation</i>
ODM	Objetivos de Desenvolvimento do Milênio
ODP	Oscilação Decadal do Pacífico
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PNM	Pressão ao Nível do Mar
SAODI	<i>South Atlantic Ocean Dipole Index</i>
SOI	<i>Southern Oscillation Index</i>
TPI	<i>Trans Polar Index</i>
TSA	<i>Tropical South Atlantic Index</i>
TNA	<i>Tropical North Atlantic Index</i>
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
VCAN	Vórtices ciclônicos de Altos Níveis
VCAS	Vórtices ciclônicos de ar superior
ZCIT	Zona de convergência intertropical

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	HIPÓTESE	21
1.2	JUSTIFICATIVA	22
1.3	OBJETIVOS	23
1.3.1	Objetivo Geral.....	23
1.3.2	Objetivos Específicos.....	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS).....	24
2.2	TENDÊNCIA TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA.....	26
2.3	PRINCIPAIS SISTEMAS PRODUTORES DE CHUVA NA REGIÃO NORDESTE	28
2.3.1	Zona de convergência intertropical (ZCIT):.....	29
2.3.2	Frentes Frias	31
2.3.3	Vórtices ciclônicos de ar superior ou de Altos Níveis (VCAS ou VCAN) .	31
2.3.4	Linhas de instabilidade (LI).....	32
2.3.5	Ondas de leste.....	32
2.3.6	Complexos convectivos de mesoescala (CCM).....	33
2.4	PRINCIPAIS FENÔMENOS CLIMÁTICOS GLOBAIS RELACIONADOS À CHUVA NO SEMIÁRIDO DO NORDESTE	33
2.4.1	Pacífico Tropical	33
2.4.1.1	El Niño/Oscilação do Sul (ENSO)	34
2.4.1.2	Índice de Oscilação do Sul (SOI)	35
2.4.1.3	Oscilação Decadal do Pacífico (ODP).....	36
2.4.2	Oceano Atlântico.....	36
2.4.2.1	Índice do Atlântico Sul Tropical (TSA ou STA) e Índice Tropical do Atlântico Norte (TNA ou NTA)	38
2.4.2.2	Índice de Dipolos do Oceano Atlântico Sul (SAODI)	38
2.4.2.3	Índice Trans Polar (TPI)	39
2.4.2.4	Oscilação do Atlântico Norte (NAO)	39
2.4.2.5	Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO ou OMA)	40
2.5	HISTÓRICO DA UTILIZAÇÃO DA TRANSFORMADA WAVELET.....	41
2.6	UTILIZAÇÃO DA TRANSFORMADA WAVELET NOS RECURSOS HÍDRICOS E NA CLIMATOLOGIA	44
3	MATERIAL E MÉTODOS	48
3.1	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	48
3.2	ANÁLISE DE TENDÊNCIA NAS BACIAS DO PAJEÚ, TERRANOVA E BRÍGIDA.....	49
3.3	ANÁLISE DO MÉTODO PARA UTILIZAÇÃO DAS WAVELETS CONTÍNUAS E DE COERÊNCIA	52

3.3.1	Normalização de Cazelles	56
3.3.2	Normalização de Kayano	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
4.1	ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE PRECIPITAÇÃO PARA DETECÇÃO DE TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS E VARIABILIDADE DE LONGO PRAZO NAS BACIAS RECEPTORAS DO PROJETO DE TRANSPOSIÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO.....	58
4.1.1	Introdução	58
4.1.2	Material e Métodos	60
4.1.2.1	Dados pluviométricos	60
4.1.2.2	Análise de tendência dos dados pluviométricos	63
4.1.3	Resultados e discussão	65
4.1.3.1	Análise de tendência climática no município de Itapetim-PE	65
4.1.3.2	Análise de tendência climática no município de São José do Egito-PE.....	70
4.1.3.3	Análise de tendência climática no município de Tuparetama-PE	75
4.1.3.4	Análise de tendência climática no município de Igaraci-PE	80
4.1.3.5	Análise de tendência climática no município de Ibimirim	85
4.1.3.6	Análise de tendência climática no município de Floresta-PE	90
4.1.3.7	Análise de tendência climática no município de Serra Talhada-PE.....	95
4.1.3.8	Análise de tendência climática no município de Salgueiro	99
4.1.3.9	Análise de tendência climática no município de Parnamirim-PE	104
4.1.3.10	Análise de tendência climática no município de Santa Maria da Boa Vista ..	109
4.1.3.11	Análise de tendência climática no município de Exu-PE.....	115
4.1.3.12	Análise de tendência climática no município de Araripina-PE	120
4.1.4	Conclusão	129
4.2	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE NORMALIZAÇÃO DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO PARA BACIAS DO SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO.....	132
4.2.1	Introdução	132
4.2.2	Material e Métodos	134
4.2.2.1	Delimitação e caracterização da área de estudo	134
4.2.2.2	Dados pluviométricos	136
4.2.2.3	Aplicação das wavelets contínuas e de coerência	137
4.2.2.3.1	<i>Normalização de Cazelles</i>	<i>140</i>
4.2.2.3.2	<i>Normalização de Kayano</i>	<i>140</i>
4.2.3	Resultados e discussão	141
4.2.3.1	Comparação das wavelets contínuas através de diferentes normalizações.....	141
4.2.4	Conclusão	149
4.3	ANÁLISE WAVELET DA VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO SOBRE BACIAS SEMIÁRIDAS DO SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO EM FUNÇÃO DAS TELECONEXÕES A ANOMALIAS CLIMÁTICAS EM LARGA ESCALA.....	150
4.3.1	Introdução	150
4.3.2	Material e Métodos	152

4.3.2.1	Dados pluviométricos	153
4.3.2.2	Dados de El Niño.....	154
4.3.2.3	Dados de Oscilação Decadal do Pacífico (ODP).....	155
4.3.2.4	Dados de Índice de Oscilação do Sul (SOI)	155
4.3.2.5	Dados do Índice Trans Polar (TPI).....	156
4.3.2.6	Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO)	156
4.3.2.7	Dados de Oscilação do Atlântico Norte (NAO)	157
4.3.2.8	Dados de Índice Tropical do Atlântico Norte (TNA).....	157
4.3.2.9	Dados de Índice do Atlântico Sul Tropical (TSA)	157
4.3.2.10	Dados de Índice de Dipolos do Oceano Atlântico Sul (SAODI)	157
4.3.2.11	Dados de Manchas solares.....	159
4.3.2.12	Aplicação das wavelets contínuas e de coerência	159
4.3.3	Resultados e discussão	163
4.3.3.1	Espectro de potência da <i>wavelet</i> em relação ao El Niño de 1963 a 2019.....	163
4.3.3.2	Espectro de potência da <i>wavelet</i> em relação ao Índice de Oscilação Sul e ODP	166
4.3.3.3	Espectro de potência da <i>wavelet</i> em relação ao Dipolo do Atlântico.....	167
4.3.3.4	Espectro de potência da <i>wavelet</i> em relação aos Índices do Atlântico Norte.....	168
4.3.3.5	Espectro de potência da <i>wavelet</i> de vários índices de 1963 a 2019	169
4.3.3.6	Espectro de coerência das Wavelets em relação aos fenômenos climáticos e às estações pluviométricas analisadas.....	170
4.3.3.6.1	<i>Espectro de coerência da precipitação em relação ao El Niño na periodicidade de 4-6 anos.</i>	<i>170</i>
4.3.3.6.2	<i>Espectro de coerência da precipitação em relação a índices pouco estudados no Nordeste na periodicidade de 4-6 anos.</i>	<i>173</i>
4.3.3.7	Espectro de coerência das Wavelets em relação aos fenômenos climáticos na periodicidade de 10-12 anos.	175
4.3.3.8	Espectro de coerência das Wavelets em relação aos fenômenos climáticos na periodicidade de 10-12 anos no Oceano Atlântico.....	177
4.3.3.9	Adequação da análise da dinâmica da precipitação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.....	185
4.3.4	Conclusão	186
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	188
5.1	ANÁLISE DE TENDÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO	188
5.2	ANÁLISE DA DIFERENÇA ENTRE NORMALIZAÇÕES NA ANÁLISE DAS WAVELETS.....	190
5.3	ANÁLISE DAS WAVELETS CONTÍNUAS E DE COERÊNCIA.....	191
	REFERÊNCIAS.....	193
	APÊNDICE A - MÉDIAS HISTÓRICAS MENSIS E TRIMESTRAIS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA.....	205
	APÊNDICE B - OCORRÊNCIA DE PRECIPITAÇÃO A 95% E 99% DE CONFIANÇA.....	211
	APÊNDICE C - PRECIPITAÇÃO MÁXIMA EM 1 DIA.....	217

1 INTRODUÇÃO

A água, insumo primordial à vida, constitui-se como elemento insubstituível para as mais diversas atividades humanas e para o equilíbrio ambiental, entretanto, o acelerado crescimento populacional tem conduzido ao aumento da demanda hídrica no mundo, o que vem ocasionando, em várias regiões do planeta, problemas relacionados à escassez desse recurso e à necessidade de planejamento de alternativas mitigadoras dos impactos ambientais relacionados à sua utilização.

Desse modo, a compreensão da dinâmica hídrica torna-se fundamental para o planejamento ambiental e para a gestão dos recursos hídricos, desse modo, o entendimento dos processos inerentes ao ciclo hidrológico é de suma importância para a modelagem e predição dos fenômenos físicos atuantes no comportamento hidrológico na macroescala, relacionado ao equilíbrio de sistemas complexos que envolvem um grande número de interações e mecanismos de retroalimentação relacionados ao ciclo planetário, continental e de grandes Bacias (CLARK *et al.*, 2015; ESPINOZA *et al.*, 2013; MADAKUMBURA *et al.*, 2019; OKI; ENTEKHABI; HARROLD, 2004), na mesoescala, onde se insere a maior quantidade de dados hidrológicos disponíveis que envolvem pequenas Bacias e Sub-Bacias (ABE *et al.*, 2018; BOSILOVICH; SCHUBERT, 2002) e na microescala (associada à hidráulica e à mecânica dos fluidos), a partir de modificações ambientais ocorridas ao longo do tempo em escala local, regional e global no âmbito da Bacia Hidrográfica (ANDRE, *et al.*, 1986; DOODGE, 1997).

Tendo como agravante os efeitos das mudanças ambientais globais, se forem confirmadas as projeções propostas pelo Quarto Relatório de Avaliação do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007) sobre as mudanças climáticas, que considera o histórico evolutivo de diversos fatores tais como: emissão de gases, concentração de gases de efeito estufa, cobertura da terra, etc (CHOI; CHOI; KIM, 2013; IPCC, 2014a; KIM *et al.*, 2013; SOLOMON *et al.*, 2007), uma das incertezas críticas para os próximos anos refere-se às alterações que poderão ocorrer quanto à intensificação dos processos relacionados à precipitação, em função da modificação dos padrões relacionados ao ciclo hidrológico que possibilita a circulação da água, tais como: evaporação, transpiração, precipitação, escoamento superficial e subterrâneo e infiltração (BAE; JUNG; LETTENMAIER, 2011; GOSLING & ARNELL, 2016; CASERINI, 2017; GRIMM *et al.*, 2008; INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2018; P. W. GASSMAN *et al.*, 2007; VOLK *et al.*, 2016; WALTHER *et al.*, 2002), o que poderá acentuar no futuro os problemas relacionados ao aumento ou diminuição das chuvas (COUMOU; RAHMSTORF, 2012; KARL; TRENBERTH, 2003; O'GORMAN, 2015; GORMAN, 2012).

O desafio referente às mudanças climáticas tem recebido relevante atenção mundial. Em agosto de 2015 foram concluídas as negociações que culminaram na adoção, em setembro, dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), por ocasião da Cúpula das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável, que deverão orientar as políticas nacionais pelos próximos quinze anos. Por ocasião, chegou-se a um acordo que contempla 17 Objetivos e 169 metas, envolvendo temáticas diversificadas, como erradicação da pobreza, segurança alimentar e agricultura, saúde, educação, água e saneamento, energia, crescimento econômico sustentável, cidades sustentáveis etc. Dentre as temáticas os desafios referentes à mudança do clima adquiriram relevância nas discussões (MINISTÉRIO DAS RELAÇÕES EXTERIORES, 2020).

Em relação às mudanças climáticas, o Brasil apresenta um grande desafio em consequência da dimensão e da heterogeneidade do clima nas diferentes regiões do país. Nesse sentido, a região do Nordeste brasileiro (NEB) se caracteriza por problemas relacionados à irregularidade das chuvas, resultando em secas severas e prolongadas, assim como chuvas excessivas (FERREIRA et al., 2017), o que tem sido associado às anomalias de Temperatura de Superfície do Mar (TSM) do Pacífico equatorial que, na fase positiva (El Niño), segundo diversos autores como (ASSIS *et al.*, 2018; BEZERRA; CAVALCANTI, 2008; CERQUEIRA; DOS SANTOS; AQUINO, 2019; MARENGO; CUNHA; ALVES, 2016) favorece a redução da precipitação pluviométrica sobre a região semiárida do Nordeste, enquanto na fase negativa (La Niña), contribui para a ocorrência de chuvas, por vezes acima da média histórica (ANDREOLI *et al.*, 2004). Autores como (ASSIS *et al.*, 2015) também corroboram que a região semiárida do Nordeste do Brasil apresenta grande variabilidade espacial e temporal das chuvas, com precipitações irregulares concentradas em poucos dias e meses.

No entanto, apesar de boa parte dos estudos indicarem a relação de fenômenos como o El Niño com a seca na região semiárida do Nordeste brasileiro, outros estudos alertam que há indicações de que essa relação não é de modo algum exata. Autores como Oliveira; Santos e Silva; Lima (2017), em trabalho realizado com cinco sub-regiões do NEB, sugeriram que as sub-regiões selecionadas são menos influenciadas pelo El Niño e La Niña do que se indicava anteriormente, tendo as áreas secas da região caracterizando-se pela maior variabilidade e maior número de eventos intensos. NÓBREGA; SANTIAGO (2014) supõem que o fenômeno El Niño não seja sempre sinônimo de seca, já que em análises históricas realizadas houve 28 anos secos relacionados com o El Niño entre 1914 e 1997, e nem todos foram El Niños de forte intensidade (6 fortes, 7 moderados e 10 fracos).

Para o entendimento das atuais tendências de variação da precipitação pluviométrica no semiárido pernambucano, análises estatísticas que indicam a variabilidade da intensidade e frequência da ocorrência de chuvas são importantes indicadores de modificação nos padrões climáticos. Comparando os máximos e mínimos do índice de anomalias de chuva (IAC), Silva; Galvínio; Nóbrega (2011) observaram que, aparentemente, a variabilidade interanual do ENOS propicia anos mais chuvosos no Alto São Francisco, e quando havia anos neutros ou normais, havia também mínimos de chuvas. SILVA, D. F. (2017) também salienta que anos com eventos/precipitações extremas foram identificados e as Análises de Ondas (wavelets) sugeriram que suas causas climáticas estavam relacionadas a uma série de fenômenos, tais como: sazonalidade, variabilidade interanual, ENOS, Dipolo do Atlântico, Manchas Solares e Oscilação Decadal do Pacífico.

Desse modo, uma das principais hipóteses deste trabalho é a de que o ENOS esteja relacionado não só às secas como às chuvas do Nordeste, isso será possível analisar ao utilizar a transformada contínua de wavelets (TCW) e de coerência. A transformada wavelet é um avanço recente em processamento de sinais que tem atraído muita atenção desde seu desenvolvimento teórico em 1984 por Grossman e Morlet (GROSSMANN; MORLET, 2009).

Seu uso tem aumentado rapidamente como uma alternativa à transformada Fourier (TF), em razão da transformada contínua de wavelets permitir a investigação de séries temporais em diferentes escalas de periodicidade, com dados irregularmente distribuídos, preservando os fenômenos locais e destacando os modos dominantes de variabilidade ao longo da escala de tempo com nível estatístico de significância, sendo assim, ideal para analisar eventos e séries temporais que contenham potências não estacionárias em diferentes frequências (DE ALENCAR *et al.*, 2017; PEREIRA *et al.*, 2018; SIFUZZAMAN; ISLAM; ALI, 2009).

Estudos recentes utilizando as wavelets têm encontrado importantes resultados que relacionam oscilações atmosféricas e climáticas aos sinais encontrados nas séries temporais, pois a partir de escalas temporais são identificados os sistemas e/ou fenômenos meteorológicos que os provocaram (DA SILVA, D. F., 2017; DICKINSON, J.E., HARDEN, T.M. & MCCABE, G.J., 2019; SANTOS *et al.*, 2019; XU *et al.*, 2019). A wavelet captura informações que os métodos tradicionais não conseguem, sendo então, aplicáveis a séries não estacionárias complexas, permitindo determinar as oscilações no domínio do tempo-frequência e se essas oscilações entre dois sinais são simultâneas ou ocorrem com alguma defasagem de tempo.

Diante da importância que o fator precipitação assume nos estudos sobre variabilidade climática e do potencial das wavelets a séries não estacionárias, este trabalho tem por objetivo avaliar a influência das anomalias relacionadas à temperatura da superfície do mar (TSM) sobre

a precipitação na área correspondente às sub-Bacias do Submédio São Francisco que estarão inseridas no projeto de integração do Rio São Francisco com as Bacias do semiárido nordestino. A necessidade de se analisar as anomalias climáticas que atuam sobre o nordeste brasileiro, e em especial, sobre a maior região semiárida do planeta, trazem relevância ao trabalho, visto que não há um consenso sobre a real influência das anomalias responsáveis pelas secas na região, e qual a consequência desses fenômenos sobre a dinâmica das chuvas.

Tendo em vista que essa é uma região de elevado interesse público diante do impacto que as secas causam para a população no semiárido e o potencial de desenvolvimento regional a partir da integração das sub-bacias nordestinas, e, em especial, daquelas contempladas pelo Eixo Norte do projeto de Transposição no Estado de Pernambuco, o estudo pretende substantiar, o entendimento da dinâmica climática da região, a partir da análise a nível regional das *wavelets* contínuas e de coerência, o que permitirá medir a correlação variável no tempo em função da frequência entre os dados de precipitação pluviométrica da região e alguns dos principais sistemas atmosféricos causadores de chuva no semiárido brasileiro, analisando e caracterizando a dinâmica dos parâmetros.

Desse modo, o trabalho tem por objetivo avaliar a dinâmica das chuvas no semiárido do Submédio São Francisco e contribuir para estudos da modelagem climática e monitoramento ambiental oferecendo prognóstico dos impactos da dinâmica das chuvas no semiárido nordestino. O estudo poderá oferecer respaldo para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento, prevenção e alerta de risco de desastres naturais.

1.1 HIPÓTESE

O presente estudo é orientado pela hipótese de que os desvios de chuva na região Semiárida do Submédio São Francisco, em Pernambuco, estão fortemente associados às anomalias de TSM. Em especial, a de que a precipitação no Submédio São Francisco se encontra mais associada a anomalias térmicas na superfície marinha do oceano Atlântico Sul do que a fenômenos originários no Oceano Pacífico, o que significa novas oportunidades de análise da precipitação na região estudada, salientando os componentes espaciais e temporais relacionados à circulação atmosférica que caracterizam a dinâmica pluviométrica regional.

1.2 JUSTIFICATIVA

O entendimento da dinâmica climática na região Semiárida do Submédio São Francisco é de relevante importância por se tratar de uma temática central para o planejamento e gestão ambiental em uma área estratégica para o Estado de Pernambuco, em virtude de um grande projeto nacional que é o Projeto de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco com Bacias regionais no semiárido do Nordeste brasileiro.

A presente investigação, atende às exigências do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, pois o projeto tem um caráter interdisciplinar e se insere, segundo o CNPq, em várias áreas de conhecimento como: 1.07.03.01-2 Meteorologia Dinâmica; 1.07.03.06-3 Climatologia; 7.06.02.00-0 Geografia Regional; 1.07.05.02-3 Climatologia Geográfica; 5.02.05.00-5 Conservação da Natureza etc.

O estudo em bacias hidrográficas, que é a unidade ecossistêmica e morfológica que melhor reflete os impactos das interferências antrópicas, possibilita a integração dos fatores que condicionam a qualidade e a disponibilidade dos recursos hídricos com os seus reais condicionantes físicos e antrópicos capazes de integrar todos os componentes relacionados com a qualidade e disponibilidade hídrica.

Orientado pelo crescente desenvolvimento de diversos modelos climáticos de monitoramento e previsão dos impactos decorrentes das mudanças climáticas, este trabalho procura analisar em qual medida os fenômenos relacionados à temperatura dos Oceanos são responsáveis pela dinâmica climática no Submédio São Francisco, influenciando na caracterização espaço-temporal da região abrangida pelo estudo, o que pode favorecer a adoção de índices e formulação de modelos climáticos de previsão e monitoramento pluviométrico nessa região.

A discussão do trabalho se insere no escopo dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos para os países, com o amparo da Organização das Nações Unidas (ONU) no qual ratifica a necessidade de preocupação com os impactos ambientais decorrentes das mudanças climáticas em áreas vulneráveis. Dentre as temáticas, os desafios referentes à mudança do clima adquiriram relevância nas discussões mundiais, por se tratar de um fator que inibe a capacidade dos países de alcançarem o desenvolvimento sustentável. Os aumentos na temperatura global, o aumento do nível do mar, a acidificação dos oceanos e outros impactos das mudanças climáticas podem afetar seriamente zonas semiáridas ao redor do planeta causando sérios impactos naturais e sociais.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar a dinâmica climática das Bacias do Eixo Norte do Projeto de Transposição do Rio São Francisco como subsídio para o cumprimento dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analisar estatisticamente os dados pluviométricos para identificação de tendências nas séries históricas de precipitação no Submédio São Francisco.
- Avaliar dois métodos diferentes de normalização de dados pluviométricos, para seleção do método mais adequado para correlacionar os dados de precipitação com os índices de TSM.
- Analisar a precipitação com as *wavelets* contínuas para determinação dos modos dominantes das variabilidades da precipitação mensal e como eles variam nas escalas de tempo e frequência nas Bacias do Submédio São Francisco.
- Analisar a coerência de vários índices relacionados às anomalias de TSM com o regime de chuvas na região do Submédio São Francisco através das *wavelets*.
- Avaliar em que medida as anomalias originadas no Oceano Pacífico e Atlântico estão relacionados à dinâmica de precipitação no semiárido.
- Apresentar as principais contribuições desta tese para o avanço na modelagem climática e monitoramento ambiental relacionando os resultados com os objetivos do desenvolvimento sustentável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)

A compreensão das relações que constituem a dinâmica do clima requer uma abordagem interdisciplinar mais ampla e profunda. Por essa razão, a complexidade inerente à temática das mudanças climáticas está inserida no escopo dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos com o amparo da Organização das Nações Unidas (ONU) com vistas a sustentabilidade ambiental, inclusão social, desenvolvimento econômico, paz, justiça, boa governança, entre outras diretrizes a serem alcançadas no século XXI.

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) são uma agenda mundial adotada durante a Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável em setembro de 2015 composta por 17 objetivos e 169 metas a serem atingidos até 2030 (UNITED NATIONS, 2018). Os 17 objetivos baseiam-se nos sucessos dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio - ODM (que expiraram em 2015 e foram implementados ao longo de 15 anos) e incluem novas áreas como mudanças climáticas, desigualdade econômica, inovação, consumo sustentável, paz e justiça, entre outras prioridades (FUSO NERINI *et al.*, 2019).

Os ODS são na verdade um chamamento global para erradicação da pobreza, proteção do planeta e garantia de que todas as pessoas desfrutem de paz e prosperidade (SACHS *et al.*, 2019), onde os objetivos devem ser interconectados, ou seja, a chave para o sucesso de um objetivo envolve abordar questões associadas a outros (ICSU, 2015). Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável são:

- 1. Erradicação da pobreza** - Acabar com a pobreza em todas as suas formas, em todos os lugares.
- 2. Fome zero e agricultura sustentável** - Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável.
- 3. Saúde e bem-estar** - Assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em todas as idades.
- 4. Educação de qualidade** - Assegurar a educação inclusiva, e equitativa e de qualidade, e promover oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todos.
- 5. Igualdade de gênero** - Alcançar a igualdade de gênero e empoderar todas as mulheres e meninas.
- 6. Água limpa e saneamento** - Garantir disponibilidade e manejo sustentável da água e saneamento para todos.

7. **Energia limpa e acessível** - Garantir acesso à energia barata, confiável, sustentável e renovável para todos.
8. **Trabalho de decente e crescimento econômico** - Promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo, e trabalho decente para todos.
9. **Inovação infraestrutura** - Construir infraestrutura resiliente, promover a industrialização inclusiva e sustentável, e fomentar a inovação.
10. **Redução das desigualdades** - Reduzir as desigualdades dentro dos países e entre eles.
11. **Cidades e comunidades sustentáveis** - Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis.
12. **Consumo e produção responsáveis** - Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis.
13. **Ação contra a mudança global do clima** - Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos.
14. **Vida na água** - Conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares, e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável.
15. **Vida terrestre** - Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da Terra e deter a perda da biodiversidade.
16. **Paz, justiça e instituições eficazes** - Promover sociedades pacíficas e inclusivas par ao desenvolvimento sustentável, proporcionar o acesso à justiça para todos e construir instituições eficazes, responsáveis e inclusivas em todos os níveis.
17. **Parcerias e meios de implementação** - Fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável.

Dentre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU o de número 13 compreende a preocupação com o atual cenário de mudanças climáticas e propõe “tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos”. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e o Acordo de Paris sobre Mudança do Clima exigem profundas transformações em todos os países, o que exigirá ações complementares de governos, sociedade civil, ciência e negócios (RECKIEN *et al.*, 2017; SACHS *et al.*, 2019).

Os aumentos na temperatura global, o aumento do nível do mar, a acidificação dos oceanos e outros impactos das mudanças climáticas podem afetar seriamente várias partes do globo, especialmente zonas semiáridas ao redor do planeta, causando sérios impactos naturais e sociais (UNITED NATIONS, 2018). A experiência dos ODM ressaltou a importância de adquirir dados atualizados para atingir os objetivos do desenvolvimento sustentável. Os

indicadores são a espinha dorsal para monitorar o progresso em direção aos ODS nos níveis local, nacional, regional e global (PECL *et al.*, 2017; SACHS *et al.*, 2019). Desse modo, os ODS fornecem uma janela de oportunidade para a criação de abordagens operacionais multidimensionais para a adaptação às mudanças climáticas (SANCHEZ RODRIGUEZ; ÜRGE-VORSATZ; BARAU, 2018).

As mudanças climáticas são reconhecidas como a maior ameaça aos países nas próximas décadas, afetando potencialmente grandes e diversos grupos humanos. Nesse sentido, a aquisição de dados climáticos atualizados e o entendimento da dinâmica climática de zonas vulneráveis aos impactos ambientais provenientes das mudanças climáticas são um passo fundamental para a adoção de medidas que possam evitar, ou ao menos mitigar, esses impactos e prover dados robustos que possam favorecer o planejamento ambiental e a adoção de práticas efetivas para o desenvolvimento sustentável.

2.2 TENDÊNCIA TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA

Nas últimas décadas, a atmosfera apresentou indicativos de uma intensificação no processo de aquecimento global (FRÖLICHER; FISCHER; GRUBER, 2018; SENEVIRATNE *et al.*, 2014; SHEFFIELD; WOOD; RODERICK, 2012; TRENBERTH, 1998; TRENBERTH *et al.*, 2014), principalmente a partir da década de 1980 (ANGELOCCI; SENTELHAS, 2010), que tem se refletido na alteração do ciclo global da água e aumento da variabilidade das chuvas (ARNBJERG-NIELSEN *et al.*, 2013; HOLMGREN *et al.*, 2013; SEN ROY, 2018; SUN; RODERICK; FARQUHAR, 2018).

Molion (2008) afirma que períodos de aquecimento e resfriamento fazem parte do processo de variabilidade natural do clima global. Nesse sentido, a variabilidade climática pode ser entendida como um fenômeno inerente à própria dinâmica climática terrestre (BRADLEY, 2015; CABALLERO-GILL; HERBERT; DOWSETT, 2019; CROWLEY, 2000; KUMP, 2011; PELTO *et al.*, 2018; SILVA, E. R. A. C. *et al.*, 2016, 2018; WRIGHT, N. M. *et al.*, 2018) estando ligada à combinação das escalas temporal e espacial dos fenômenos meteorológicos relacionados às flutuações das condições meteorológicas e, portanto, das condições climáticas em torno da média climatológica (SILVA, E. R. A. C. *et al.*, 2018).

No entanto, o Quinto Relatório Científico do IPCC AR5 (IPCC, 2014b) salienta o aumento na temperatura da ordem de 0,9°C desde 1850, e desde 1976 a temperatura global está acima da média histórica do século XX. O relatório também atribui às atividades antrópicas (com 95% de certeza), o aquecimento global observado nos últimos 50 anos. Nesse sentido

diversos autores corroboram acerca do caráter antropogênico das mudanças climáticas (BARTON *et al.*, 2016; FISCHER; KNUTTI, 2015; HANSEN; STONE, 2016; ROSENZWEIG; NEOFOTIS, 2013; STERN; KAUFMANN, 2014; WARD, 2014).

Evidências científicas de que as mudanças climáticas globais ocasionariam cenários de aumento dos eventos climáticos extremos (EMANUEL, 2005; GIORGI *et al.*, 2011; KNUTSON; TULEYA; KURIHARA, 1998; O&APOS;GORMAN, 2012; REGUERO; LOSADA; MÉNDEZ, 2019; TRENBERTH; FASULLO; SHEPHERD, 2015) acrescentaram à análise espacial da precipitação uma importância ainda maior devido à necessidade de compreender a grande variabilidade da precipitação regional intra e interanual (ABBOTT *et al.*, 2019; DONOHOE *et al.*, 2014; GAUGHAN *et al.*, 2016; GOLDSTEIN; SUDING, 2014; SILVA, E. R. A. C. *et al.*, 2018).

Diversos autores afirmam que, caso os cenários de aquecimento global se confirmem, é esperado, além de um aumento dos eventos extremos de precipitação (tanto em termos de volume quanto de intensidade de precipitação), que o ciclo hidrológico tenha uma grande variabilidade em várias escalas de tempo (sazonal, anual, decadal, etc) (BARROS *et al.*, 2012; DONAT *et al.*, 2016; KNAPP *et al.*, 2008; LELIS *et al.*, 2011; O’GORMAN, 2015; PFAHL; O’GORMAN; FISCHER, 2017; SEN ROY, 2018; SILLMANN; ROECKNER, 2008).

Trabalhos como o de Grant *et al.* (2014) destacam que as mudanças climáticas deverão alterar a precipitação intra-anual em muitas regiões, o que resulta em secas mais extremas e comuns e em eventos de chuvas torrenciais em outras áreas. Autores como Fay *et al.*, (2011) ainda salientam que o aquecimento global, leva a períodos mais longos e mais eventos de chuva intensa e ao aumento da variabilidade de precipitação interanual e intra-anual. Já o IPCC (2012) aponta para a problemática do estresse hídrico devido ao aumento da variabilidade intra-anual das precipitações.

Por essa razão, a variabilidade climática deve ser entendida como um fenômeno inerente à própria dinâmica climática terrestre (SILVA *et al.*, 2016) e está ligada à combinação das escalas temporal e espacial dos fenômenos meteorológicos relacionados às flutuações das condições meteorológicas e, por extensão, das condições climáticas em torno da média climatológica (ANGELOCCI; SENTELHAS, 2010). A distribuição interanual e intra-anual de chuvas pode ter efeitos intensos sob as interações ambientais. Trabalhos como o de Gaughan *et al.* (2016) sobre a variação de precipitação nas escalas inter e intra-anuais em savanas semiáridas alertam para a relação entre as variações atípicas do clima e sua relação com fenômenos como a Oscilação Sul de El Niño (ENOS) e o Dipolo do Oceano Índico (IOD).

Souza Júnior et al. (2009) também apontam que as variáveis meteorológicas relacionadas a fenômenos de escala global sofrem influência do fenômeno ENOS que, por sua vez, está relacionado às anomalias oceânicas e atmosféricas na região equatorial do Oceano Pacífico. Para autores como Baú et al. (2013) o fenômeno ENOS é um dos responsáveis pelas flutuações globais do clima, e possui capacidade de alterá-lo segundo sua escala de atuação espacial e temporal. Dentre todos os fenômenos atmosféricos, no entanto, dada à sua escala global de abrangência e sua extensa durabilidade temporal, as discussões ainda são abrangentes.

Outros estudos sobre tendência de precipitação também se mostraram válidos no Brasil. Autores como Back et al. (2012) analisaram a tendência de 17 índices de precipitação para a região de Vargem Bonita, no estado de Santa Catarina, a partir de dados diários de precipitação de 1944 a 2010, através do teste não paramétrico de Mann-Kendall.

Nesse sentido, a região semiárida do Nordeste do Brasil apresenta grande variabilidade espacial e temporal da precipitação, enfrentando graves problemas relacionados à irregularidade das chuvas, resultando em secas severas e prolongadas, assim como chuvas excessivas (FERREIRA et al., 2017), o que tem sido associado às anomalias de Temperatura de Superfície do Mar (TSM) do Pacífico equatorial que, na fase positiva (El Niño), favorece a redução da precipitação pluviométrica sobre a região Nordeste, enquanto na fase negativa (La Niña), contribui para a ocorrência de chuvas, por vezes acima da média histórica (ANDREOLI; KAYANO, 2007). Segundo Sousa et al. (2008), outro aspecto da variabilidade na precipitação no Nordeste é a modulação por fenômenos de mais baixa frequência na escala interdecadal, como a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP).

Num trabalho realizado por da Silva (2013), os resultados mostraram que o estado de Pernambuco apresentou tendência de diminuição da precipitação total anual da intensidade média diária de chuva, do número de dias em que a precipitação é maior que 10mm e 20mm. Estudos de detecção de mudanças climáticas em Pernambuco revelaram também um aumento de cerca de 4°C na temperatura máxima diária no período de 1961 a 2009 e diminuição da precipitação em 275 mm (o que corresponde a 57% do total anual) (NOBRE, 2011; LACERDA, 2015).

2.3 PRINCIPAIS SISTEMAS PRODUTORES DE CHUVA NA REGIÃO NORDESTE

Em termos quantitativos, o Brasil é um dos países com maior disponibilidade hídrica no mundo. Tal status, no entanto, não inclui o país entre os que se encontram em uma zona de conforto hídrico, sobretudo quando se avalia a condição de disponibilidade de água no

Nordeste. Desse modo, o Brasil é enquadrado na categoria de países com escassez econômica de água, pois apesar de contar com quantidade suficiente para atender a sua demanda, possui uma região semiárida, com chuvas escassas e mal distribuídas, onde o mau gerenciamento dos recursos hídricos acentua a problemática das secas (SILVA, E. R. A. C. et al., 2016).

A natureza e magnitude dos desastres causados pelas secas no Nordeste brasileiro são resultantes da combinação entre a ausência, ou irregularidade das chuvas, com a falta de organização da produção agrícola (ANDRADE, 1985; BLAIKIE et al., 1994; SAUVAGE, 1996; OLIVEIRA, 2001).

Segundo (JATOBÁ; SILVA; GALVÍNCIO, 2017), do ponto de vista físico, o semiárido nordestino é uma consequência da circulação atmosférica e não apenas o resultado do efeito da continentalidade e das influências topográficas (embora o autor saliente que esse fator tem importância na dinâmica regional do clima). No semiárido três centros de ação são responsáveis pela circulação atmosférica que age sobre o território pernambucano: o Centro de Altas Subtropicais do Atlântico Norte (o Centro dos Açores) e o Centro de Altas Subtropicais do Atlântico Sul (Anticiclone Semifixo do Atlântico Sul), que são influenciados pelas temperaturas da superfície oceânica, e um centro de depressão formado sobre o interior da América do Sul, que é a Baixa do Chaco, influenciado pelas elevadas temperaturas verificadas no centro da América do Sul, no verão austral, e que interferem indiretamente no estado de Pernambuco.

Na região Nordeste do Brasil, as pesquisas indicam que existem seis sistemas atmosféricos principais que estão implicados na dinâmica do regime de chuvas da região, são eles: A Zona de convergência intertropical (ZCIT), as frentes frias, os vórtices ciclônicos de ar superior (VCAS), as linhas de instabilidade, as ondas de leste e os complexos convectivos de mesoescala. Esses sistemas têm as seguintes características:

2.3.1 Zona de convergência intertropical (ZCIT):

A ZCIT é caracterizada por uma extensa região de convergência dos ventos alísios nordeste com os alísios de sudeste, oriundos do anticiclone subtropical do hemisfério norte e do anticiclone subtropical do hemisfério sul, respectivamente, em baixos níveis, além de baixas pressões, altas temperaturas da superfície do mar, intensa atividade convectiva e precipitação (HASTENRATH, 1985;). O choque entre eles faz com que o ar quente e úmido ascenda e provoque a formação das nuvens (FERREIRA, A. G.; MELLO, 2005).

A ZCIT está localizada na região do cavado equatorial, que apresenta áreas de máxima temperatura da superfície do mar, possibilitando convergência de massa nos trópicos, dando

origem a uma extensa banda de nebulosidade. A ZCIT apresenta movimento norte-sul, podendo alcançar 5° de latitude Sul e 10° a 14° de latitude norte, no Atlântico (NOBREGA et.al, 2014). Entre agosto e outubro ela encontra-se mais ao norte e entre fevereiro-abril mais ao sul, sendo esse o período em que ela ocasiona chuva no Nordeste semiárido.

As variações do posicionamento da ZCIT sobre o Nordeste do Brasil (NEB), por sua vez, estão fortemente relacionadas com o “Padrão Dipolo do Atlântico”. O Padrão do Dipolo no oceano Atlântico Tropical se configura com fase positiva e negativa. A fase positiva do Dipolo é o padrão de anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) com sinal positivo ao norte e negativo ao sul do equador sobre o Atlântico Tropical, sendo, de um modo geral, desfavorável à precipitação sobre o norte do NEB. A fase negativa do Dipolo é o padrão de anomalias de TSM com sinal negativo ao norte e positivo ao sul do equador sobre o Atlântico Tropical, sendo, nesse caso, favorável à precipitação sobre o norte do NEB (MOURA; SHUKLA, 1981).

A ZCIT é mais significativa sobre os oceanos, e por isso, a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) é um dos fatores determinantes na sua posição e intensidade (FERREIRA, A. G.; MELLO, 2005). Ela está localizada no ramo ascendente da célula de Hadley e é um dos mais importantes sistemas meteorológicos atuante nos trópicos, sendo parte integrante da circulação geral da atmosfera e um dos três cinturões de ventos observados em cada hemisfério do planeta (AIMOLA; MOURA, 2016; MOURA; VITORINO, 2012).

Segundo Jatobá (2017), quando o oceano Atlântico Sul, sobretudo na faixa latitudinal correspondente às latitudes 20° e 30°S, se resfria anormalmente, especialmente no final da primavera e verão do hemisfério norte, o anticiclone se expande e os alísios sopram com mais força em direção à faixa de baixas pressões equatoriais, empurrando para posições mais setentrionais a ZCIT, que é decisiva para o regime pluviométrico de Pernambuco e no Nordeste setentrional.

Concomitantemente Jatobá (2017) salienta que “o Anticiclone dos Açores possui a mesma dinâmica, quando as águas superficiais do Atlântico Norte estão mais frias, no final do outono e no inverno boreais, nas imediações e um pouco ao sul da região de origem desse centro de altas pressões, há uma expressiva diástole do Centro de Ação dos Açores”. Por outro lado, quando o Atlântico Norte se resfria mais fortemente, os ventos alísios boreais (alísios de NE-NO) agem com mais energia, deslocando a ZCIT para posições mais meridionais e acarretando chuvas convectivas intensas que se verificam na costa norte do Nordeste brasileiro, e atingem inclusive o Estado de Pernambuco, na região semiárida, tanto do Agreste como no Sertão.

2.3.2 Frentes Frias

São bandas de nuvens organizadas que se formam na região de confluência entre uma massa de ar frio (mais densa) com uma massa de ar quente (menos densa). A massa de ar fria penetra por baixo da massa quente, e faz com que o ar quente e úmido suba, forme as nuvens e, conseqüentemente, as chuvas. São bem características entres os meses de novembro a janeiro, atingindo principalmente a porção sudeste do Brasil, podendo alcançar o centro (FERREIRA, A. G.; MELLO, 2005; GAN; KOUSKY; ROPELEWSKI, 2004).

Quando há uma massa de ar fria muito forte, a frente fria consegue chegar ao Nordeste, sobretudo ao sul da Bahia, onde há uma condição mais favorável às frentes frias. Esses sistemas por vezes podem chegar a áreas do leste de Pernambuco e Paraíba, mas com menor frequência, pois geralmente a massa de ar frio, proveniente dos polos, não é tão forte para empurrar a frente fria para essas áreas. Com seu avanço, as frentes perdem energia e velocidade, e o contato com o solo quente reduz o frio das massas de ar, enfraquecendo o sistema, por essa razão, é raro uma frente fria chegar até o Nordeste.

2.3.3 Vórtices ciclônicos de ar superior ou de Altos Níveis (VCAS ou VCAN)

Os VCAS são um conjunto de nuvens que, observado nas imagens de satélite possuem a forma aproximada de um círculo que gira no sentido horário. Os VCANs são caracterizados como sistemas de baixa pressão cujo centro caracteriza-se por ser frio e de circulação ciclônica, que se originam em altos níveis da atmosfera (REBOITA et al., 2017) e penetram na região Nordeste do Brasil (COUTINHO, MAYTÊ DUARTE LEAL et al., 2017).

Portanto, os VCAS consistem em sistemas de baixa pressão em grande escala que se formam na alta troposfera. Na sua periferia os vórtices provocam nebulosidade e grandes totais pluviométricos, enquanto no centro das nuvens causadoras de chuva há movimentos de ar de cima para baixo (movimentos verticais subsidentes), aumentando a pressão e inibindo a formação de nuvens (ARAUJO; SOUSA, 2013; KOUSKY; GAN, 1981).

Os VCANs que penetram na região Nordeste do Brasil formam-se no oceano Atlântico, principalmente entre os meses de novembro e março, e sua trajetória normalmente no sentido Leste-Oeste. Seu deslocamento é em torno de 4° a 6° de longitude, (FERREIRA; MELO, 2005; MOLION; BERNARDO, 2002) com atuação variando, em média, entre 7 e 10 dias, período em que se observa a formação de nuvens causadoras de chuva em sua borda, enquanto em seu centro há subsidência, o que dificulta a formação de chuva (FERREIRA; MELLO, 2005). Constituem, portanto, um sistema com alta significância na precipitação do NEB, atuante principalmente no verão austral. São transientes, variam muito de posição e não possuem uma

sub-região preferencial para atuar, embora possam modificar as condições de tempo em todo o Nordeste brasileiro por vários dias, como observaram Kousky e Gan (1981).

No Nordeste do Brasil, esse sistema é um dos responsáveis por períodos de chuvas ou estiagens que dependem de qual setor que está atuando sobre uma região específica e atua com maior frequência entre os meses de janeiro e fevereiro (CORREIA, M. D. F. et al., 2012; CORREIA, M. DE F.; PENAFORTE; ARAGÃO, 2019; COUTINHO, MICHELYNE DUARTE LEAL; GAN; RAO, 2010; GOMES, R. C.; ZANELLA; DE OLIVEIRA, 2017; PINHEIRO et al., 2014; REBOITA et al., 2017).

2.3.4 Linhas de instabilidade (LI)

As Linhas de Instabilidade são bandas de nuvens causadoras de chuva, normalmente do tipo cumulonimbus (IBGE, 2012; SANT'ANNA NETO, 2005) organizadas em forma de linha, que se deslocam ao mesmo tempo, sendo responsáveis por índices elevados de precipitação nestas regiões.

Sua formação se dá por conta da grande quantidade de radiação solar incidente sobre a região tropical, ocorrendo o desenvolvimento das nuvens cumulus, que atingem um número maior à tarde e início da noite, quando a convecção é máxima, com consequentes chuvas (NIMER, 1971). Outro fator que contribui para o incremento das LI, principalmente nos meses de fevereiro e março, é a proximidade da ZCIT (ALCÂNTARA et al., 2014; COHEN, J. C. P.; DIAS; NOBRE, 1989; FERREIRA, A. G.; MELLO, 2005; LIMA; ALCÂNTARA, 2017; SILVA, M. T. et al., 2017).

2.3.5 Ondas de leste

As ondas de leste são um fenômeno meteorológico e são formadas no campo de pressão atmosférica, na faixa tropical do globo terrestre, na área de influência dos ventos alísios, próxima da Linha do Equador, especialmente nos meses outono e inverno do hemisfério sul, e se deslocam de leste a oeste, ou seja, desde a costa da África até o litoral leste do Brasil (INNOCENTINI et al., 2005; NEVES; ALCÂNTARA; SOUZA, 2016).

Ele provoca chuvas principalmente na Zona da Mata que se estende desde o Recôncavo Baiano até o litoral do Rio Grande do Norte, mas, quando as condições oceânicas e atmosféricas estão favoráveis, as Ondas de Leste também provocam chuvas no estado do Ceará nos meses de junho, julho e agosto, principalmente na parte centro-norte do estado (FERREIRA; MELLO,

2005), embora na região semiárida do Submédio São Francisco as ondas de Leste não costumam ter forte atuação.

2.3.6 Complexos convectivos de mesoescala (CCM)

Os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) são aglomerados de nuvens cumulonimbus frias e espessas que se formam devido às condições locais favoráveis como temperatura, relevo, pressão, etc., e provocam chuvas intensas e de curta duração, normalmente acompanhadas de fortes rajadas de vento (FERREIRA, V.; ANABOR, 2015; LYRA et al., 2017; SILVA, F. D. DOS S. et al., 2008).

Os CCMs, na região subtropical, ocorrem preferencialmente durante os meses de primavera e verão no hemisfério sul, formando-se no período noturno com um ciclo de vida entre 10 e 20 horas (VIANA; AQUINO; MUÑOZ, 2009; VILA, 2004; ZULUAGA ARIAS; POVEDA JARAMILLO, 2004).

2.4 PRINCIPAIS FENÔMENOS CLIMÁTICOS GLOBAIS RELACIONADOS À CHUVA NO SEMIÁRIDO DO NORDESTE

Segundo MARENGO (2008), as chuvas do Semiárido nordestino apresentam enorme variabilidade espacial e temporal. Anos de secas e chuvas abundantes se alternam de formas erráticas, e são vários os grandes episódios de seca como as que ocorreram nos anos de 1710-1711, 1723-1727, 1736-1757, 1744-1745, 1777-1778, 1808-1809, 1824-1825, 1835-1837, 1844-1845, 1877-1879, 1982-1983, 1997-1998, assim como secas menores em 2003 e 2005 e anos de seca prolongada entre 2012-2017.

Diversos autores tentam explicar a razão dessas diversas secas, principalmente relacionando-as às oscilações de temperatura da superfície do mar. Por essa razão, analisou-se alguns desses fenômenos que poderiam estar relacionados ao padrão de chuvas na região semiárida de Pernambuco, onde estão localizadas as 3 Bacias Hidrográficas estudadas do Submédio São Francisco, na área abarcada pelo Eixo Norte da Transposição do Rio São Francisco-PE.

2.4.1 Pacífico Tropical

Existem vários índices usados para monitorar o Pacífico tropical, todos baseados em anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM ou SST) em uma determinada região.

2.4.1.1 El Niño/Oscilação do Sul (ENSO)

Nos meses finais de todos os anos as temperaturas da superfície do oceano aquecem ao longo das costas do Equador e do norte do Peru. Numa escala temporal de três a sete anos ocorre um aquecimento muito mais forte nas águas do Pacífico, que geralmente é acompanhado por chuvas nas regiões costeiras e áridas desses dois países (ARAÚJO et al., 2013).

O fenômeno El Niño está intimamente relacionado a uma oscilação atmosférica global conhecida como Oscilação do Sul (SO). O El Niño consiste em um acentuado aumento cíclico da temperatura (5–9°C) da camada superficial da água no leste do Oceano Pacífico (nas partes tropical e central) em uma área de cerca de 10 milhões de metros quadrados. A profundidade dessa camada quente de água atinge 100-200 metros e é acompanhada por uma mudança na direção do vento na troposfera sobre o Oceano Pacífico, uma mudança nas zonas de convecção e precipitação.

Durante episódios quentes (ENSO), tempestades extratropicais e sistemas frontais seguem caminhos significativamente diferentes do normal, resultando em anomalias persistentes de temperatura e precipitação em muitas regiões. Em alguns casos, ocorre uma anomalia do sinal oposto - o fenômeno La Niña, que é caracterizado por anomalias negativas na temperatura do oceano no Leste e no centro do Oceano Pacífico, bem como fortes ventos alísios ao longo do equador (ALEKSEEV, 2018).

A alternância das condições quentes de El Niño e fria de La Niña, conhecida como oscilação El Niño – Sul (ENSO), representa a mais forte flutuação ano a ano do sistema climático global (TIMMERMANN et al., 2018). Durante episódios de El Niño, observa-se uma pressão abaixo do normal no Pacífico tropical oriental e pressão acima do normal na Indonésia e no norte da Austrália. Esse padrão de pressão está associado a ventos equatoriais próximos à superfície, no sentido Leste-Oeste e caracterizam a fase quente do SO, que é frequentemente chamada de episódio El Niño / Oscilação do Sul (ENSO), (ALEKSEEV, 2018).

SOUZA JÚNIOR et al. (2017) apontam que as variáveis meteorológicas relacionadas a fenômenos de escala global sofrem influência do fenômeno El Niño – Southern Oscillation (ENSO ou ENOS) que, por sua vez, está relacionado às anomalias oceânicas e atmosféricas na região equatorial do Oceano Pacífico e enfraquecimento dos ventos alísios equatoriais (TIMMERMANN et al., 2018). Para autores como (BAÚ; DE AZEVEDO; BRESOLIN, 2013) o fenômeno ENOS é um dos responsáveis pelas flutuações globais do clima, e possui capacidade de provocar alterações segundo suas escalas de atuação. FAY et al. (2011) ainda salientam que o aquecimento global, leva a períodos mais longos e mais eventos de chuva intensa bem como ao aumento da variabilidade de precipitação interanual e intra-anual.

Durante os episódios quentes (ENSO), os padrões normais de precipitação tropical e circulação atmosférica são interrompidos. As águas anormalmente quentes no Pacífico equatorial central e oriental dão origem a nuvens e chuvas intensificadas nessa região, especialmente durante as estações boreais de inverno e primavera. Ao mesmo tempo, as chuvas são reduzidas na Indonésia, Malásia e norte da Austrália. Assim, a circulação normal de Walker durante o inverno e a primavera, que apresenta aumento do ar, nebulosidade e chuvas na região da Indonésia e no Pacífico ocidental, e afundamento do ar no Pacífico equatorial oriental, fica mais fraca que o normal e, para episódios quentes fortes, pode haver uma reversão (ALEKSEEV, 2018).

O fenômeno El Niño, dependendo da intensidade e período do ano em que ocorre, é um dos responsáveis por anos secos ou muito secos, principalmente quando acontece conjuntamente com o dipolo positivo do Atlântico (Dipolo do Atlântico: diferença entre a anomalia da Temperatura da Superfície do Mar-TSM na Bacia do Oceano Atlântico Norte e Oceano Atlântico Sul), que é desfavorável às chuvas. O fenômeno La Niña (resfriamento anômalo das águas do oceano Pacífico) associado ao dipolo negativo do Atlântico (favorável às chuvas), é normalmente responsável por anos considerados normais, chuvosos ou muito chuvosos na região.

2.4.1.2_Índice de Oscilação do Sul (SOI)

É um índice padronizado baseado nas diferenças normalizadas de pressão do nível do mar observadas entre o Taiti e Darwin, na Austrália. O SOI é uma medida das flutuações em larga escala na pressão do ar que ocorrem entre o Pacífico tropical ocidental e oriental (isto é, o estado da Oscilação do Sul) durante os episódios de El Niño e La Niña. É um dos principais índices atmosféricos para medir a força dos eventos El Niño e La Niña e seus possíveis impactos na região australiana. Em geral, as séries temporais suavizadas do SOI correspondem muito bem às mudanças nas temperaturas dos oceanos no Pacífico tropical oriental (NOAA, 2020).

A fase negativa do SOI representa pressão de ar abaixo do normal no Taiti e pressão de ar acima do normal em Darwin. Períodos prolongados de valores SOI negativos coincidem com águas oceânicas anormalmente quentes em todo o Pacífico tropical oriental e central, típico dos episódios de El Niño, possuindo um período de 2-8 anos de duração. Esses valores negativos são geralmente acompanhados por uma diminuição da força dos ventos do Pacífico e uma redução nas chuvas de inverno e primavera em grande parte do leste da Austrália e no extremo superior (CLIMATE DATA GUIDE, 2020). É importante salientar que existem pequenas variações nos valores de SOI calculados em vários centros de monitoramento.

2.4.1.3 Oscilação Decadal do Pacífico (ODP)

Segundo Sousa et al. (2008), outro aspecto da variabilidade na precipitação no Nordeste é a modulação por fenômenos de mais baixa frequência na escala interdecadal, como a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP). É frequentemente descrita como um padrão de longa duração semelhante ao El Niño da variabilidade climática do Pacífico (ZHANG et al. 1997).

Como observado no El Niño / Oscilação do Sul (ENSO), os extremos no padrão ODP são marcados por variações generalizadas na bacia do Pacífico e no clima norte-americano. A ODP é detectada como águas superficiais mornas ou frias no Oceano Pacífico, ao norte de 20°N. Quando os SST são anormalmente frios no interior do Pacífico Norte e quentes ao longo da costa do Pacífico, e quando as pressões do nível do mar estão abaixo da média no Pacífico Norte, a ODP tem um valor positivo.

A (ODP) é um padrão de longa duração semelhante ao El Niño da variabilidade climática do Pacífico. Embora as duas oscilações climáticas tenham impressões digitais espaciais similares, elas têm um comportamento muito diferente no tempo. Duas características principais distinguem a ODP de El Niño / Oscilação do Sul (ENSO): primeiro, os "eventos" da ODP do século XX persistiram por 20 a 30 anos, enquanto os eventos típicos da ENSO persistiram por 6 a 18 meses; segundo, as impressões digitais climáticas da ODP são mais visíveis no setor do Pacífico Norte / América do Norte, enquanto assinaturas secundárias existem nos trópicos - o oposto é verdadeiro para o ENSO.

Vários estudos independentes encontraram evidências de apenas dois ciclos completos de ODP no século passado: os regimes "legais" da ODP prevaleceram entre 1890-1924 e novamente entre 1947-1976, enquanto os regimes "quentes" da ODP dominaram entre 1925-1946 e de 1977 a (até menos) em meados dos anos 90. Shoshiro Minobe mostrou que as flutuações da ODP do século XX eram mais enérgicas em duas periodicidades gerais, uma de 15 a 25 anos e a outra de 50 a 70 anos, desse modo a ODP muda de fase em uma escala de tempo inter-decadal. As fases recentes da ODP correspondem a uma fase fria iniciando por volta de 1945 e passando para uma fase quente em 1977.

2.4.2 Oceano Atlântico

Existem vários índices baseados na TSM que podem ser usados para monitoramento do Oceano Atlântico, no entanto é importante salientar a complexa dinâmica climática que envolve este Oceano. Vários autores analisaram a dinâmica do Atlântico Tropical e salientaram a existência de uma estrutura assimétrica anômala no campo de temperatura da superfície do mar (SST) sobre o Equador associada a uma circulação cruzada equatorial (CHANG, P.; JI; LI,

1997; CHIANG; VIMONT, 2004; MÉLICE; SERVAIN, 2003; NNAMCHI; LI; ANYADIKE, 2011).

O Dipolo Subtropical do Atlântico Sul (DSAS) está relacionado a anomalias de pressão e ventos, e é o principal modo de variabilidade acoplada entre o oceano e a atmosfera, entre anomalias na Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e na Pressão ao Nível do Mar (PNM) no oceano Atlântico Sul (VENEGAS et al., 1997, STERL; HAZELEGER, 2003). Este modo é constituído por dois polos com anomalias de TSM de sinais opostos: um polo na região nordeste (NE) do Atlântico Sul que vai de 15°S até aproximadamente 30°S e outro polo mais ao sudoeste (SO) que vai de 30°S a 45°S (STERL; HAZELEGER, 2003). De acordo com Morioka et al. (2011) um evento DSAS começa a se desenvolver no final da primavera, atingindo seu pico no verão austral, ou seja, em dezembro, janeiro e fevereiro (DJF), e decai no final do outono.

O fenômeno de dipolo do Atlântico é identificado como uma mudança atípica na temperatura da superfície do mar no Oceano Atlântico Tropical e é resultante da interação entre oceano e atmosfera, e que pode diminuir ou aumentar a formação de nuvens influenciando os índices pluviométricos no leste da Amazônia e litoral norte brasileiro (Amapá, Pará, Maranhão, Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte), incluindo também os estados da Paraíba, e Pernambuco.

A dinâmica ocorre quando as águas do Atlântico Tropical Norte estão mais quentes que as do Atlântico Tropical Sul, o que ocasiona movimentos descendentes que transportam o ar frio e seco dos altos níveis da atmosfera sobre a região leste da Amazônia e litoral norte brasileiro, inibindo a formação de nuvens e diminuindo a precipitação (dipolo positivo), podendo acarretar secas. Diversamente, quando as águas do Atlântico Tropical Norte estão mais frias em comparação as do Atlântico Tropical Sul, ocorre aumento nos movimentos ascendentes sobre o leste da Amazônia e litoral norte brasileiro, aumentando tanto a formação de nuvens quanto os índices pluviométricos (dipolo negativo), (NÓBREGA; SANTIAGO, 2014).

Desse modo, o Nordeste Brasileiro está localizado em uma região de transição entre a ZCIT e a Alta Subtropical do Atlântico Sul, sendo que as chuvas ocorrem principalmente quando a ZCIT está sobre o nordeste brasileiro, ou seja, quando as águas do Atlântico Sul estão mais quentes entre março e abril, assim a posição da ZCIT e as chuvas no Nordeste apresentam variabilidade interanual, de acordo com os padrões de TSM do Atlântico Sul.

Dentre os índices de monitoramento do Oceano Atlântico destacam-se:

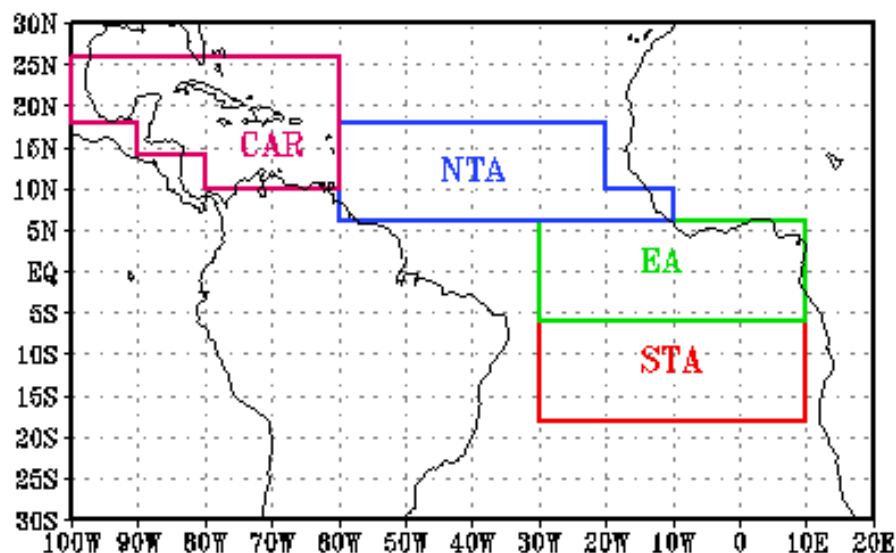
2.4.2.1 Índice do Atlântico Sul Tropical (TSA ou STA) e Índice Tropical do Atlântico Norte (TNA ou NTA)

Os índices de TNA e TSA foram definidos em um artigo de (ENFIELD *et al.*, 1999), onde padrões dipolares através do Atlântico tropical foram encontrados com uma periodicidade de 8 a 12 anos para a primavera-inverno boreal e de 2,3 anos para a primavera-verão boreal.

O índice de anomalia TSA SST é um indicador da temperatura da superfície no Golfo da Guiné, no tropical leste do Oceano Atlântico Sul. É calculado com SSTs na localização (0° - 20° S, 30° W- 10° E). A anomalia é calculada em relação a um ciclo sazonal climatológico mensal com base nos anos 1982-2005. A climatologia mensal é interpolada linearmente para determinar anomalias semanais.

Já o índice de anomalia TNA da média do SST mensal é um indicador das temperaturas da superfície no leste do Oceano Atlântico Norte tropical. É calculado com SSTs na localização (55° W - 15° W, 5° N - 25° N). Os conjuntos de dados HadISST e NOAA OI 1x1 são usados para criar o índice. Ambos os índices (TNA e TSA) são calculados usando a análise Reynolds OIv2 SST, disponibilizada pela NOAA / ESRL, e que é atualizado semanalmente (Figura 1).

Figura 1- Zoneamento das anomalias no Oceano Atlântico.



Fonte: NOAA, 2020.

2.4.2.2 Índice de Dipolos do Oceano Atlântico Sul (SAODI)

O modo dipolo tropical, também chamado de gradiente meridional ou inter-hemisférico do Atlântico tropical, que se manifesta como uma estrutura assimétrica anômala no campo de temperatura da superfície do mar (SST) sobre o Equador associado a uma circulação cruzada equatorial. um assunto de considerável pesquisa. O dipolo do Oceano Atlântico Sul (SAOD) é o mecanismo de aquecimento das águas superficiais nas costas da África Equatorial

Oeste/Central, associado ao resfriamento simultâneo de magnitude semelhante nas costas Argentina-Uruguai-Brasil (NNAMCHI; LI; ANYADIKE, 2011).

2.4.2.3 Índice Trans Polar (TPI)

As diferenças na pressão do nível do mar entre pares de estações têm sido tradicionalmente usadas como índices da circulação atmosférica em larga escala (Lamb 1977). O TPI é definido como a diferença de pressão normalizada entre Hobart, no estado insular da Tasmânia (Austrália) e Stanley (Malvinas ou Ilhas Falkland), um arquipélago localizado no sul do Oceano Atlântico, na plataforma continental da Patagônia (CRAM et al., 2015; JONES, PHILIP D.; HARPHAM; LISTER, 2016; TURNEY et al., 2016).

O índice foi sugerido pela primeira vez por Pittock (PITTOCK, 1980a, b, 1984) para medir a excentricidade do vórtice polar ao redor do Polo Sul e foi atualizado e analisado posteriormente por JONES, P. D.; SALINGER; MULLAN (1999). Em trabalho realizado por Tsekov (2016), o autor comparou as propriedades de escala do TPI com as propriedades de escala de outros índices de variabilidade climática observando que a mudança temporal nas propriedades de escala do TPI se assemelha à do índice de Oscilação do Atlântico Norte (NAO), indicando uma possível relação entre a dinâmica atmosférica extratropical do Sul e a dinâmica atmosférica do Atlântico Norte ou possíveis mecanismos comuns que controlam a variabilidade de TPI e NAO.

2.4.2.4 Oscilação do Atlântico Norte (NAO)

Um dos padrões de teleconexão mais proeminentes é a oscilação do Atlântico Norte (NAO), (BARNSTON e LIVEZEY, 1987). O NAO combina partes dos padrões do Atlântico Leste e do Atlântico Oeste originalmente identificados por Wallace e Gutzler (1981). O NAO é principalmente um dipolo norte-sul na pressão do nível do mar, caracterizado por anomalias simultâneas fora de fase e pressão fora de fase, entre latitudes temperadas e altas no setor atlântico e, portanto, corresponde a mudanças nos ocidentais do Atlântico Norte na Europa.

A fase positiva do NAO reflete alturas e pressões abaixo do normal nas altas latitudes do Atlântico Norte, e alturas e pressões acima do normal no Atlântico Norte central, no leste dos Estados Unidos e na Europa Ocidental. A fase negativa reflete um padrão oposto de anomalias de altura e pressão sobre essas regiões. Ambas as fases do NAO estão associadas a mudanças em toda a bacia na intensidade e localização da corrente de jato e pista de tempestade do Atlântico Norte e em modulações em larga escala dos padrões normais de transporte de calor

e umidade zonal e meridional (HURRELL, 1995), que por sua vez resulta em mudanças nos padrões de temperatura e precipitação que se estendem do leste da América do Norte à Europa ocidental e central (KAYANO; ANDREOLI; SOUZA, 2019).

O NAO exibe considerável variabilidade inter-sazonal e interanual, e períodos prolongados (vários meses) das fases positiva e negativa do padrão são comuns. O NAO de inverno também exibe significativa variabilidade multi-decadal (HURRELL 1995, CHELLIAH e BELL 2005). Por exemplo, a fase negativa do NAO dominou a circulação de meados da década de 1950 até o inverno de 1978/79. Durante esse intervalo de aproximadamente 24 anos, houve quatro períodos proeminentes de pelo menos três anos cada, nos quais a fase negativa foi dominante e a fase positiva foi notavelmente ausente. De fato, durante todo o período, a fase positiva foi observada na média sazonal apenas três vezes e nunca apareceu em dois anos consecutivos.

A oscilação do Atlântico Norte (NAO) é um dos principais modos de variabilidade da atmosfera do Hemisfério Norte (Hurrell, 1995). É particularmente importante no inverno, quando exerce um forte controle sobre o clima do Hemisfério Norte (Osborn, 2011). Essa também é a estação que apresenta forte variabilidade interdecadal (Osborn, 2004). No inverno, a diferença entre a pressão normalizada do nível do mar sobre Gibraltar e a pressão normalizada do nível do mar sobre o sudoeste da Islândia é um índice útil da força do NAO.

2.4.2.5 Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO ou OMA)

Os padrões multidecadais da temperatura da superfície do mar (SST) no Atlântico Norte, geralmente acima de 0-80N, são representados pelo índice de Oscilação Multidecadal do Atlântico. O sinal AMO é baseado em padrões espaciais na variabilidade da SST após a remoção dos efeitos da forçante antrópica na temperatura, revelando padrões naturais de longo prazo na SST.

A AMO é caracterizada por fases quentes e frias, com períodos de aproximadamente 20 a 40 anos. O índice AMO está relacionado às temperaturas do ar e às chuvas na América do Norte e na Europa e está associado a mudanças na frequência de secas na América do Norte e na frequência de eventos severos de furacões. O índice AMO mostra um período relativamente frio, começando no início dos anos 60 e se estendendo até meados dos anos 90. Desde 1997, a AMO está em uma fase quente. Se os padrões anteriores continuarem válidos, a fase quente continuará potencialmente pelas próximas décadas.

As séries temporais são calculadas a partir do conjunto de dados Kaplan SST, que é atualizado mensalmente e é basicamente um índice das temperaturas do Atlântico Norte.

Diversos autores estudaram o AMO ao redor do mundo tais como KURTHS *et al.* (2019), encontrando relação entre o AMO e a precipitação em áreas áridas e semiáridas da Índia, nas monções da Ásia (LU; DONG; DING, 2006), bem como relações entre a AMO e a temperatura do mar no Pacífico Ocidental (ALEXANDER; HALIMEDA KILBOURNE; NYE, 2014; STEINMAN; MANN; MILLER, 2015).

2.5 HISTÓRICO DA UTILIZAÇÃO DA TRANSFORMADA WAVELET

Joseph Fourier (1807) com suas teorias de análise de frequência (ISLAM, 2011) foi, possivelmente, o primeiro a tornar o conceito de temperatura planetária um objeto de estudo da ciência, lançando as bases matemáticas que contribuíram para a concepção da ideia das *wavelets* (CORTES OSORIO; CANO GARZÓN; CHAVES OSORIO, 2007; GAO *et al.*, 2011; JESCHKE *et al.*, 2018; KLAPPER, 2010; PRAKASH, 2018).

No entanto, a análise de frequência não era suficiente para a resolução de problemas matemáticos, tornando-se necessária a formulação de estruturas matemáticas que variam em termo de escala (GRAPS, 1995). As *wavelets* foram pela primeira vez mencionadas na tese de Haar (1910), no entanto as *wavelets* de Haar não são continuamente diferenciadas, o que limitou sua aplicação (HAAR, A., 1910; LEPIK; HEIN, 2014; SCHLEICHER, 2002).

Apenas na década de 30, no estudo conduzido por Paul Levy sobre o movimento Browniano em que o autor examina processos em tempo contínuo com incrementos estacionários e independentes, fazendo a conexão com distribuições infinitamente divisíveis descrevendo sua estrutura utilizando a base de *wavelets* (SUYUNDYKOV; PUECHMOREL; FERR, 2010), demonstrou-se que as funções da base de Haar (HAAR, D. TER, 2000) eram melhores do que as da base de Fourier para análise dos pequenos e complicados detalhes do movimento Browniano que tanto contribuíram para o entendimento da termodinâmica e hidrodinâmica (BIGG, 2008; EINSTEIN, 1956; PERRIN, 1909; SALINAS, 2005; SUYUNDYKOV; PUECHMOREL; FERR, 2010).

No início dos anos 80, muitos cientistas já utilizavam as *wavelets* por se tratar de uma análise numérica mais simples e de uma síntese mais robusta de certos fenômenos transitórios (DREMIN; IVANOV; NECHITAILO, 2001; GRAPS, 1995; KAISER; HUDGINS, 1995; LILLY; OLHEDE, 2012; ROLAND, 2000), como uma alternativa à análise tradicional de Fourier, onde podia-se extrair apenas informações sobre o domínio da frequência, mas não era possível saber "quando" no tempo essas frequências acontecem (HUGHES *et al.*, 1980; KALLWEIT; WOOD, 1982; KARCZ; KERSEY, 1980; WRIGHT, C.; LYONS, 1980).

Em 1988, Mallat desenvolveu uma teoria denominada “análise de multirresolução” que é usada para calcular a transformada de *wavelet* (MALLAT, S, 1989). É justamente a decomposição de uma função com o uso de *wavelets* que recebe a denominação de “transformada *wavelet*” (GARGOUR *et al.*, 2009; GOSWAMI; CHAN, 2010; JAWERTH; SWELDENS, 1994) e tem suas variantes contínua e discreta (BURRUS; GOPINATH; GUO, 1998; GOODMAN, 2016; NASON; SILVERMAN, 1994; STASZEWSKI; GIACOMIN, 1997; WANG, Y. *et al.*, 2018; YAN; GAO; CHEN, 2014).

Em 1990, Ingrid Daubechies usou os trabalhos de Mallat para construir um conjunto de bases ortonormais de *wavelets* suaves, com suportes compactos servindo de alicerce para as diferentes aplicações atuais (DAUBECHIES, INGRID, 1992; DAUBECHIES, INGRID; MAES, 2019; MOHR *et al.*, 2014; WELSTEAD, 2009). Com isso, Ingrid Daubechies criou a sua própria família de *wavelets* baseada no conceito de resoluções múltiplas, intitulada “*wavelets* de Daubechies” (DAUBECHIES, INGRID, 1993; DAUBECHIES, 2009).

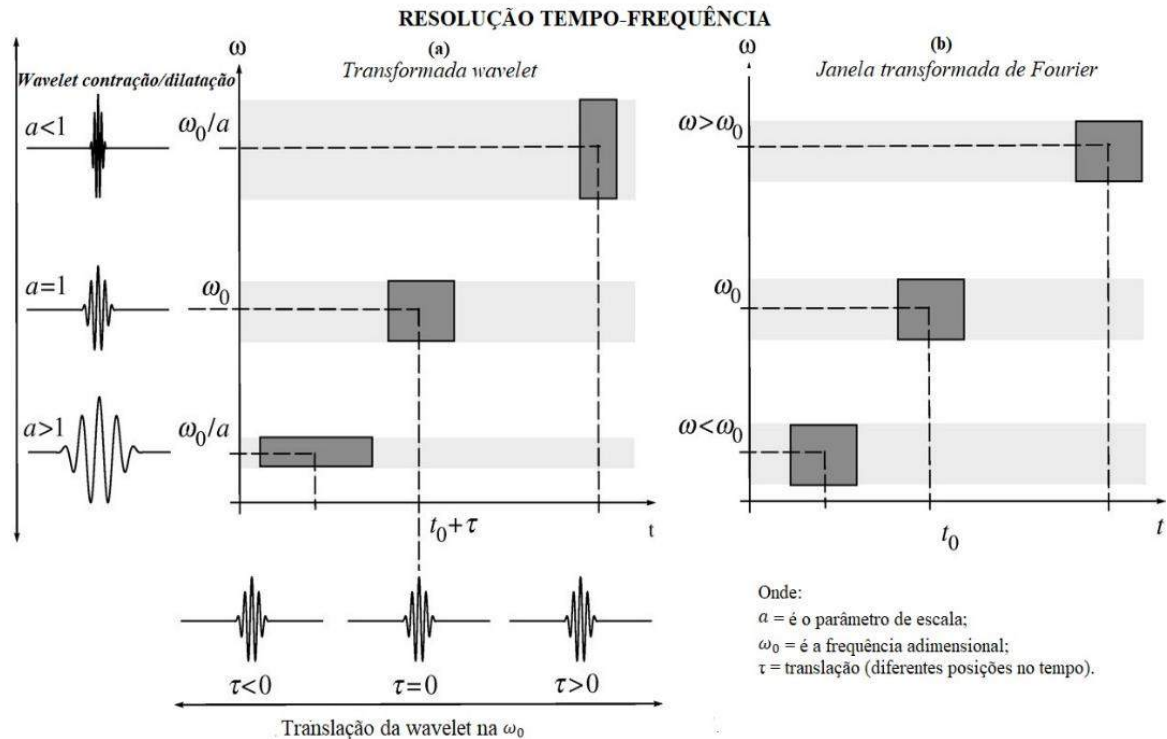
Nesse sentido, do ponto de vista histórico, primeiro surgiu a transformada *wavelet* contínua, depois a análise multirresolução e a transformada discreta. Segundo BERNARDES; DOMINGUES; MENDES (2016), a transformada *wavelet* contínua é uma transformada integral linear que pode ser utilizada na exploração de características de sinais não estacionários para extrair informações de variações em certas bandas de frequências e/ou detectar estruturas locais presentes, e ainda pode ser entendida como a integral ao longo do tempo de um sinal multiplicado por uma escala, e deslocado por uma função *wavelet* também chamada *wavelet* mãe (ANTOINE *et al.*, 2009; CHOPRA; MARFURT, 2015; GHILAIFAN *et al.*, 2016).

A transformada de wavelets (WFT) se baseia na suposição de que o sinal pode ser decomposto em componentes sinusoidais. O principal problema com a WFT é o tratamento inconsistente de diferentes frequências: em baixas frequências há tão poucas oscilações dentro da janela que a localização da frequência é perdida, enquanto em altas frequências há tantas oscilações que a localização no tempo é perdida. A análise da Wavelet tenta superar esses problemas decompondo uma série temporal (ou sinal) no espaço do tempo t / frequência f (período ou escala a) simultaneamente, obtendo-se informações sobre a amplitude de qualquer sinal “periódico” dentro da série e como essa amplitude varia com o tempo.

A abordagem wavelet permite então descrever a evolução das características oscilantes de uma série temporal, em que oscilações baixas possuem boa frequência e baixa resolução de tempo, enquanto oscilações rápidas têm boa resolução de tempo, mas uma resolução de frequência mais baixa. Sua aplicabilidade na análise de sinais se deve principalmente porque permite decompor uma série temporal em diferentes níveis de resolução tempo-frequência e,

então determinar, as componentes da variabilidade dominante (Torrence e Compo, 1998), conforme descrito na Figura 2.

Figura 2- Resolução tempo-frequência da abordagem wavelet.



em que: tem-se exemplos de wavelets e suas caixas de tempo-frequência, representando a distribuição de variação (energia) correspondente. Em (a) quando a escala de a diminui, a resolução de tempo melhora, mas a resolução de frequência fica mais pobre e é deslocado para altas frequências. Por outro lado, se a aumenta, as caixas mudam para a região de baixas frequências e a altura das caixas se torna menor (com uma resolução de frequência melhor), mas suas larguras são mais longas (com uma resolução de tempo ruim). No caso de (b), em contraste com as wavelets, todas as caixas da transformada de Fourier com janela são obtidas por uma mudança de tempo ou frequência de uma função única, que produz a mesma variação que se espalha por todo o plano de frequência de tempo. Fonte: A autora (2020). Adaptado de Cazelles (2007).

Desse modo, a transformada wavelet decompõe um sinal usando funções (wavelets) que se estreitam quando os recursos de alta frequência estão presentes e aumentam em estruturas de baixa frequência (DAUBECHIES, INGRID, 1992). Essa decomposição produz uma boa localização em tempo e frequência, conforme ficou explícito na Figura 2, o que é bastante adequado para investigar a evolução temporal dos sinais aperiódicos e transitórios.

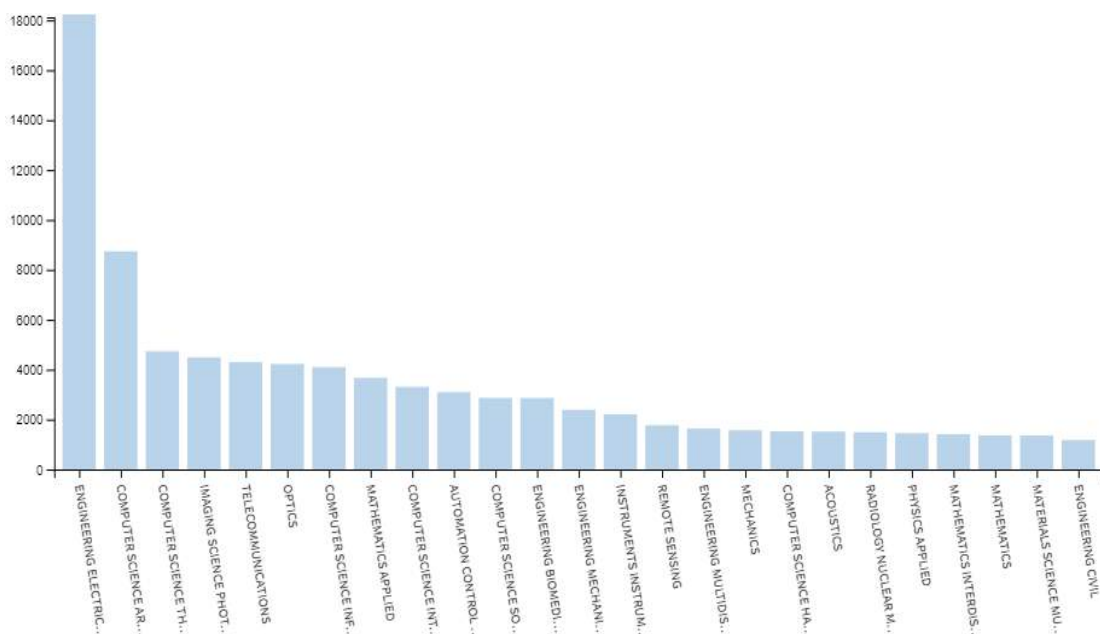
Por essa razão, as *wavelets* têm vantagens sobre os métodos tradicionais de Fourier na análise de situações físicas em que o sinal contém descontinuidades e picos acentuados (GRAPS, 1995; LIU, C.-L., 2010), se destacando em diferentes áreas do conhecimento tais

como: Engenharia (ALMEIDA *et al.*, 2017; BARTUZI *et al.*, 2018; GUILLEN *et al.*, 2016; LI; MONTI; PONCI, 2014), Física (GHILAIFAN *et al.*, 2016; PAGLIAROLI *et al.*, 2020), Matemática (ATKINSON; HAN, 2009; HAN; LI; TAN, 2017; HARIHARAN; KANNAN, 2014), Economia (CARAIANI, 2012; GONZÁLEZ-CONCEPCIÓN; GIL-FARIÑA; PESTANO-GABINO, 2018; LAO; NIE; JIANG, 2018; PIMENTEL, 2013; VISHNY; ZINGALES, 2017; YANG; YANG; HAMORI, 2018), Computação (ALAIFARI *et al.*, 2018; HERRERA-ALCÁNTARA; GONZÁLEZ-MENDOZA, 2019), Medicina (CHIKHALIKAR; DHARWADKAR, 2019; HUSSAIN, 2018; KARTHIGA; NARASIMHAN, 2018; WARD, 2014), etc. Em 2017 o matemático Yves Meyer recebeu o prêmio Abel, considerado o Nobel da matemática, pelo desenvolvimento da teoria matemática das *wavelets*, evidenciando a relevância dessa teoria.

2.6 UTILIZAÇÃO DA TRANSFORMADA WAVELET NOS RECURSOS HÍDRICOS E NA CLIMATOLOGIA

Nesse sentido, inúmeras campos da ciência ocupam-se atualmente com as aplicações das *wavelets*, sendo as áreas que mais empregam análises baseadas nas *wavelets* as áreas de engenharia elétrica, Computação, física, etc, como demonstrado no levantamento das publicações realizado na Web of Science (Figura 3).

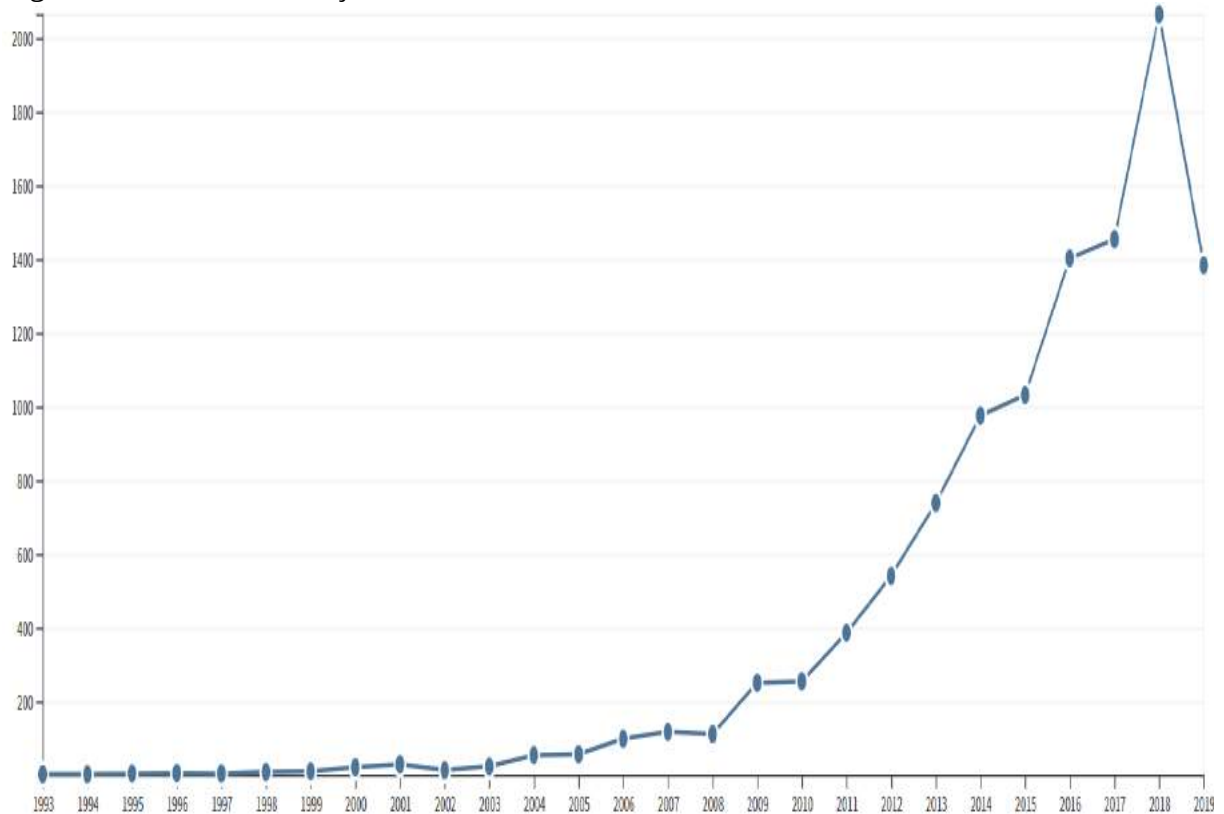
Figura 3 - Citações sobre as wavelets por área.



Fonte: A autora (2020).

Dentre as áreas elencadas, uma das áreas que ainda não apresentam tantos estudos relacionados às *wavelets* é a área de recursos hídricos, sendo os estudos mais expressivos realizados a partir dos anos 2000, tendo seu pico de citações em 2018 com mais de 2000 trabalhos expressivos na área, como pode ser visualizado na Figura 4, no levantamento do número de citações anuais, destacando-se entre eles os trabalhos de ANH *et al.* (2018) na modelagem hidrológica, ROUSHANGAR; NOURANI; ALIZADEH (2018) para análise e categorização da precipitação e SHARGHI *et al.* (2018) com hidroclimatologia nos Estados Unidos.

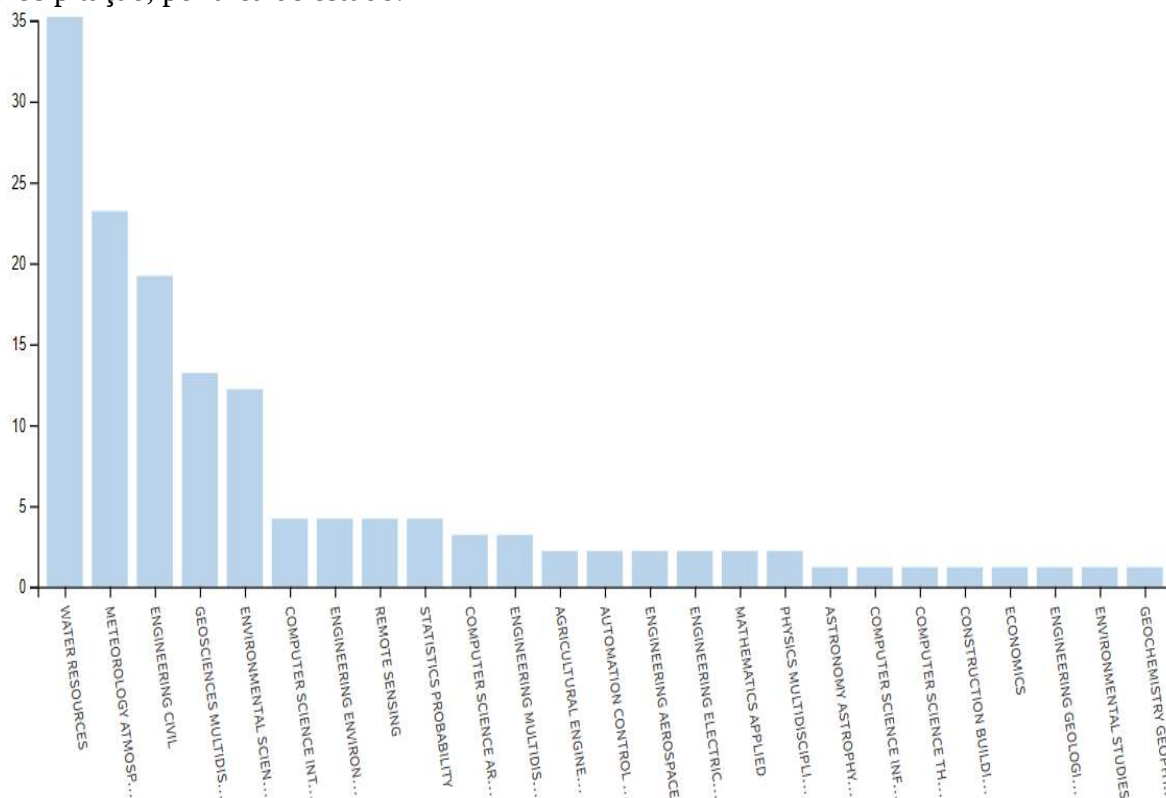
Figura 4 - Número de citações sobre *wavelets* na área de recursos hídricos.



Fonte: A autora (2020).

Desde o início dos anos 2000 observa-se um maior interesse na utilização das *wavelets* para análise nos estudos da precipitação. Na plataforma Web of Science, a área de recursos hídricos é a que mais envolve trabalhos com as *wavelets* aplicadas à análise da precipitação, seguida pelas áreas de meteorologia, engenharia civil e meio ambiente (Figura 5).

Figura 5 - Citações com a utilização das wavelets em estudos que envolvem a dinâmica da precipitação, por área de estudo.

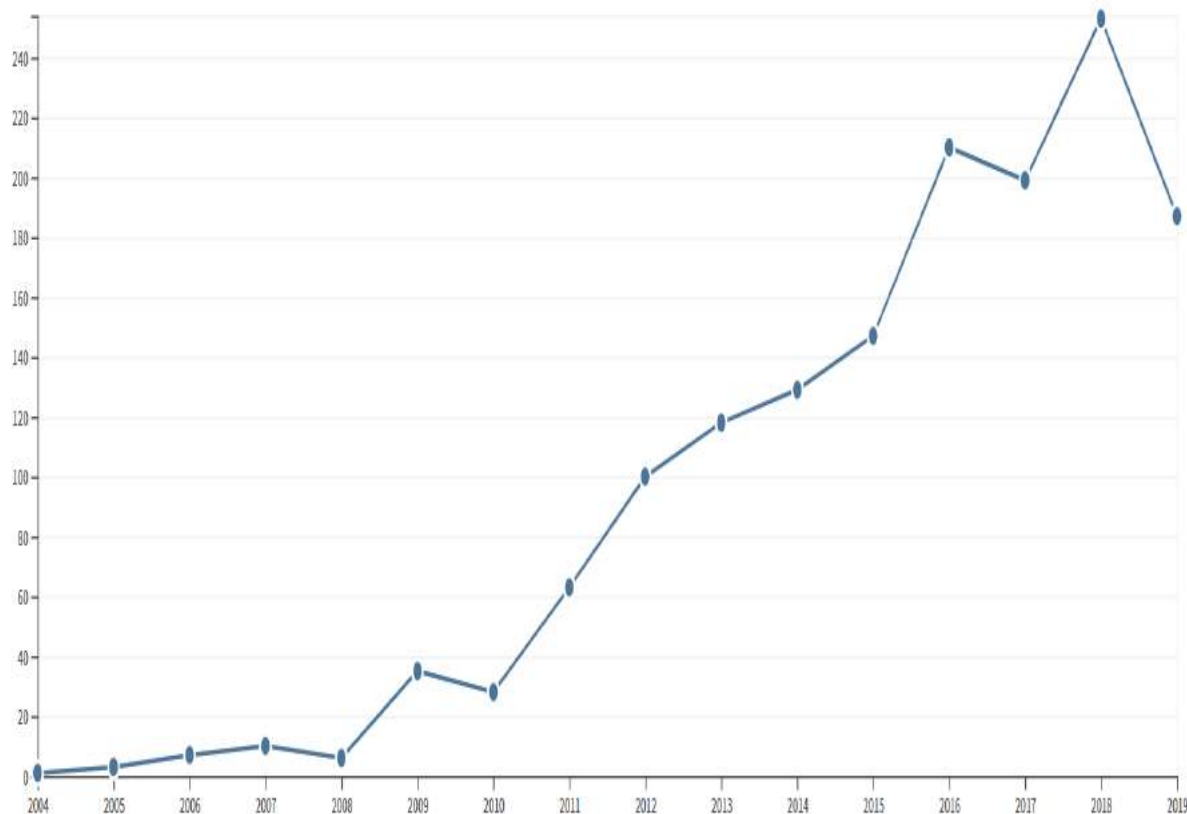


Fonte: A autora (2020).

Vários estudos ao redor do mundo se destacam em relação à análise da precipitação, tais como os de CHANG *et al.* (2019), caracterizando os efeitos das monções e teleconexões climáticas sobre a precipitação na China usando coerência de *wavelets*, ALIZADEH; ROUSHANGAR; ADAMOWSKI (2019), investigando a variabilidade mensal da precipitação usando uma abordagem multiescalar, ZHANG *et al.* (2017) analisando os efeitos das monções durante a primavera na China, SONG *et al.*, (2019) estudando as alterações espaço-temporais multiescalares de extremos de precipitação na região de Beijing-Tianjin-Hebei de 1958 a 2017, na China e trabalhos como os de XU, L. *et al.* (2019), para melhoramento das previsões de precipitação de um conjunto multi-modelo norte-americano de previsão sazonal, que fornece previsões de precipitação globalmente usando *wavelet*.

Esse trabalho utiliza-se das ondaletas (*wavelets*) como uma ferramenta de análise da dinâmica climática e desenvolvimento de estratégias para o monitoramento ambiental de bacias hidrográficas e prevenção de impactos ambientais decorrentes da precipitação na região compreendida pela pesquisa. As informações sobre a evolução da utilização das *wavelets* para entendimento da dinâmica da precipitação em artigos de projeção internacional pode ser visto a seguir (Figura 6):

Figura 6 - Número de citações de trabalhos que utilizaram as wavelets para estudo da precipitação.



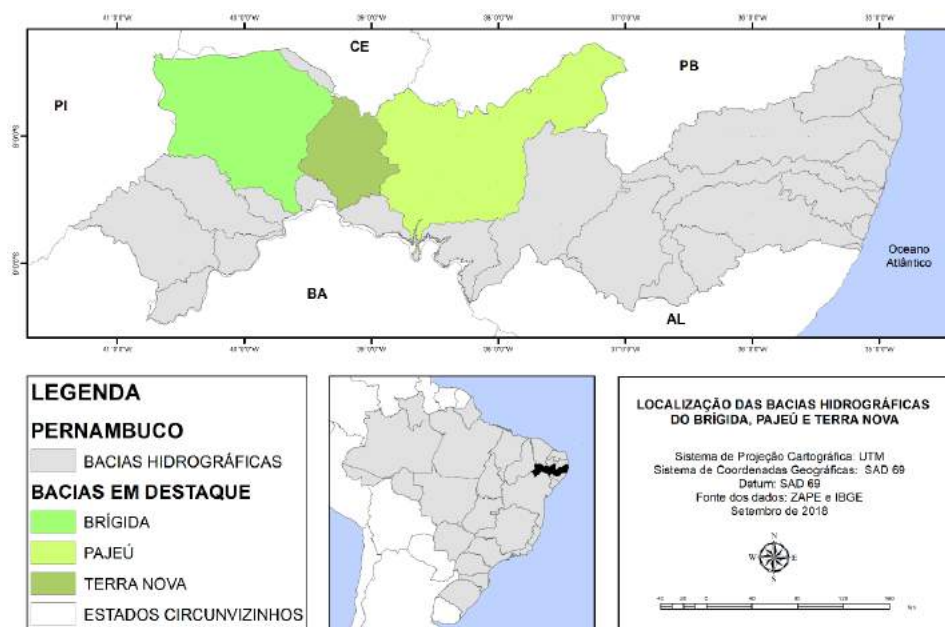
Nesse sentido, a análise de wavelets aparece como uma importante ferramenta nas ciências ambientais, podendo ser utilizada para caracterizar e validar simulações de modelos relacionados aos mais diversos processos ambientais, permitindo a descrição da evolução das características oscilantes de uma série temporal, o que é um grande diferencial nos estudos climáticos. Com base numa metodologia de análise robusta foi possível caracterizar a dinâmica climática da região estudada, o que possibilitará no futuro o desenvolvimento de estratégias para o planejamento ambiental e para o monitoramento climático em bacias hidrográficas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende as Bacias hidrográficas pernambucanas dos rios Pajeú, Terra Nova e Brígida, inseridas no âmbito do Eixo Norte do Projeto de Transposição do Rio São Francisco (Figura 7):

Figura 7 - Localização da Área de Estudo.

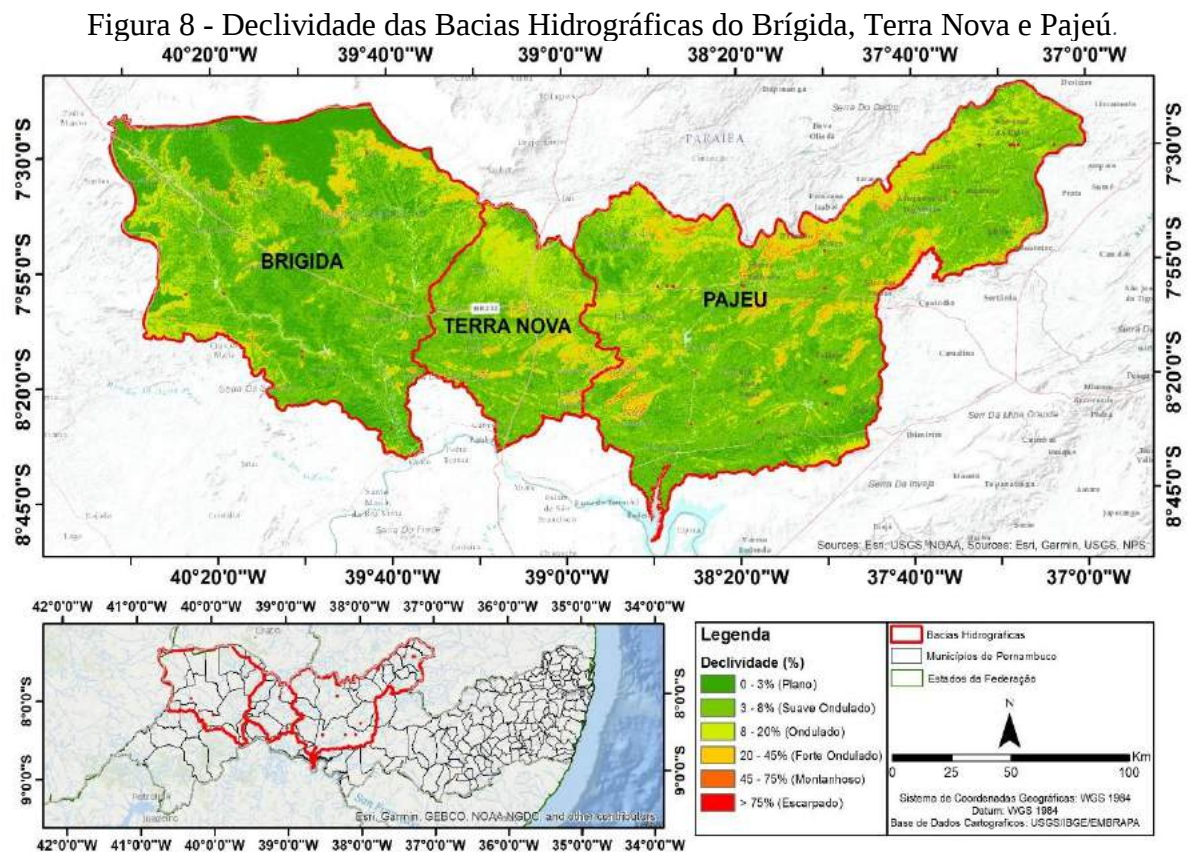


Fonte: A autora (2020).

O mês de março é o mais chuvoso na região semiárida do submédio São Francisco, época em que o semiárido pernambucano está sob a influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e no mês de julho as temperaturas são mais baixas sendo as temperaturas mais elevadas entre os meses de outubro e dezembro (PERNAMBUCO, 1994).

Nas áreas mais elevadas das Bacias analisadas, devido a variação do relevo, predominam os chamados “brejos de altitude”, em municípios como Triunfo, Flores, Santa Cruz da Baixa Verde etc., a topografia propicia o surgimento de “brejos de altitude”, caracterizados por Andrade e Lins (2000) como uma mancha de umidade em meio ao clima semiárido. A combinação entre relevo e exposição ao fluxo predominante de ventos propicia a diminuição das temperaturas e o aumento das chuvas nessas regiões (MELO, 1988), que mesmo localizados em áreas semiáridas, devido a altitude, apresentam clima mais ameno e maior quantidade de precipitação. Nessas áreas a condensação do vapor d’água presente no ar aumenta a nebulosidade, diminuindo a insolação, consequentemente, a temperatura também diminui em

conjunto com a evapotranspiração potencial (SOARES, NÓBREGA, GALVÍNCIO, 2018). Desse modo o entendimento da topografia da região é essencial para o entendimento da dinâmica climática regional (Figura 8):



Fonte: A autora (2020).

3.2 ANÁLISE DE TENDÊNCIA NAS BACIAS DO PAJEÚ, TERRANOVA E BRÍGIDA

A área de estudo compreende as Bacias hidrográficas pernambucanas dos rios Pajeú, Terra Nova e Brígida, inseridas no âmbito do Eixo Norte do Projeto de Transposição do Rio São Francisco. Os dados trabalhados nessa primeira etapa foram os dados de precipitação de 7 postos pluviométricos selecionados na Bacia do Pajeú-PE com dados de 1963 a 2019, portanto de 55 anos nos municípios de Ibimirim, Serra Talhada, Itapetim, São José do Egito, Igaraci, Floresta e Tuparetama. Também foram trabalhados os dados de precipitação de 1 posto pluviométrico selecionado na Bacia do Terra Nova-PE com dados de 1963 a 2019, no município de Salgueiro e, por último, foram trabalhados os dados de precipitação de 4 postos pluviométricos selecionados na Bacia do Brígida-PE, com dados de 1963 a 2019, nos municípios de Parnamirim, Santa Maria da Boa Vista, Exu e Araripina.

Os dados pluviométricos diários de 1963 a 2019 das estações do Submédio São Francisco foram obtidos através de diferentes agências como SUDENE e APAC. O preenchimento dos dados faltosos ocorreu por correlação com outra estação meteorológica mais próxima, levando-se em consideração a latitude e altitude dos postos pluviométricos e a que apresentou melhor coeficiente de correlação. Os dados foram processados através do software Climap 3.0.

O Climap 3.0 é um aplicativo com interface gráfica que auxilia a análise de séries de dados meteorológicos de chuva e de temperatura do ar, com a associação de informações e criação de gráficos. O aplicativo foi desenvolvido por Salvador em 2014 (SALVADOR, 2017). A linguagem de programação empregada para seu desenvolvimento foi a de Python 2.7.6, com os recursos de criação de interface gráfica da biblioteca Tkinter, que é um recurso nativo do Python (ROSSUM, 1996; BARBOSA et al., 2016).

Após a obtenção dos dados diários e análise, os dados foram processados no Climap 3.0 para a obtenção dos índices climáticos, como indicado por Barbosa et al. (2016):

- I. Totais mensais, trimestrais e anuais de precipitação pluviométrica
- II. DPP: Desvio padronizado da precipitação dos totais mensais, trimestrais e anuais. $DPP = (\text{total} - \text{média}) / \text{desvio padrão}$;
- III. Pr1: Número de dias por ano com precipitação $\geq 5\text{mm}$, $\geq 10\text{mm}$, e $\geq 20\text{mm}$
- IV. Análise da ocorrência de precipitações a 95% e a 99% de confiança;
- V. Regressão linear e Teste não paramétrico de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975), segundo proposto por Sneyers (1975) para delimitar o ponto inicial de determinada tendência, sendo ideal para detectar alterações de ordem climática em séries meteorológicas, permitindo, também, a localização aproximada do ponto inicial dessa alteração (SALVADOR, 2017; SILVA, E. R. A. C. et al., 2018).

Os resultados obtidos com o software permitem analisar os dados com base:

- 1- No P-valor, que é a significância de um resultado (também denominado nível descritivo do teste), é a probabilidade de que a estatística do teste (como variável aleatória) tenha valor extremo em relação ao valor observado (estatística) quando a hipótese H_0 é verdadeira.

Posteriormente foi elaborado o gráfico referente à quantidade de chuvas onde o P-valor reflete a significância do resultado. Em termos gerais, um P-valor pequeno significa que a probabilidade de obter um valor da estatística de teste como o observado é muito improvável, levando-se, desse modo, à rejeição da hipótese nula.

Salvador (2017) considera que, na hipótese de estabilidade de uma série temporal, a sucessão de valores ocorre de forma independente e a distribuição de probabilidade deve

permanecer sempre a mesma, o que caracteriza, desse modo, uma série aleatória simples. Dessa forma, se $p\text{-valor} \geq 0.5$ não há tendência, se $p\text{-valor} \leq 0.5$ há tendência, se $p\text{-valor} \leq 0.05$ há tendência com significância estatística.

2- No 'r' (chamado também de Coeficiente de Correlação de Pearson) que mede o grau de relacionamento linear entre valores emparelhados em uma amostra, bem como a intensidade e a direção da relação linear entre duas variáveis quantitativas (NETER, 1996).

O 'r' sempre será um valor entre $-1 \leq r \leq 1$. Quanto mais próximo de -1, maior a correlação negativa; quanto mais próximo de 1, maior a correlação positiva e quanto mais próximo de 0, menor a correlação linear. Posteriormente, é analisada a regressão, que é uma técnica estatística usada para investigar a relação entre duas ou mais variáveis.

A identificação de tendência climática na precipitação pluviométrica foi realizada aplicando-se o teste não-paramétrico de Mann-Kendall, recomendado pela Organização Meteorológica Mundial como um dos principais métodos de estudo de tendências de mudanças climáticas possibilitando ainda, a detecção do ponto inicial da tendência (KOU DAHE *et al.*, 2017; WORKU *et al.*, 2019; YUE; PILON; CAVADIAS, 2002). Essa metodologia compara cada valor da série temporal com os valores restantes em ordem sequencial, contando o número de vezes que os termos restantes são maiores ou menores que o valor analisado.

Segundo Salvador (2017), na versão sequencial do teste de Mann-Kendall realizado através do Climap 3.0, são geradas duas curvas, a estatística $U(tn)$ e o seu inverso, a estatística $U^*(tn)$. A intersecção das duas curvas geradas representa o ponto aproximado de mudança na série, se este ponto ocorre dentro do intervalo de confiança $1,96 < u(tn) < 1,96$ ($1,96$ correspondendo $\alpha = 0,05$).

Segundo Gossens e Berger (1986) nesse teste, uma tendência é constatada quando a curva $U(tn)$, que é o teste aplicado no sentido direto da série temporal, cruza um dos limites de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$). O teste aplicado no sentido inverso da série, representado pela curva $U^*(tn)$, serve também para detectar uma ruptura na série (alteração pluviométrica), quando esta cruza com $U(tn)$, dentro do intervalo de confiança.

Com o banco de dados definido, fez-se uma análise e consistência das séries históricas. Os valores relacionados à erros na coleta ou transmissão dos dados foram devidamente excluídos da série, passando a constar como falhas. Posteriormente fez-se uma contabilização das falhas e verificou-se que a quantidade é menor que 1%, sendo esse um limiar que não compromete a confiabilidade dos resultados. Deve-se salientar que o programa determina que resultados não sejam gerados quando a quantidade de falhas supera o limite de confiabilidade,

e, nesse sentido, o limite de falha foi de 1% e o teste de confiabilidade foi o do próprio programa. Após a análise dos dados e correção das falhas, realizou-se a aplicação dos testes.

3.3 ANÁLISE DO MÉTODO PARA UTILIZAÇÃO DAS WAVELETS CONTÍNUAS E DE COERÊNCIA

O objetivo dessa etapa é utilizar a wavelet contínua e wavelet de coerência para análise correlacional da influência das anomalias de TSM sobre a variabilidade da precipitação em bacias receptoras da transposição do Rio São Francisco em Pernambuco, com base em índices climáticos e em dados pluviométricos. Para analisar os conjuntos de dados, foram realizados: (I) decomposição de wavelet e espectros de potência de wavelet, que determinam os modos de oscilação significativos; (II) padrões de coerência wavelet, que descrevem associações locais nos domínios do tempo e da frequência; (III) ângulos de fase, que indicam o sinal da associação, seja em fase ou fora de fase; e (IV) a evolução das componentes periódicas de cada série no modo de oscilação mais significativo.

Para análise de como o conteúdo da frequência de um sinal muda com o tempo foi utilizada a transformada de wavelet contínua (CWT). Já para quantificar as dependências entre duas séries temporais, foram realizadas análises de coerência de wavelets entre os dados das estações pluviométricas e os principais fenômenos climáticos atuantes sobre o semiárido, em razão da coerência da wavelet permitir verificar se diferentes modos periódicos de duas séries temporais tendem a oscilar simultaneamente (subindo e descendo juntos e quantificando a sincronia de duas séries temporais). Além disso, a análise de fases foi usada para caracterizar a associação entre essas duas séries temporais conforme recomendado por (CAZELLES, B., 2018; CAZELLES, BERNARD *et al.*, 2007; CAZELLES, BERNARD; CAZELLES; CHAVEZ, 2014).

A função wavelet Morlet, que consiste em uma onda plana de período determinado, finita em extensão, multiplicada por uma gaussiana, foi a utilizada neste trabalho, e é com frequência aplicada na análise de sinais considerados “naturais”. Esta função foi escolhida pelo fato de possuir um formato característico semelhante aos identificados na série-temporal analisada. A ondaleta Morlet é complexa e possui características semelhantes às de sinais meteorológicos, tais como simetria ou assimetria, e variação temporal brusca ou suave. Segundo a literatura, este é um critério para escolha da função ondaleta (Weng e Lau, 1994; Morettin, 1999). A wavelet Morlet é definida por:

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} \exp^{i^2\omega_0 t} \exp^{-t^2/2} \quad (1)$$

Este wavelet é o produto de um complexo exp sinusoidal ($i^2\omega_0 t$) multiplicado por um envelope Gaussiano ($\exp(-t^2/2)$), onde $\psi(t)$ é a função de dois parâmetros, t é o tempo, o termo $\pi^{-1/4}$ é um fator de normalização para garantir a variação da unidade e o termo ω_0 é a frequência angular central da wavelet, de caráter adimensional com valor igual a 6, para que neste caso particular, possa satisfazer a condição de admissibilidade. Todos introduzidos no “script” de programação do Software Matlab®. O período de anos dos ciclos e a escala temporal dominante foram obtidos por programação no Software Matlab® com comandos específicos.

Em seguida a transformada de *wavelet* contínua (CW) decompõe uma função definida no domínio da frequência, em uma outra função definida no domínio do tempo e frequência, determinada por:

$$W_{x(a,\tau)} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi * \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{*a,\tau}(t) dt \quad (2)$$

Onde:

$W_{x(a,\tau)}$ = coeficiente *wavelet*;

Os parâmetros a e τ denotam a dilatação (fator de escala) e a translação (mudança de tempo), respectivamente;

o fator $\frac{1}{\sqrt{a}}$ normaliza as wavelets para que tenham variação unitária e, portanto, sejam comparáveis para todas as escalas a ;

$*$ representa a forma complexa do conjugado;

$x(t)$ = o sinal;

$\psi(t)$ = função de dois parâmetros, um para a posição no tempo τ e outro para a escala das wavelets a .

Sendo assim, a transformação wavelet pode ser pensada como uma correlação cruzada de um sinal $x(t)$ com um conjunto de wavelets $\psi((t - \tau) / a)$ de várias “larguras” ou escalas a , em diferentes posições no tempo τ . Os coeficientes da wavelet, $W_{x(a,\tau)}$, representam assim a contribuição das escalas a em diferentes posições horárias τ . Na equação (2), o fator $\frac{1}{\sqrt{a}}$ em linha normaliza as wavelets para que tenham variação unitária e, portanto, sejam comparáveis

para todas as escalas a , conforme proposto por (CAZELLES, BERNARD; CAZELLES; CHAVEZ, 2014).

Por meio da utilização de *wavelet*, é possível estimar o espectro de potência *wavelet* eq. (3), que é a repartição da variância entre o parâmetro de escala a e diferentes localizações de tempo t . Ressaltando-se que o parâmetro de escala *wavelet* a é inversamente proporcional à frequência central da *wavelet*.

$$S_x(f(escala), t(tempo)) = |W_x(f, t)|^2 \quad (3)$$

Vale ressaltar que o parâmetro de escala *wavelet* a é inversamente proporcional à frequência central da *wavelet* f_0 . Desta forma, deve-se considerar a relação da escala a com a sua frequência central quando for escolher a *wavelet*. Para a *wavelet* Morlet, podemos notar que de fato temos $f \cong \frac{1}{a}$ para $f_0 = 2\pi$.

Em muitas aplicações, é desejável quantificar as relações estatísticas entre dois sinais não estacionários. Diferentes definições são apresentadas para o cálculo da coerência *wavelet* com o objetivo de quantificar as relações estatísticas entre duas séries temporais. Desse modo, a metodologia seguida neste trabalho para calcular a coerência é a proposta por (CAZELLES, BERNARD *et al.*, 2005) onde a coerência deriva-se do cálculo das *wavelets* contínuas nas duas séries para formulação do espectro cruzado, que é a coerência. A coerência é utilizada para determinação da associação entre dois sinais, $x(\tau)$ e $y(\tau)$, (Equação 4), portanto, a função de coerência é uma medida direta da correlação entre os espectros de duas séries temporais, sendo definida como o espectro cruzado normalizado pelo espectro de cada sinal (CAZELLES, BERNARD *et al.*, 2007), como mostrado a seguir:

$$R_{x,y}(f, \tau) = \frac{|\langle W_{x,y}(f, \tau) \rangle|^2}{|\langle W_x(f, \tau) \rangle|^2 |\langle W_y(f, \tau) \rangle|^2} \quad (4)$$

tal que $W_{x,y}(f, \tau) = W_x(f, \tau)W_y^*(f, \tau)$ expressa a transformada *wavelet* cruzada, $W_x(f, \tau)$ e $W_y(f, \tau)$ representam a transformada *wavelet* das séries $x(\tau)$ e $y(\tau)$, respectivamente. Os colchetes angulares em torno dos termos indicam suavização no tempo e na frequência. Com a coerência é possível estimar o quanto duas séries temporais não estacionárias $x(\tau)$ e $y(\tau)$ estão relacionadas nas diferentes frequências e ao longo do tempo.

O $R_{x,y}(f, \tau)$ varia de 0 a 1 e indica uma forte ou fraca relação para valores altos ou baixos, respectivamente, e apresenta uma relação linear perfeita quando $R_{x,y}(f, \tau) = 1$ entre dois sinais em determinada frequência e tempo. Desta forma, com a utilização do gráfico de coerência com *wavelet* pode-se diferenciar no espaço tempo-frequência a intensidade da relação e identificar mudanças tanto ao nível de frequência quanto do tempo.

Adicionalmente, pode-se calcular a fase com *wavelets* possibilitando caracterizar a relação entre sinais. A diferença de fase com *wavelets* gera informações a respeito do sinal da relação e a análise de fases é usada para caracterizar a associação entre duas séries temporais conforme recomendado por (CAZELLES, B., 2018; CAZELLES, BERNARD *et al.*, 2007; CAZELLES, BERNARD; CAZELLES; CHAVEZ, 2014). Pelo fato da wavelet Morlet referir-se a uma wavelet complexa, $\Im(W_x(f, \tau))$ pode ser escrita como $|\Im(W_x(f, \tau))|$ (isto é, em termos do seu módulo) e fase Eq. (5):

$$\phi_x(f, \tau) = \tan^{-1} \left(\frac{\Im(W_x(f, \tau))}{\Re(W_x(f, \tau))} \right), \quad (5)$$

De maneira semelhante, a diferença de fase com a transformada wavelet e o atraso instantâneo de tempo $\Delta T(\tau)$ entre duas séries temporais $x(t)$ e $y(t)$ são escritos matematicamente na Eq. (6) e (7), respectivamente.

$$\phi_{x,y}(f, \tau) = \tan^{-1} \left(\frac{\Im(W_{x,y}(f, \tau))}{\Re(W_{x,y}(f, \tau))} \right) \quad (6)$$

tal que $\Im$ representa a parte imaginária e $\Re$ a parte real.

e também o intervalo de tempo instantâneo $\Delta T(\tau)$ entre as séries temporais $x(t)$ e $y(t)$. Este intervalo de tempo é calculado como:

$$\Delta T(\tau) = \frac{\phi_{x,y}(f, \tau)}{2\pi F(\tau)} \quad (7)$$

tal que:

$$F(\tau) = \frac{\int_{f_1}^{f_2} f |W_{x,y}(f, \tau)| df}{\int_{f_1}^{f_2} |W_{x,y}(f, \tau)| df} \quad (8)$$

corresponde à frequência instantânea estabelecida em uma banda de frequência ou periódica escolhida.

As wavelets contínuas e de coerência foram elaboradas utilizando-se a normalização utilizada por (DA SILVA, D. F., 2017) que calcula a média e o desvio padrão mensalmente (Equação 9). Todas as séries estudadas foram normalizadas antes da comparação.

$$AVari,j = \frac{(Vari,j - Var\bar{t})}{\sigma_i} \quad (9)$$

Em que: $AVari,j$ é a anomalia normalizada da precipitação no ano $j = 1, 2, 3, \dots, N$ e mês $i = 1, 2, 3, \dots, 12$; $Vari,j$ é a precipitação no ano $j = 1, 2, 3, \dots, N$ e mês $i = 1, 2, 3, \dots, 12$; $Var\bar{t}$ e σ_i são a média climatológica e o desvio padrão do mês i .

Todas as análises referentes à wavelet usaram algoritmos originais desenvolvidos no WaveletToolbox do Matlab R2019b, composta por várias opções de processamento e aplicações para analisar e sintetizar sinais, imagens e dados que possuem comportamento regular pontuado com mudanças abruptas. A caixa de ferramentas inclui algoritmos para a transformada *wavelet* contínua (CWT) e coerência *wavelet* (utilizada neste trabalho para análise de como o conteúdo da frequência de um sinal muda com o tempo).

Esses algoritmos incorporam análises cruzadas e procedimentos estatísticos adaptados e algoritmos para a coerência wavelet, que permite verificar se diferentes modos periódicos de duas séries temporais tendem a oscilar simultaneamente (subindo e descendo juntos e quantificando a sincronia de duas séries temporais).

3.3.1 Normalização de Cazelles

As wavelets contínuas foram elaboradas utilizando-se duas normalizações diferentes, a normalização proposta por Cazelles (2007), com base no desvio padrão e média global da série, onde as séries temporais de incidência foram transformadas em raiz quadrada (Equação 5), e a normalização utilizada por (DA SILVA, D. F., 2017) que calcula a média e o desvio padrão mensalmente (Equação 6). Todas as séries estudadas foram normalizadas antes da comparação. A utilização das duas normalizações pretende salientar as diferenças dos resultados, que podem ser utilizados para diferentes tipos de análise.

$$N_{cazelles} = \sqrt{\frac{(x - média(x))}{desvpad(x)}} \quad (5)$$

Em que: $N_{azelles}$ é a normalização da precipitação no ano $j = 1, 2, 3, \dots, N$ e mês $i = 1, 2, 3, \dots, 12$, feita com base na raiz quadrada da precipitação no ano $j = 1, 2, 3, \dots, N$ e mês $i = 1, 2, 3, \dots, 12$, além da média global e no desvio padrão de toda a série.

3.3.2 Normalização de Kayano

$$NK_{ayano} = A_{Vari,j} = \frac{(Var_{i,j} - Var_i)}{\sigma_i} \quad (6)$$

Em que: $A_{Vari,j}$ é a anomalia normalizada da precipitação no ano $j = 1, 2, 3, \dots, N$ e mês $i = 1, 2, 3, \dots, 12$; $Var_{i,j}$ é a precipitação no ano $j = 1, 2, 3, \dots, N$ e mês $i = 1, 2, 3, \dots, 12$; Var_i e σ_i são a média climatológica e o desvio padrão do mês i .

Todas as análises referentes à wavelet usaram algoritmos originais desenvolvidos no Matlab R2019b. A caixa de ferramentas inclui algoritmos para a transformada *wavelet* contínua (CWT) e coerência *wavelet*. Esses algoritmos incorporam análises cruzadas e procedimentos estatísticos adaptados.

A ferramenta principal utilizada para processar os dados foi o WaveletToolbox do MatLab™, composta por várias opções de processamento e aplicações para analisar e sintetizar sinais, imagens e dados que possuem comportamento regular pontuado com mudanças abruptas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE PRECIPITAÇÃO PARA DETECÇÃO DE TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS E VARIABILIDADE DE LONGO PRAZO NAS BACIAS RECEPTORAS DO PROJETO DE TRANSPOSIÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO.

Resumo: Para o entendimento das atuais tendências de variação da precipitação pluviométrica no semiárido pernambucano, análises estatísticas que indicam a variabilidade da intensidade e frequência da ocorrência de chuvas são importantes indicadores de modificação nos padrões climáticos. Por essa razão, este estudo tem como objetivo analisar a variabilidade nos padrões de precipitação no período amostral de 1963 a 2019, a partir de análises estatísticas, para estimativa da tendência de ocorrência e intensidade de eventos extremos de precipitação. Foram utilizados dados diários de precipitação pluviométrica em 12 estações nas Bacias do Pajeú-PE, Terra Nova e Brígida, processados através do software Climap 3.0 e Matlab, nos quais foram analisadas as séries mensais, trimestrais e anuais da precipitação, a ocorrência de dias com chuvas acima de 1, 10 e 20mm, o número de dias no ano com precipitação acima de 5, 10, 20 e 30mm, bem como os métodos de análise de regressão linear e teste não paramétrico de Kendall-tau para verificar a tendência linear da quantidade e intensidade dos eventos de chuva nas séries de precipitação avaliadas. O estudo demonstrou variação nos padrões de precipitação pluviométrica, proveniente da atuação de diferentes sistemas meteorológicos na região, o que caracteriza as Bacias pela grande heterogeneidade na distribuição das chuvas em função dos fatores climáticos, tais como: a continentalidade, massas de ar e características topográficas. Dessa forma, os resultados sugerem uma tendência de diminuição nos padrões pluviométricos em todos os postos analisados. O volume e a ocorrência de chuvas também apresentaram diminuição nos postos analisados, principalmente na década de 1970 e meados da década de 1980, coincidindo com o final da atuação negativa da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e início da ODP positiva. A frequência de precipitações abaixo da média histórica tem se intensificado nas Bacias do Eixo Norte da Transposição do Rio São Francisco, principalmente após a década de 1990, o que é um indicativo da tendência de aumento dos eventos de seca na região, que coincide com o aumento da frequência do El Niño e da influência das anomalias de TSM sobre a variabilidade da precipitação nas Bacias receptoras do Projeto de Transposição do Rio São Francisco.

PALAVRAS-CHAVE: Variabilidade climática, Mudanças Climáticas, Tendência.

4.1.1 Introdução

A precipitação pode ser entendida como um processo que possui uma grande variabilidade espacial e temporal (SILVA e SIMÕES, 2014). Desse modo, a detecção das causas dos ciclos e extremos pluviométricos relacionados aos fenômenos climáticos decorrentes da circulação atmosférica global é de suma importância para a compreensão da dinâmica climática de uma região, bem como a análise de tendência climática é de grande valia nos estudos climáticos por sinalizar modificações nas variáveis meteorológicas (HENSON *et*

al., 2017; JONES, J. M. *et al.*, 2016; MADSEN *et al.*, 2014; MECHLER; BOUWER, 2015; ROBINS *et al.*, 2016; TANG, 2019; THOMPSON *et al.*, 2015).

Yevjevich (1972) define tendência em uma série temporal como uma mudança sistemática e contínua em qualquer parâmetro de uma dada amostra, excluindo-se mudanças periódicas ou quase periódicas. Para Goossens e Berger (1986) tendência climática é uma mudança do clima caracterizada por um contínuo acréscimo ou decréscimo nos valores observados da variável em um período determinado. Conti (2000) afirma que tendência é o “aumento ou diminuição lenta dos valores médios ao longo de série de dados de no mínimo três décadas, podendo ou não ocorrer de forma linear”. E segundo Silva et al. (2017), a análise da tendência de séries históricas de precipitação é uma das maneiras de se determinar a ocorrência de mudança climática local.

O estudo de tendência assume grande importância em áreas consideradas de vulnerabilidade ambiental, principalmente àquelas susceptíveis a variabilidade nos padrões climáticos. Nesse sentido, a região semiárida do Nordeste brasileiro, que é caracterizada pelo alto potencial de evaporação da água, em função da grande disponibilidade de energia solar, atreladas as altas temperaturas e a baixa umidade do ar (ASSIS, SOUZA & SOBRAL, 2015), apresenta grande variabilidade espacial e temporal das chuvas, com precipitações irregulares concentradas em poucos dias e meses, o que torna mais preocupante a questão do manejo da água e disponibilidade hídrica, sendo de grande interesse o entendimento das tendências espaço-temporais da pluviosidade.

No semiárido pernambucano o ritmo das precipitações é ditado pela atuação de sistemas atmosféricos de grande escala, mesoescala e microescala. Dentre os de grande escala, destacam-se a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e as frentes frias; em mesoescala, os vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN) e; em microescala ocorrem as circulações orográficas e pequenas células convectivas (MOLLION; BERNARDO, 2002). De acordo com Mollion e Bernardo (2000) esta semiaridez está relacionada à subsidência gerada pelo ramo descendente da célula Hadley-Walker e a inversão psicotérmica sobre a região. Que tem como principais sistemas produtores de chuvas: as instabilidades associadas aos Sistemas Frontais, Zona de Convergência Intertropical – ZCIT e os Vórtices Ciclônicos em Ar Superior.

Segundo Marengo (2006), em razão da dificuldade que os modelos têm para representar adequadamente as características do clima regional, a experiência brasileira mostra a necessidade de se ajustar os métodos aplicáveis aos cenários de mudança do clima resultantes de modelos globais para projeções de escopo regional ou local (SILVA; GALVÍNIO, 2011). Segundo Sant’Anna Neto (2010), enquanto as escalas globais permitem apenas a generalização

dos elementos e processos, as regionais possibilitam a compreensão das suas formas de organização, que podem ser verificadas de maneira especializada, e mais complexa, nas escalas locais.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar a variabilidade nos padrões de precipitação, a partir da análise estatística da tendência pluviométrica de 1963 a 2019, através do Software Climap 3.0 nas Bacias Hidrográficas do Rio Pajeú, Terra Nova e Brígida, que serão contempladas com o projeto de integração com a Bacia do Rio São Francisco em Pernambuco. O estudo é imprescindível em razão da necessidade de entendimento da dinâmica hidrológica regional, o que possibilitará no futuro o desenvolvimento de estratégias que levem em consideração a disponibilidade hídrica das Bacias estudadas, permitindo estratégias de planejamento ambiental e monitoramento climático em bacias hidrográficas, o que está diretamente em consonância com as boas práticas de conservação ambiental.

4.1.2 Material e Métodos

4.1.2.1 Dados pluviométricos

A área de estudo compreende as Bacias hidrográficas pernambucanas dos rios Pajeú, Terra Nova e Brígida, inseridas no âmbito do Eixo Norte do Projeto de Transposição do Rio São Francisco. Os dados trabalhados nessa primeira etapa foram os dados de precipitação de 7 postos pluviométricos selecionados na Bacia do Pajeú-PE com dados de 1963 a 2019, portanto de 56 anos nos municípios de Ibimirim, Serra Talhada, Itapetim, São José do Egito, Igaraci, Floresta e Tuparetama (Tabela 1).

Tabela 1 - Dados pluviométricos da Bacia do Pajeú-PE.

CÓDIGO	ESTAÇÃO	LAT	LONG	ALT	PRECIP ANUAL	FALHAS	FALHAS (correção)
APAC 155	ITAPETIM	7°37'67"	37°20'06"	638	625.2	7,9% (1990 -1992)	Estação 92 e 40 ≤ 1%
APAC 92	S. JOSE DO EGITO	7°44'04"	37°28'06"	625	627.7	4,11% (1991 - 1992)	Estação 40 ≤ 1%
APAC 296/151	TUPARETAMA	7°71'67"	37°35'	580	593.7	3,2% (1991)	Estação 529 e 69 ≤ 1%
APAC 69/148	IGUARACI	7°50'	37°23'	595	610.9	1,48%	Estação 502 ≤ 1%

APAC 424/14	IBIMIRIM	8°38'33"	37°63'33"	454	601.1	1,55%	Estação 234 $\leq 1\%$
APAC 266/87	FLORESTA	8°41'67"	37°93'33"	449	459.1	1,7	Estação 468, 234 e 93 $\leq 1\%$
APAC 12	SERRA TALHADA	7°93'06"	38°28'89"	480	645	1,57%	Estação 485 e 13 $\leq 1\%$

Posteriormente foram trabalhados os dados de precipitação de 1 posto pluviométrico selecionado na Bacia do Terra Nova-PE com dados de 1963 a 2019, no município de Salgueiro (Tabela 2).

Tabela 2 - Dados pluviométricos da Bacia do Terra Nova-PE

CÓDIGO	ESTAÇÃO	LAT	LONG	ALT	PRECIP ANUAL	FALHAS	FALHAS (correção)
APAC 8	SALGUEIRO	8°4'	39°7'	415	576.4	1,17	Estação 226 $\leq 1\%$

Por último foram trabalhados os dados de precipitação de 4 postos pluviométricos selecionados na Bacia do Brígida-PE, com dados de 1963 a 2019, nos municípios de Parnamirim, Santa Maria da Boa Vista, Exu e Araripina (Tabela 3).

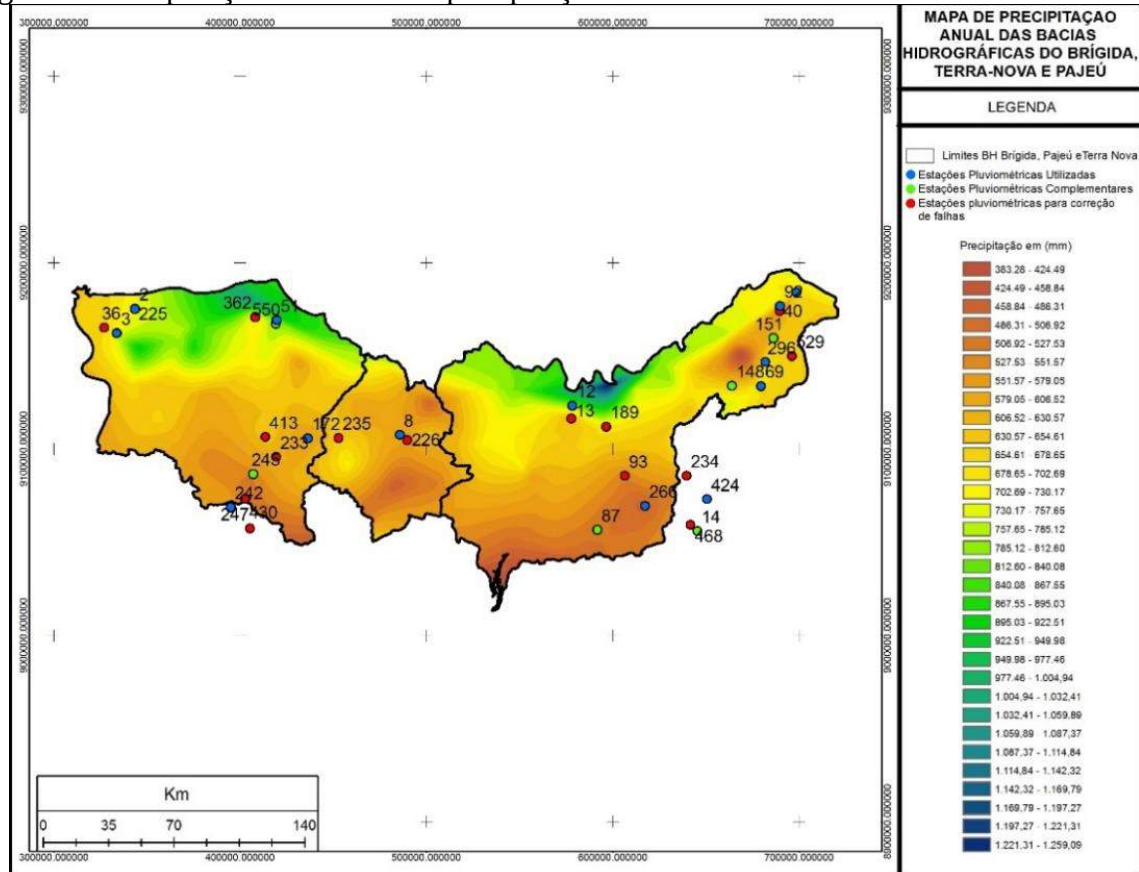
Tabela 3 - Dados pluviométricos da Bacia do Brígida-PE

CÓDIGO	ESTAÇÃO	LAT	LONG	ALT	PRECIP ANUAL	FALHAS	FALHAS (correção)
APAC 172	PARNAMIRIM	8°08'89"	39°57'75"	395	487.5	1,2%	Estação 413, 233, 235 $\leq 1\%$
APAC 242/187	SANTA MARIA DA BOA VISTA	8°42'33"	39°95'42"	406	474.2	0,13%	Estação 245, 247 $\leq 1\%$
APAC 51/550	EXU	7°51'61"	39°72'94"	526	739.1	1,37%	Estação 362 $\leq 1\%$
APAC 2/225	ARARIPINA	7°57'67"	40°50'58"	639	843.2	0,13%	Estação 3 e 36 $\leq 1\%$

Os dados pluviométricos diários das estações do Submédio São Francisco foram obtidos através de diferentes agências como SUDENE e APAC. Os dados pesquisados são de 1963 a 2019. O preenchimento dos dados faltosos ocorreu por correlação com outra estação meteorológica mais próxima, levando-se em consideração a latitude e altitude dos postos pluviométricos e a que apresentou melhor coeficiente de correlação.

Primeiramente foi realizada a interpolação dos dados de precipitação pelo método Natural Neighbor do ArcGis, com base na média de precipitação de cada posto, para seleção dos postos de análise e dos postos que seriam utilizados para a correção das falhas dos dados de precipitação nas Bacias estudadas (Figura 9).

Figura 9 - Interpolação dos dados de precipitação nas Bacias estudadas.



Fonte: A autora (2020).

Foram selecionadas para a análise 7 estações na Bacia do Pajeú-PE, 1 na Bacia do Terra Nova e 3 na Bacia do Brígida, escolhidas com base na distribuição espacial, levando-se em consideração também a latitude, altitude e quantidade de falhas dos postos pluviométricos (Figura 09). Posteriormente foi calculada a média mensal dos anos estudados e tabulada para dar entrada no Matlab.

Durante a formatação das tabelas de Itapetim, São José do Egito, Igaraci, Tuparetama, Ibimirim, Floresta, Serra Talhada, Salgueiro, Parnamirim, Santa Maria da Boa Vista, Exu e Araripina, identificou-se a ausência de alguns dados em determinados anos, que foram preenchidos com dados de estações que apresentaram maior correlação com as estações estudadas, respeitando-se também critérios como a proximidade, a latitude e a altitude. As estações selecionadas foram aquelas que apresentaram menos de 10% de falhas nos dados brutos, sendo posteriormente corrigidas para atingir um erro de menos de 1%.

4.1.2.2 Análise de tendência dos dados pluviométricos

Para definir a análise de tendência analisou-se o padrão diário, mensal e anual do regime de chuvas observando a variabilidade pluviométrica existente nas estações estudadas. Nesse sentido, foram utilizados dados diários de precipitação pluviométrica no período de 1963 a 2019 de 8 estações na Bacia do Pajeú-PE, localizada na região do Submédio São Francisco, adquiridos através da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), e processados através do software Climap 3.0.

O Climap 3.0 é um aplicativo com interface gráfica que auxilia a análise de séries de dados meteorológicos de chuva e de temperatura do ar, com a associação de informações e criação de gráficos. O aplicativo foi desenvolvido por Salvador em 2014 (SALVADOR, 2017). A linguagem de programação empregada para seu desenvolvimento foi a de Python 2.7.6, com os recursos de criação de interface gráfica da biblioteca Tkinter, que é um recurso nativo do Python (ROSSUM, 1996; BARBOSA et al., 2016).

Após a obtenção dos dados diários e análise, os dados foram processados no Climap 3.0 para a obtenção dos índices climáticos, como indicado por Barbosa et al. (2016):

- I. Totais mensais, trimestrais e anuais de precipitação pluviométrica
- II. DPP: Desvio padronizado da precipitação dos totais mensais, trimestrais e anuais. $DPP = (\text{total} - \text{média}) / \text{desvio padrão}$;
- III. Pr1: Número de dias por ano com precipitação $\geq 5\text{mm}$, $\geq 10\text{mm}$, e $\geq 20\text{mm}$
- IV. Análise da ocorrência de precipitações a 95% e a 99% de confiança;
- V. Regressão linear e Teste não paramétrico de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975), segundo proposto por Sneyers (1975) para delimitar o ponto inicial de determinada tendência, sendo ideal para detectar alterações de ordem climática em séries meteorológicas, permitindo, também, a localização aproximada do ponto inicial dessa alteração (SALVADOR, 2017; SILVA, E. R. A. C. et al., 2018).

Os resultados obtidos com o software permitem analisar os dados com base:

- 2- No P-valor, que é a significância de um resultado (também denominado nível descritivo do teste), é a probabilidade de que a estatística do teste (como variável aleatória) tenha valor extremo em relação ao valor observado (estatística) quando a hipótese H_0 é verdadeira.

Posteriormente foi elaborado o gráfico referente à quantidade de chuvas onde o P-valor reflete a significância do resultado. Em termos gerais, um P-valor pequeno significa que a probabilidade de obter um valor da estatística de teste como o observado é muito improvável, levando-se, desse modo, à rejeição da hipótese nula.

Salvador (2017) considera que, na hipótese de estabilidade de uma série temporal, a sucessão de valores ocorre de forma independente e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma, o que caracteriza, desse modo, uma série aleatória simples. Dessa forma, se $p\text{-valor} \geq 0.5$ não há tendência, se $p\text{-valor} \leq 0.5$ há tendência, se $p\text{-valor} \leq 0.05$ há tendência com significância estatística.

2- No 'r' (chamado também de Coeficiente de Correlação de Pearson) que mede o grau de relacionamento linear entre valores emparelhados em uma amostra, bem como a intensidade e a direção da relação linear entre duas variáveis quantitativas (NETER, 1996).

O 'r' sempre será um valor entre $-1 \leq r \leq 1$. Quanto mais próximo de -1, maior a correlação negativa; quanto mais próximo de 1, maior a correlação positiva e quanto mais próximo de 0, menor a correlação linear. Posteriormente, é analisada a regressão, que é uma técnica estatística usada para investigar a relação entre duas ou mais variáveis.

A identificação de tendência climática na precipitação pluviométrica foi realizada aplicando-se o teste não-paramétrico de Mann-Kendall, recomendado pela Organização Meteorológica Mundial como um dos principais métodos de estudo de tendências de mudanças climáticas possibilitando ainda, a detecção do ponto inicial da tendência (KOU DAHE *et al.*, 2017; WORKU *et al.*, 2019; YUE; PILON; CAVADIAS, 2002). Essa metodologia compara cada valor da série temporal com os valores restantes em ordem sequencial, contando o número de vezes que os termos restantes são maiores ou menores que o valor analisado.

Segundo Salvador (2017), na versão sequencial do teste de Mann-Kendall realizado através do Climap 3.0, são geradas duas curvas, a estatística $U(tn)$ e o seu inverso, a estatística $U^*(tn)$. A intersecção das duas curvas geradas representa o ponto aproximado de mudança na série, se este ponto ocorre dentro do intervalo de confiança $1,96 < u(tn) < 1,96$ (1,96 correspondendo $\alpha = 0,05$).

Segundo Gossens e Berger (1986) nesse teste, uma tendência é constatada quando a curva $U(tn)$, que é o teste aplicado no sentido direto da série temporal, cruza um dos limites de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$). O teste aplicado no sentido inverso da série, representado pela curva $U^*(tn)$, serve também para detectar uma ruptura na série (alteração pluviométrica), quando esta cruza com $U(tn)$, dentro do intervalo de confiança.

Com o banco de dados definido, fez-se uma análise e consistência das séries históricas. Os valores relacionados à erros na coleta ou transmissão dos dados foram devidamente excluídos da série, passando a constar como falhas. Posteriormente fez-se uma contabilização das falhas e verificou-se que a quantidade é menor que 1%, sendo esse um limiar que não compromete a confiabilidade dos resultados. Deve-se salientar que o programa determina que

resultados não sejam gerados quando a quantidade de falhas supera o limite de confiabilidade, e, nesse sentido, o limite de falha foi de 1% e o teste de confiabilidade foi o do próprio programa. Após a análise dos dados e correção das falhas, realizou-se a aplicação dos testes.

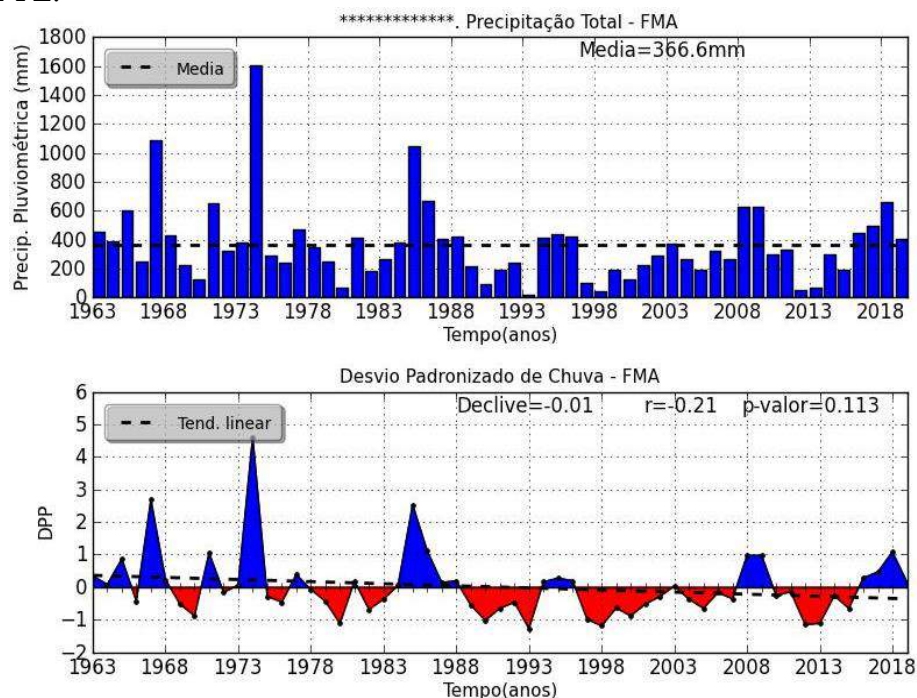
Diante da importância que o fator precipitação assume nos estudos sobre variabilidade climática, a utilização do Climap 3.0 teve por objetivo avaliar a tendência nos padrões da precipitação pluviométrica interanual de 1963 a 2019 na Bacia do Pajeú-PE, para balizar as discussões dos resultados relacionados às wavelets, visando substanciar estudos futuros relativos ao regime de chuvas e ao planejamento hídrico no semiárido pernambucano.

4.1.3 Resultados e discussão

4.1.3.1 Análise de tendência climática no município de Itapetim-PE

Na figura 10, a precipitação total no trimestre mais chuvoso de Itapetim (FMA) teve uma média de 366.6 mm, e uma tendência de diminuição das chuvas, demonstrado pelo desvio padrão (DPP), sem, contudo, apresentar significância estatística, sendo o declive de -0.01, o r de -0.21 (correlação negativa) e o p-valor de 0.113.

Figura 10 - Média histórica e DPP do trimestre de maior precipitação pluviométrica na estação de Itapetim-PE.



Fonte: A autora (2020).

Posteriormente foi avaliada a média, mediana e desvio padrão anual com base na densidade das chuvas, onde a densidade e as precipitações variam entre um mês e outro. Os

valores foram tabelados e observa-se que o mês de março é o que apresenta a maior média de chuvas na estação de Itapetim-PE (Apêndice I-A), conforme a Tabela 4:

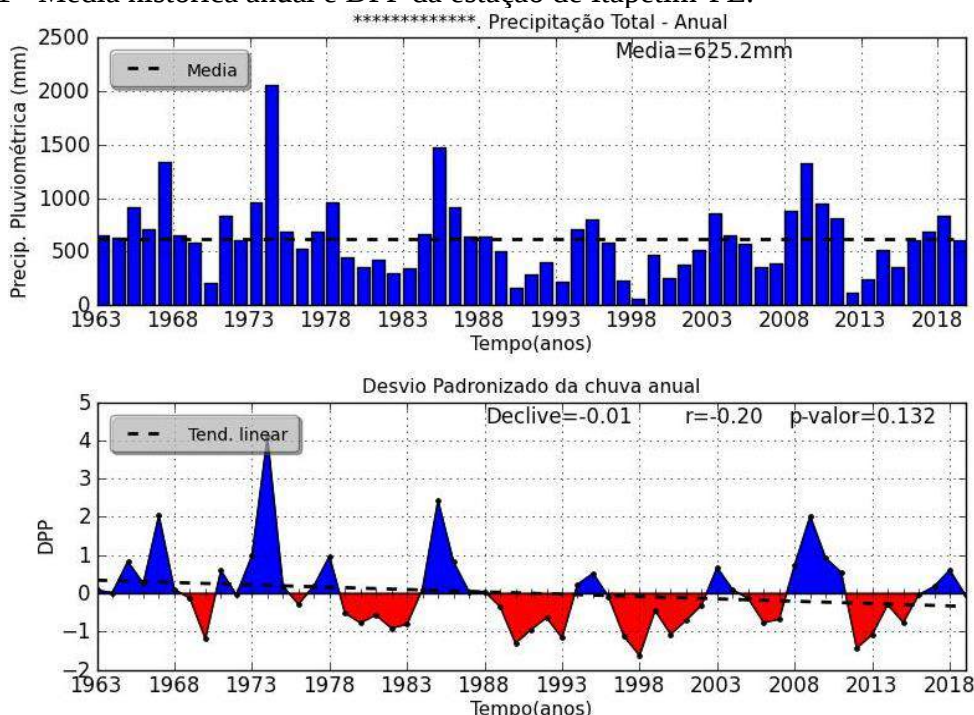
Tabela 4 - Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade de 1963 a 2019 em Itapetim.

ITAPETIM	Média	Mediana	Desvio Padrão
Janeiro	82.2	60	85.8
Fevereiro	103.6	76	113.6
Março	136.4	118	93.6
Abril	126.6	93.8	132.5
Mai	57.5	33.7	70.1
Junho	34.8	20	39.1
Julho	21.5	11	26.5
Agosto	9.1	0	20.4
Setembro	4	0	10.5
Outubro	12.3	0	30.5
Novembro	7.1	0	17.5
Dezembro	31	2	44.6

Fonte: A autora (2020).

A precipitação total anual da estação de Itapetim-PE teve uma média de cerca de 625mm, e uma tendência de diminuição das chuvas a partir do final da década de 1990, demonstrado pelo desvio padrão (DPP), sem, contudo, ser significativa, sendo o declive de -0.01, o r de -0.20 (correlação negativa) e o p-valor de 0.132 (Figura 11).

Figura 11 - Média histórica anual e DPP da estação de Itapetim-PE.

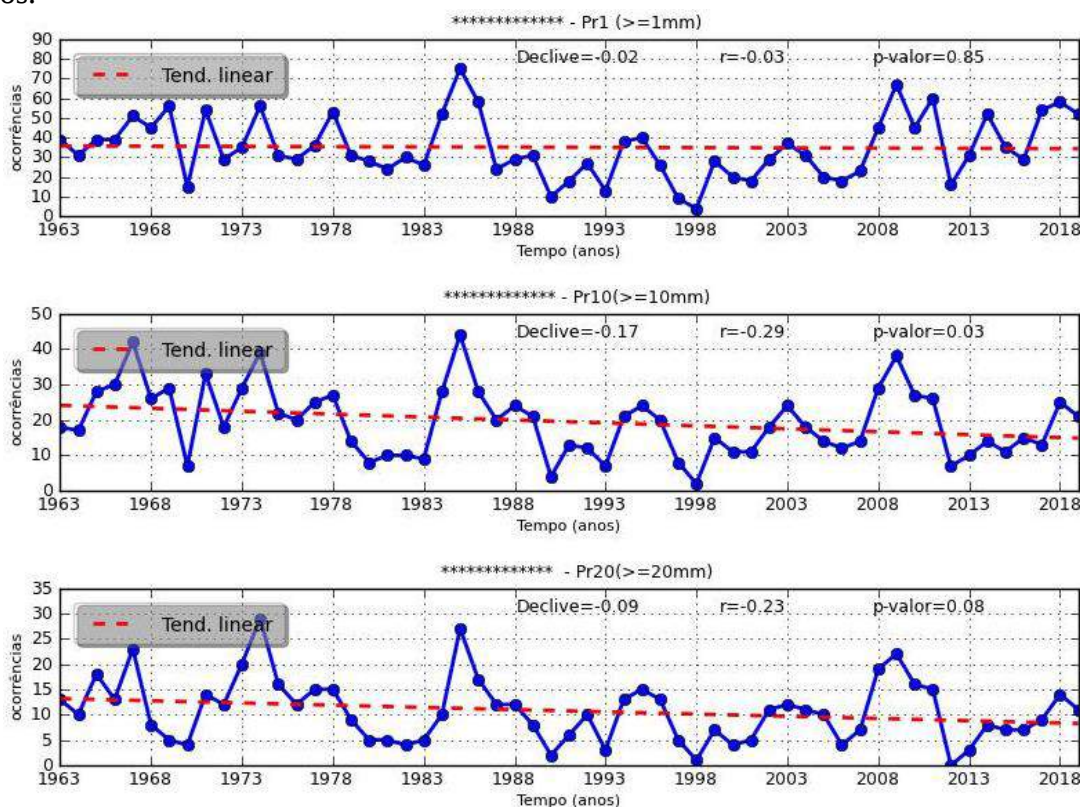


Fonte: A autora (2020).

Posteriormente, elaborou-se a estimativa de dias com chuva iguais ou menores que 1mm ($\geq 1\text{mm}$), dias com chuvas iguais ou menores que 10mm ($\geq 10\text{mm}$) e dias com chuvas iguais ou menores do que 20mm diários ($\geq 20\text{mm}$). Ao utilizar um valor de corte de 0,05 para o valor-p, rejeitou-se a hipótese nula e concluiu-se que existe uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos.

Esse valor (ou valores menores, como ocorreu em relação aos episódios com chuvas $\geq 10\text{ mm}$) significa que o estudo assumiu uma probabilidade de 5% de que diferenças entre os grupos sejam encontradas e de que a probabilidade desse resultado seja devida ao acaso, possuindo um intervalo de confiança de 95% (Figura 12).

Figura 12 - Dias com chuva $\geq 1\text{ mm}$, dias com chuva $\geq 10\text{ mm}$ e dias com chuva $\geq 20\text{ mm}$ diários.



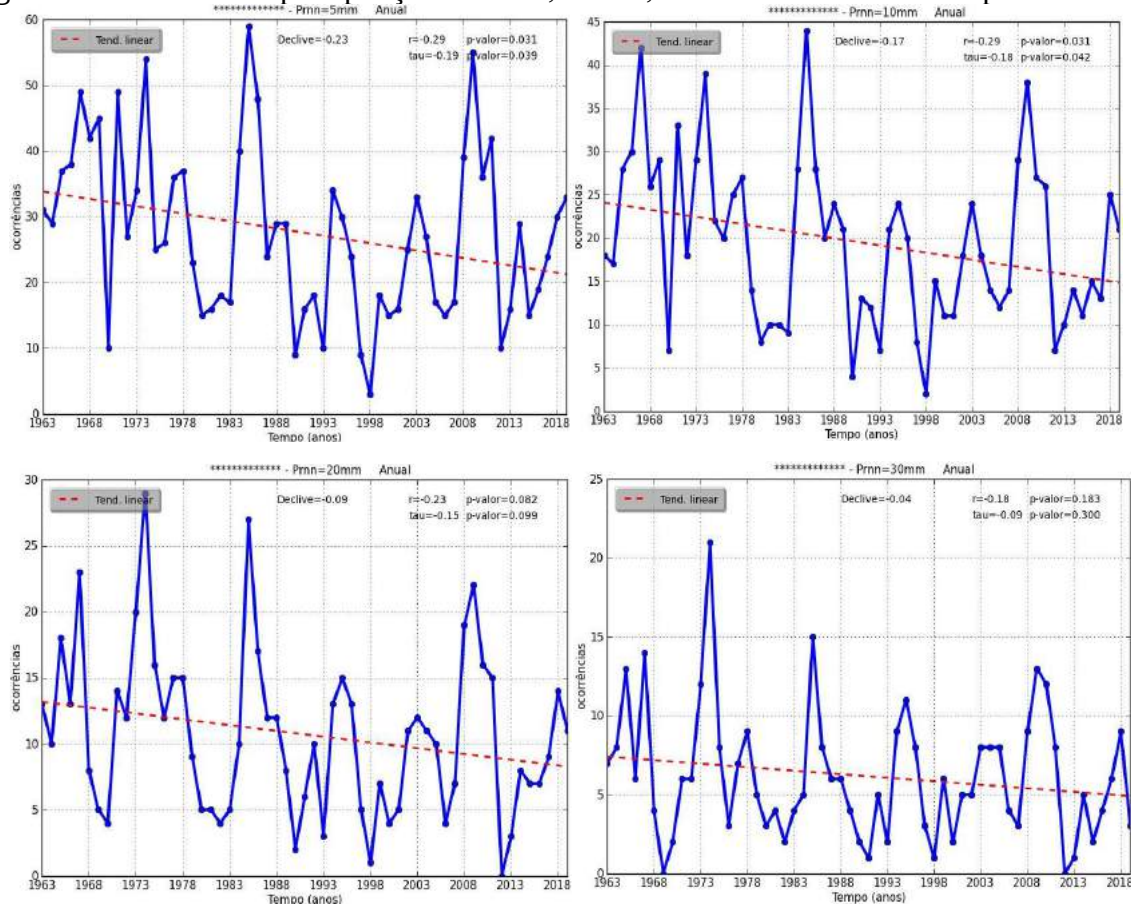
Fonte: A autora (2020).

Também houve, a partir do final da década de 1990, uma tendência estatisticamente significativa de redução dos extremos de precipitação na região. Como pôde ser observado, os dias com chuva $\geq 1\text{mm}$ apresentaram tendência linear positiva, ou seja, um ligeiro aumento das precipitações maiores ou iguais a 1mm durante os anos na série histórica admitida. Todavia o P-valor foi de 0.85, o que indica que a probabilidade de significância desse resultado não foi estatisticamente significativa.

Os dias com chuva iguais ou superiores a 10mm tiveram uma tendência de diminuição ao longo dos anos, apresentando um nível de P-valor 0.03, portanto, com forte significância estatística, sugerindo que as chuvas acima de 10mm são mais representativas da precipitação na região do que as chuvas abaixo desse corte, que não apresentam tendência significativa. Já para dias com chuva iguais ou superiores a 20mm também ocorreu a tendência de diminuição da frequência desses episódios com um P-valor de 0.08, no entanto essa tendência não é estatisticamente significativa.

A seguir, será apresentado os volumes de precipitação $\Rightarrow$ 5mm, $\Rightarrow$ 10mm, $\Rightarrow$ 20mm e $\Rightarrow$ 30 mm, para efeito de comparação (Figura 13).

Figura 13 - Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Itapetim-PE.



Fonte: A autora (2020).

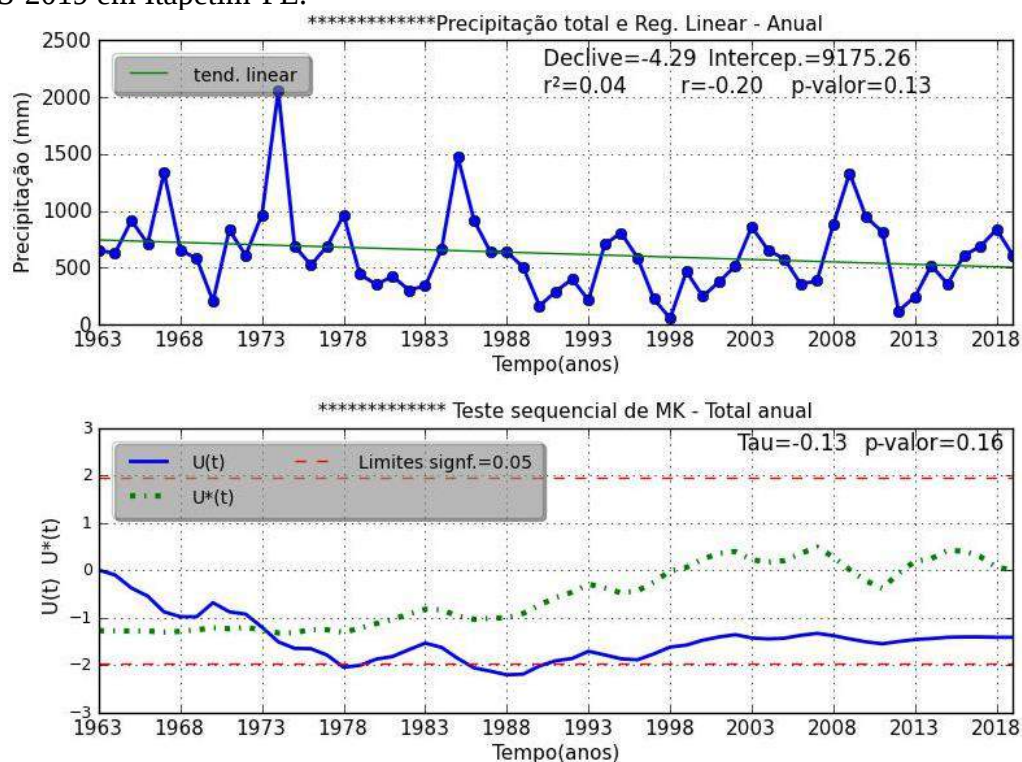
Em todos os cenários observados o volume de precipitação apresenta uma tendência de diminuição, sendo os volumes de precipitação de 5mm e 10mm os mais significantes estatisticamente. Fica evidenciado pela figura anterior que a precipitação no município de Itapetim-PE apresentou uma variabilidade, com tendência de diminuição, tanto no volume de chuvas quanto nos extremos de precipitação.

Posteriormente foi analisada a precipitação ao longo dos 56 anos de período amostral (1963 a 2019) a 95% de confiança (considerando 59mm de precipitação) e a 99% de confiança (considerando 90.1mm de precipitação), ambos apresentando uma correlação linear fraca e P-valor não representativo de significância estatística, embora haja um declive de -0.01 (Apêndice B).

Também foi elaborado o gráfico anual da precipitação máxima ocorrida em 1 dia, que mostrou tendência de aumento em relação ao volume precipitado, porém, sem significância estatística, o que pode ocasionar preocupação em relação aos extremos de precipitação na região, mesmo que esses eventos estejam ficando menos recorrentes (Apêndice C).

A seguir, foi realizada a precipitação total, regressão linear anual e o Teste Sequencial de Mann-Kendall para estimar o nível de significância estatística e o tipo de tendência nas séries de precipitação anual. Dessa forma, para elaboração do teste sequencial de Mann-Kendall levou-se em consideração as variáveis resultantes da análise da precipitação pluviométrica. Na (Figura 14) a Regressão Linear apresentou tendência de queda (declive de -4.29), todavia não apresenta tendência significativa (p-valor = 0.13).

Figura 14 - Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963-2019 em Itapetim-PE.



Fonte: A autora (2020).

No Teste Sequencial de Mann-Kendall (Figura 14) realizado em Itapetim-PE, a curva estatística $U(t)$ e o seu inverso, a estatística $U^*(t)$ se cruzam no início da década de 1970

dentro do intervalo de confiança $1,96 < u(tn) < 1,96$ (1,96 correspondendo $\alpha = 0,05$). No entanto só cruza o limite de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$), mostrando tendência, no final da década de 1980, por essa razão a série histórica não apresentou tendência significativa (p-valor = 0.16).

4.1.3.2 Análise de tendência climática no município de São José do Egito-PE

Foram avaliadas a média, mediana e desvio padrão anual com base na densidade das chuvas da estação mais próxima a de Itapetim, que é a de São José do Egito, e observa-se que o mês de abril apresenta a maior média de chuvas na estação (Tabela 5).

Tabela 5 - Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade em São José do Egito- PE

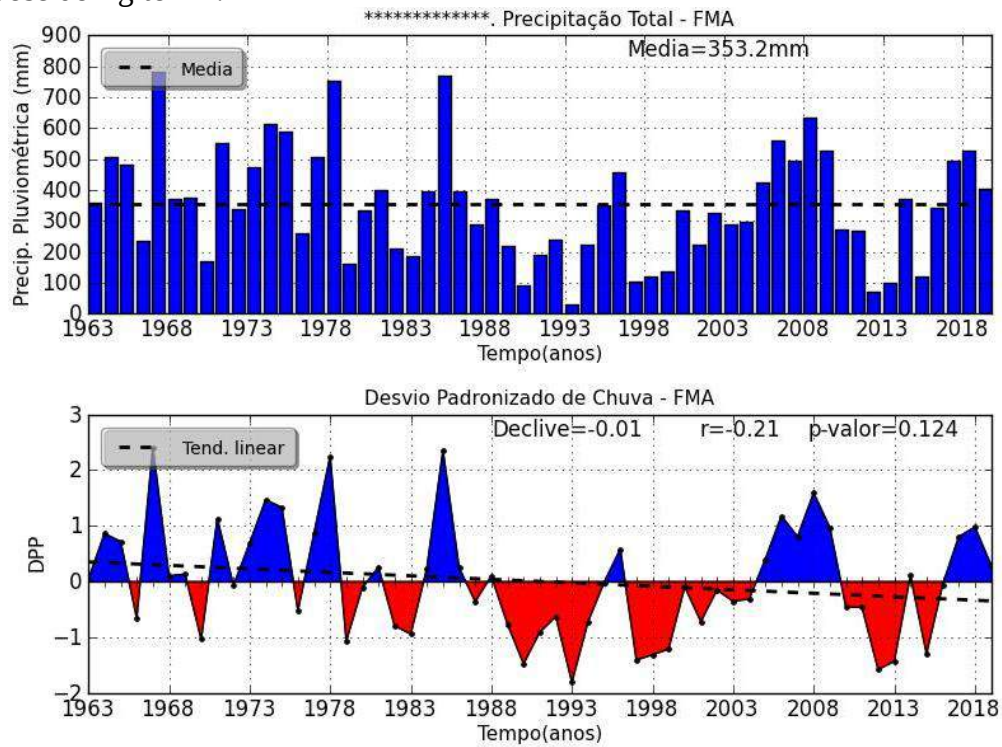
SÃO JOSÉ DO EGITO	Média	Mediana	Desvio Padrão
Janeiro	76.9	54	66
Fevereiro	93.9	77.8	80.3
Março	127.6	110.8	89.8
Abril	131.7	91.7	98.5
Mai	72.9	64.6	66.5
Junho	38.7	26.4	41.6
Julho	30	18.6	33.4
Agosto	7.1	0	18.6
Setembro	3.4	0	11.2
Outubro	6.9	0	19.8
Novembro	8.2	0	18
Dezembro	30.3	5.1	47.8

Fonte: A autora (2020).

Foi analisada a climatologia mensal e trimestral da precipitação pluviométrica, para identificar os períodos secos e chuvosos da estação mais próxima a de Itapetim, que é a de São José do Egito, de 1963 a 2019. A média mensal da precipitação pluviométrica identificou o mês de abril como o mais chuvoso, embora a precipitação no mês de março também seja considerável, e o trimestre correspondente a fevereiro-março-abril é o mais chuvoso no município (Apêndice II-A).

A análise da climatologia da estação de São José do Egito evidencia que a precipitação na estação tem maior ocorrência nos meses de janeiro a maio. A precipitação total no trimestre mais chuvoso de São José do Egito (FMA) teve uma média de cerca de 353.2 mm, e uma tendência de diminuição das chuvas demonstrado pelo desvio padrão (DPP) a partir de meados da década de 1990, sem, contudo, apresentar significância, sendo o declive de -0.01, o r de -0.21 (correlação negativa) e o p-valor de 0.124 (Figura 15).

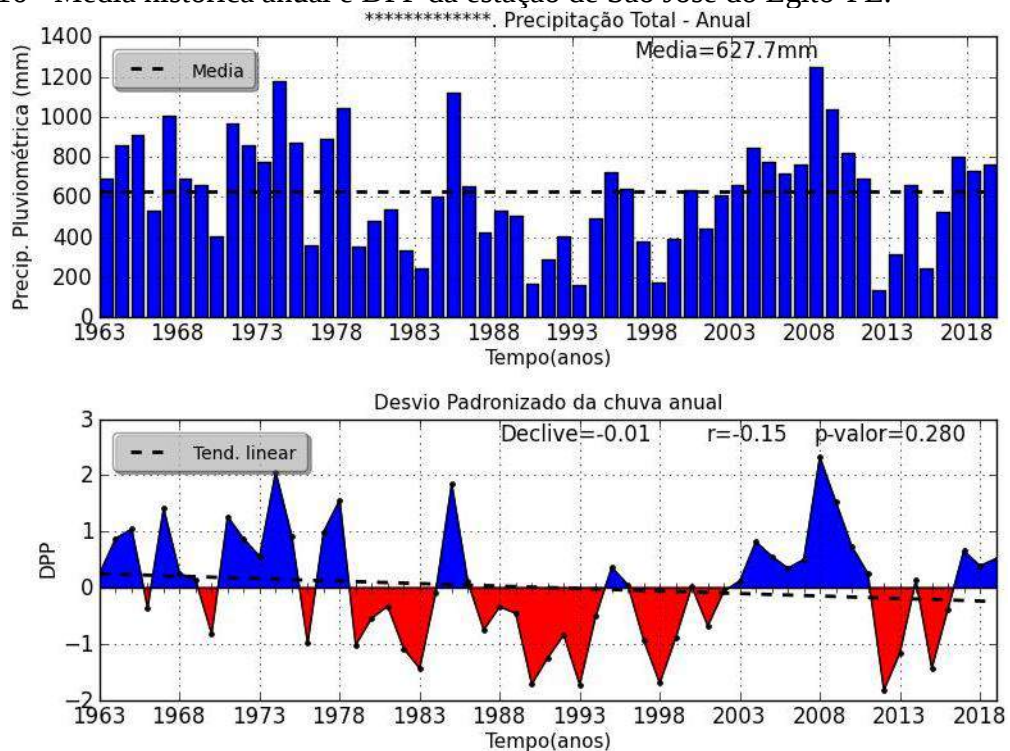
Figura 15 - Média histórica e DPP do trimestre de maior precipitação pluviométrica na estação de São José do Egito-PE.



Fonte: A autora (2020).

A seguir tem-se a precipitação total anual da estação de São José do Egito-PE.

Figura 16 - Média histórica anual e DPP da estação de São José do Egito-PE.

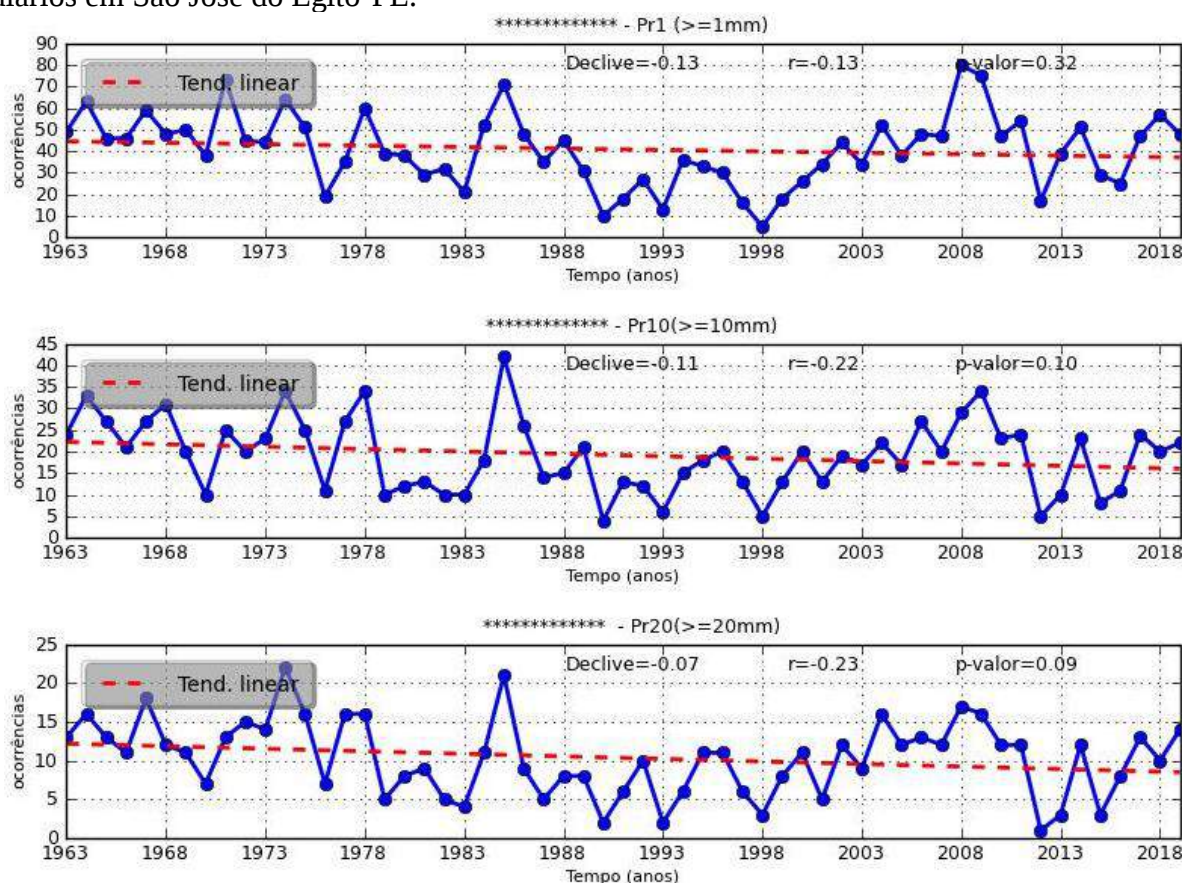


Fonte: A autora (2020).

A precipitação total anual da estação de São José do Egito-PE teve uma média de cerca de 627.7mm, e uma tendência de diminuição das chuvas a partir de meados da década de 1990, demonstrado pelo desvio padrão (DPP), sem, contudo, ser significativa, sendo o declive de -0.01, o r de -0.15 (correlação negativa) e o p -valor de 0.280.

Posteriormente, elaborou-se a estimativa de dias com chuva iguais ou menores que 1mm ($\Rightarrow$ 1mm), dias com chuvas iguais ou menores que 10mm ($\Rightarrow$ 10mm) e dias com chuvas iguais ou menores do que 20mm diários ($\Rightarrow$ 20mm) em São José do Egito-PE (Figura 17).

Figura 17 - Dias com chuva $\Rightarrow$ 1 mm, dias com chuva $\Rightarrow$ 10 mm e dias com chuva $\Rightarrow$ 20 mm diários em São José do Egito-PE.



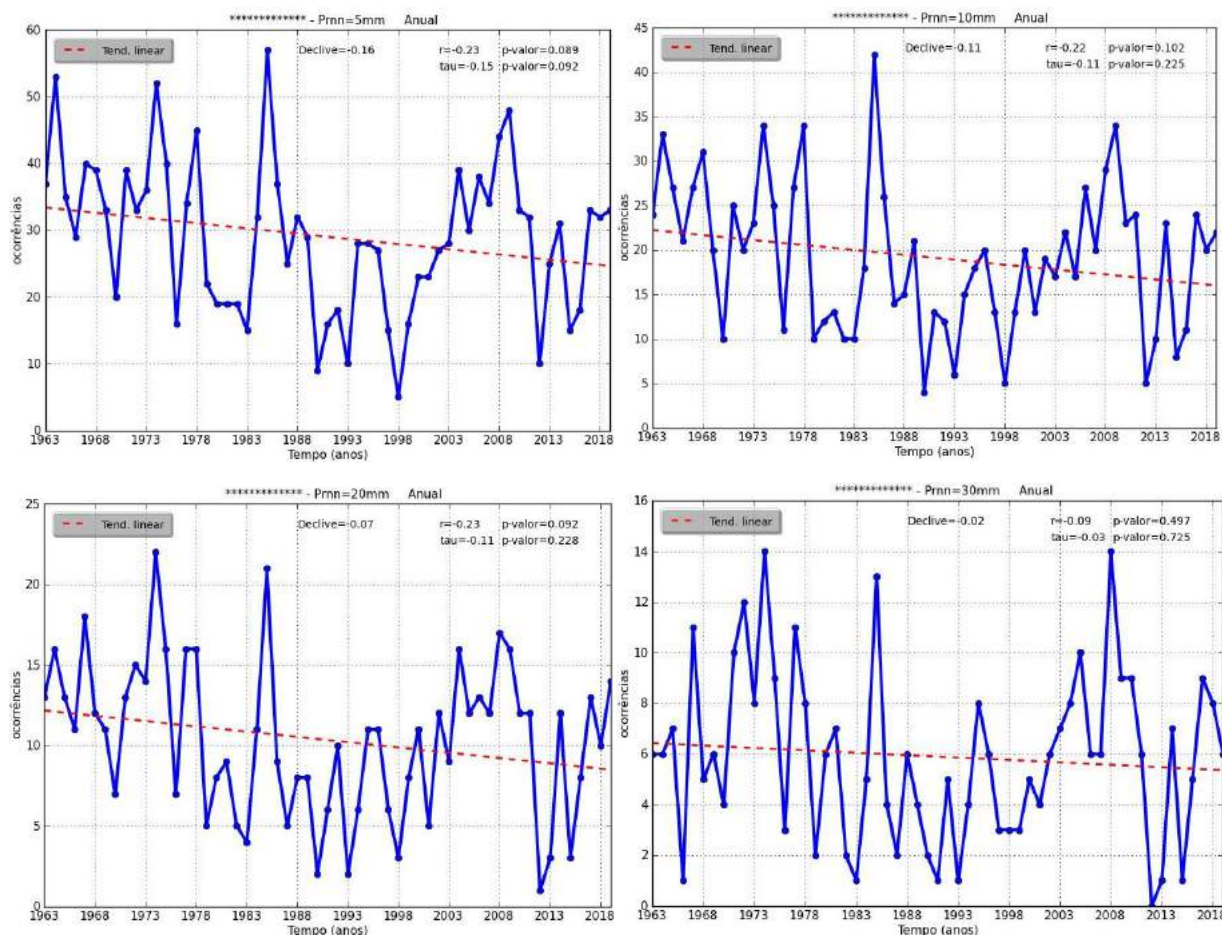
Fonte: A autora (2020).

Como pôde ser observado, os dias com chuva $\Rightarrow$ 1mm apresentaram tendência linear negativa, ou seja, uma ligeira diminuição das precipitações maiores ou iguais a 1mm. O P -valor foi de 0.32, o que indica que a probabilidade de significância desse resultado não foi estatisticamente significativa. Os dias com chuva iguais ou superiores a 10mm também tiveram uma tendência de diminuição ao longo dos anos, apresentando um nível de P -valor 0.10. Já para dias com chuva iguais ou superiores a 20mm ocorreu a tendência de diminuição da frequência

desses episódios com um P-valor de 0.09, e como nas demais, a tendência não foi estatisticamente significativa.

A seguir, será apresentado os volumes de precipitação $\Rightarrow 5\text{mm}$, $\Rightarrow 10\text{mm}$, $\Rightarrow 20\text{mm}$ e $\Rightarrow 30\text{ mm}$ de São José do Egito-PE (Figura 18).

Figura 18 - Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em São José do Egito-PE.



Fonte: A autora (2020).

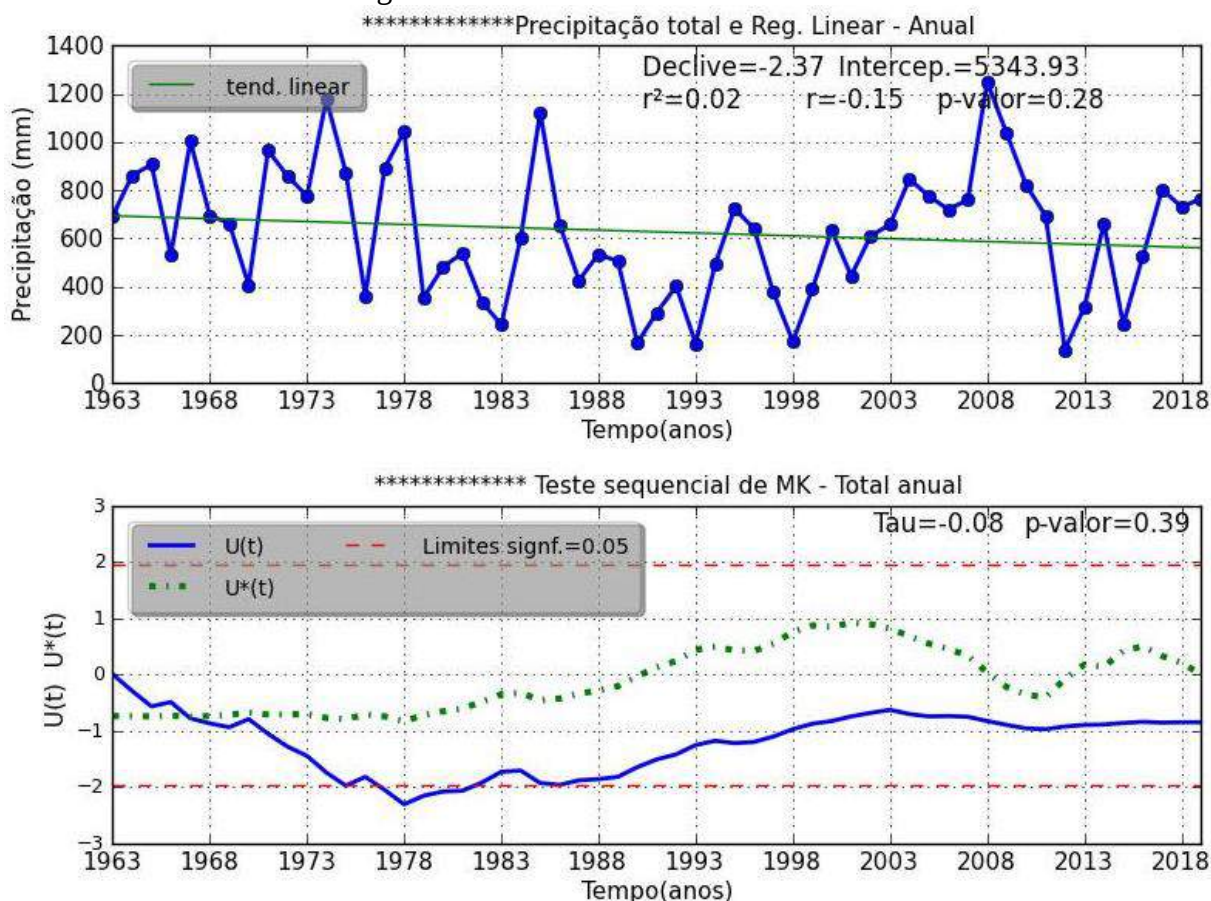
Em todos os cenários observados o volume de precipitação apresenta uma tendência de diminuição, no entanto essa diminuição não é estatisticamente significativa. Fica evidenciado que a precipitação no município de São José do Egito-PE apresentou uma variabilidade, com tendência de diminuição, tanto no volume de chuvas quanto nos extremos de precipitação.

Posteriormente foi analisada a precipitação a 95% de confiança (considerando 52.4mm de precipitação) e a 99% de confiança (considerando 82.8mm de precipitação), ambos apresentando uma correlação linear fraca e P-valor não representativo de significância estatística (Apêndice B).

O gráfico anual da precipitação máxima ocorrida em 1 dia mostrou tendência de aumento em relação ao volume precipitado, porém, sem significância estatística, o que pode ocasionar preocupação em relação aos extremos de precipitação na região de São José do Egito (Apêndice C).

A Regressão Linear, com base na precipitação total, e o Teste Sequencial de Mann-Kendall para estimar o nível de significância estatística e o tipo de tendência nas séries de precipitação anual de São José do Egito-PE pode ser visualizada na Figura 19. A Regressão Linear apresentou tendência de queda (declive de -2.37), todavia não apresenta tendência significativa (p-valor = 0.28). No Teste Sequencial de Mann-Kendall, a curva estatística $U(t)$ e o seu inverso, a estatística $U^*(t)$ se cruzam em meados da década de 1960, dentro do intervalo de confiança $1,96 < u(t) < 1,96$ (1,96 correspondendo $\alpha = 0,05$). No entanto só cruza o limite de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$) em meados da década de 1970, por essa razão a série histórica não apresentou tendência significativa (p-valor = 0.39).

Figura 19 - Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963-2019 em São José do Egito-PE.



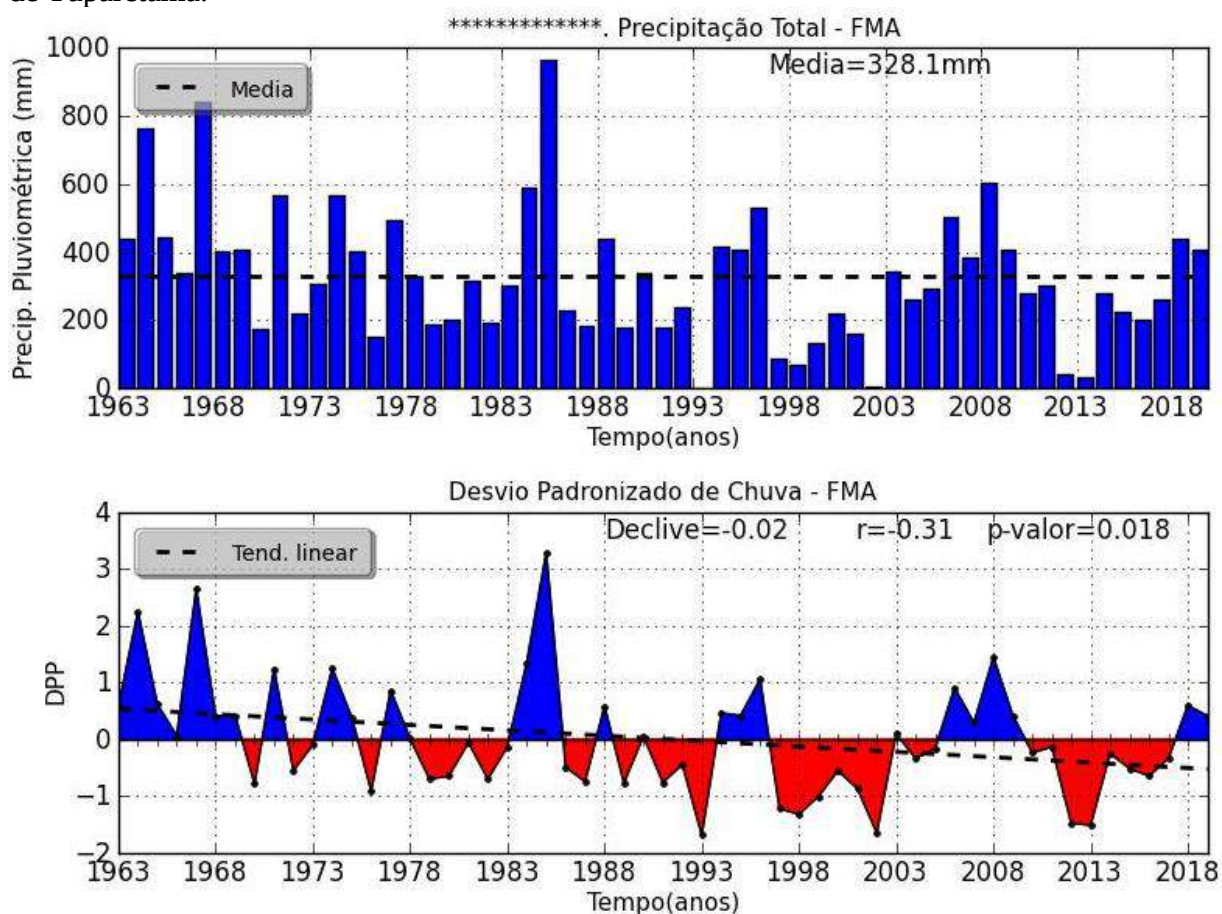
Fonte: A autora (2020).

4.1.3.3 Análise de tendência climática no município de Tuparetama-PE

Foi analisada a climatologia mensal e trimestral da precipitação pluviométrica, para identificar os períodos secos e chuvosos da estação de Tuparetama, de 1963 a 2019. A média mensal da precipitação pluviométrica identificou o mês de abril como o mais chuvoso, embora a precipitação no mês de março também seja considerável, e o trimestre correspondente a fevereiro-março-abril é o mais chuvoso no município (Apêndice A).

A precipitação total no trimestre mais chuvoso (FMA) teve uma média de cerca de 328.1mm, e uma tendência de diminuição das chuvas demonstrado pelo desvio padrão (DPP) a partir de meados da década de 1990, com significância, sendo o declive de -0.02, o r de -0.31 (correlação negativa) e o p -valor de 0.018 (Figura 20).

Figura 20 - Média histórica e DPP do trimestre de maior precipitação pluviométrica na estação de Tuparetama.



Fonte: A autora (2020).

Foram avaliadas a média, mediana e desvio padrão mensal com base na densidade das chuvas da estação de Tuparetama, e observa-se que o mês de abril apresenta a maior média de chuvas na estação (Tabela 6).

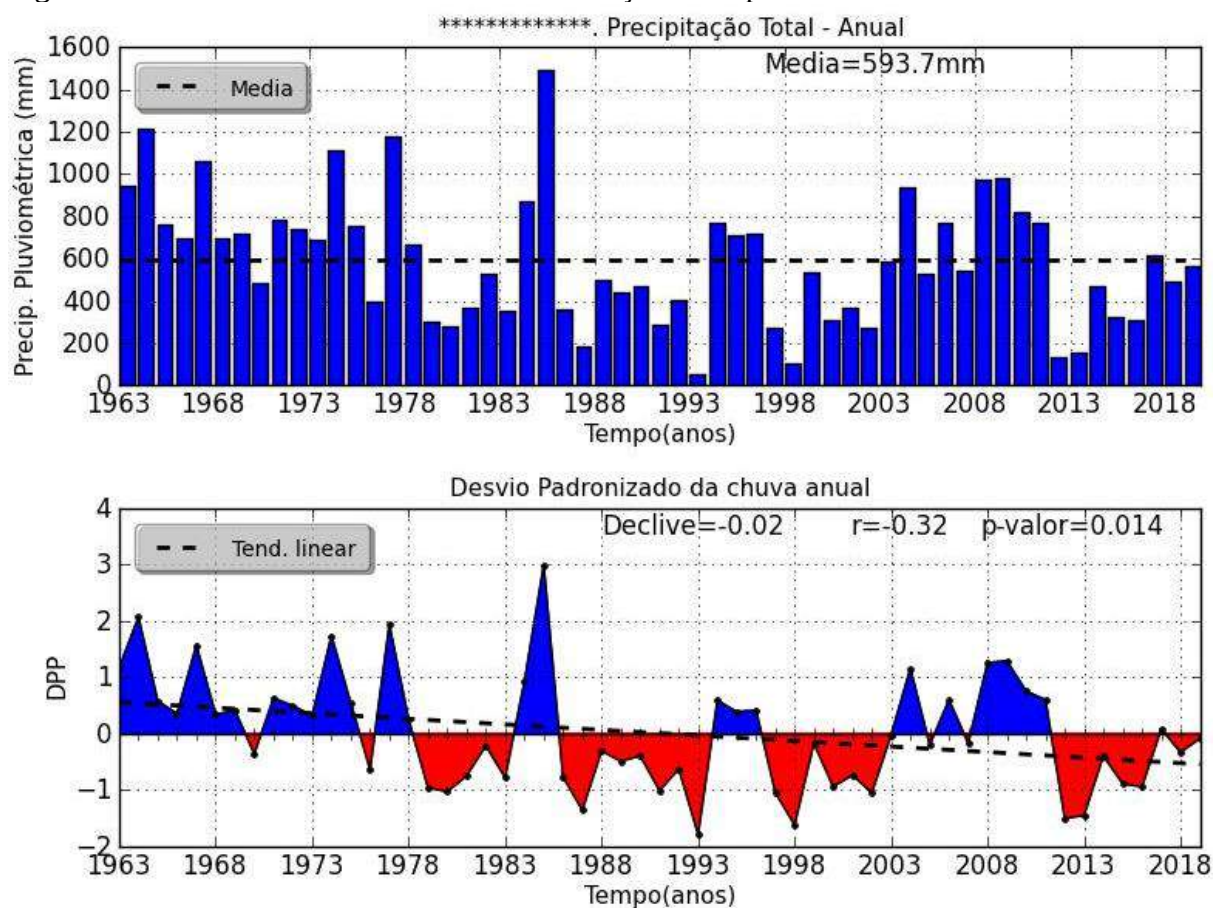
Tabela 6 - Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade em Tuparetama

TUPARETAMA	Média	Mediana	Desvio Padrão
Janeiro	64.4	37.3	80.3
Fevereiro	73.6	63.7	60
Março	124.8	110.8	91.7
Abril	129.6	94.3	111.6
Maio	66.2	39.3	66.4
Junho	40.6	23	47
Julho	29.1	18	40.6
Agosto	9.9	0	22.9
Setembro	2.4	0	5.8
Outubro	10.4	0	28.8
Novembro	11.5	0	22.3
Dezembro	31.2	10.5	63.6

Fonte: A autora (2020).

A seguir tem-se a precipitação total anual da estação de Tuparetama-PE que teve uma média de cerca de 693.7mm, e uma tendência de diminuição das chuvas significativa, sendo o declive de -0.02, o r de -0.32 (correlação negativa) e o p-valor de 0.014 (Figura 21).

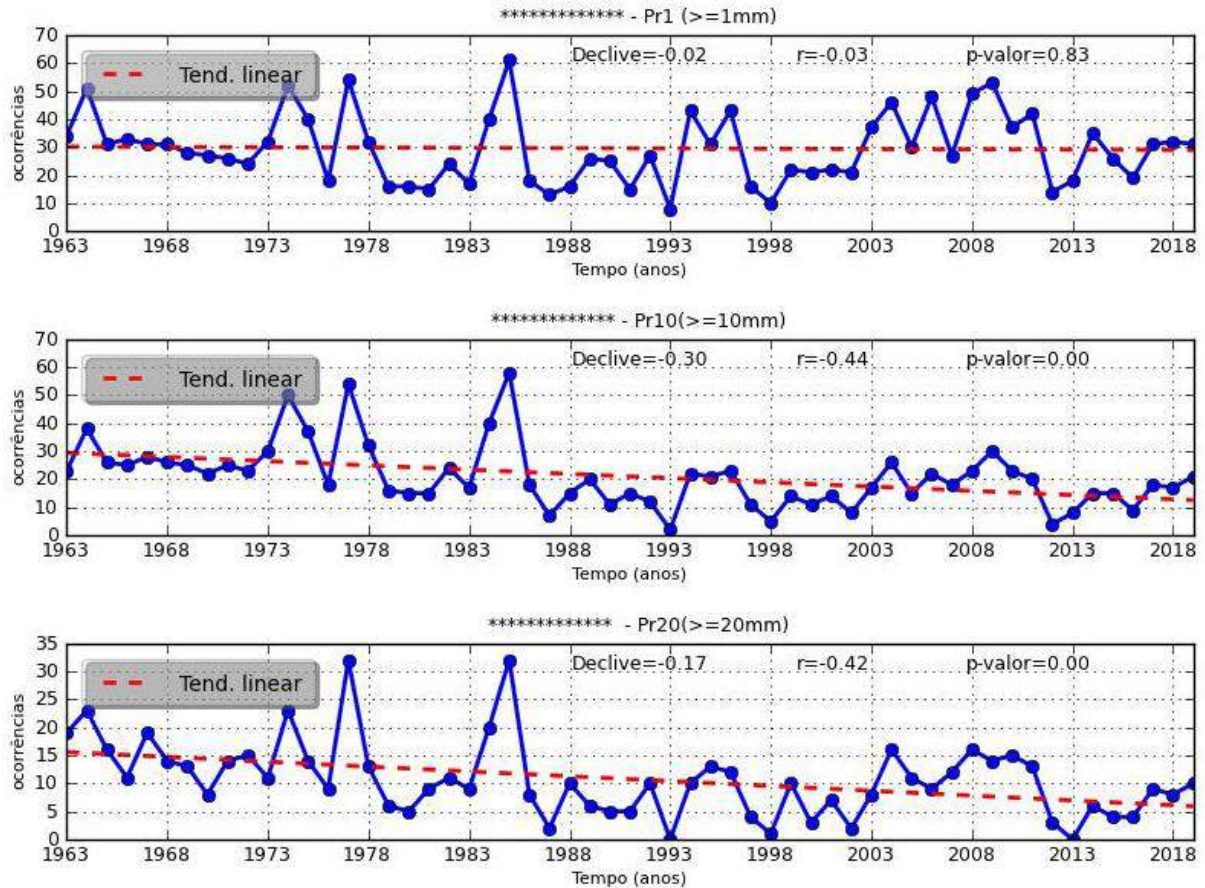
Figura 21 - Média histórica anual e DPP da estação de Tuparetama-PE.



Fonte: A autora (2020).

Posteriormente, elaborou-se a estimativa de dias com chuva iguais ou menores que 1mm ($\Rightarrow 1\text{mm}$), dias com chuvas iguais ou menores que 10mm ($\Rightarrow 10\text{mm}$) e dias com chuvas iguais ou menores do que 20mm diários ($\Rightarrow 20\text{mm}$) em Tuparetama (Figura 22).

Figura 22 - Dias com chuva $\Rightarrow 1\text{ mm}$, dias com chuva $\Rightarrow 10\text{ mm}$ e dias com chuva $\Rightarrow 20\text{ mm}$ diários em Tuparetama-PE.



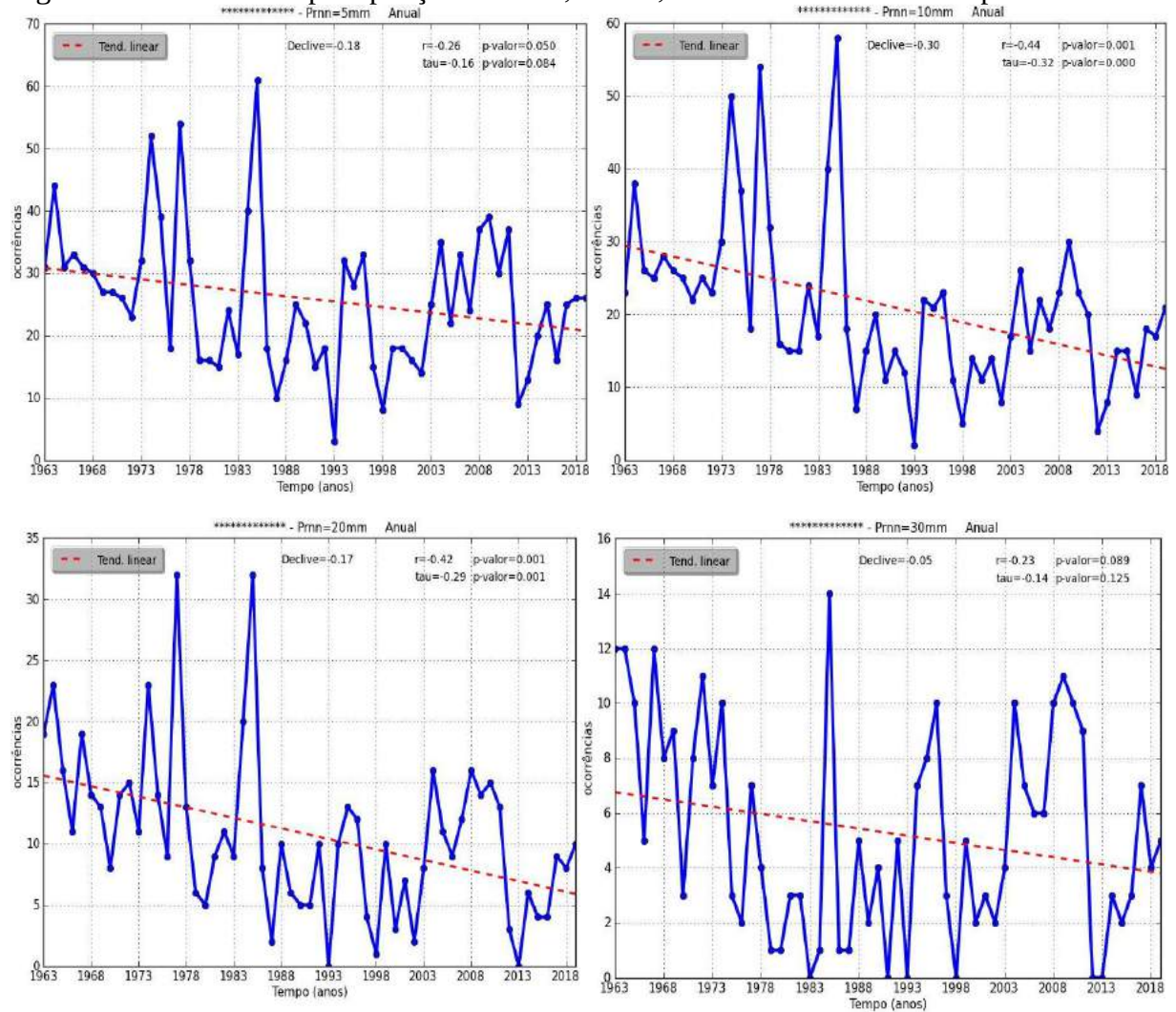
Fonte: A autora (2020).

Como pôde ser observado, os dias com chuva $\Rightarrow 1\text{mm}$ apresentaram tendência linear negativa, ou seja, uma ligeira diminuição das precipitações maiores ou iguais a 1mm. O P-valor foi de 0.83, o que indica que a probabilidade de significância desse resultado não foi estatisticamente significativa.

Os dias com chuva iguais ou superiores a 10mm tiveram uma tendência de diminuição ao longo dos anos, apresentando um nível de P-valor = 0.00, portanto, com forte significância estatística, sugerindo que as chuvas acima de 10mm e 20mm são representativas da precipitação na região do que as chuvas abaixo desse corte, que não apresentam tendência significativa.

A seguir, será apresentado os volumes de precipitação $\geq 5\text{mm}$, e $\geq 10\text{mm}$, $\geq 20\text{mm}$ e $\geq 30\text{mm}$ de Tuparetama, onde o volume de chuvas entre 10 e 20mm anuais apresentam tendência de queda e possuem forte significância estatística (Figura 23).

Figura 23 - Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Tuparetama-PE.



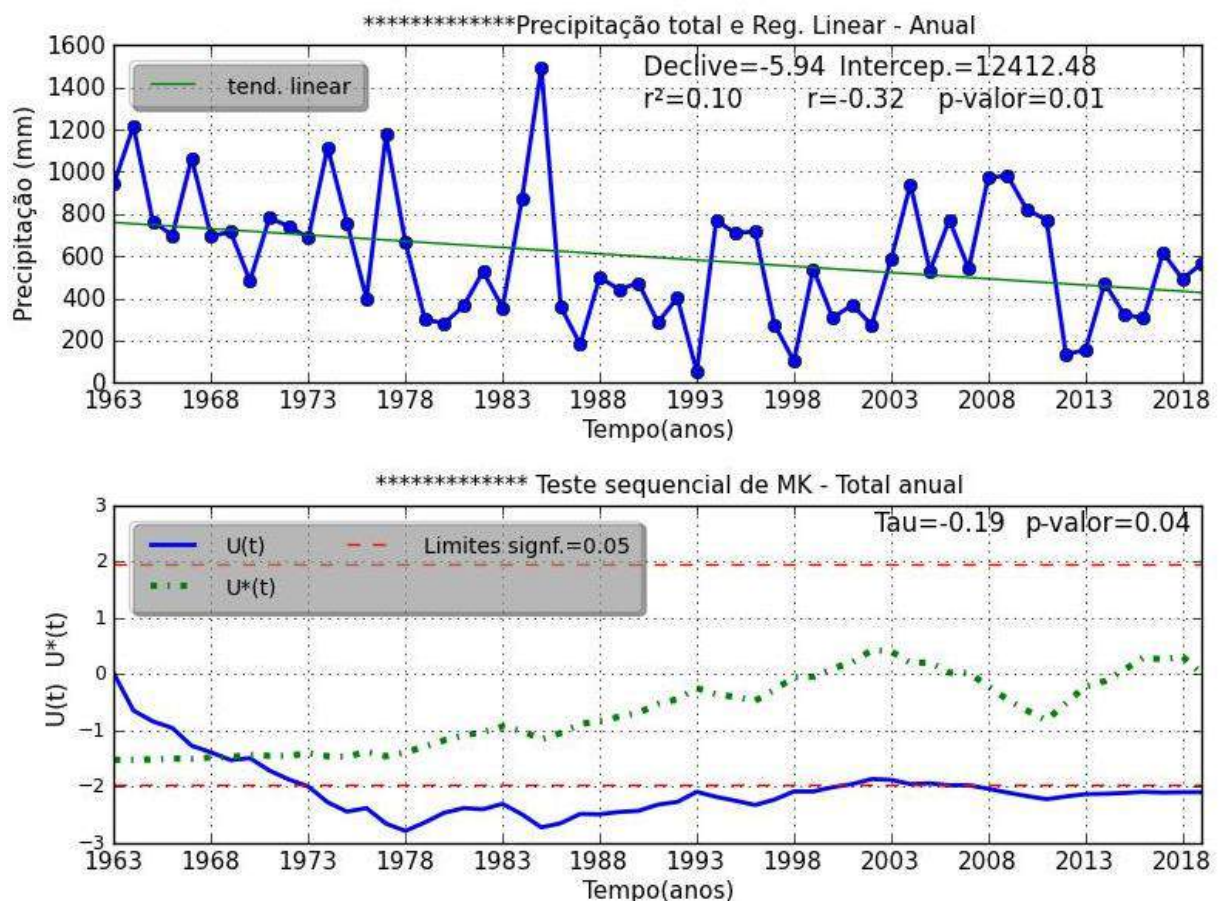
Fonte: A autora (2020).

Posteriormente foi analisada a precipitação a 95% de confiança (considerando 56.8mm de precipitação) e a 99% de confiança (considerando 90.7mm de precipitação), ambos apresentando uma correlação linear fraca e P-valor não representativo de significância estatística (Apêndice B).

Foi também elaborado o gráfico anual da precipitação máxima ocorrida em 1 dia em Tuparetama, que mostrou tendência de aumento em relação ao volume precipitado, porém, sem significância estatística (Apêndice C).

A Figura 24 mostra a precipitação total, regressão linear anual e Teste Sequencial de Mann-Kendall em Tuparetama-PE. A precipitação total e regressão linear anual representaram tendência significativa de queda (declive de -5.94 e p-valor = 0.01). O Teste Sequencial de Mann-Kendall, a curva estatística $U(t)$ e o seu inverso, a estatística $U^*(t)$ se cruzam no final da década de 1960, dentro do intervalo de confiança $1,96 < u(t) < 1,96$ ($1,96$ correspondendo a $\alpha = 0,05$), e cruza o limite de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$), em meados da década de 1970, mostrando tendência significativa (p-valor = 0.04).

Figura 24 - Precipitação Total, Regressão Linear anual e Teste Sequencial de Mann-Kendall de 1963-2019 em Tuparetama-PE.

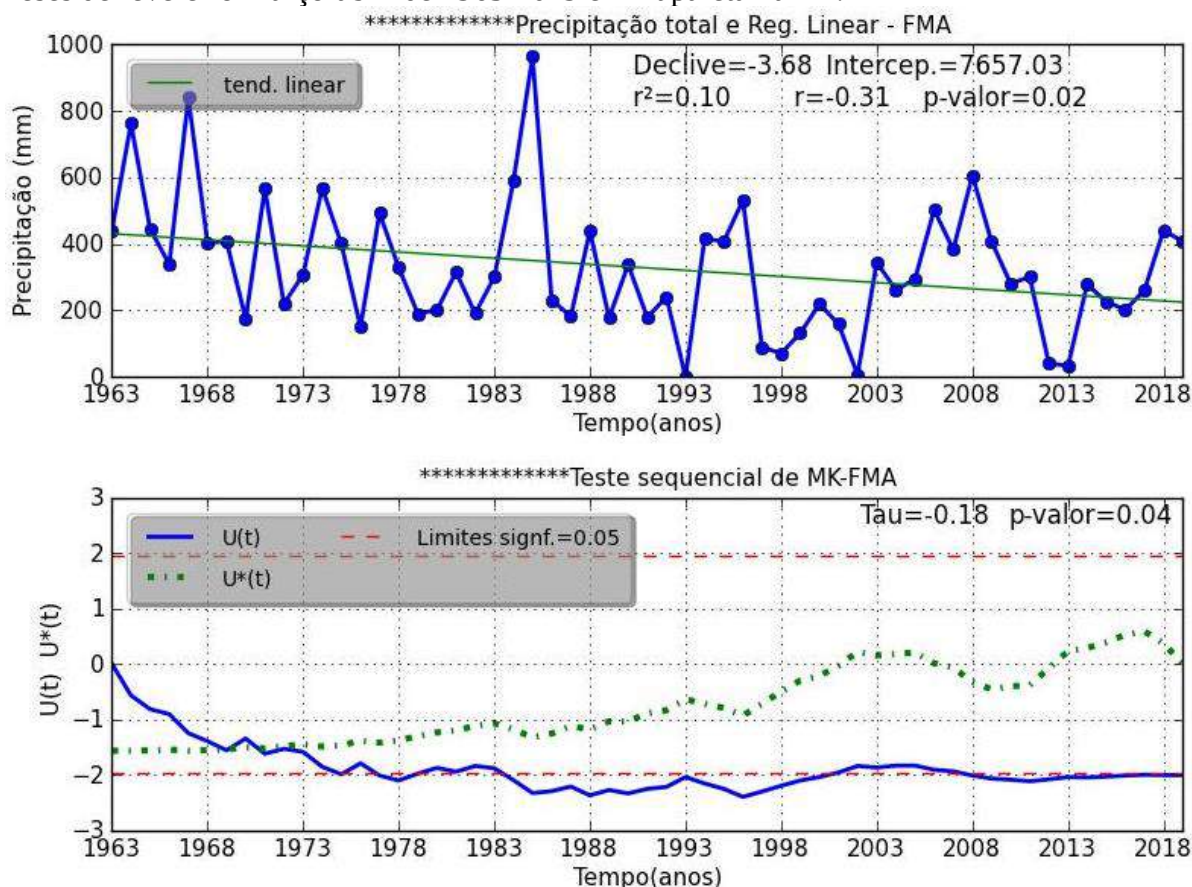


Fonte: A autora (2020).

Em razão de que em Tuparetama a regressão linear e o Teste Sequencial de Mann-Kendall terem apresentado tendência significante de queda da precipitação, houve a elaboração do gráfico de regressão linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall no trimestre mais chuvoso do município de Tuparetama-PE. A Regressão Linear apresentou tendência significativa de queda (declive de -3.68 e p-valor = 0.02).

No Teste Sequencial de Mann-Kendall, a curva estatística $U(t)$ e $U^*(t)$ se cruzam no final da década de 1960, e $U(t)$ cruza o limite de confiança de 95% no final da década de 1970, e, principalmente, nas décadas de 1980 e 1990, mostrando tendência significativa (Figura 25).

Figura 25 - Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall nos meses de fevereiro-março-abril de 1963-2019 em Tuparetama-PE.



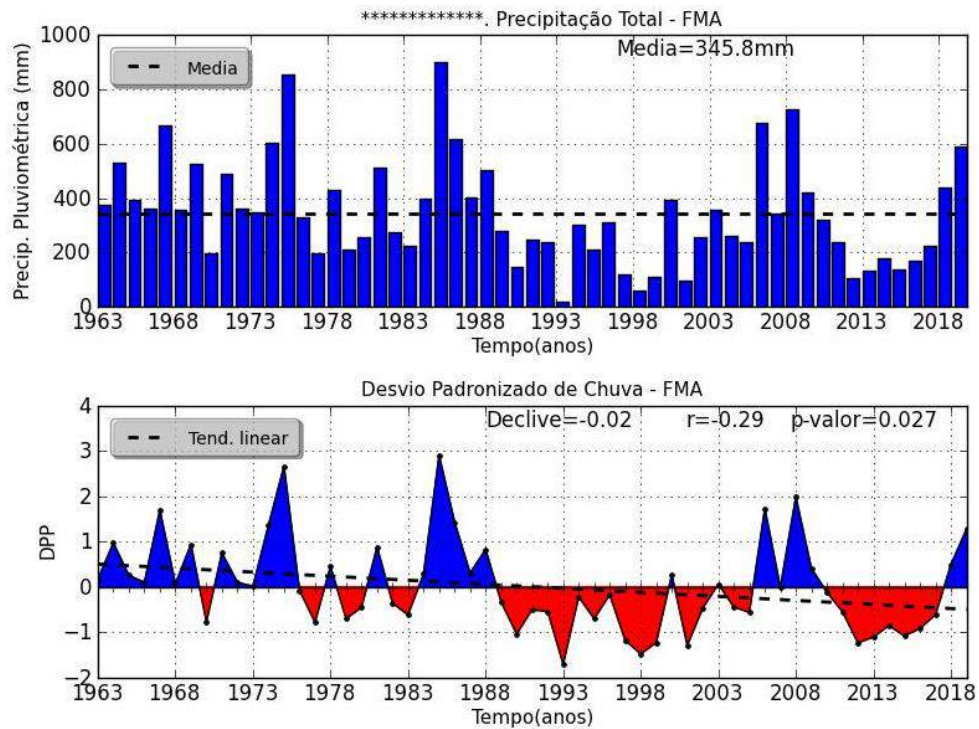
Fonte: A autora (2020).

4.1.3.4 Análise de tendência climática no município de Igaraci-PE.

A climatologia mensal e trimestral da precipitação pluviométrica, identificou o mês de março como o mais chuvoso e o trimestre de fevereiro-março-abril como sendo o mais chuvoso no município na estação de Igaraci, de 1963 a 2019 (Apêndice A).

A análise pluviométrica da estação de Igaraci evidencia que a precipitação na estação tem maior ocorrência nos meses de janeiro a maio. A precipitação total no trimestre mais chuvoso (FMA) teve uma média de cerca de 345.8mm, e uma tendência significante de diminuição das chuvas, sendo o declive de -0.02, o $r = -0.31$ (correlação negativa) e o p -valor de 0.027 (Figura 26).

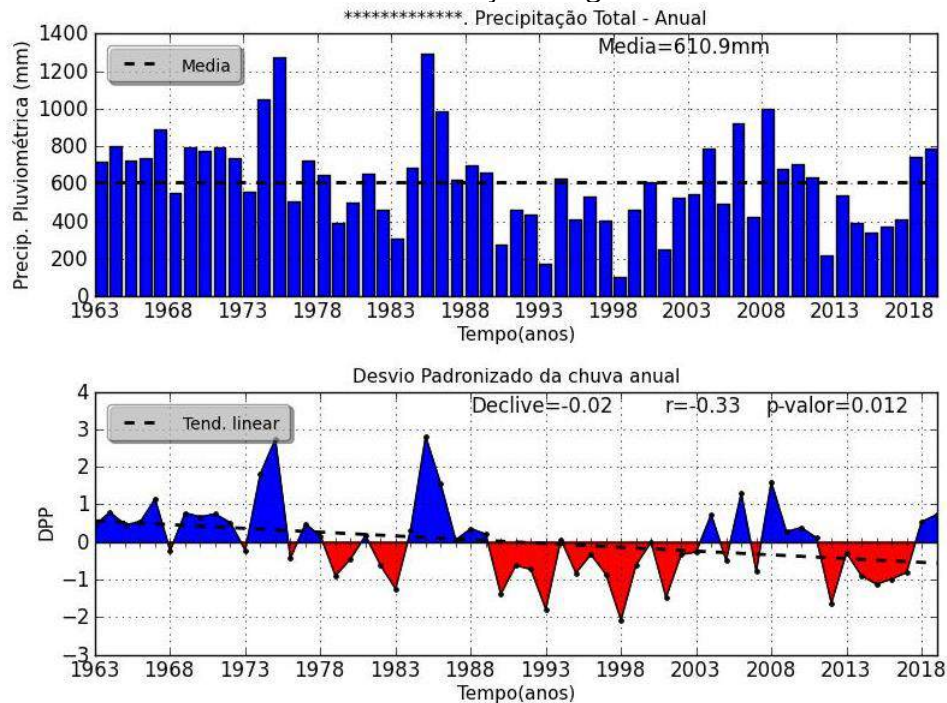
Figura 26: Média histórica do trimestre FMA e DPP da estação de Iguaraci-PE.



Fonte: A autora (2020).

A seguir tem-se a precipitação total anual da estação de Iguaraci-PE, que teve uma média de cerca de 610.9mm, e uma tendência significativa de diminuição das chuvas, sendo o declive de -0.02, o $r=-0.33$ (correlação negativa) e o p-valor de 0.012 (Figura 27).

Figura 27 - Média histórica anual e DPP da estação de Iguaraci-PE.



Fonte: A autora (2020).

Foram avaliadas a média, mediana e desvio padrão mensal com base na densidade das chuvas da estação de Iguaraci-PE, e observa-se que o mês de março apresenta a maior média de chuvas na estação (Tabela 7).

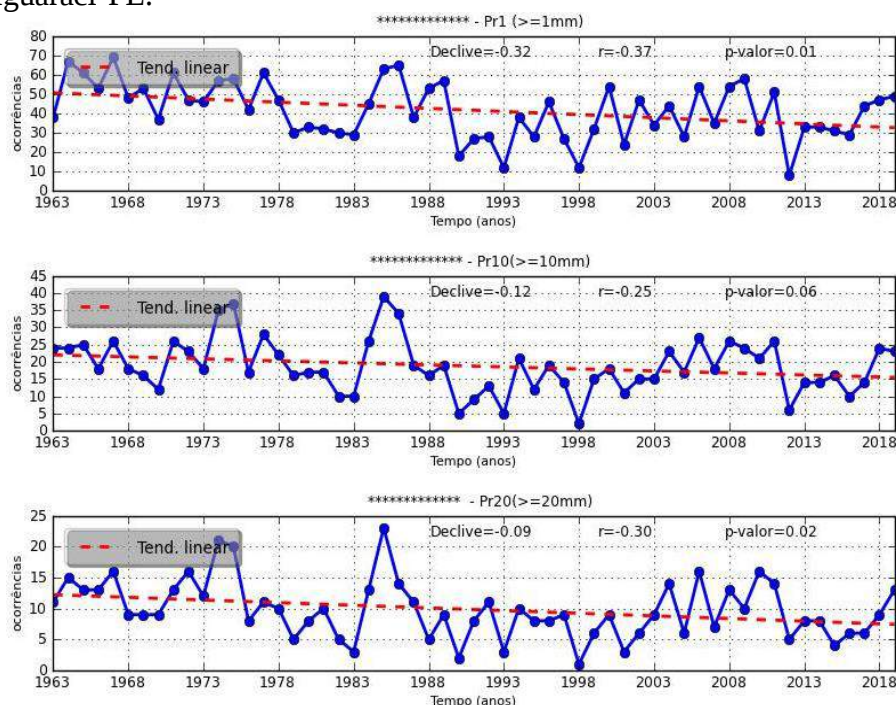
Tabela 7 - Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade em Iguaraci-PE

IGUARACI	Média	Mediana	Desvio Padrão
Janeiro	65.3	43.3	74
Fevereiro	96.3	86.5	73
Março	130.6	100.3	101
Abril	118.9	92.1	90.8
Mai	67	58.6	48.2
Junho	31.2	26.5	8.8
Julho	26.5	18.2	26.9
Agosto	8.8	1.5	14.8
Setembro	6.1	0	10.2
Outubro	12.1	1.2	24.5
Novembro	17	4.9	23.7
Dezembro	31.2	13	41.1

Fonte: A autora (2020).

Posteriormente, elaborou-se a estimativa de dias com chuva iguais ou menores que 1mm ($\Rightarrow 1\text{mm}$), dias com chuvas iguais ou menores que 10mm ($\Rightarrow 10\text{mm}$) e dias com chuvas iguais ou menores do que 20mm diários ($\Rightarrow 20\text{mm}$) em Iguaraci-PE (Figura 28).

Figura 28 - Dias com chuva $\Rightarrow 1\text{ mm}$, dias com chuva $\Rightarrow 10\text{ mm}$ e dias com chuva $\Rightarrow 20\text{ mm}$ diários em Iguaraci-PE.



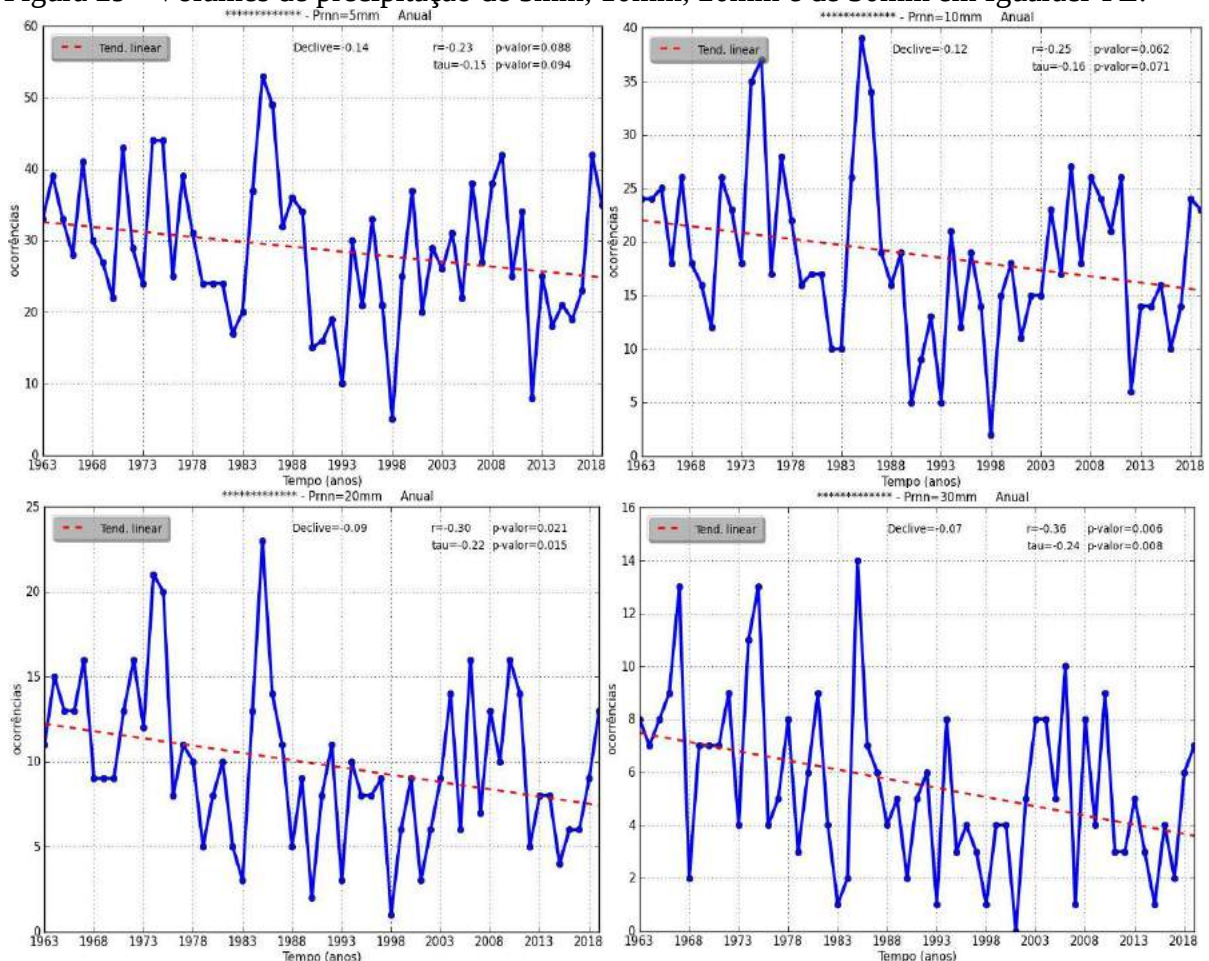
Fonte: A autora (2020).

Observou-se que os dias com chuva $\Rightarrow 1\text{mm}$ apresentaram tendência linear negativa (declive = -0.32 e $r = -0.37$), com diminuição das precipitações maiores ou iguais a 1mm . O P-valor foi de 0.01 , o que indica que a probabilidade de significância desse resultado foi estatisticamente significativa.

Os dias com chuva $\Rightarrow 10\text{mm}$ também tiveram uma tendência de diminuição ao longo dos anos (declive = -0.12 e $r = -0.25$), apresentando um nível de P-valor = 0.06 . Já para dias com chuva iguais ou superiores a 20mm ocorreu a tendência de diminuição da ocorrência desses episódios (declive = -0.09 e $r = -0.30$), com um P-valor = 0.02 , e como nas demais, a tendência foi estatisticamente significativa.

A seguir, serão apresentados os volumes de precipitação $\Rightarrow 5\text{mm}$, e $\Rightarrow 10\text{mm}$, $\Rightarrow 20\text{mm}$ e $\Rightarrow 30\text{mm}$ de Iguaraci-PE (Figura 29).

Figura 29 - Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Iguaraci-PE.



Fonte: A autora (2020).

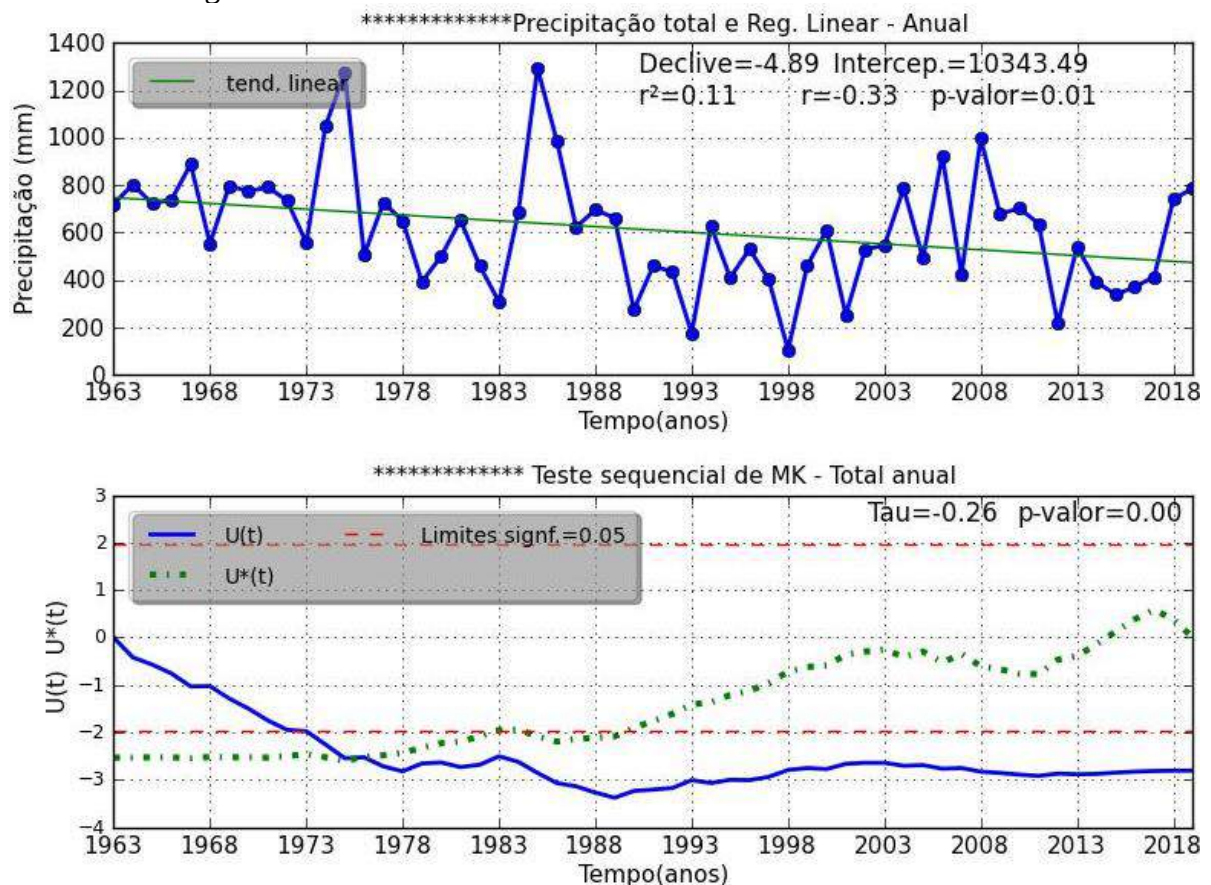
Em todos os cenários observados o volume de precipitação apresenta uma tendência de diminuição, sendo os volumes de precipitação de 20mm e 30mm os mais significantes

estatisticamente. Fica evidenciado, pela figura anterior, que a precipitação no município de Iguaraci-PE apresentou uma variabilidade, com tendência de diminuição, tanto no volume de chuvas quanto nos extremos de precipitação (Figura 41).

Posteriormente foi analisada a precipitação a 95% de confiança (considerando 48.7mm de precipitação) e a 99% de confiança (considerando 85mm de precipitação), ambos apresentando uma correlação linear fraca, tendência de diminuição da precipitação e P-valor não representativo de significância estatística (Apêndice B) e a precipitação máxima em 1 dia na estação de Iguaraci-PE com tendência de queda não estatisticamente significativa (Apêndice C).

A Figura 30 mostra a Regressão Linear Teste Sequencial de Mann-Kendall em Iguaraci-PE. A regressão linear apresentou tendência significativa de queda (declive de -4.89 e p-valor = 0.01). No Teste Sequencial de Mann-Kendall, a curva estatística $U(t)$ e o seu inverso, a estatística $U^*(t)$ se cruzam em meados da década de 1970, dentro do intervalo de confiança $1,96 < u(t) < 1,96$ (1,96 correspondendo a $\alpha = 0,05$), e cruza o limite de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$), mostrando tendência significativa (p-valor = 0.04).

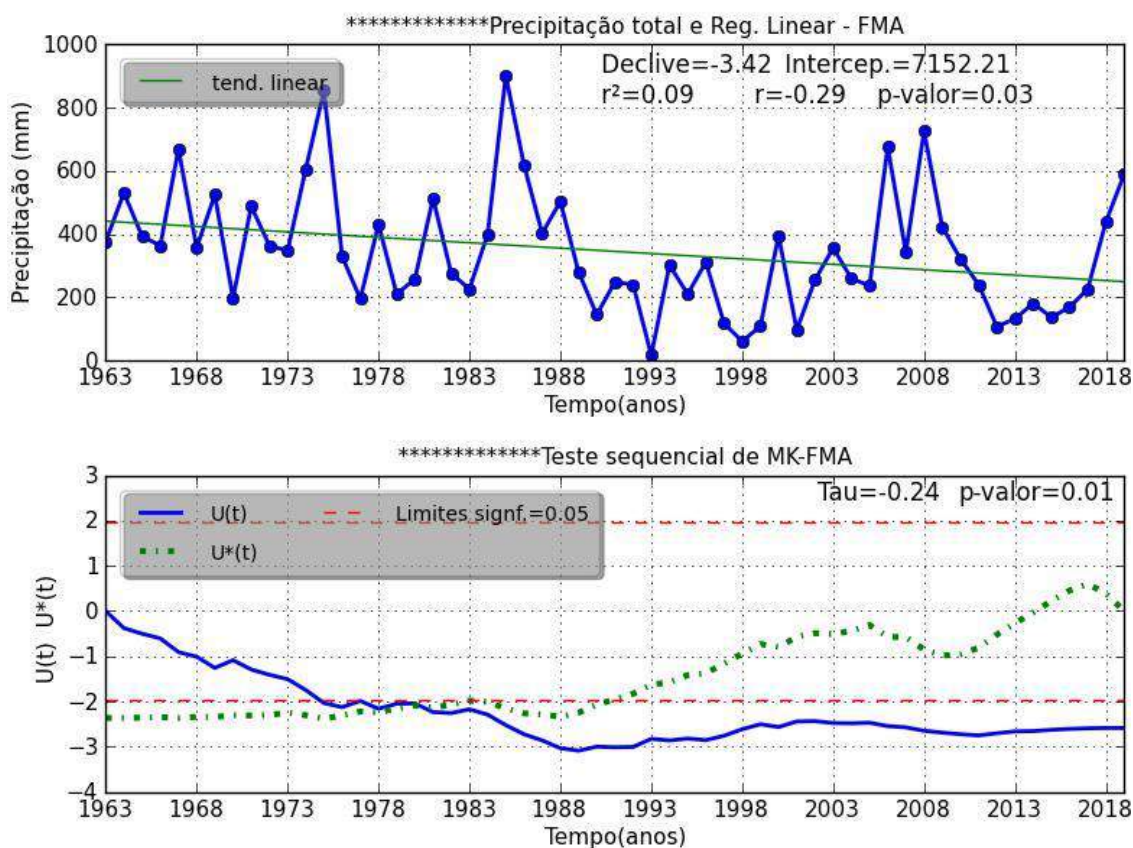
Figura 30 - Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963-2019 em Iguaraci-PE.



Fonte: A autora (2020).

Em razão de em Iguaraci a regressão linear e o Teste Sequencial de Mann-Kendall terem apresentado tendência significativa de queda da precipitação, houve a elaboração do gráfico de regressão linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall no trimestre mais chuvoso do município (Figura 31).

Figura 31 - Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall nos meses de fevereiro-março-abril de 1963-2019 em Iguaraci-PE.



Fonte: A autora (2020).

A Regressão Linear apresentou tendência significativa de queda (declive = -3.42, $r = -0.29$ e p-valor = 0.03). No Teste Sequencial de Mann-Kendall, a curva estatística $U(t)$ e $U^*(t)$ se cruzam no final da década de 1970, e $U(t)$ também cruza o limite de confiança de 95% no final da década de 1970, mostrando tendência significativa (p-valor = 0.01).

4.1.3.5 Análise de tendência climática no município de Ibimirim

A climatologia mensal e trimestral da precipitação pluviométrica identificou os períodos secos e chuvosos da estação de Ibimirim de 1963 a 2019 (Apêndice A), evidenciando que a precipitação tem maior ocorrência nos meses de janeiro a abril. Posteriormente foi avaliada a média, mediana e desvio padrão com base na quantidade e densidade das chuvas mensais na estação de Ibimirim, sendo o mês de março o mais chuvoso de 1963 a 2019 (Tabela 8).

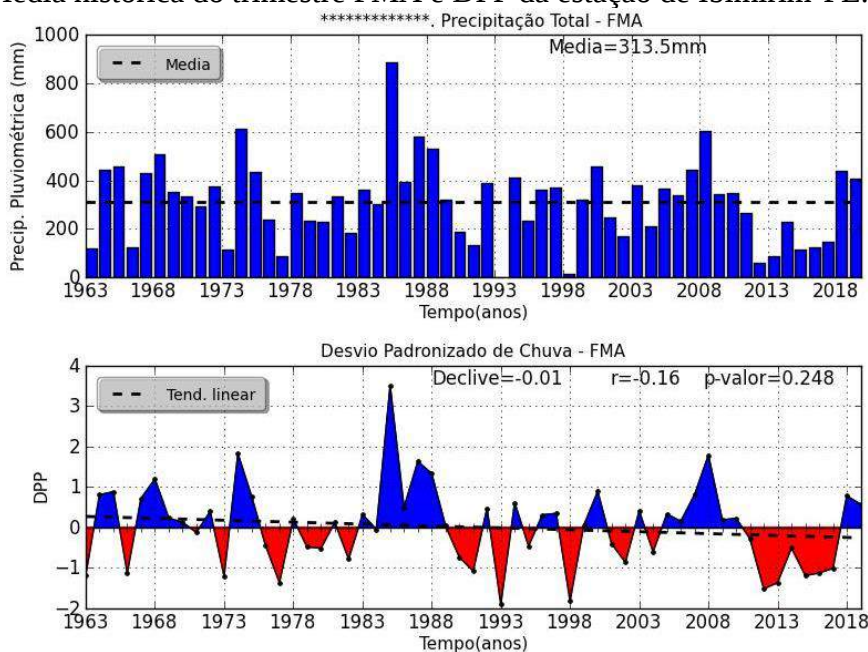
Tabela 8 - Média, mediana e desvio padrão mensal de Ibimirim-PE.

IBIMIRIM	Média	Mediana	Desvio Padrão
Janeiro	52.5	29.6	64.6
Fevereiro	81.8	59	72.4
Março	135.9	103	114.8
Abril	95.8	80	76.3
Mai	69.6	50.6	65
Junho	41.2	29.2	48
Julho	33.5	22	38.4
Agosto	13.2	0	24.4
Setembro	4.9	0	12
Outubro	11.1	0	27.4
Novembro	22	10.2	32.4
Dezembro	39.6	23.6	47.2

Fonte: A autora (2020).

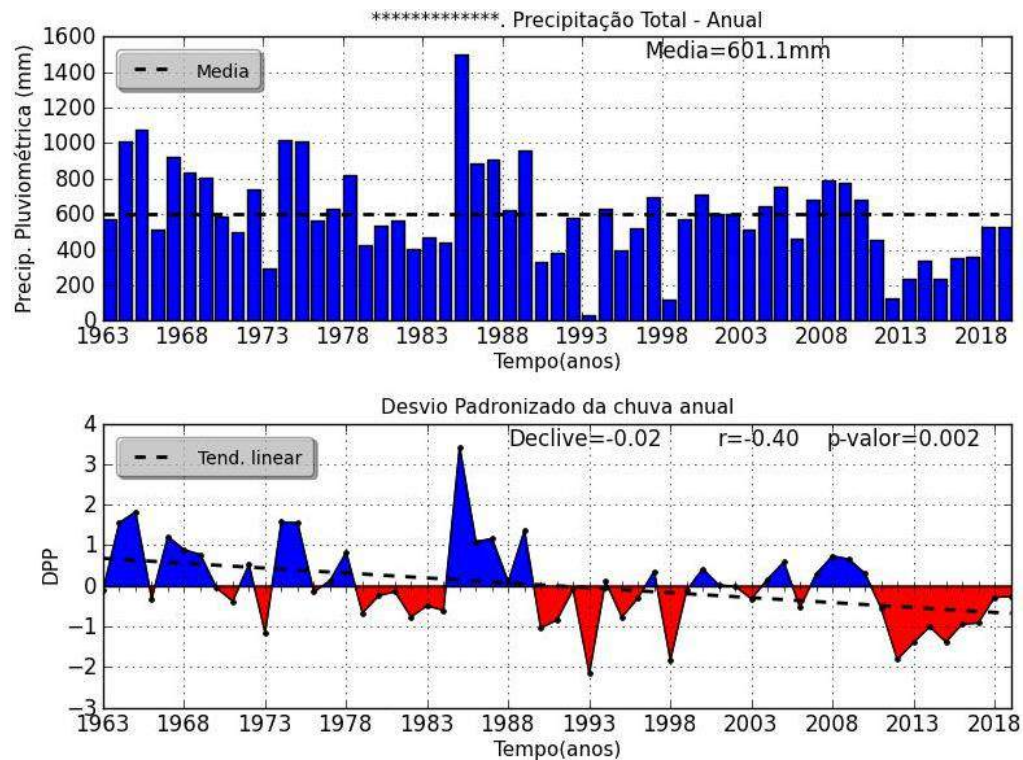
A precipitação total no trimestre mais chuvoso de São José do Egito (FMA) teve uma média de cerca de 313.5mm, e uma tendência de diminuição da precipitação demonstrado pelo desvio padrão (DPP) a partir de meados da década de 1990, contudo sem significância estatística, sendo o declive de 0.01, o $r = -0.16$ (correlação negativa) e o p-valor de 0.248 (Figura 32).

Figura 32 - Média histórica do trimestre FMA e DPP da estação de Ibimirim-PE.



A variação da precipitação pluviométrica no município de Ibimirim também pode ser visualizada observando-se a precipitação total anual, que teve média de 601.1mm e desvio padronizado da chuva anual, com a série apresentando tendência significativa de diminuição (Figura 33).

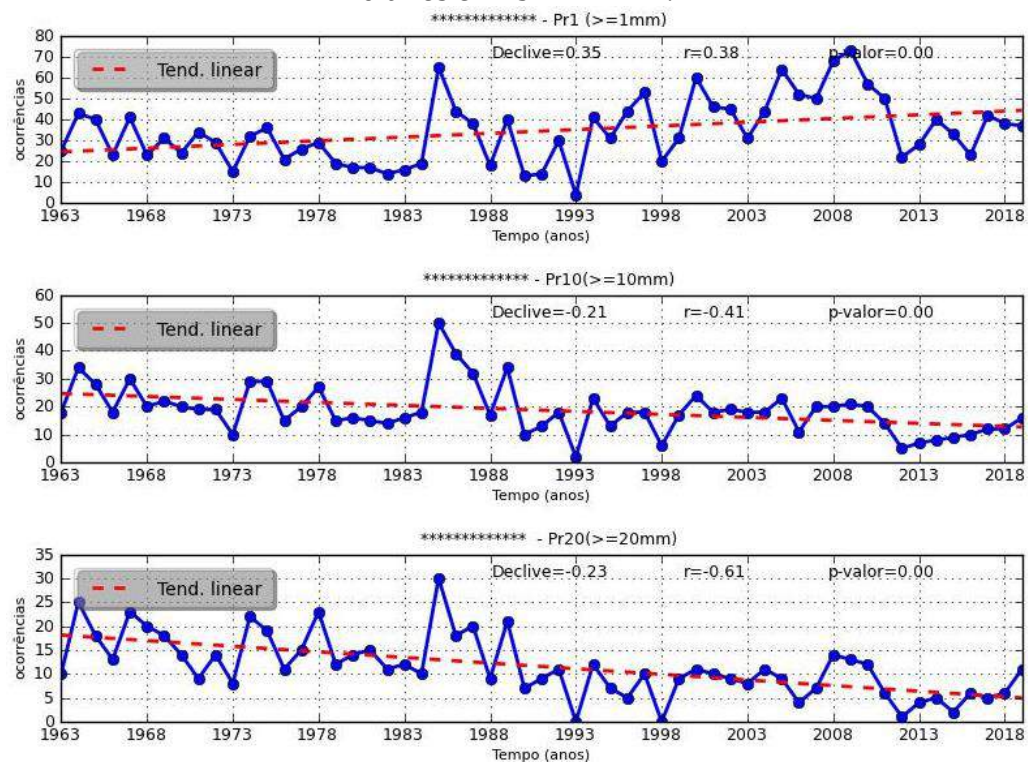
Figura 33 - Precipitação total anual e DPP da estação de Ibimirim-PE.



Fonte: A autora (2020).

Posteriormente, elaborou-se a estimativa da ocorrência de dias com chuva.

Figura 34 - Dias com chuva ≥ 1 mm, dias com chuva ≥ 10 mm e dias com chuva ≥ 20 mm diários em Ibimirim-PE.

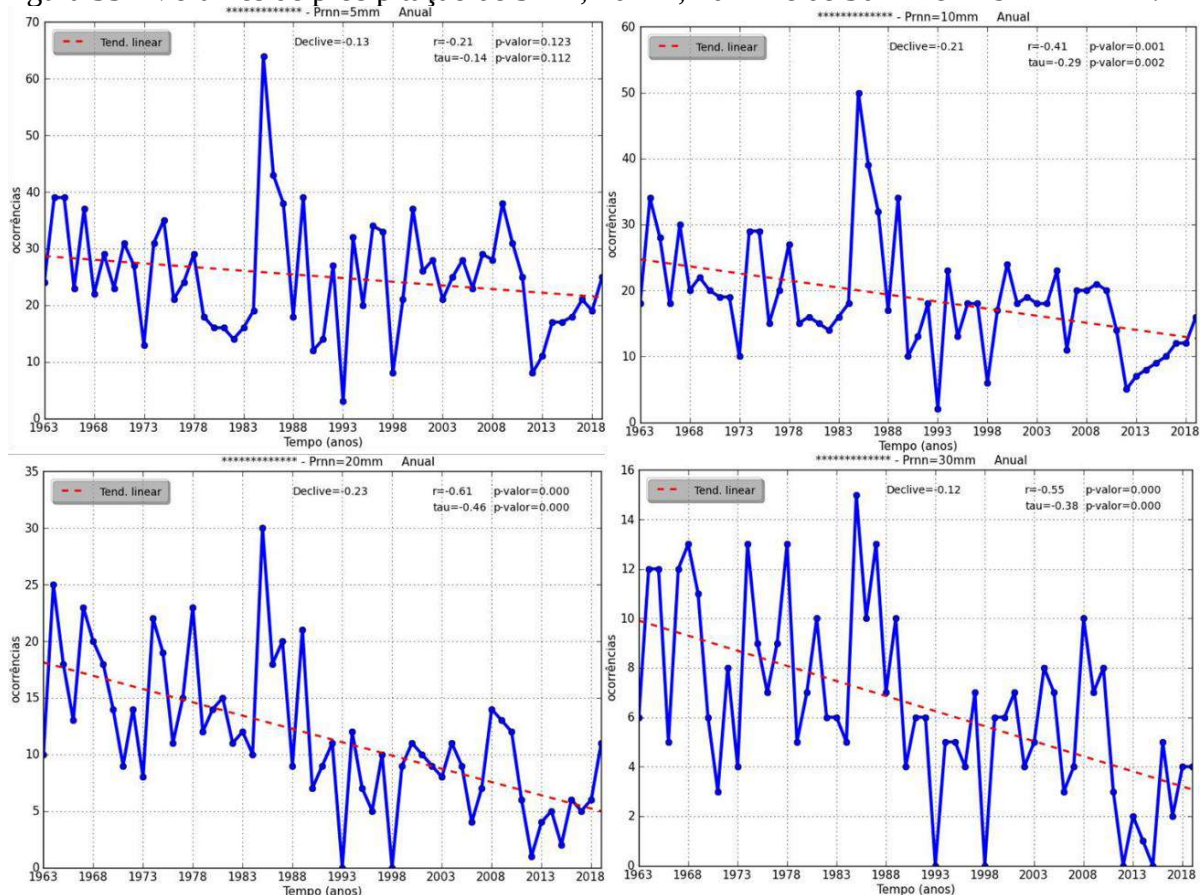


Fonte: A autora (2020).

Observou-se que os dias com chuva $\geq 1\text{mm}$ apresentaram tendência linear positiva (declive = 0.35 e $r = 0.38$), com diminuição das precipitações maiores ou iguais a 1mm. Já a ocorrência de extremos de precipitação de 10 e 20 mm diminui ao longo da série histórica, com o P-valor foi de 0.00, o que indica que a probabilidade de significância desse resultado foi estatisticamente significativa.

A seguir, serão apresentados os volumes de precipitação $\geq 5\text{mm}$, $\geq 10\text{mm}$, $\geq 20\text{mm}$ e $\geq 30\text{mm}$ de Ibimirim-PE. Observa-se que os volumes de precipitação de $\geq 5\text{mm}$ apresentou tendência de diminuição não significativa, enquanto a precipitação $\geq 10\text{mm}$, $\geq 20\text{mm}$ e $\geq 30\text{mm}$ apresentam tendência de diminuição estatisticamente significantes (Figura 35).

Figura 35 - Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Ibimirim -PE.



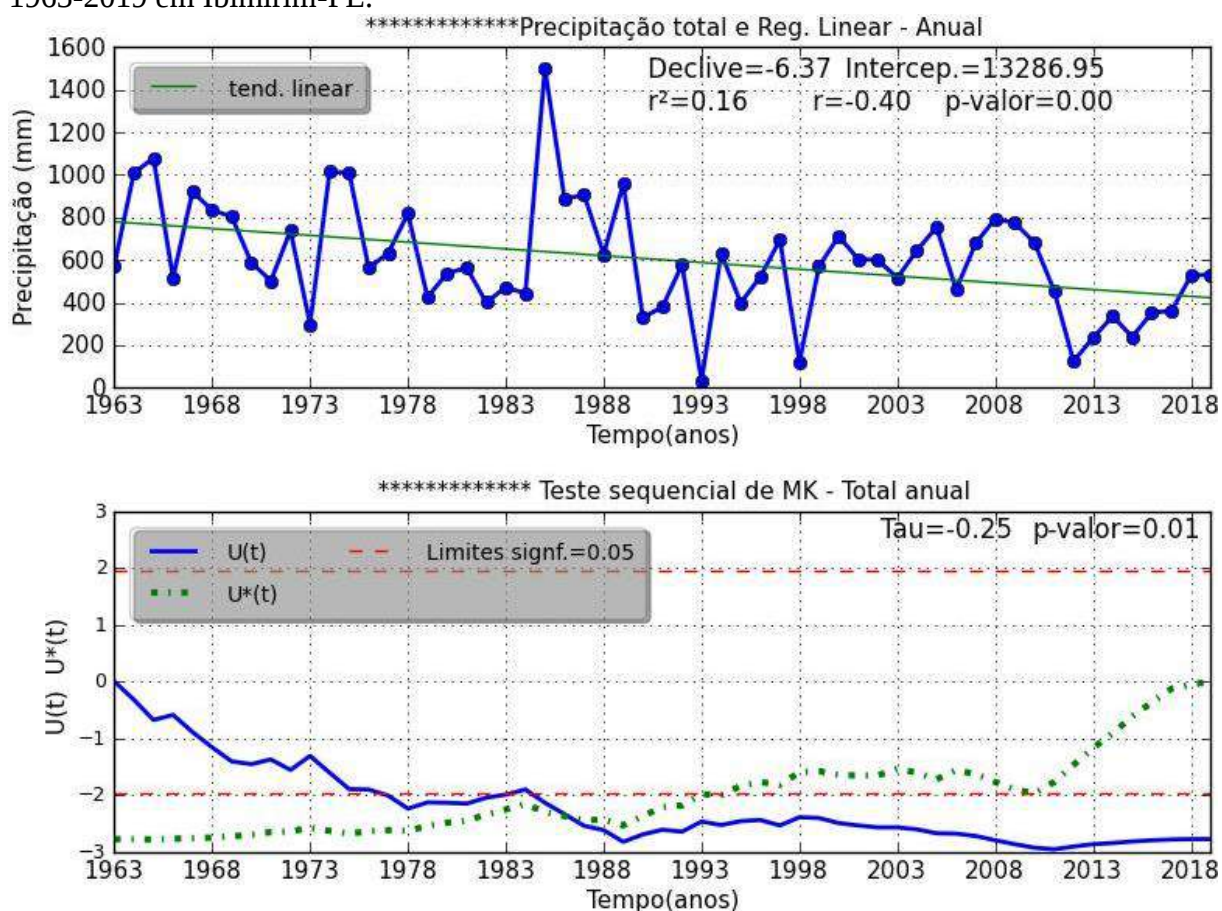
Fonte: A autora (2020).

Posteriormente foi analisada a precipitação a 95% de confiança (considerando 46.2mm de precipitação) e a 99% de confiança (considerando 75.6mm de precipitação), ambos apresentando uma correlação linear fraca, tendência de diminuição da precipitação e P-valor não representativo de significância estatística (Apêndice B). Bem como a precipitação máxima

em 1 dia na estação de Ibimirim-PE com tendência de aumento não estatisticamente significativo (Apêndice C).

A (Figura 36) mostra a Regressão Linear Teste Sequencial de Mann-Kendall em Ibimirim-PE. A regressão linear apresentou tendência significativa de diminuição (declive de -6.37 e p-valor = 0.00). No Teste Sequencial de Mann-Kendall, a curva estatística $U(t)$ e o seu inverso, a estatística $U^*(t)$ se cruzam na década de 1960, dentro do intervalo de confiança $1,96 < u(t) < 1,96$ (1,96 correspondendo a $\alpha = 0,05$), mas não cruza o limite de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$), mostrando que há tendência de diminuição da precipitação, com significância estatística (p-valor = 0.01).

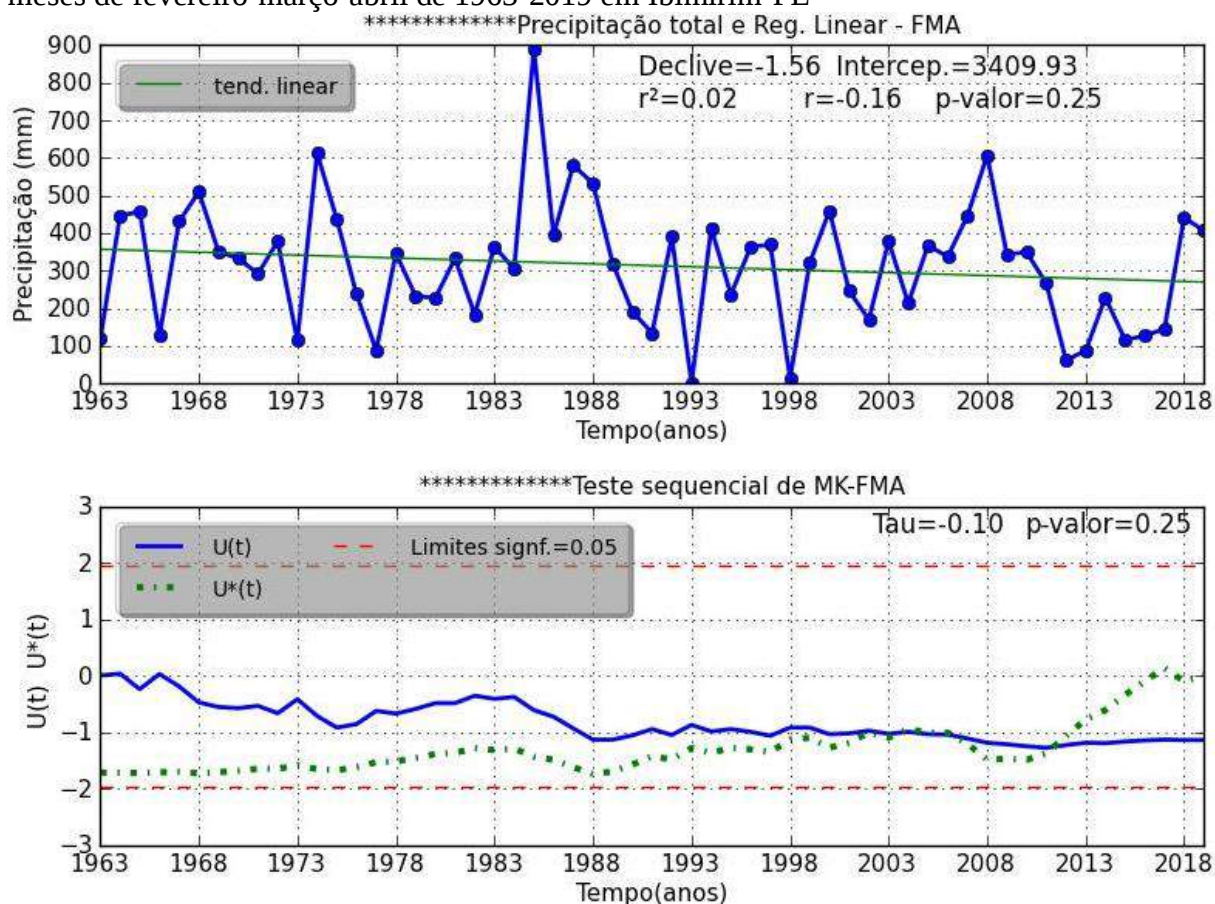
Figura 36 - Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963-2019 em Ibimirim-PE.



Fonte: A autora (2020).

Em razão de que em Ibimirim-PE a precipitação total, regressão linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall terem apresentado tendência significante de queda da precipitação, houve a elaboração do gráfico de regressão linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall no trimestre mais chuvoso do município (Figura 37).

Figura 37 - Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall nos meses de fevereiro-março-abril de 1963-2019 em Ibimirim-PE



Fonte: A autora (2020).

4.1.3.6 Análise de tendência climática no município de Floresta-PE

A climatologia mensal e trimestral da precipitação pluviométrica identificou os períodos secos e chuvosos da estação de Floresta-PE de 1963 a 2019 (Apêndice A), evidenciando uma maior ocorrência da precipitação nos meses de janeiro a abril. A análise pluviométrica da estação de Floresta evidencia maior ocorrência da precipitação nos meses de janeiro a maio. Posteriormente foi avaliada a média, mediana e desvio padrão com base na quantidade e densidade das chuvas mensais na estação de Floresta, sendo o mês de março o mais chuvoso de 1963 a 2019 (Tabela 9).

Tabela 9 - Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade de 1963 a 2019 de Floresta-PE.

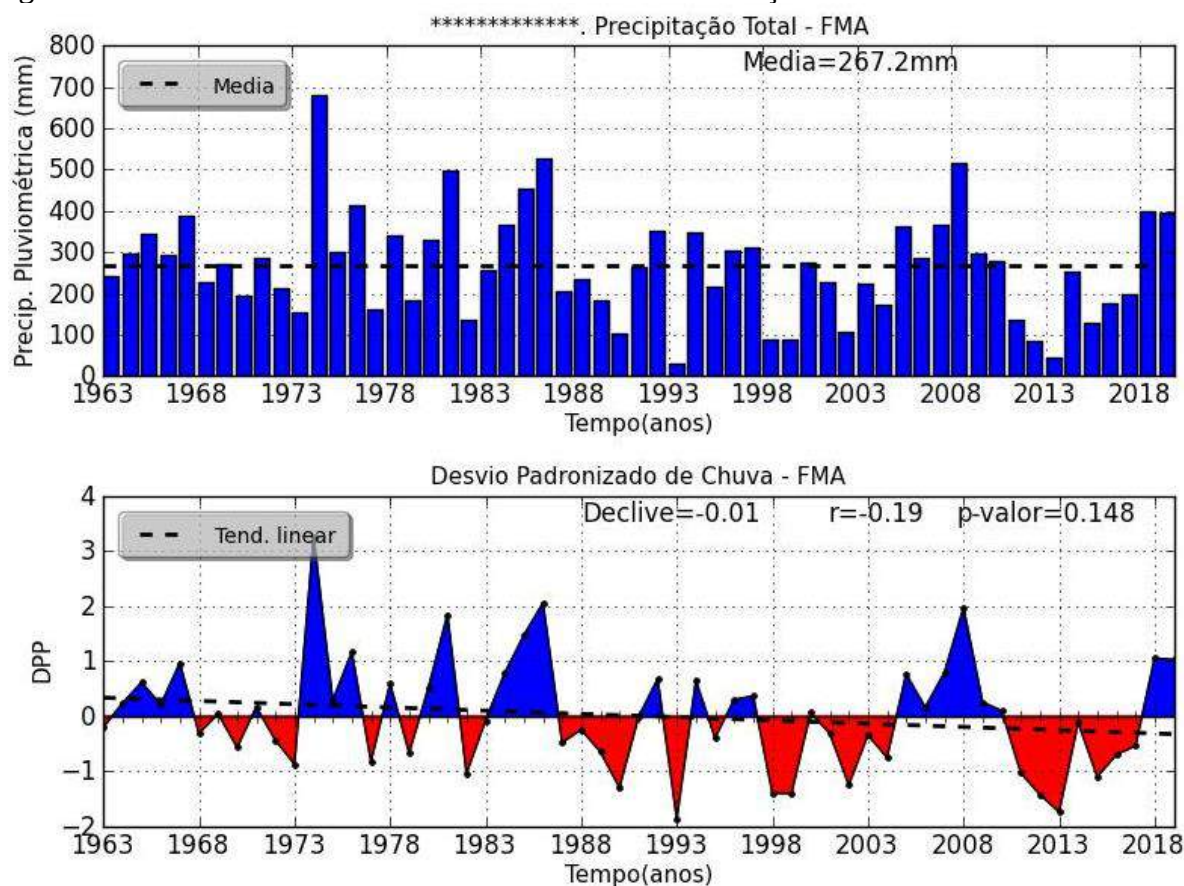
FLORESTA	Média	Mediana	Desvio Padrão
Janeiro	61.8	40.2	66.7
Fevereiro	76	59	67

Março	120.9	118.5	81.6
Abril	70.3	52.2	62.2
Mai	26.8	18.8	24.6
Junho	14.6	8.9	14.8
Julho	12.9	7.5	14.9
Agosto	3.3	0.1	5.3
Setembro	3.6	0	7.9
Outubro	6	0	11.5
Novembro	19	9.3	30
Dezembro	43.7	23.6	57

Fonte: A autora (2020).

A precipitação total no trimestre mais chuvoso (FMA) tem uma média de cerca de 267.2mm e uma tendência não significativa de diminuição das chuvas, sendo o declive = -0.01, o $r = -0.19$ (correlação negativa) e o p-valor de 0.148 (Figura 38).

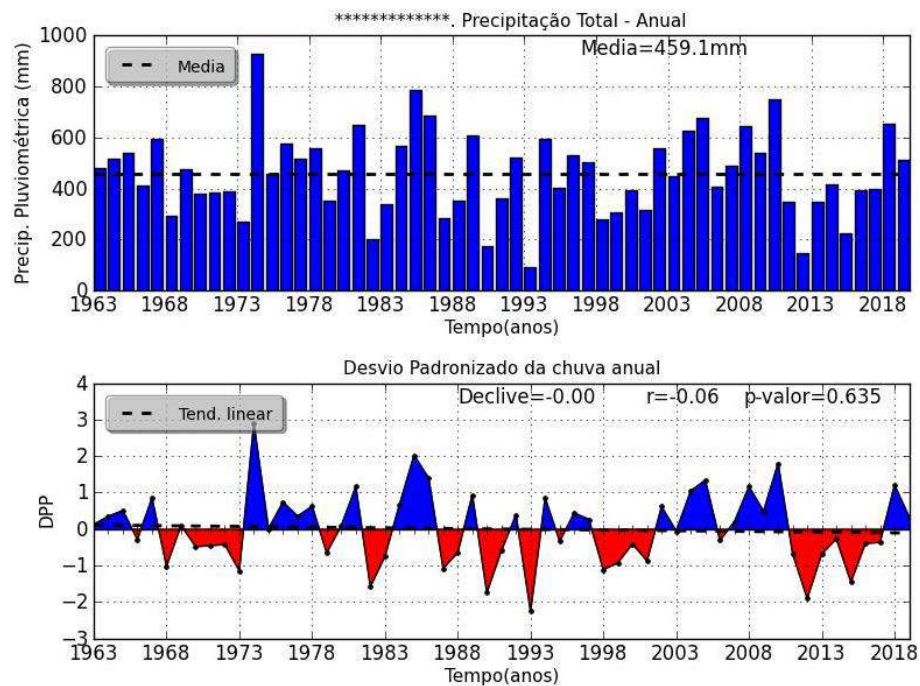
Figura 38 - Média histórica do trimestre FMA e DPP da estação de Floresta-PE.



Fonte: A autora (2020).

A seguir tem-se a precipitação total anual da estação de Floresta-PE, que teve uma média de 459.1mm, não houve tendência na série, sendo o declive = 0, o $r = -0.66$ e o p-valor de 0.635 (Figura 39).

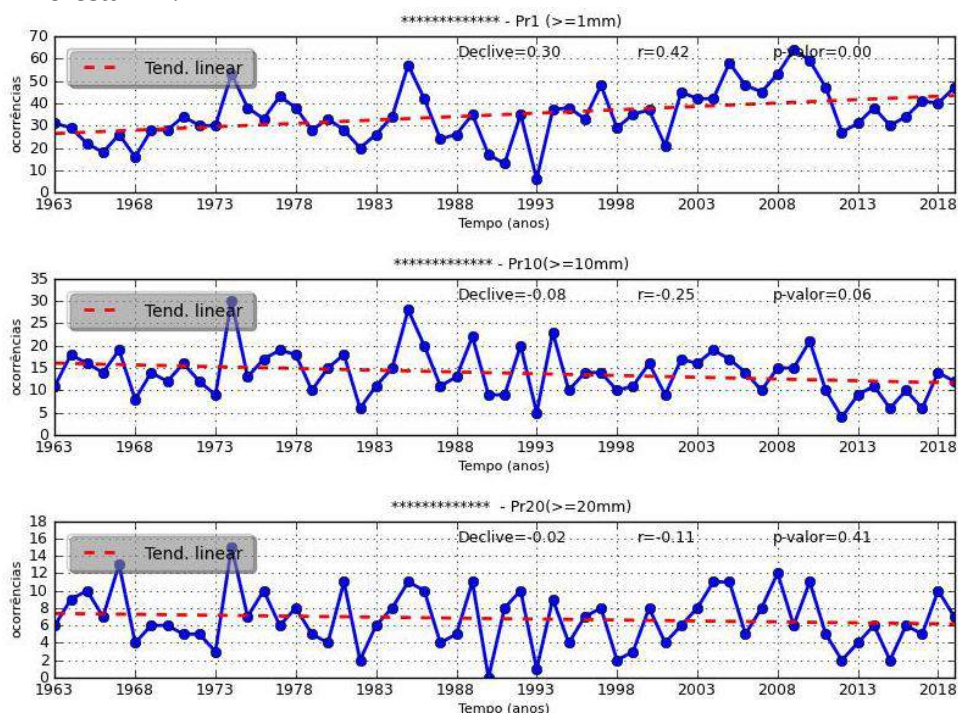
Figura 39 - Média histórica anual e DPP da estação de Floresta-PE.



Fonte: A autora (2020).

Posteriormente, elaborou-se a estimativa de dias com chuva iguais ou menores que 1mm ($\Rightarrow 1\text{mm}$), dias com chuvas iguais ou menores que 10mm ($\Rightarrow 10\text{mm}$) e dias com chuvas iguais ou menores do que 20mm diários ($\Rightarrow 20\text{mm}$) em Floresta-PE (Figura 40).

Figura 40 - Dias com chuva $\Rightarrow 1$ mm, dias com chuva $\Rightarrow 10$ mm e dias com chuva $\Rightarrow 20$ mm diários em Floresta-PE.

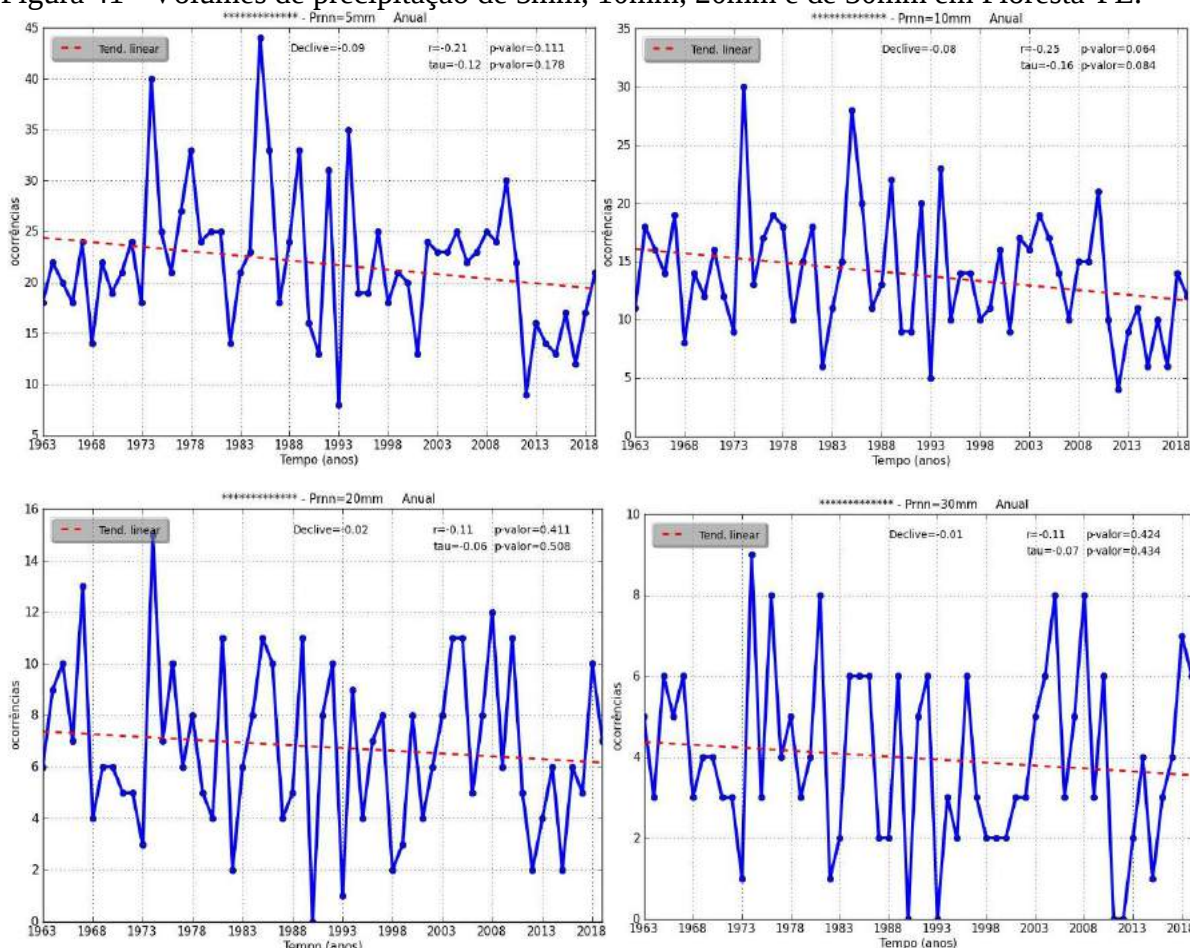


Fonte: A autora (2020).

Observou-se que os dias com chuva $\Rightarrow 1\text{mm}$ apresentaram tendência linear positiva (declive = 0.30 e $r = 0.42$), com aumento de ocorrência das precipitações maiores ou iguais a 1mm. O P-valor foi de 0.01 para chuvas $\Rightarrow 1\text{mm}$ indica que a probabilidade de significância desse resultado foi estatisticamente significativa. Já para dias com as ocorrências de chuva iguais ou superiores a 10mm e $\Rightarrow 20\text{mm}$ ocorreu a tendência de diminuição da ocorrência desses episódios.

A seguir, serão apresentados os volumes de precipitação $\Rightarrow 5\text{mm}$, e $\Rightarrow 10\text{mm}$, $\Rightarrow 20\text{mm}$ e $\Rightarrow 30\text{mm}$ de Floresta-PE (Figura 41).

Figura 41 - Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Floresta-PE.



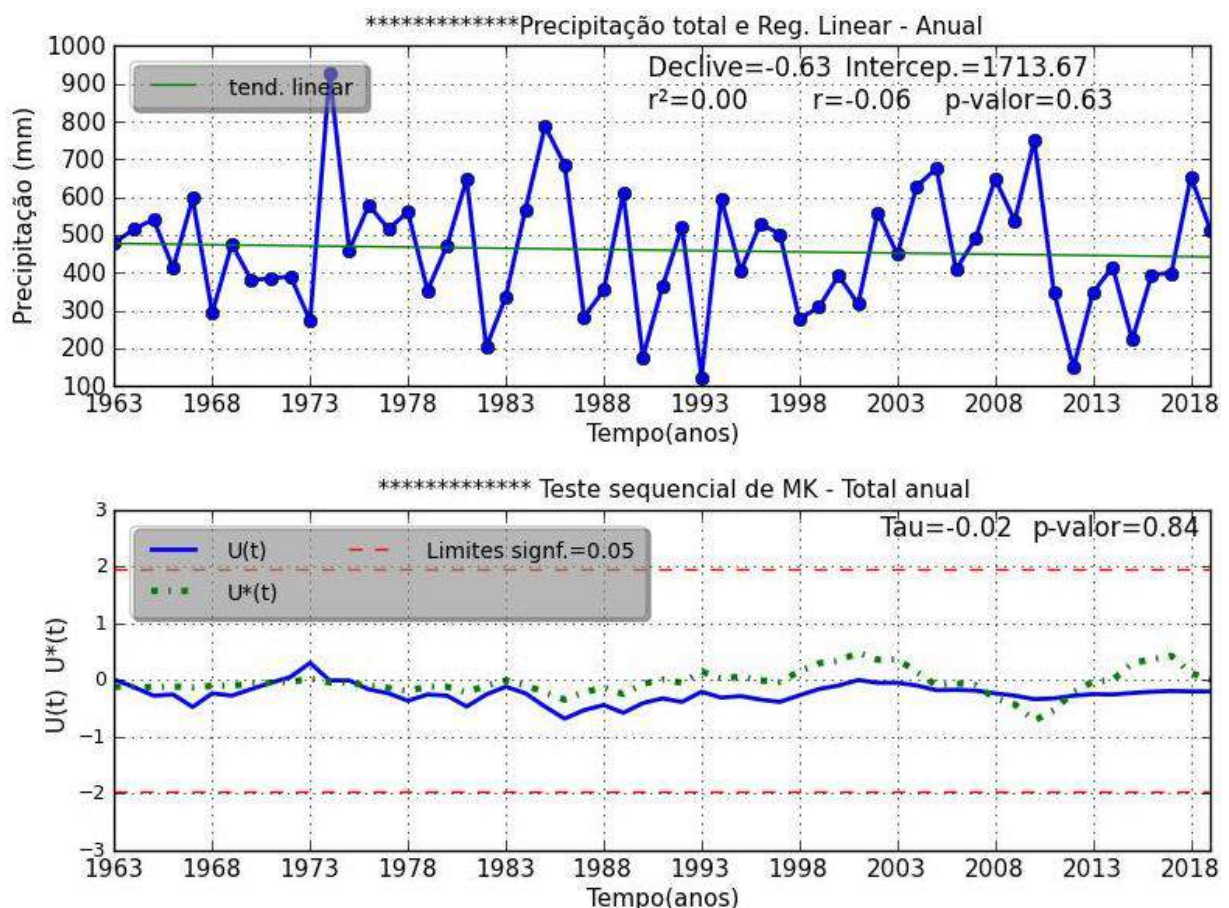
Fonte: A autora (2020).

Em todos os cenários observados o volume de precipitação apresenta uma tendência de diminuição, sendo os volumes de precipitação de 20mm e 30mm os mais significantes estatisticamente. Fica evidenciado pela figura anterior (Figura 41), que a precipitação no município de Floresta-PE apresentou uma variabilidade, com tendência de diminuição, tanto no volume de chuvas quanto nos extremos de precipitação.

Posteriormente foi analisada a precipitação a 95% de confiança (considerando 48.7mm de precipitação) e a 99% de confiança (considerando 85mm de precipitação), ambos apresentando uma correlação linear fraca, tendência de diminuição da precipitação e P-valor não representativo de significância estatística (Apêndice B). Bem como a precipitação máxima em 1 dia na estação de Floresta-PE com tendência de aumento não estatisticamente significativo (Apêndice C).

A (Figura 42) mostra a Regressão Linear Teste Sequencial de Mann-Kendall em Floresta-PE. A regressão linear não apresentou tendência (declive de -0.63 e p-valor = 0.63). No Teste Sequencial de Mann-Kendall, a curva estatística $U(t)$ e o seu inverso, a estatística $U^*(t)$ se cruzam em vários anos dentro do intervalo de confiança $1,96 < u(t) < 1,96$ (1,96 correspondendo a $\alpha = 0,05$), mas não cruza o limite de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$), demonstrando que não há tendência (p-valor = 0.84).

Figura 42 - Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963-2019 em Floresta -PE.



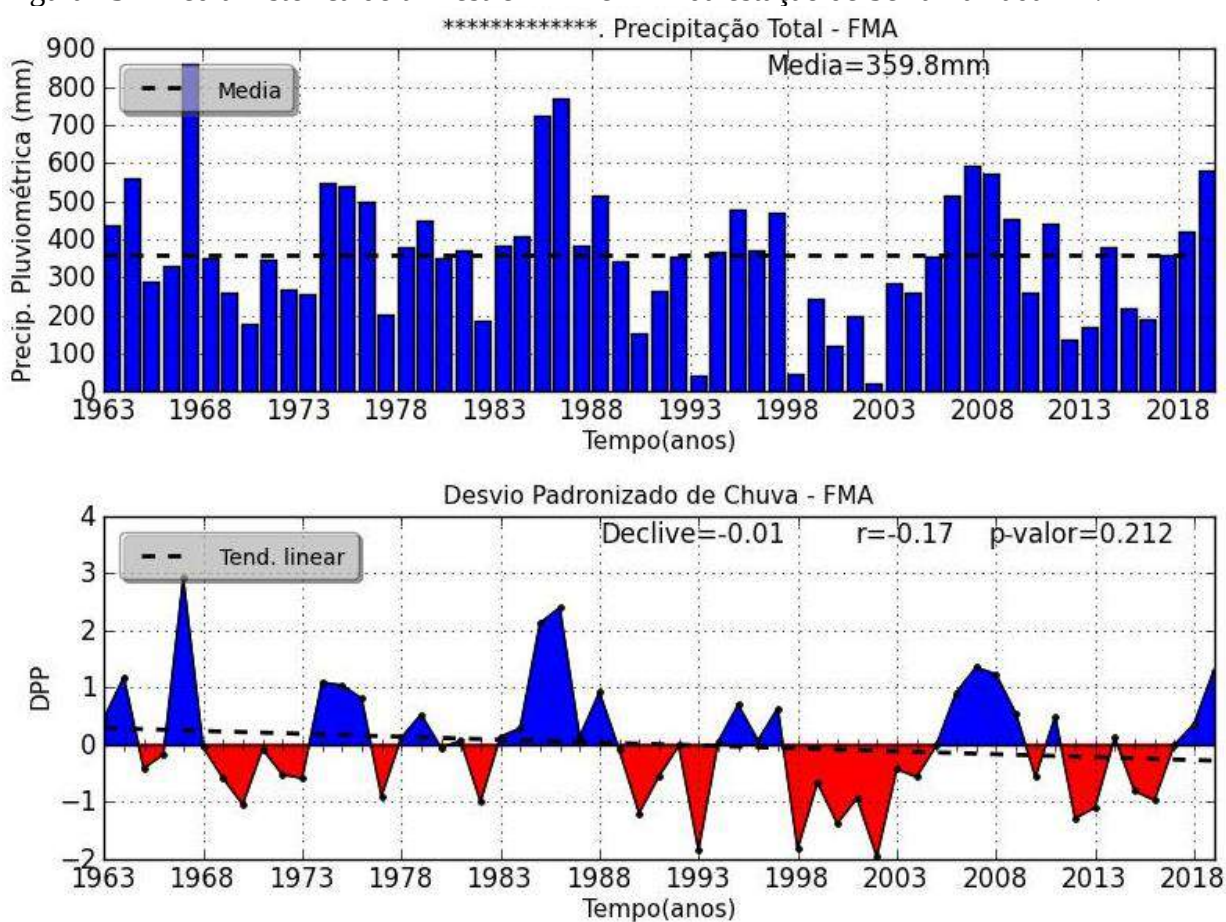
Fonte: A autora (2020).

4.1.3.7 Análise de tendência climática no município de Serra Talhada-PE

A climatologia mensal e trimestral da precipitação pluviométrica, identificou o mês de março como o mais chuvoso e o trimestre de fevereiro-março-abril como sendo o mais chuvoso no município na estação de Serra Talhada de 1963 a 2019 (Apêndice A).

A análise pluviométrica da estação de Serra Talhada evidencia que a precipitação na estação tem maior ocorrência nos meses de janeiro a maio. A precipitação total no trimestre mais chuvoso (FMA) teve uma média de cerca de 359.8mm, e uma tendência não significativa de diminuição das chuvas, sendo o declive de -0.01, o $r=-0.17$ (correlação negativa) e o p-valor de 0.212 (Figura 43).

Figura 43 - Média histórica do trimestre FMA e DPP da estação de Serra Talhada-PE.



Fonte: A autora (2020).

Foram avaliadas a média, mediana e desvio padrão mensal com base na densidade das chuvas da estação de Serra Talhada-PE, e observa-se que o mês de março apresenta a maior média de chuvas na estação (Tabela 10).

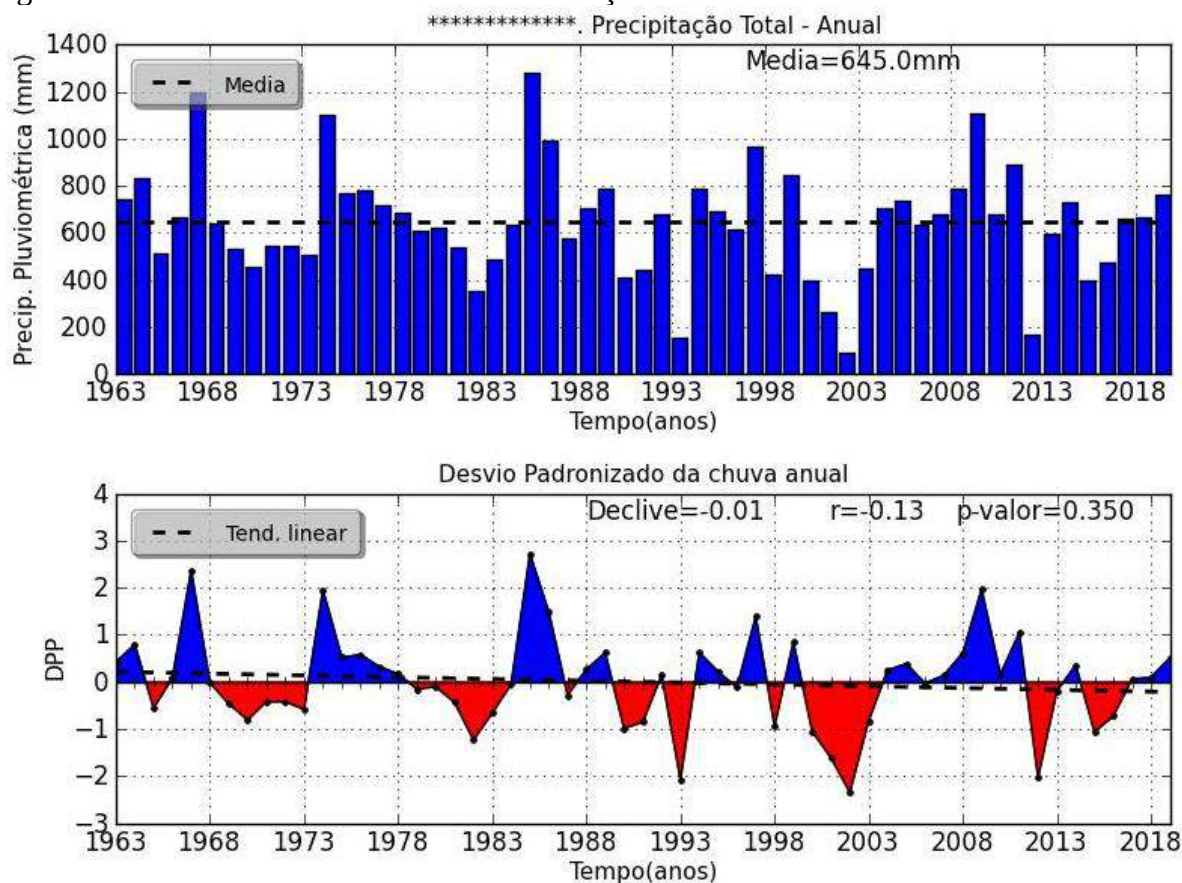
Tabela 10 - Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade de 1963 a 2019 de Serra Talhada-PE.

Serra Talhada	Média	Mediana	Desvio Padrão
Janeiro	87.6	66.7	74.1
Fevereiro	111	102.1	80.2
Março	140.7	127.1	95.3
Abril	108	118.8	71.5
Mai	51.4	34.4	56.7
Junho	30.5	26.4	29.3
Julho	22.2	16.5	19.8
Agosto	5.6	0	9.9
Setembro	5.4	0	11.8
Outubro	15.7	0	38.6
Novembro	18	10.5	25.4
Dezembro	48.8	25.4	56.4

Fonte: A autora (2020).

A seguir tem-se a precipitação total anual da estação de Serra Talhada-PE, que teve uma média de cerca de 645mm e uma tendência não significativa de diminuição das chuvas, sendo o declive de -0.01, o $r = -0.13$ (correlação negativa) e o p-valor de 0.350 (Figura 44).

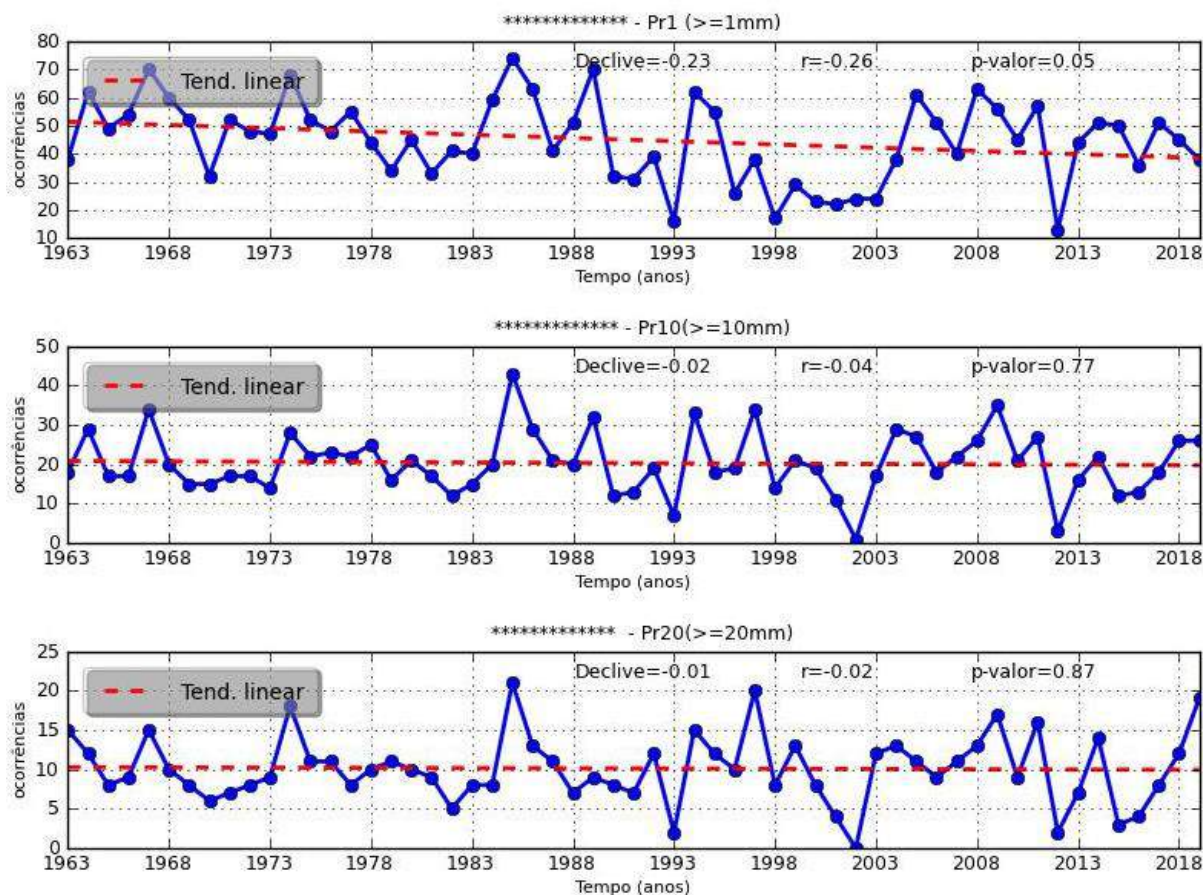
Figura 44 - Média histórica anual e DPP da estação de Serra Talhada -PE.



Fonte: A autora (2020).

Posteriormente, elaborou-se a estimativa de dias com chuva iguais ou menores que 1mm, dias com chuvas iguais ou menores que 10mm e dias com chuvas iguais ou menores do que 20mm diários em Serra Talhada-PE (Figura 45).

Figura 45 - Dias com chuva ≥ 1 mm, dias com chuva ≥ 10 mm e dias com chuva ≥ 20 mm diários em Serra Talhada-PE.

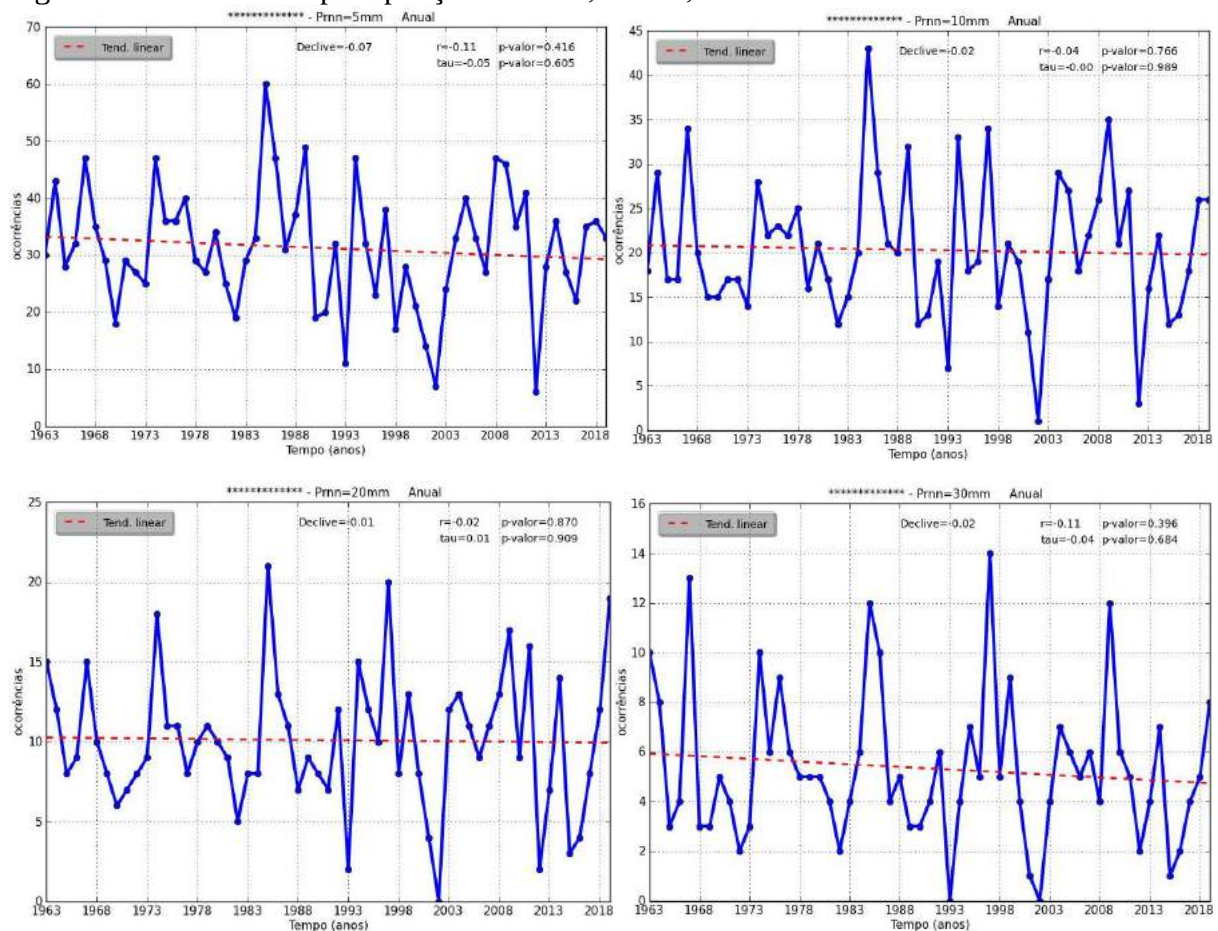


Fonte: A autora (2020).

Observou-se que os dias com chuva ≥ 1 mm apresentaram tendência linear negativa (declive = -0.23 e $r = -0.26$), com diminuição das precipitações maiores ou iguais a 1mm. O P-valor foi de 0.05, o que indica que a probabilidade de significância desse resultado foi estatisticamente significativa. Os dias com chuva ≥ 10 mm não mostraram tendência (p-valor=0.77), bem como os dias com chuva iguais ou superiores a 20mm.

A seguir, serão apresentados os volumes de precipitação ≥ 5 mm, e ≥ 10 mm, ≥ 20 mm e ≥ 30 mm de Serra Talhada-PE (Figura 46). Em todos os cenários observados o volume de precipitação apresenta uma tendência de diminuição, no entanto, fica evidenciado pela figura anterior que não há significância estatística.

Figura 46 - Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Serra Talhada.

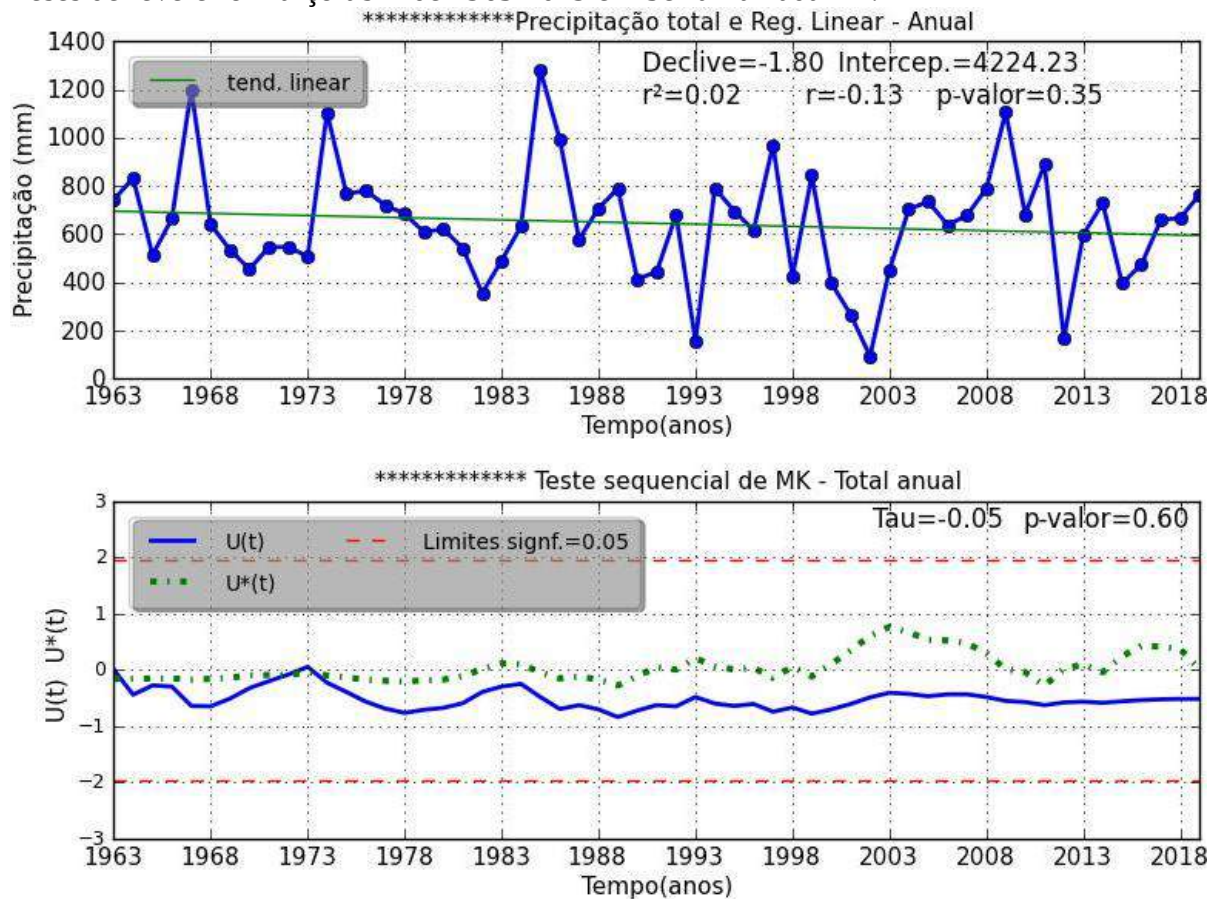


Fonte: A autora (2020).

Posteriormente foi analisada a precipitação a 95% de confiança (considerando 47mm de precipitação) e a 99% de confiança (considerando 80.5mm de precipitação), a Pr95p apresentou uma correlação linear fraca, tendência de diminuição da precipitação e P-valor não representativo de significância estatística. Já Pr99p apresentou uma correlação linear fraca, tendência de aumento da precipitação e P-valor não representativo de significância estatística (Apêndice B). Bem como a precipitação máxima em 1 dia na estação de Serra Talhada-PE com tendência de aumento não estatisticamente significativo (Apêndice C).

A (Figura 47) mostra a Regressão Linear Teste Sequencial de Mann-Kendall em Serra Talhada-PE. A regressão linear não apresentou tendência (declive de -0.63 e p-valor = 0.63). No Teste Sequencial de Mann-Kendall, a curva estatística $U(t)$ e o seu inverso, a estatística $U^*(t)$ se cruzam na década de 1970 dentro do intervalo de confiança $1,96 < u(t) < 1,96$ ($1,96$ correspondendo a $\alpha = 0,05$), mas não cruza o limite de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$), demonstrando que há tendência de diminuição não estatisticamente significativa (p-valor = 0.39).

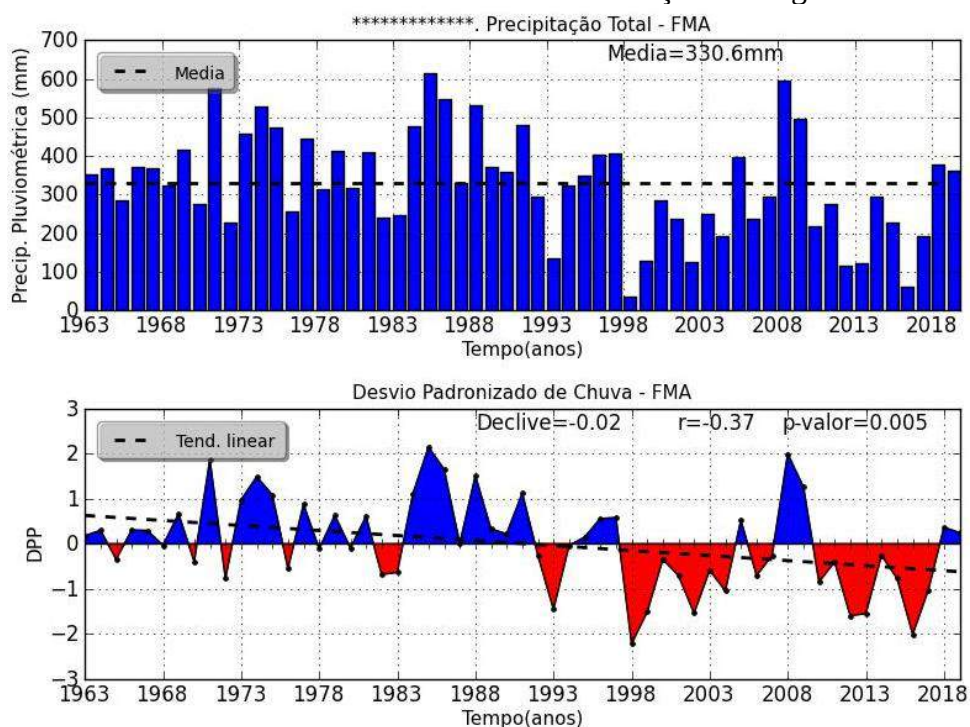
Figura 47 - Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall nos meses de fevereiro-março-abril de 1963-2019 em Serra Talhada-PE.



4.1.3.8 Análise de tendência climática no município de Salgueiro

A climatologia mensal e trimestral da precipitação pluviométrica, identificou o mês de março como o mais chuvoso e o trimestre de fevereiro-março-abril como sendo o mais chuvoso no município na estação de Salgueiro de 1963 a 2019 (Apêndice A). A análise pluviométrica da estação de Salgueiro evidencia que a precipitação na estação tem maior ocorrência nos meses de janeiro a maio. A precipitação total no trimestre mais chuvoso (FMA) teve uma média de cerca de 330.6mm, e uma tendência significativa de diminuição das chuvas, sendo o declive de -0.02, o $r = -0.37$ (correlação negativa) e o $p\text{-valor}$ de 0.005 (Figura 48).

Figura 48 - Média histórica do trimestre FMA e DPP da estação de Salgueiro-PE.



Fonte: A autora (2020).

Foram avaliadas a média, mediana e desvio padrão mensal com base na densidade das chuvas da estação de Salgueiro-PE, e observa-se que o mês de março apresenta a maior média de chuvas na estação (Tabela 11).

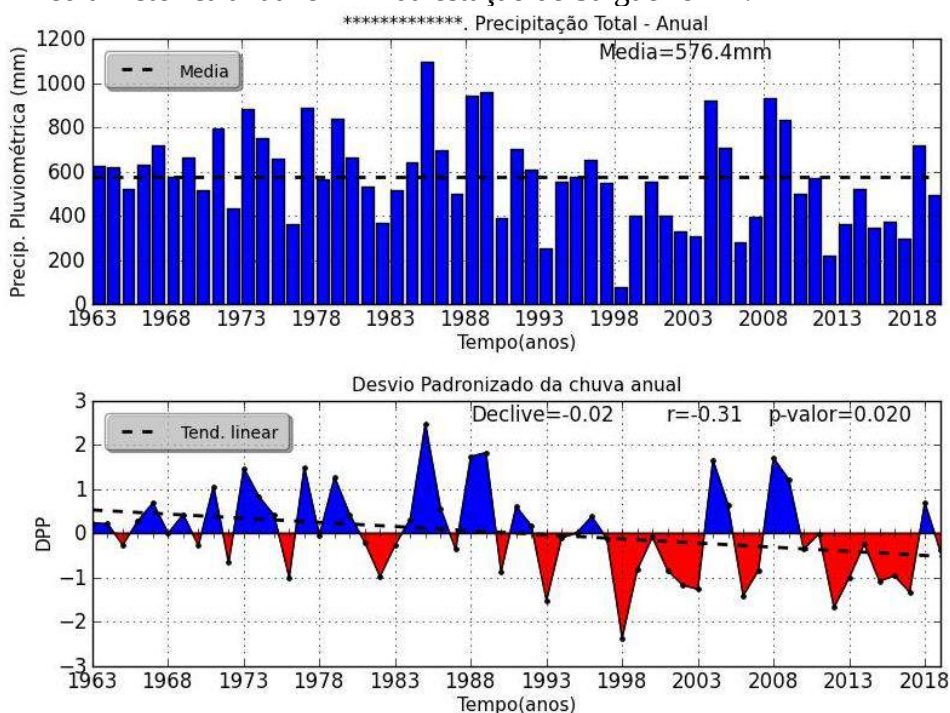
Tabela 11 - Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade em Salgueiro-PE.

SALGUEIRO	Média	Mediana	Desvio Padrão
Janeiro	90.8	71.5	98
Fevereiro	102.6	90	67.6
Março	132	117	85.5
Abril	96	78.4	70.3
Maió	33.6	20	38
Junho	12.9	6.2	15.4
Julho	10.1	4.8	13.8
Agosto	2.2	0.2	3.7
Setembro	6	0	15.3
Outubro	11.3	2	22.6
Novembro	21.4	10.8	30
Dezembro	57.4	31.8	63.2

Fonte: A autora (2020).

A seguir tem-se a precipitação total anual da estação de Salgueiro -PE, que teve uma média de cerca de 576.4mm e uma tendência significativa de diminuição das chuvas, sendo o declive de -0.02, o $r = -0.31$ (correlação negativa) e o p-valor de 0.020.

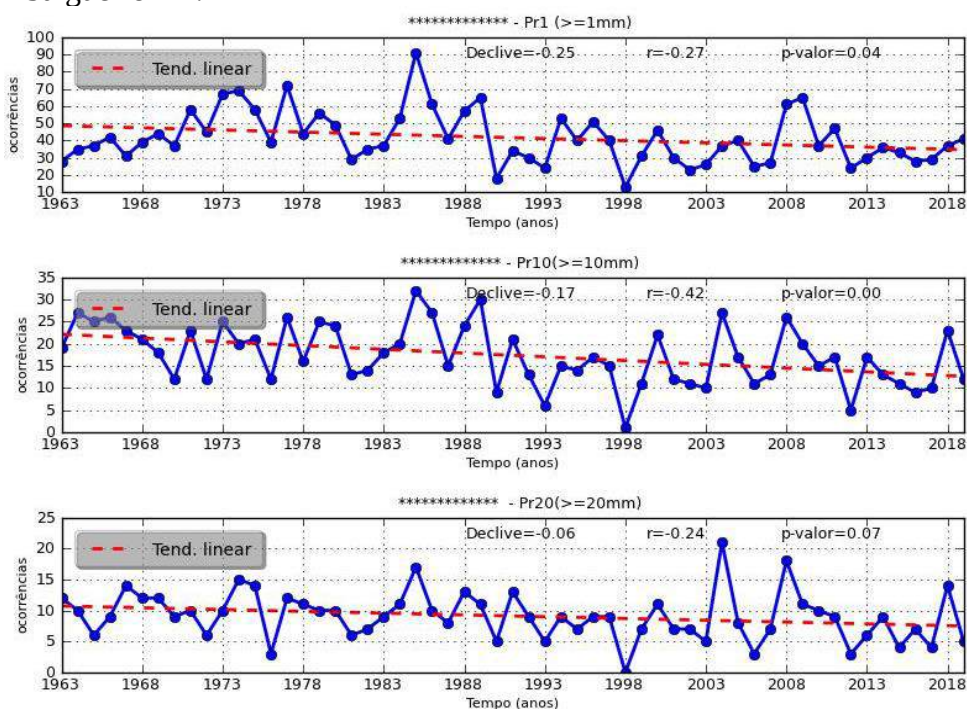
Figura 49 - Média histórica anual e DPP da estação de Salgueiro-PE.



Fonte: A autora (2020).

Posteriormente, elaborou-se a estimativa de dias com chuva iguais ou menores que 1mm ($\Rightarrow 1\text{mm}$), dias com chuvas iguais ou menores que 10mm ($\Rightarrow 10\text{mm}$) e dias com chuvas iguais ou menores do que 20mm diários ($\Rightarrow 20\text{mm}$) em Salgueiro-PE (Figura 50).

Figura 50 - Dias com chuva $\Rightarrow 1$ mm, dias com chuva $\Rightarrow 10$ mm e dias com chuva $\Rightarrow 20$ mm diários em Salgueiro-PE.



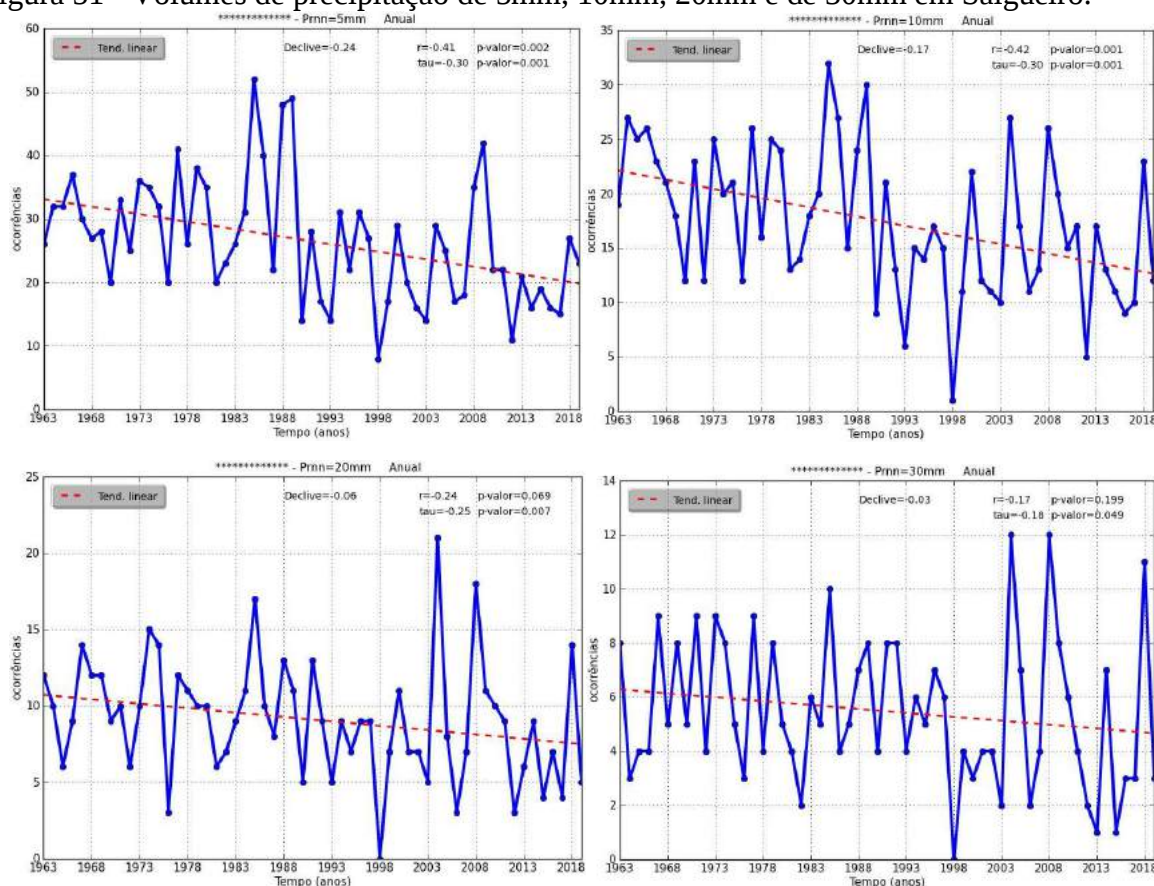
Fonte: A autora (2020).

Observou-se que os dias com chuva $\Rightarrow 1\text{mm}$ apresentaram tendência linear negativa (declive = -0.25 e $r = -0.27$), com diminuição das precipitações maiores ou iguais a 1mm. O P-valor foi de 0.04, o que indica que a probabilidade de significância desse resultado foi estatisticamente significativa.

Os dias com chuva $\Rightarrow 10\text{mm}$ também tiveram uma tendência de diminuição ao longo dos anos (declive = -0.17 e $r = -0.42$), apresentando um nível de P-valor = 0.00. Já para dias com chuva iguais ou superiores a 20mm ocorreu a tendência de diminuição da ocorrência desses episódios (declive = -0.06 e $r = -0.24$), com um P-valor = 0.07, contudo a tendência não foi estatisticamente significativa.

A seguir, serão apresentados os volumes de precipitação $\Rightarrow 5\text{mm}$, e $\Rightarrow 10\text{mm}$, $\Rightarrow 20\text{mm}$ e $\Rightarrow 30\text{ mm}$ de Salgueiro-PE (Figura 51).

Figura 51 - Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Salgueiro.



Fonte: A autora (2020).

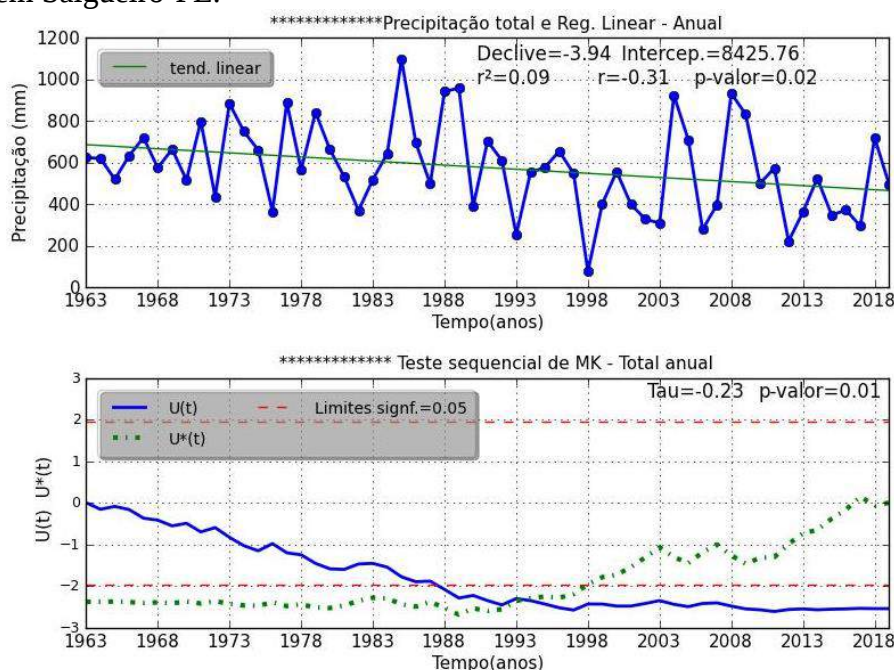
Em todos os cenários observados o volume de precipitação apresenta uma tendência de diminuição, sendo os volumes de precipitação de 5mm, 20mm e 30mm os mais significantes estatisticamente. Fica evidenciado pela figura anterior que a precipitação no município de

Salgueiro-PE apresentou uma variabilidade, com tendência de diminuição, tanto no volume de chuvas quanto nos extremos de precipitação.

Posteriormente foi analisada a precipitação a 95% de confiança (considerando 47.3mm de precipitação) e a 99% de confiança (considerando 84.3mm de precipitação), ambos apresentando uma correlação linear fraca, tendência de diminuição da precipitação e P-valor não representativo de significância estatística (Apêndice B). Bem como a precipitação máxima em 1 dia na estação de Salgueiro-PE com tendência de diminuição não estatisticamente significativo (Apêndice C).

A (Figura 52) mostra a Regressão Linear Teste Sequencial de Mann-Kendall em Salgueiro-PE. A regressão linear apresentou tendência significativa de queda (declive de -4.89 e p-valor = 0.01). No Teste Sequencial de Mann-Kendall, a curva estatística $U(t)$ e o seu inverso, a estatística $U^*(t)$ se cruzam em meados da década de 1970, dentro do intervalo de confiança $1,96 < u(t) < 1,96$ (1,96 correspondendo a $\alpha = 0,05$), e cruza o limite de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$), mostrando tendência significativa (p-valor = 0.04).

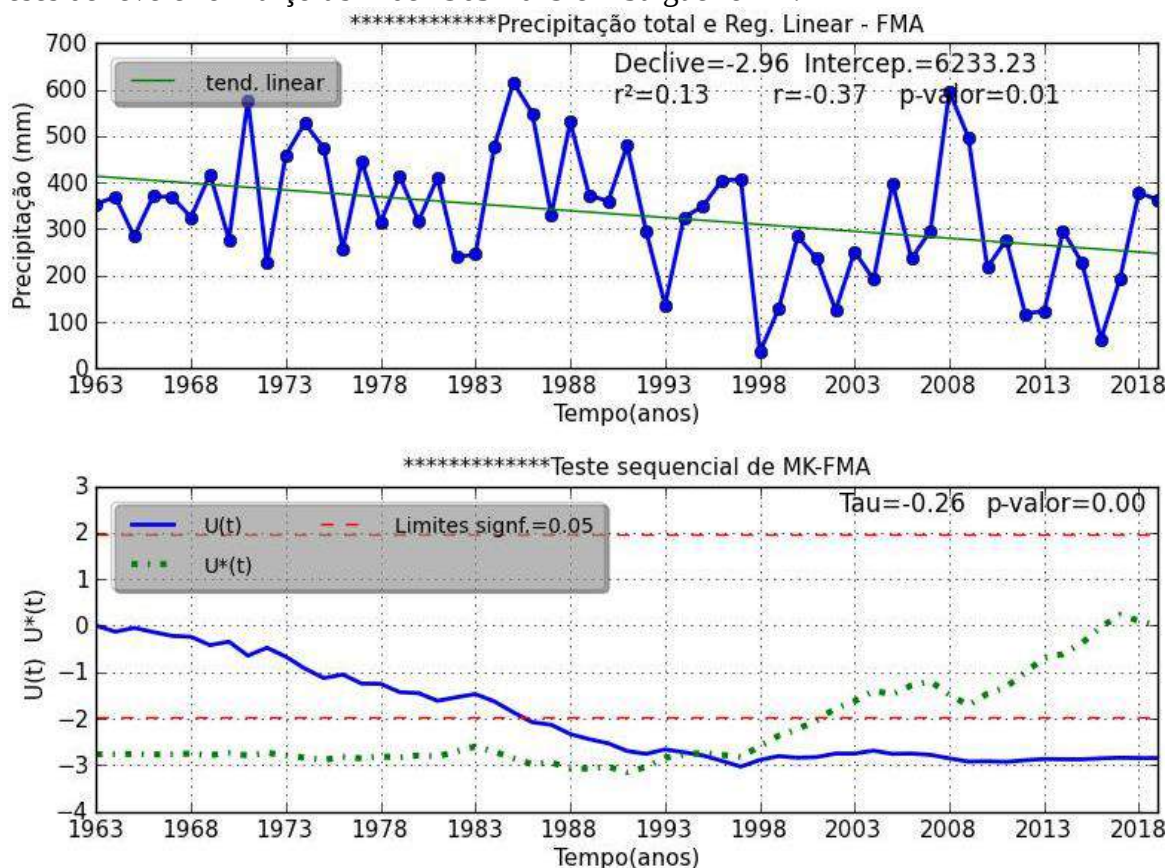
Figura 52 - Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963-2019 em Salgueiro-PE.



Fonte: A autora (2020).

Em razão de em Salgueiro a regressão linear e o Teste Sequencial de Mann-Kendall terem apresentado tendência significativa de queda da precipitação, houve a elaboração do gráfico de regressão linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall no trimestre mais chuvoso do município (Figura 53).

Figura 53 - Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall nos meses de fevereiro-março-abril de 1963-2019 em Salgueiro-PE.



Fonte: A autora (2020).

A Regressão Linear apresentou tendência significativa de queda (declive = -2.96, $r = -0.37$ e $p\text{-valor} = 0.01$). No Teste Sequencial de Mann-Kendall, a curva estatística $U(t)$ e $U^*(t)$ se cruzam em meados da década de 1990, e $U(t)$ cruza o limite de confiança de 95% em meados da década de 1980, mostrando tendência significativa ($p\text{-valor} = 0.00$).

4.1.3.9 Análise de tendência climática no município de Parnamirim-PE

A climatologia mensal e trimestral da precipitação pluviométrica, identificou o mês de março como o mais chuvoso e o trimestre de fevereiro-março-abril como sendo o mais chuvoso no município na estação de Parnamirim de 1963 a 2019 (Apêndice A). Foram avaliadas a média, mediana e desvio padrão mensal com base na densidade das chuvas da estação de Parnamirim (Tabela 12):

Tabela 12 - Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade de 1963 a 2019 de Parnamirim-PE.

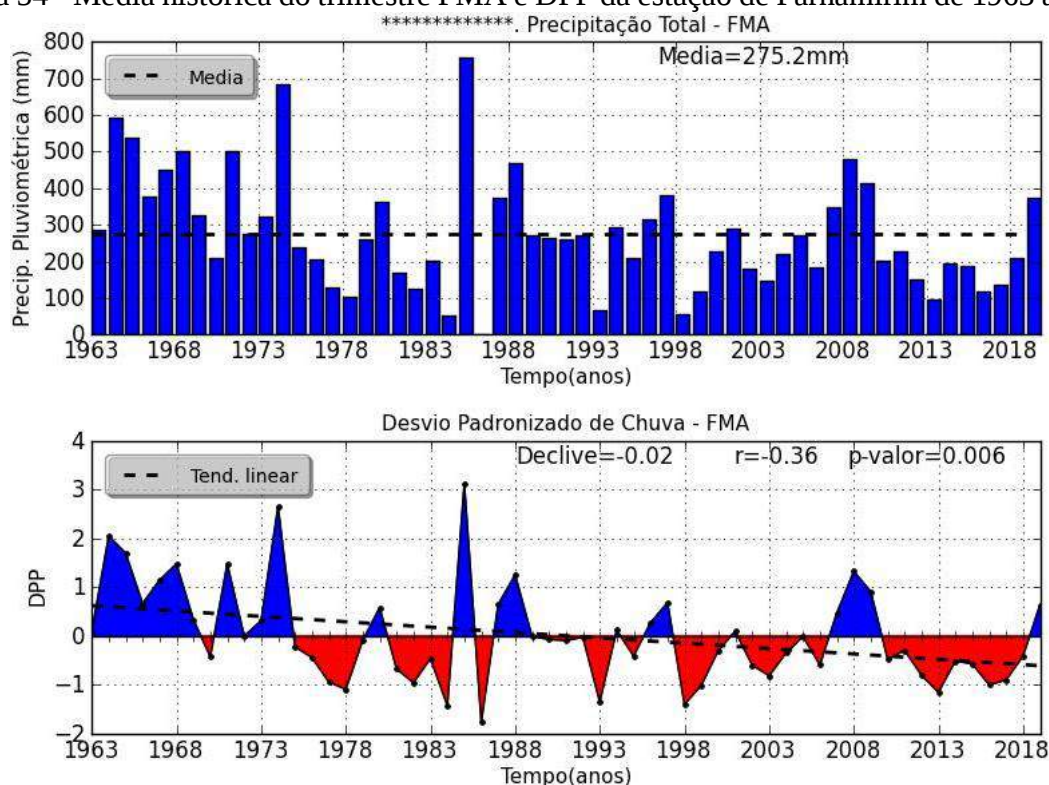
PARNAMIRIM	Média	Mediana	Desvio Padrão
Janeiro	73.7	52	77

Fevereiro	86	69	65.8
Março	109.6	99.5	88.2
Abril	79.6	58	78.5
Mai	22.6	12.2	28.4
Junho	9.6	4.5	12.5
Julho	6.6	1.2	9.4
Agosto	2.8	0	5.3
Setembro	3.9	0	10.4
Outubro	11.3	0	19.9
Novembro	24	13.5	32.4
Dezembro	57.8	41.4	61.1

Fonte: A autora (2020).

A precipitação total no trimestre mais chuvoso (FMA) em Parnamirim teve uma média de cerca de 275.2mm, e uma tendência de diminuição das chuvas não estatisticamente significativa, sendo o declive de -0.02, o $r = -0.36$ (correlação negativa) e o p-valor de 0.006 (Figura 54).

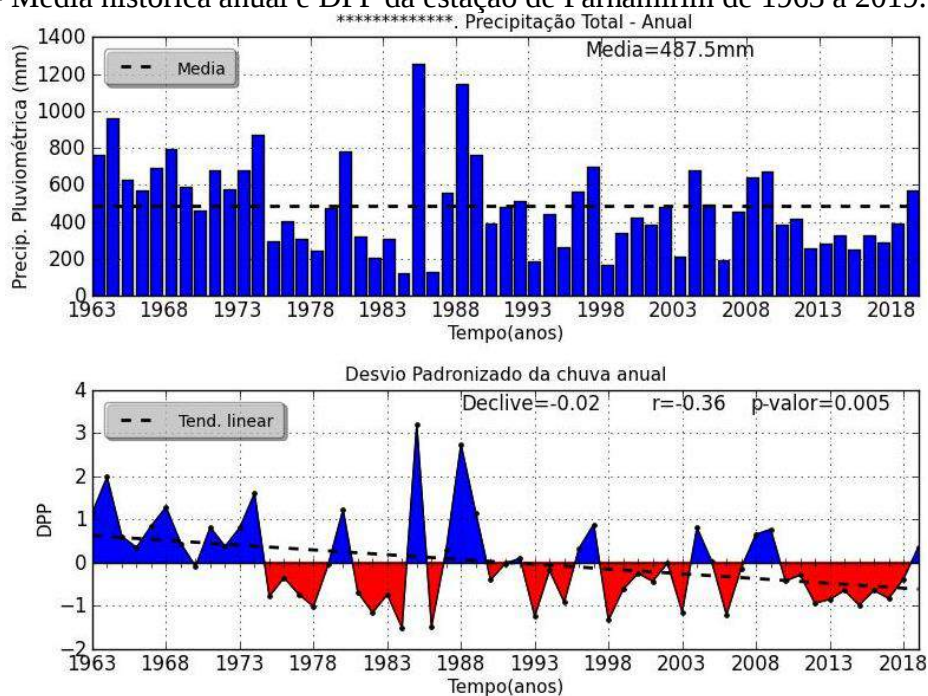
Figura 54 - Média histórica do trimestre FMA e DPP da estação de Parnamirim de 1963 a 2019.



Fonte: A autora (2020).

A seguir tem-se a precipitação total anual da estação de Parnamirim-PE, que teve uma média de cerca de 487.5mm e uma tendência significativa de diminuição das chuvas, sendo o declive de -0.02, o $r = -0.36$ (correlação negativa) e o p-valor de 0.005 (Figura 55).

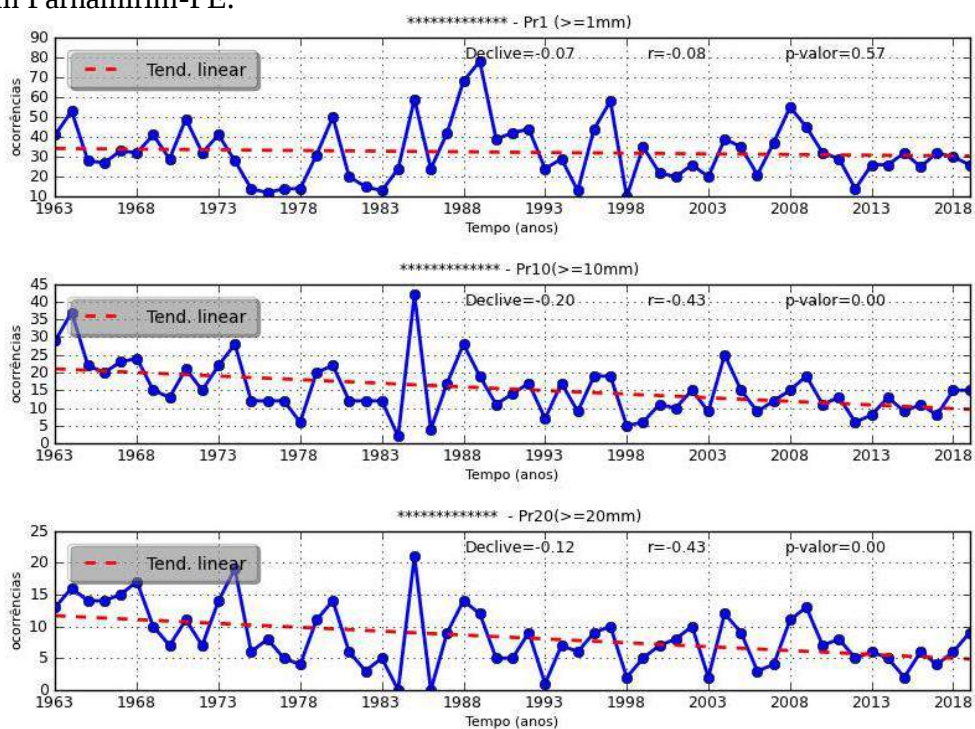
Figura 55 - Média histórica anual e DPP da estação de Parnamirim de 1963 a 2019.



Fonte: A autora (2020).

Posteriormente, elaborou-se a estimativa de dias com chuva iguais ou menores que 1mm ($\Rightarrow 1\text{mm}$), dias com chuvas iguais ou menores que 10mm ($\Rightarrow 10\text{mm}$) e dias com chuvas iguais ou menores do que 20mm diários ($\Rightarrow 20\text{mm}$) em Parnamirim (Figura 56).

Figura 56 - Dias com chuva $\Rightarrow 1$ mm, dias com chuva $\Rightarrow 10$ mm e dias com chuva $\Rightarrow 20$ mm diários em Parnamirim-PE.



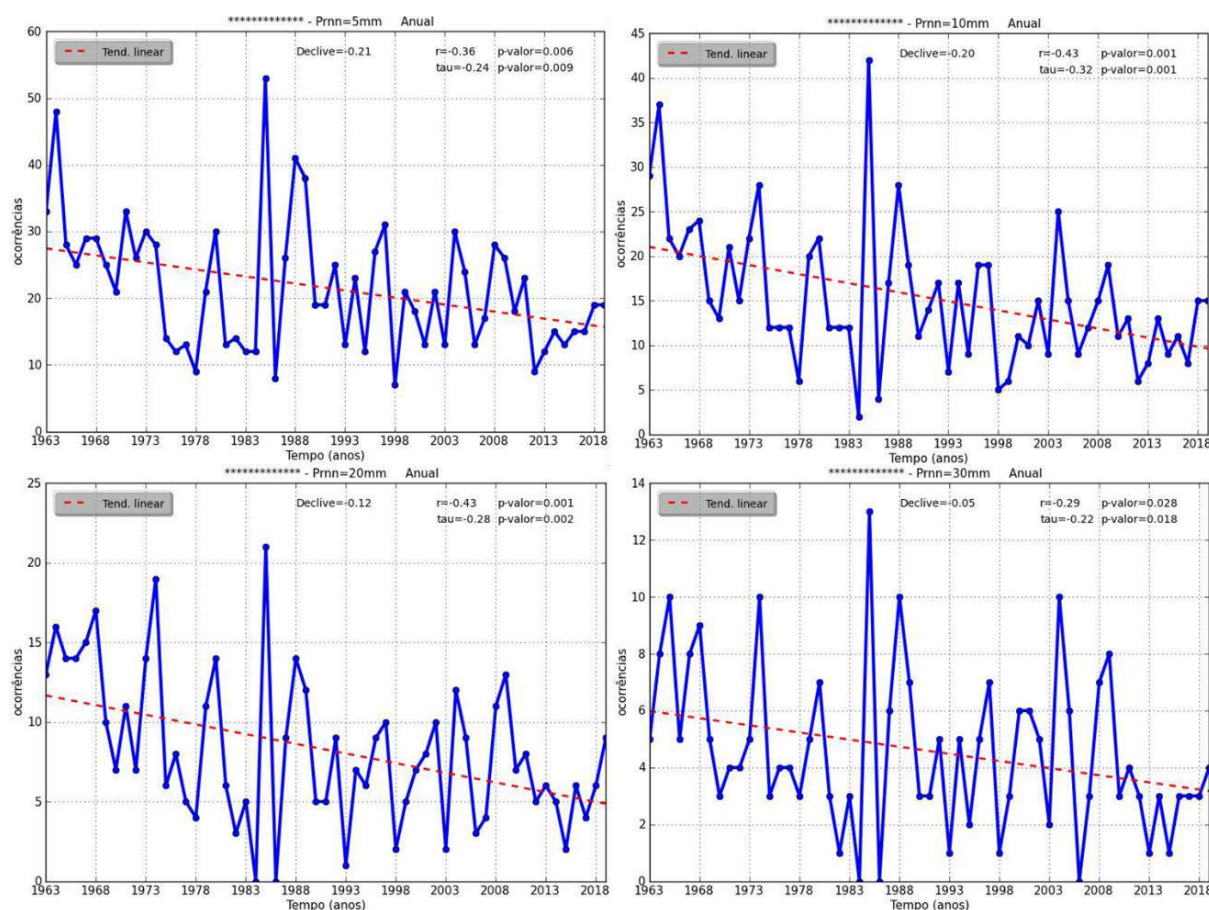
Fonte: A autora (2020).

Observou-se que os dias com chuva $\Rightarrow 1\text{mm}$ apresentaram tendência linear negativa (declive = -0.07 e $r = -0.08$), com diminuição das precipitações maiores ou iguais a 1mm , mas sem significância estatística.

Os dias com chuva $\Rightarrow 10\text{mm}$ também tiveram uma tendência de diminuição ao longo dos anos (declive = -0.20 e $r = -0.43$), apresentando um nível de $P\text{-valor} = 0.00$. Já para dias com chuva iguais ou superiores a 20mm ocorreu a tendência de diminuição da ocorrência desses episódios (declive = -0.12 e $r = -0.43$), com um $P\text{-valor} = 0.00$, sendo ambas as tendências estatisticamente significativamente.

A seguir, serão apresentados os volumes de precipitação $\Rightarrow 5\text{mm}$, $\Rightarrow 10\text{mm}$, $\Rightarrow 20\text{mm}$ e $\Rightarrow 30\text{mm}$ de Parnamirim-PE (Figura 57).

Figura 57: Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Parnamirim.



Fonte: A autora (2020).

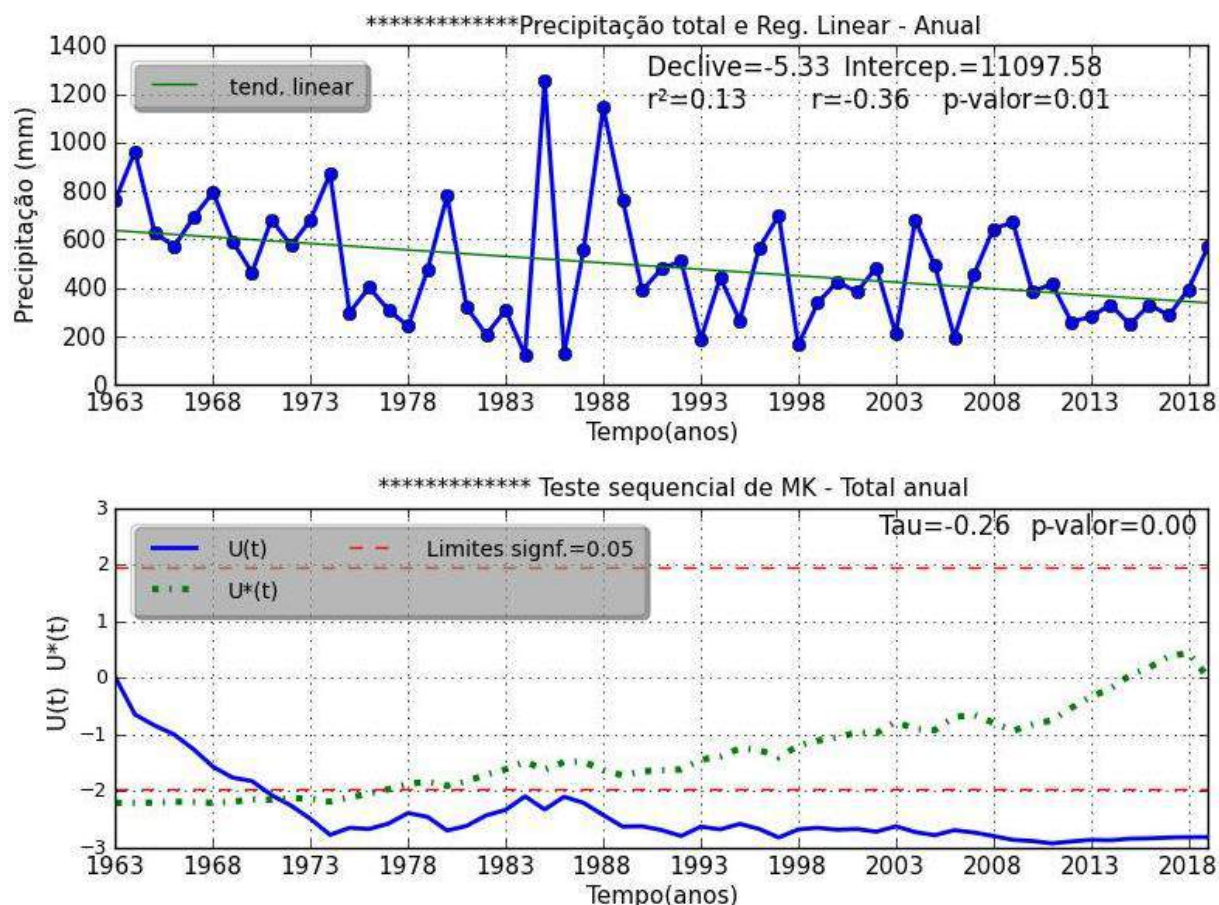
Em todos os cenários observados o volume de precipitação apresenta uma tendência de diminuição, sendo os volumes de precipitação de 10mm , 20mm e 30mm os mais significantes estatisticamente. Fica evidenciado pela figura 57 que a precipitação no município de

Parnamirim-PE apresentou uma variabilidade, com tendência de diminuição, tanto no volume de chuvas quanto nos extremos de precipitação.

Posteriormente foi analisada a precipitação a 95% de confiança (considerando 48.1mm de precipitação) e a 99% de confiança (considerando 85.7mm de precipitação), ambos apresentando uma correlação linear forte, forte tendência de diminuição da precipitação e P-valor com significância estatística (Apêndice B). Bem como a precipitação máxima em 1 dia na estação de Parnamirim-PE com tendência de diminuição não estatisticamente significativo (Apêndice C).

A Figura 58 mostra a precipitação total, regressão linear anual e o Teste Sequencial de Mann-Kendall em Parnamirim-PE. A regressão linear apresentou tendência significativa de queda (declive de -5.33 e p-valor = 0.01). No Teste Sequencial de Mann-Kendall, a curva estatística $U(t)$ e o seu inverso, a estatística $U^*(t)$ se cruzam no final da década de 1960, dentro do intervalo de confiança $1,96 < u(t) < 1,96$ (1,96 correspondendo a $\alpha = 0,05$), e cruza o limite de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$), mostrando tendência significativa (p-valor = 0.00).

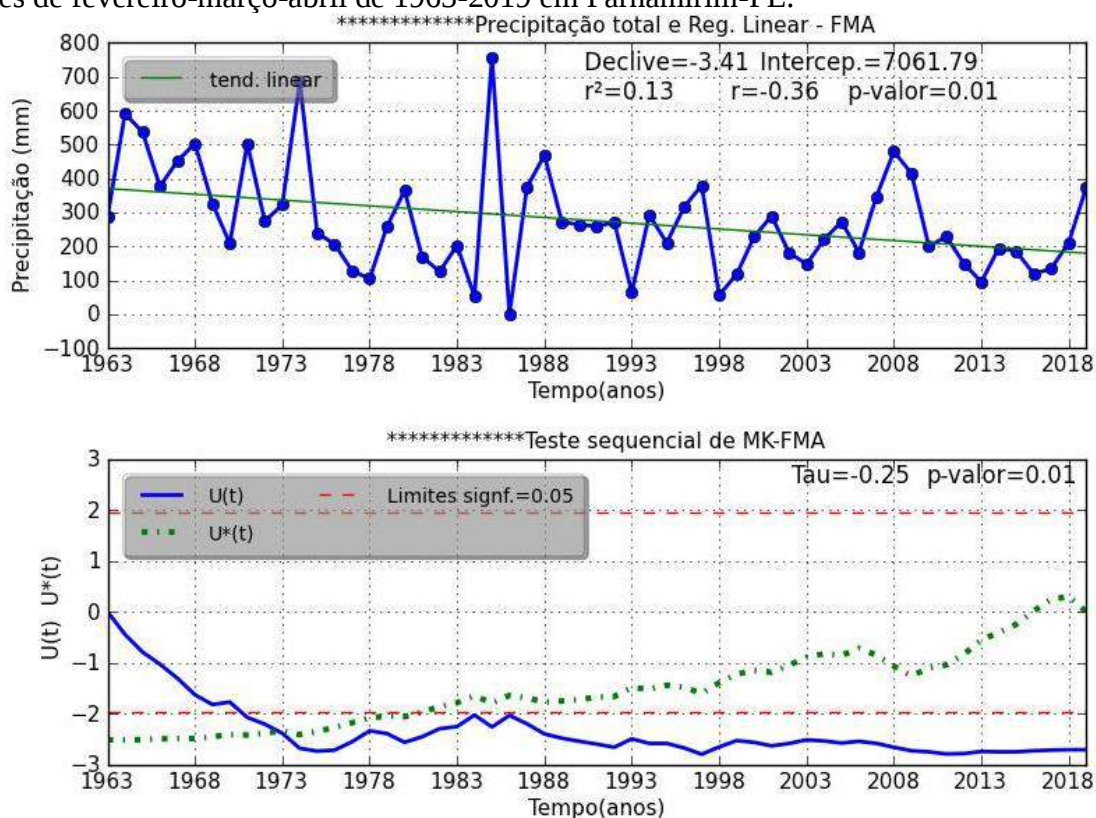
Figura 58 - Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963-2019 em Parnamirim-PE.



Fonte: A autora (2020).

Em razão de que em Parnamirim a regressão linear e o Teste Sequencial de Mann-Kendall terem apresentado tendência significativa de queda da precipitação, houve a elaboração do gráfico de regressão linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall no trimestre mais chuvoso do município (Figura 59).

Figura 59 - Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall nos meses de fevereiro-março-abril de 1963-2019 em Parnamirim-PE.



Fonte: A autora (2020).

A Regressão Linear apresentou tendência significativa de queda (declive = -3.41, $r = -0.36$ e $p\text{-valor} = 0.01$). No Teste Sequencial de Mann-Kendall, a curva estatística $U(t)$ e $U^*(t)$ se cruzam em meados da década de 1990, e $U(t)$ cruza o limite de confiança de 95% no início da década de 1970, mostrando tendência significativa ($p\text{-valor} = 0.01$).

4.1.3.10 Análise de tendência climática no município de Santa Maria da Boa Vista

A climatologia mensal e trimestral da precipitação pluviométrica, identificou o mês de março como o mais chuvoso e o trimestre de fevereiro-março-abril como sendo o mais chuvoso no município na estação de Santa Maria da Boa Vista de 1963 a 2019 (Apêndice A). Foram avaliadas a média, mediana e desvio padrão mensal com base na densidade das chuvas da estação de Santa Maria da Boa Vista (Tabela 13).

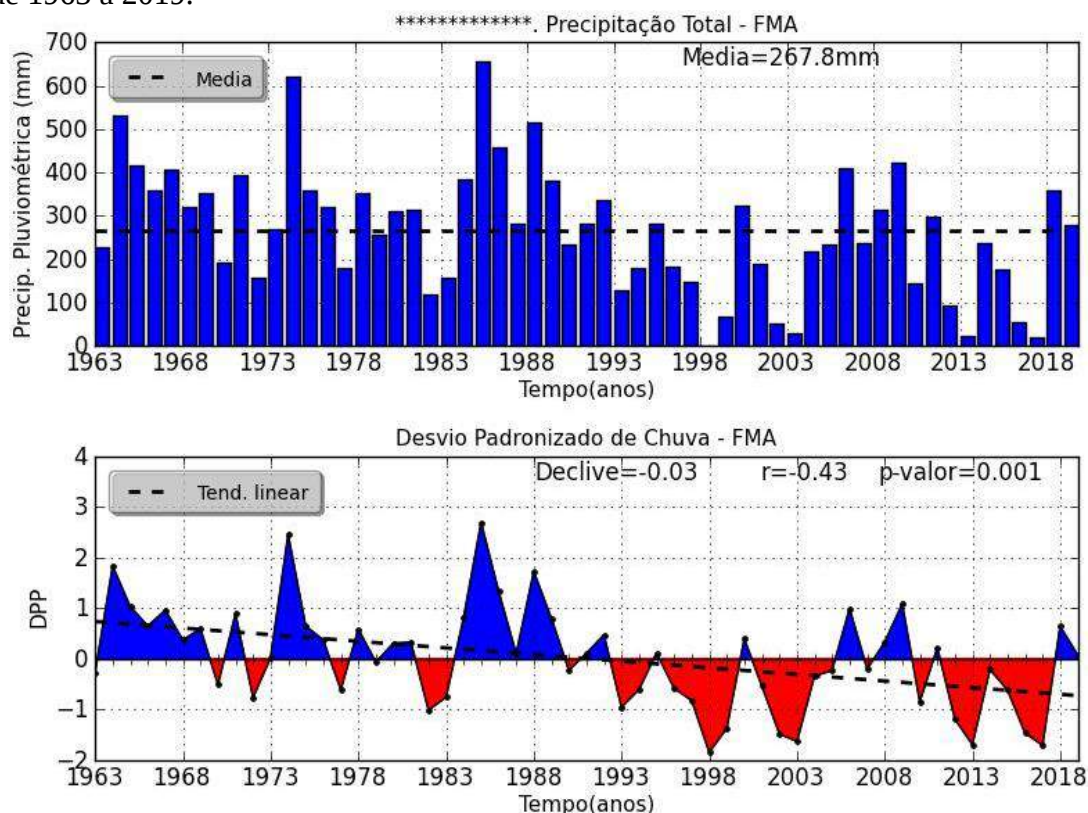
Tabela 13 - Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade de 1963 a 2019 de Santa Maria da Boa Vista -PE.

STA. MARIA DA BOA VISTA	Média	Mediana	Desvio Padrão
Janeiro	70.7	49.6	76.4
Fevereiro	80.4	71.5	62.5
Março	103.2	99.6	74.9
Abril	84.3	52	84.7
Mai	23.1	11.4	29.5
Junho	8.5	2	13.3
Julho	7.9	4.8	9.6
Agosto	2.6	0	7
Setembro	2.4	0	8.7
Outubro	9.7	0	18.8
Novembro	29.2	20.4	31.3
Dezembro	51.8	30.3	57.2

Fonte: A autora (2020).

A precipitação total no trimestre mais chuvoso (FMA) em Santa Maria da Boa Vista teve uma média de cerca de 267.8mm, e uma tendência significativa de diminuição das chuvas, sendo o declive de -0.03, o $r = -0.47$ (correlação negativa) e o p-valor de 0.001 (Figura 60).

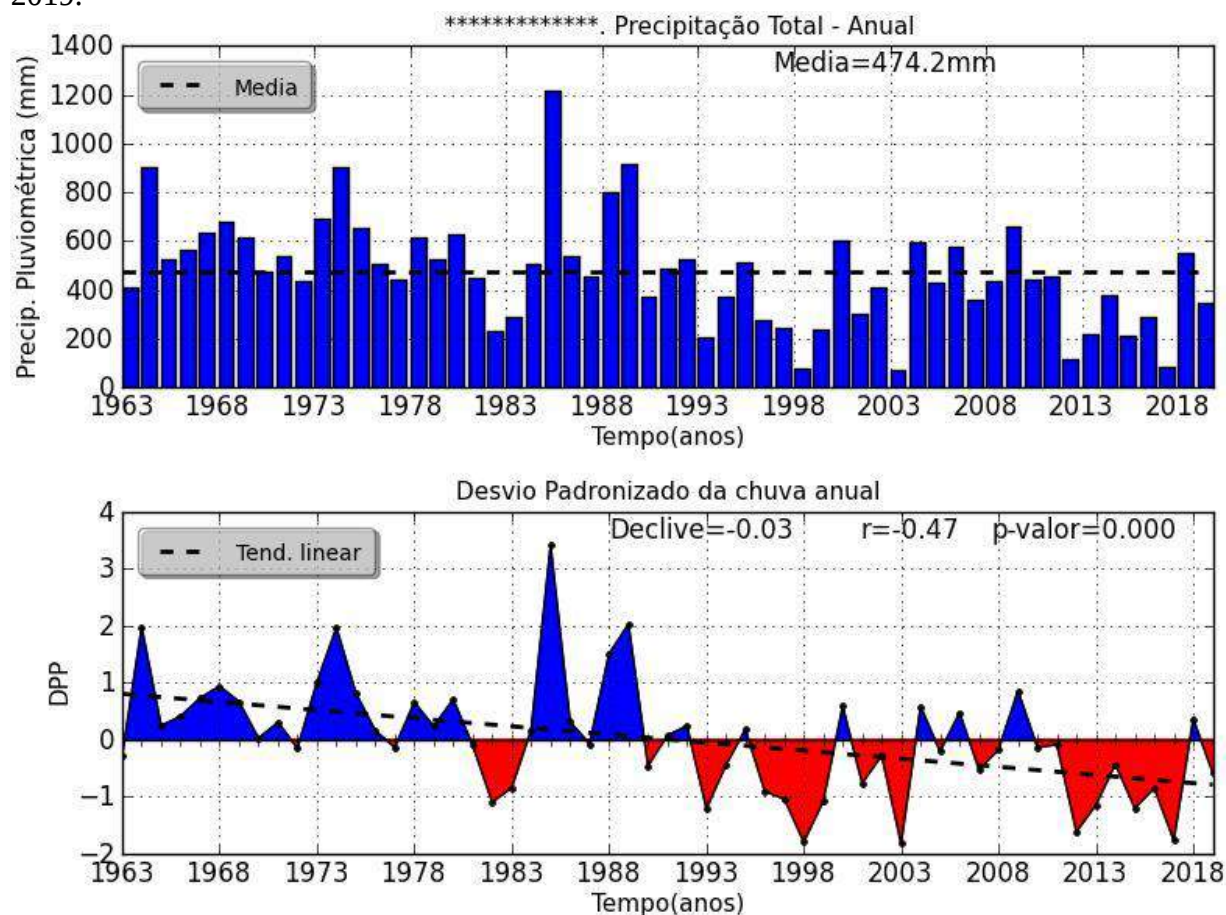
Figura 60 - Média histórica do trimestre FMA e DPP da estação de Santa Maria da Boa Vista-PE de 1963 a 2019.



Fonte: A autora (2020).

A precipitação total anual da estação de Santa Maria da Boa Vista-PE, que teve uma média de cerca de 474.2mm e uma tendência significativa de diminuição das chuvas, sendo o declive de -0.03, o $r = -0.47$ (correlação negativa) e o p-valor de 0.000 (Figura 61).

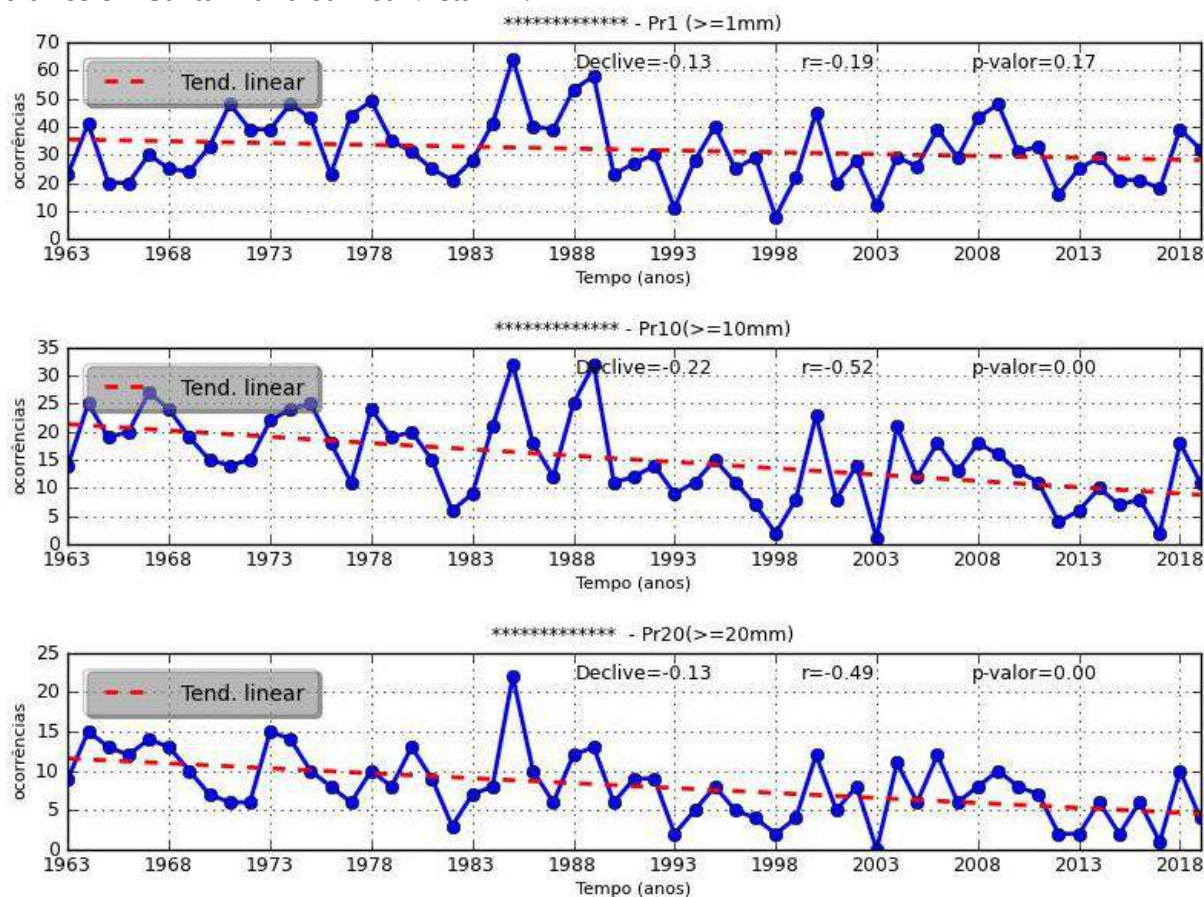
Figura 61 - Média histórica anual e DPP da estação de Santa Maria da Boa Vista-PE de 1963 a 2019.



Fonte: A autora (2020).

Posteriormente, elaborou-se a estimativa de dias com chuva iguais ou menores que 1mm ($\geq 1\text{mm}$), dias com chuvas iguais ou menores que 10mm ($\geq 10\text{mm}$) e dias com chuvas iguais ou menores do que 20mm diários ($\geq 20\text{mm}$) (Figura 62).

Figura 62 - Dias com chuva ≥ 1 mm, dias com chuva ≥ 10 mm e dias com chuva ≥ 20 mm diários em Santa Maria da Boa Vista-PE.



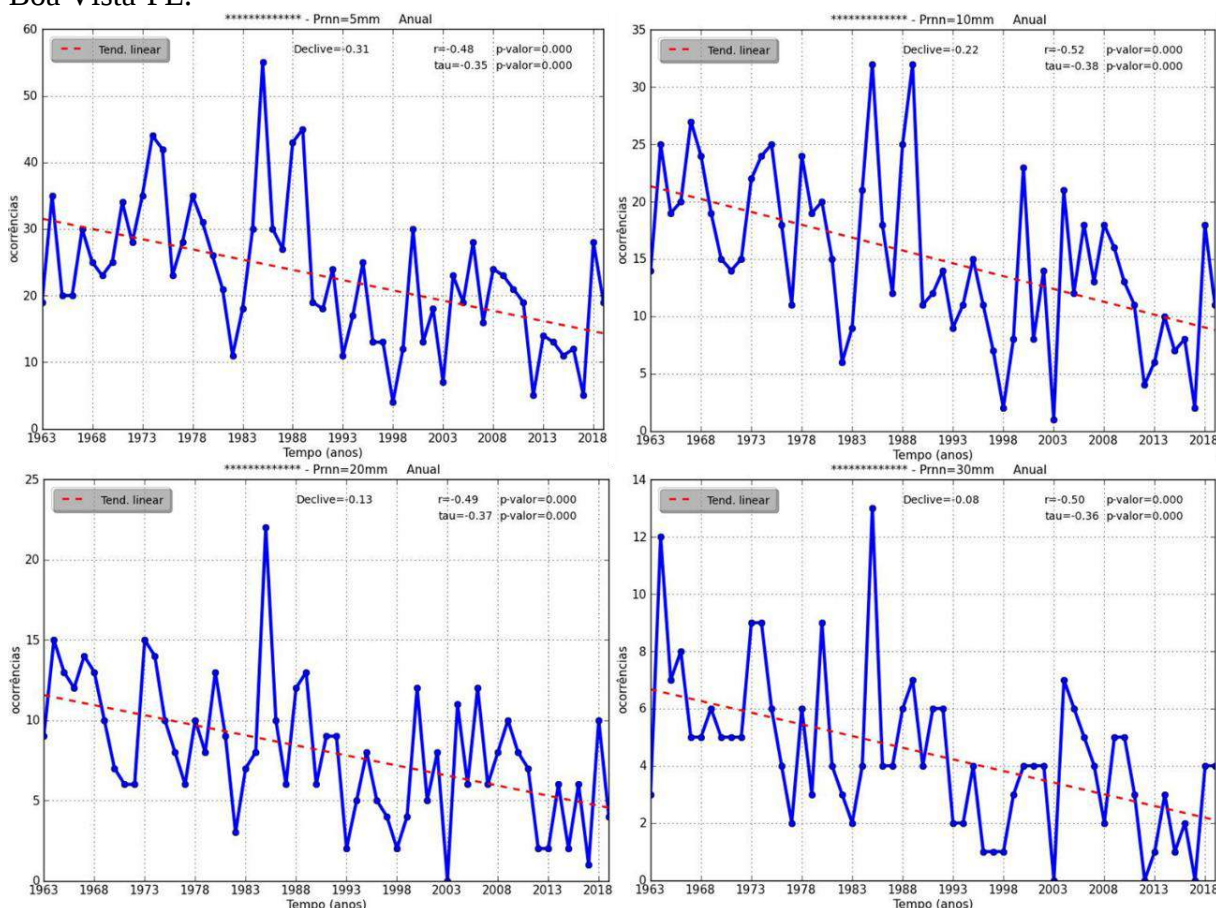
Fonte: A autora (2020).

Observou-se que os dias com chuva ≥ 1 mm apresentaram tendência linear negativa (declive = -0.13 e $r = -0.19$), com diminuição das precipitações maiores ou iguais a 1mm. O P-valor foi de 0.17, o que indica que a probabilidade de significância desse resultado não foi estatisticamente significativa.

Os dias com chuva ≥ 10 mm também tiveram uma tendência de diminuição ao longo dos anos (declive = -0.22 e $r = -0.52$), apresentando um nível de P-valor = 0.00. Já para dias com chuva iguais ou superiores a 20mm ocorreu a tendência de diminuição da ocorrência desses episódios (declive = -0.13 e $r = -0.49$), com um P-valor = 0.00, indicando que a tendência foi estatisticamente significativa.

A seguir, serão apresentados os volumes de precipitação ≥ 5 mm, e ≥ 10 mm, ≥ 20 mm e ≥ 30 mm de Santa Maria da Boa Vista-PE (Figura 63).

Figura 63 - Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Santa Maria da Boa Vista-PE.



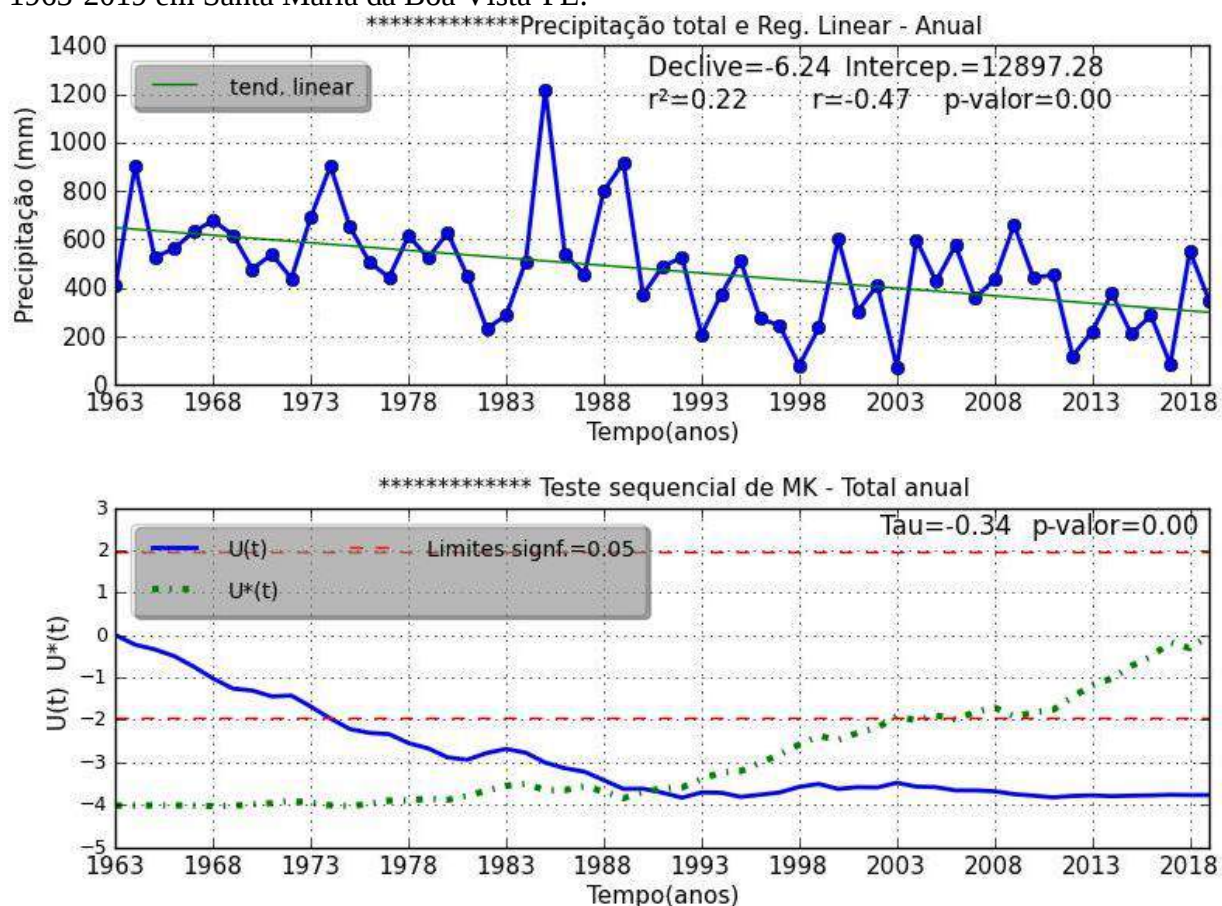
Em todos os cenários observados o volume de precipitação apresenta uma tendência de diminuição, sendo todos os volumes de precipitação analisados significantes estatisticamente. Fica evidenciado pela figura 63 que a precipitação no município de Santa Maria da Boa Vista apresentou uma variabilidade, com tendência de diminuição, tanto no volume de chuvas quanto nos extremos de precipitação.

Posteriormente foi analisada a precipitação a 95% de confiança (considerando 47mm de precipitação) e a 99% de confiança (considerando 74.9mm de precipitação), ambos apresentando uma correlação linear fraca, tendência de diminuição da precipitação e P-valor com significância estatística (Apêndice B). Bem como a precipitação máxima em 1 dia na estação de Santa Maria da Boa Vista-PE com tendência de diminuição não estatisticamente significativa (Apêndice C).

A (Figura 64) mostra a precipitação total, regressão linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall em Santa Maria da Boa Vista-PE. A regressão linear apresentou tendência significativa de queda (declive de -6.24 e $p\text{-valor} = 0.00$). No Teste Sequencial de Mann-Kendall, a curva estatística $U(t)$ e o seu inverso, a estatística $U^*(t)$ se cruzam em meados da década de 1970,

dentro do intervalo de confiança $1,96 < u(t) < 1,96$ (1,96 correspondendo a $\alpha = 0,05$), e cruza o limite de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$), mostrando tendência significativa (p-valor = 0.00).

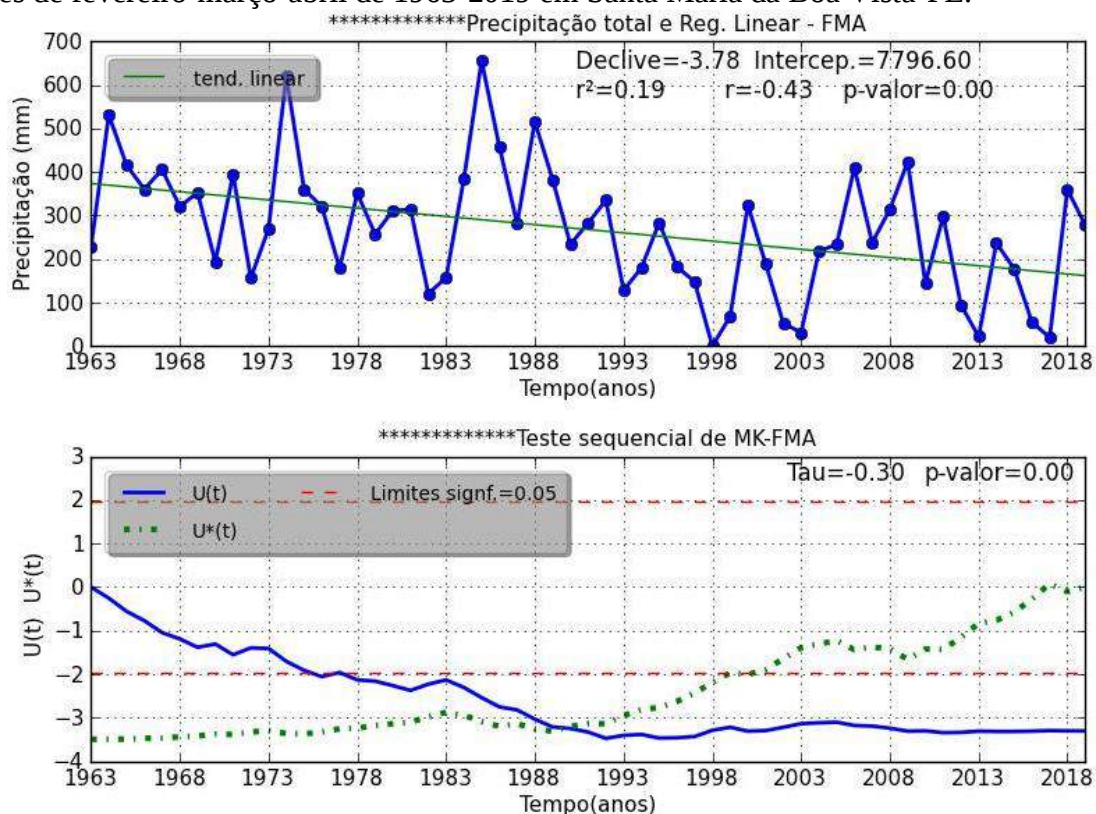
Figura 64 - Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963-2019 em Santa Maria da Boa Vista-PE.



Fonte: A autora (2020).

Em razão de que em Santa Maria da Boa Vista a regressão linear e o Teste Sequencial de Mann-Kendall terem apresentado tendência significante de queda da precipitação, houve a elaboração do gráfico de regressão linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall no trimestre mais chuvoso do município (Figura 65).

Figura 65 - Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall nos meses de fevereiro-março-abril de 1963-2019 em Santa Maria da Boa Vista-PE.



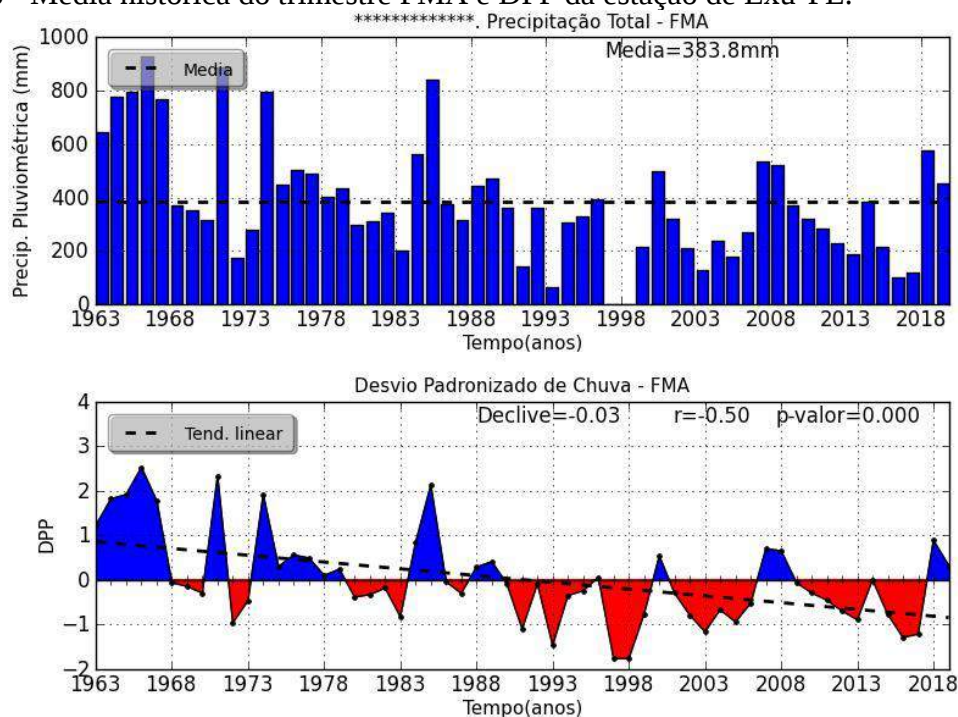
Fonte: A autora (2020).

A Regressão Linear apresentou tendência significativa de queda (declive = -2.96, $r = -0.37$ e $p\text{-valor} = 0.01$). No Teste Sequencial de Mann-Kendall, a curva estatística $U(t)$ e $U^*(t)$ se cruzam em meados da década de 1990, e $U(t)$ cruza o limite de confiança de 95% em meados da década de 1980, mostrando tendência significativa ($p\text{-valor} = 0.00$).

4.1.3.11 Análise de tendência climática no município de Exu-PE

A climatologia mensal e trimestral da precipitação pluviométrica, identificou o mês de março como o mais chuvoso e o trimestre de fevereiro-março-abril como sendo o mais chuvoso no município na estação de Exu-PE de 1963 a 2019 (Apêndice XI-A). A precipitação total no trimestre mais chuvoso (FMA) teve uma média de cerca de 383.8mm, e uma tendência significativa de diminuição das chuvas, com declive de -0.03, $r = -0.50$ (correlação negativa) e o $p\text{-valor}$ de 0.000 (Figura 66).

Figura 66 - Média histórica do trimestre FMA e DPP da estação de Exu-PE.



Fonte: A autora (2020).

Foram avaliadas a média, mediana e desvio padrão mensal com base na densidade das chuvas da estação de Exu-PE, e observa-se que o mês de março apresenta a maior média de chuvas na estação (Tabela 14).

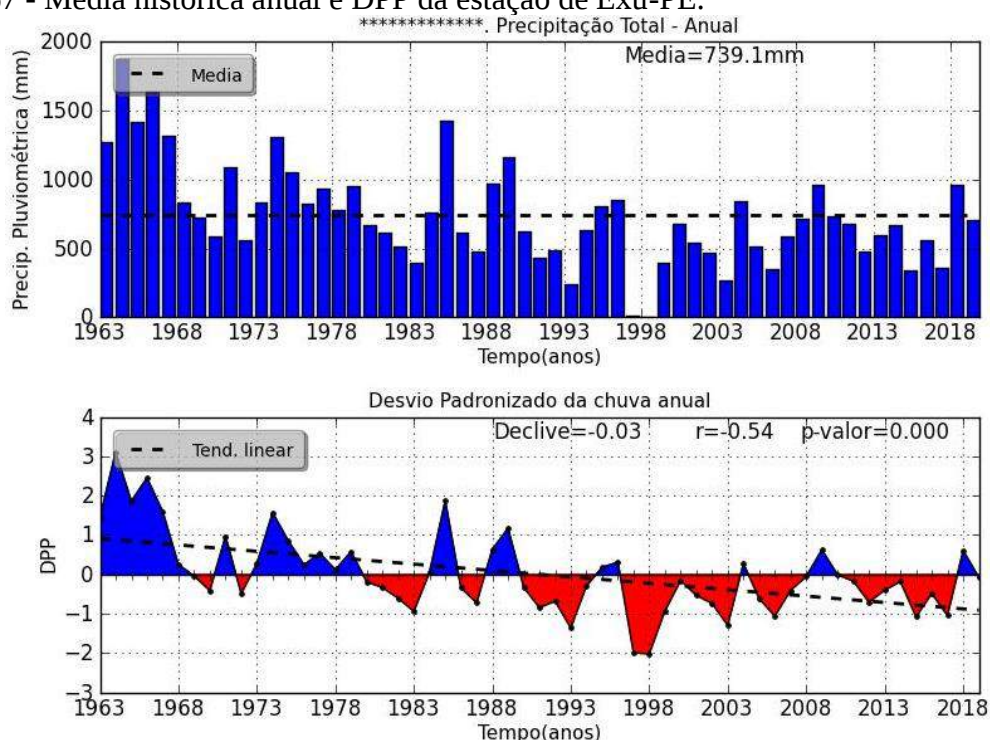
Tabela 14 - Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade de 1963 a 2019 de Exu-PE.

EXU	Média	Mediana	Desvio Padrão
Janeiro	118.4	100.3	92.6
Fevereiro	114.1	83	101.7
Março	150.9	148.4	84
Abril	118.7	96.3	105.6
Mai	64.3	46.7	78.2
Junho	31.4	22.3	33.9
Julho	21.5	10	35
Agosto	10.1	0	22.7
Setembro	8.1	0	17.8
Outubro	13.1	0	21.2
Novembro	29.2	15.3	37.9
Dezembro	59.2	46	65.8

Fonte: A autora (2020).

A seguir tem-se a precipitação total anual da estação de Exu-PE, que teve uma média de cerca de 739.1mm e uma tendência significativa de diminuição das chuvas, sendo o declive de -0.03, o $r = -0.54$ (correlação negativa) e p-valor de 0.000 (Figura 67).

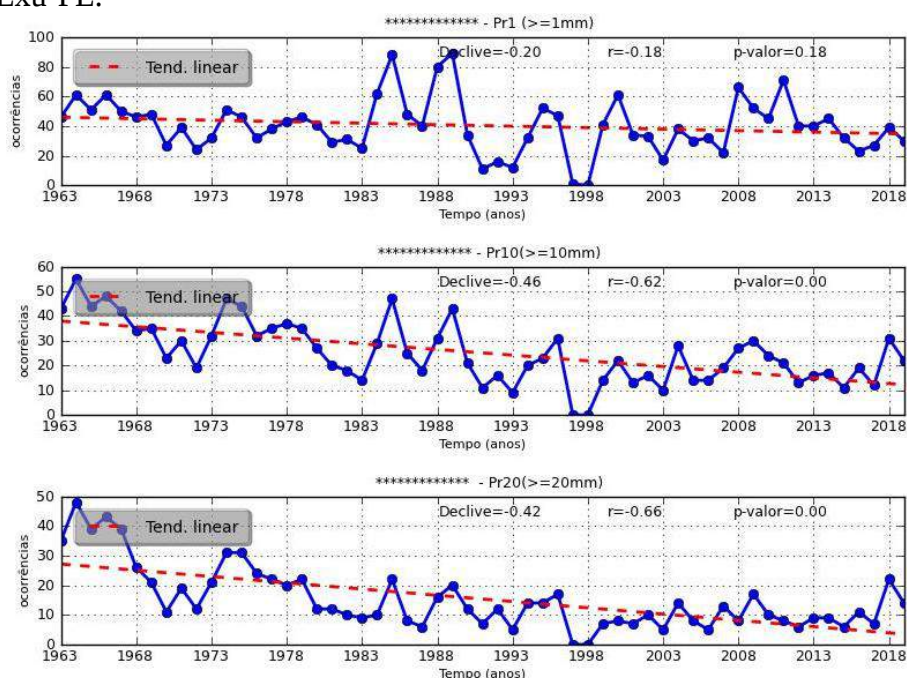
Figura 67 - Média histórica anual e DPP da estação de Exu-PE.



Fonte: A autora (2020).

Posteriormente, elaborou-se a estimativa de dias com chuva iguais ou menores que 1mm ($\Rightarrow$ 1mm), dias com chuvas iguais ou menores que 10mm ($\Rightarrow$ 10mm) e dias com chuvas iguais ou menores do que 20mm diários ($\Rightarrow$ 20mm) em Exu-PE (Figura 68).

Figura 68 - Dias com chuva $\Rightarrow$ 1 mm, dias com chuva $\Rightarrow$ 10 mm e dias com chuva $\Rightarrow$ 20 mm diários em Exu-PE.



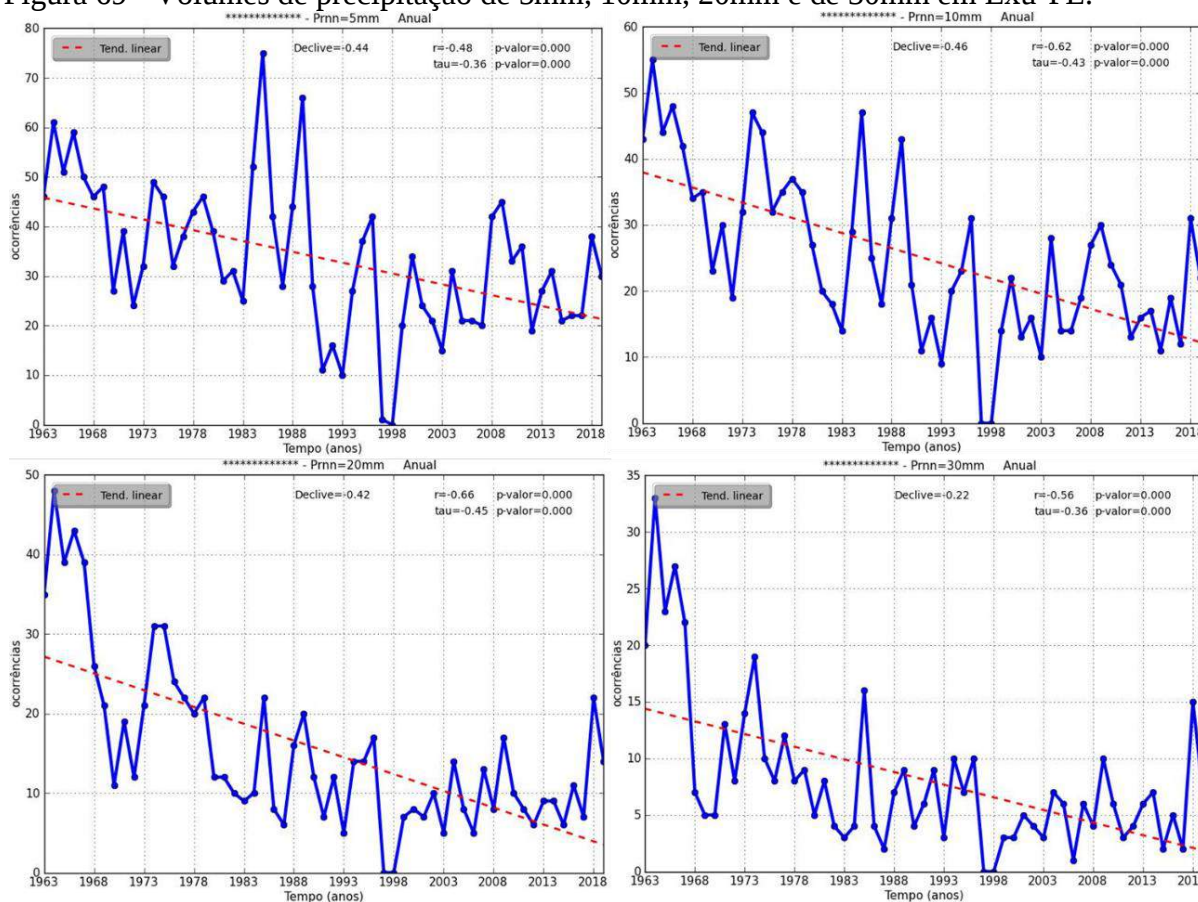
Fonte: A autora (2020).

Observou-se que os dias com chuva $\Rightarrow 1\text{mm}$ apresentaram tendência linear negativa (declive = -0.20 e $r = -0.18$), com diminuição das precipitações maiores ou iguais a 1mm . O P-valor foi de 0.18 , o que indica que a probabilidade de significância desse resultado não foi estatisticamente significativa.

Os dias com chuva $\Rightarrow 10\text{mm}$ também tiveram uma tendência de diminuição ao longo dos anos (declive = -0.46 e $r = -0.62$), apresentando um nível de P-valor = 0.00 . Já para dias com chuva iguais ou superiores a 20mm ocorreu a tendência de diminuição da ocorrência desses episódios (declive = -0.42 e $r = -0.66$), com um P-valor = 0.00 , contudo a tendência não foi estatisticamente significativa.

A seguir, serão apresentados os volumes de precipitação $\Rightarrow 5\text{mm}$, e $\Rightarrow 10\text{mm}$, $\Rightarrow 20\text{mm}$ e $\Rightarrow 30\text{mm}$ de Exu-PE (Figura 69).

Figura 69 - Volumes de precipitação de 5mm , 10mm , 20mm e de 30mm em Exu-PE.



Fonte: A autora (2020).

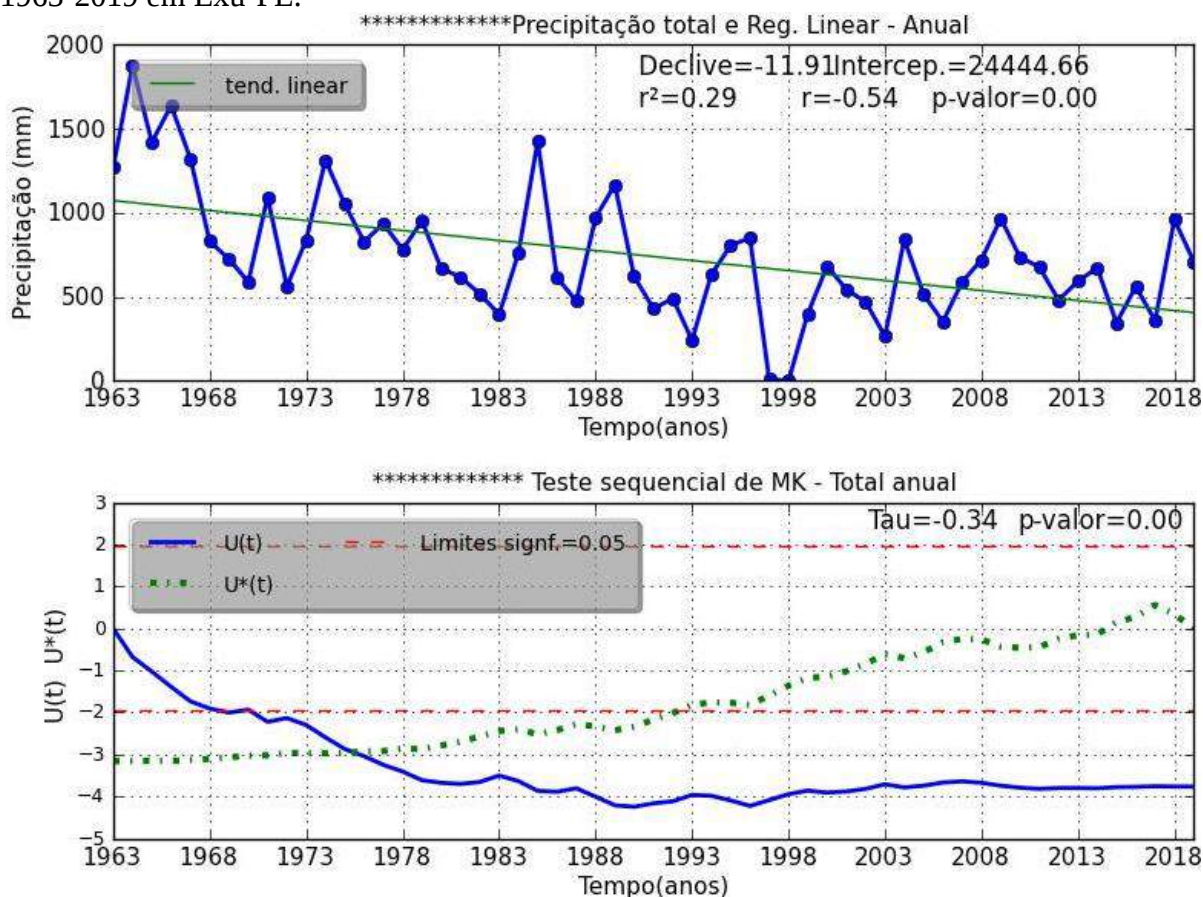
Em todos os cenários observados o volume de precipitação apresenta uma tendência de diminuição, sendo os volumes de precipitação de 5mm , 10mm , 20mm e 30mm significantes estatisticamente. Fica evidenciado pela figura 69 que a precipitação no município de Exu-PE

apresentou uma variabilidade, com tendência de diminuição, tanto no volume de chuvas quanto nos extremos de precipitação.

Posteriormente foi analisada a precipitação a 95% de confiança (considerando 50.4mm de precipitação) e a 99% de confiança (considerando 81.1mm de precipitação), ambos apresentando uma correlação linear fraca, tendência de diminuição da precipitação e P-valor não representativo de significância estatística (Apêndice B). Bem como a precipitação máxima em 1 dia na estação de Exu-PE com tendência de diminuição não estatisticamente significativo (Apêndice XI-C).

A (Figura 70) mostra a precipitação total, regressão linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall em Exu-PE. A regressão linear apresentou tendência significativa de queda com forte significância estatística (declive de -11.91, $r = -0.54$ e $p\text{-valor} = 0.00$). No Teste Sequencial de Mann-Kendall, a curva estatística $U(t)$ e o seu inverso, a estatística $U^*(t)$ se cruzam em meados da década de 1970, dentro do intervalo de confiança $1,96 < u(t) < 1,96$ ($1,96$ correspondendo a $\alpha = 0,05$), e cruza o limite de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$) no final da década de 1960, mostrando tendência com forte significância estatística ($\tau = -0.34$ e $p\text{-valor} = 0.00$).

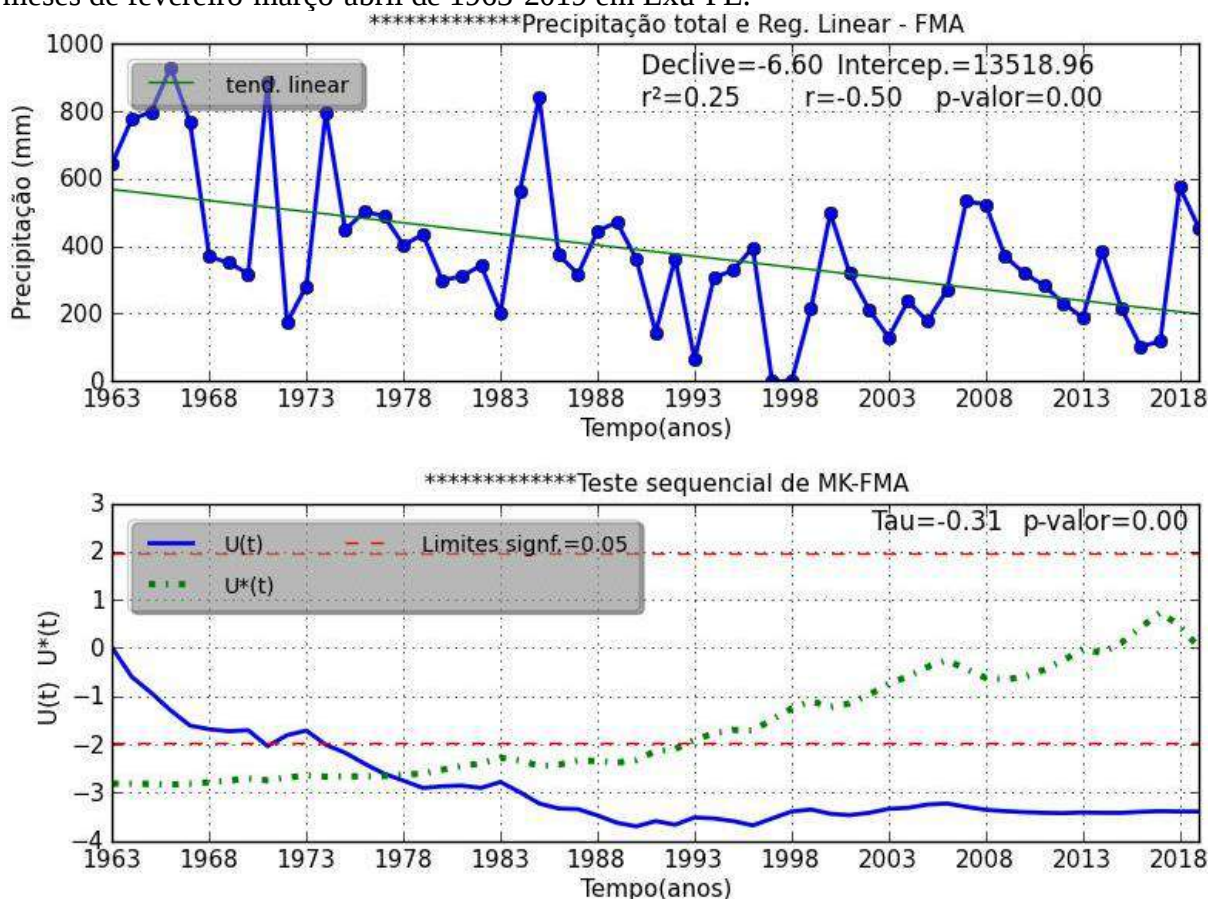
Figura 70 - Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963-2019 em Exu-PE.



Fonte: A autora (2020).

Em razão de que em Exu-PE a precipitação total, regressão linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall terem apresentado tendência significativa de queda da precipitação, houve a elaboração do gráfico de regressão linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall no trimestre mais chuvoso do município (Figura 71).

Figura 71 - Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall nos meses de fevereiro-março-abril de 1963-2019 em Exu-PE.



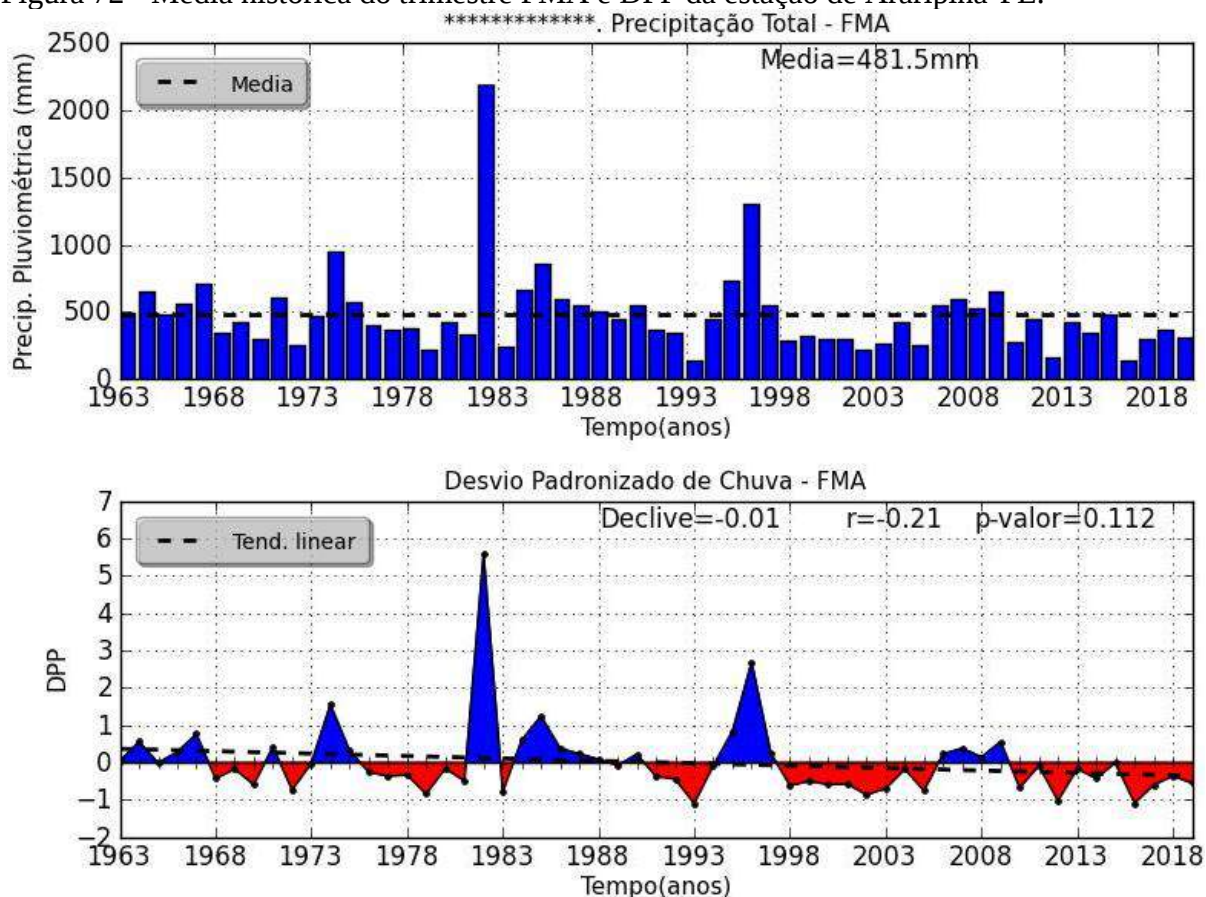
A Regressão Linear apresentou tendência significativa de queda (declive = -6.60, $r = -0.50$ e $p\text{-valor} = 0.01$). No Teste Sequencial de Mann-Kendall, a curva estatística $U(t)$ e $U^*(t)$ se cruzam no final da década de 1970, e $U(t)$ cruza o limite de confiança de 95% em meados da década de 1970, mostrando tendência significativa ($\text{tau}=-0.31$ e $p\text{-valor} = 0.00$).

4.1.3.12 Análise de tendência climática no município de Araripina-PE.

A climatologia mensal e trimestral da precipitação pluviométrica, identificou o mês de março como o mais chuvoso e o trimestre de fevereiro-março-abril como sendo o mais chuvoso no município na estação de Araripina de 1963 a 2019 (Apêndice A). A análise pluviométrica da estação de Araripina evidencia que a precipitação na estação tem maior ocorrência nos meses

de janeiro a maio. A precipitação total no trimestre mais chuvoso (FMA) teve uma média de cerca de 481.5mm, e uma tendência significativa de diminuição das chuvas, sendo o declive de -0.01, o $r = -0.21$ (correlação negativa) e o p-valor de 0.112 (Figura 72).

Figura 72 - Média histórica do trimestre FMA e DPP da estação de Araripina-PE.



Fonte: A autora (2020).

Foram avaliadas a média, mediana e desvio padrão mensal com base na densidade das chuvas da estação de Araripina-PE, e observa-se que o mês de março apresenta a maior média de chuvas na estação (Tabela 15).

Tabela 15 - Média, mediana e desvio padrão mensal da pluviosidade de 1963 a 2019 de Araripina-PE.

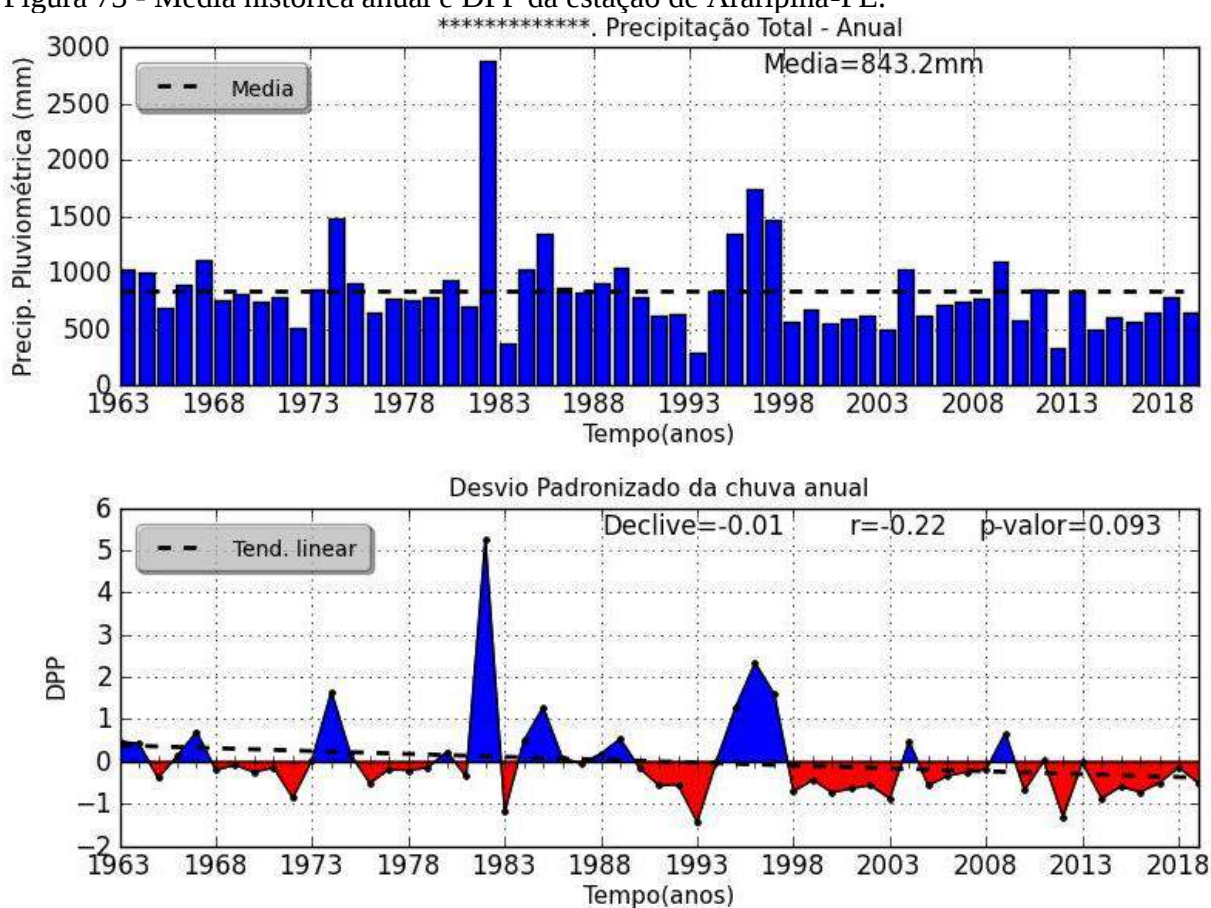
ARARIPINA	Média	Mediana	Desvio Padrão
Janeiro	131.9	115.6	82.8
Fevereiro	155.2	128.5	108.9
Março	208.8	174	198.3
Abril	117.4	101.7	85.8
Maió	52.9	30.2	71.4

Junho	18.8	12	24.2
Julho	13.8	6.5	19.2
Agosto	4	0.2	7.9
Setembro	4.8	0	9.3
Outubro	15.5	7.4	23.7
Novembro	40.6	29.5	33.1
Dezembro	79.5	63.8	63.3

Fonte: A autora (2020).

A seguir tem-se a precipitação total anual da estação de Araripina-PE, que teve uma média de cerca de 843.2mm e uma tendência de diminuição das chuvas, sendo o declive de - 0.01, o $r = -0.22$ (correlação negativa) e o p-valor de 0.093 (Figura 73).

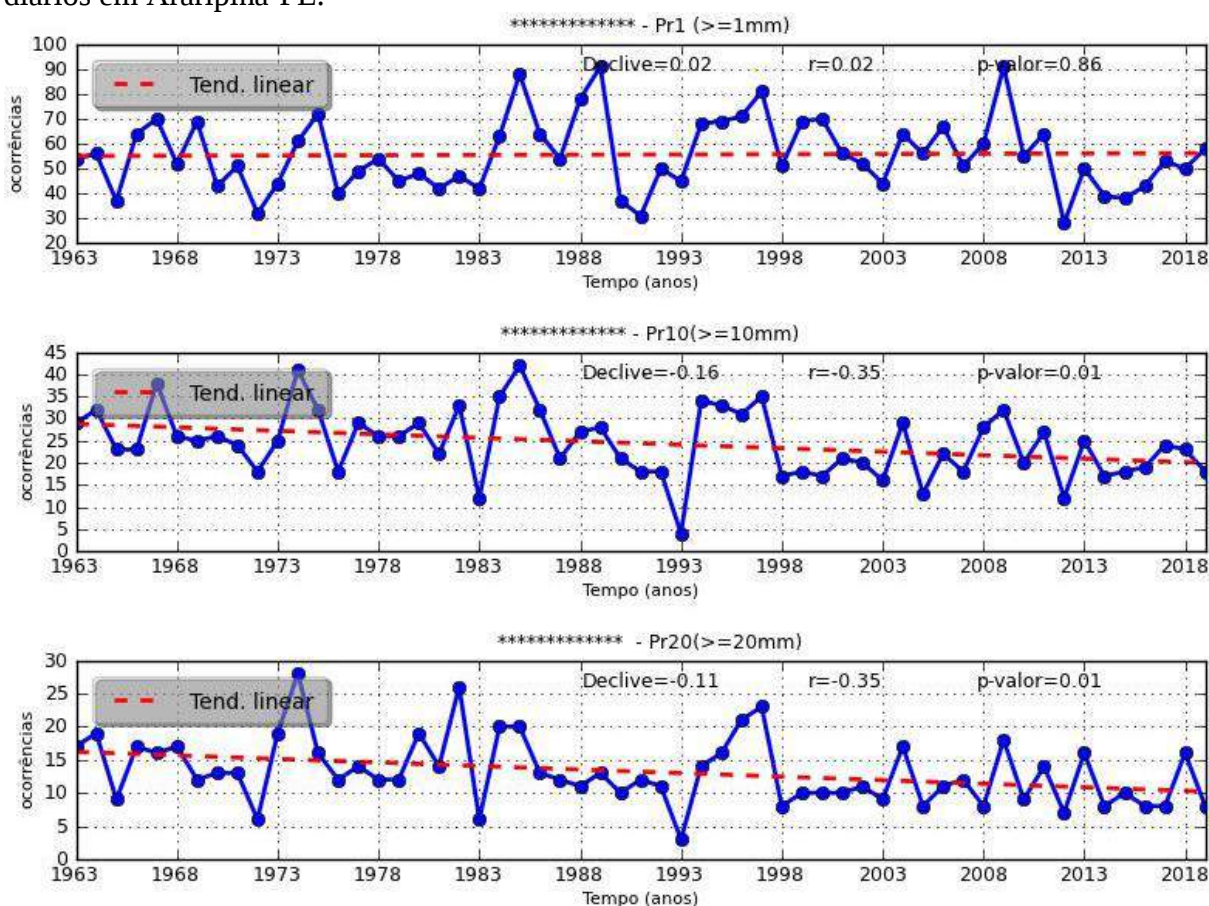
Figura 73 - Média histórica anual e DPP da estação de Araripina-PE.



Fonte: A autora (2020).

Posteriormente, elaborou-se a estimativa de dias com chuva iguais ou menores que 1mm ($\geq 1\text{mm}$), dias com chuvas iguais ou menores que 10mm ($\geq 10\text{mm}$) e dias com chuvas iguais ou menores do que 20mm diários ($\geq 20\text{mm}$) em Araripina-PE (Figura 74).

Figura 74 - Dias com chuva ≥ 1 mm, dias com chuva ≥ 10 mm e dias com chuva ≥ 20 mm diários em Araripina-PE.



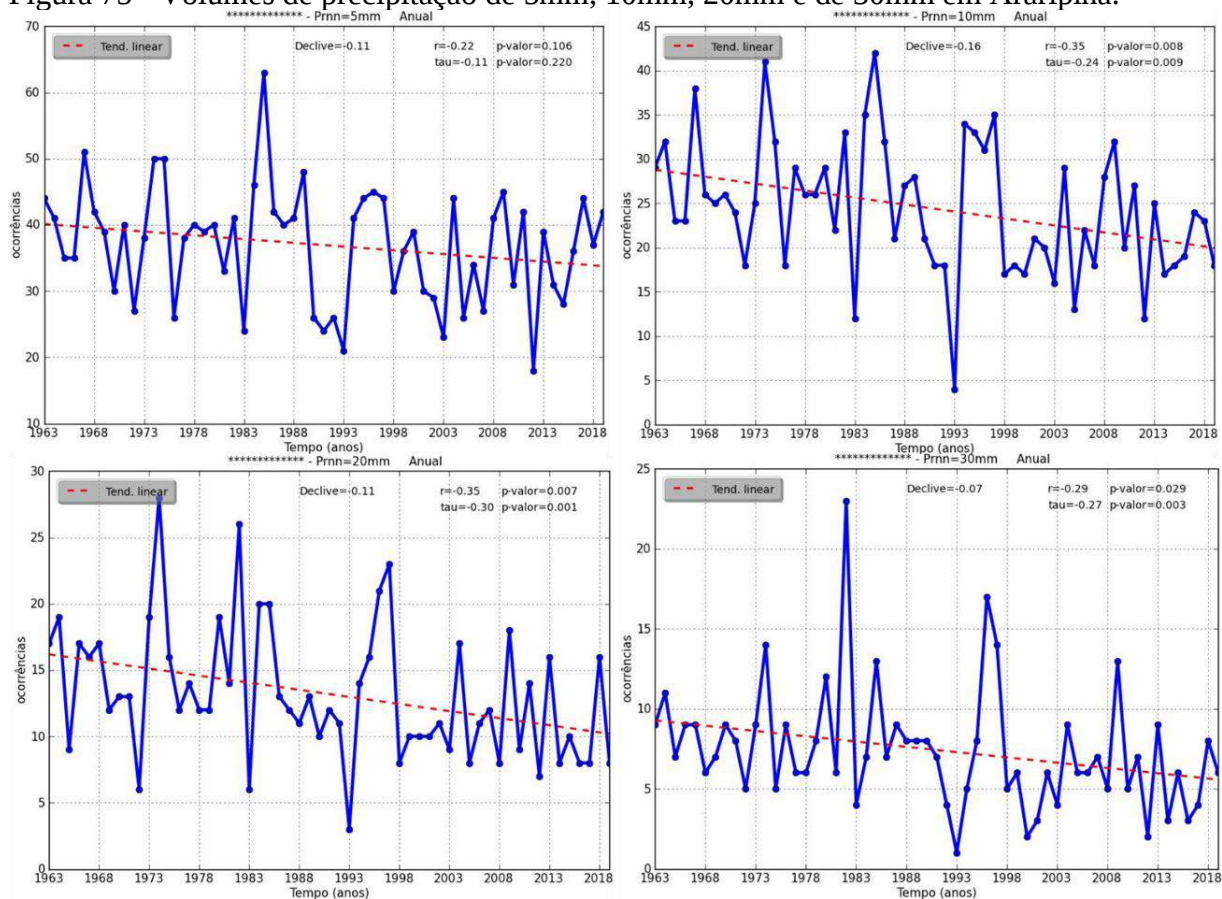
Fonte: A autora (2020).

Observou-se que os dias com chuva ≥ 1 mm apresentaram tendência linear positiva (declive = 0.02 e $r = 0.02$), com aumento das ocorrências de precipitações maiores ou iguais a 1mm. O P-valor foi de 0.86, o que indica que não há significância nesse resultado.

Os dias com chuva ≥ 10 mm também tiveram uma tendência de diminuição ao longo dos anos (declive = -0.16 e $r = -0.35$), apresentando um nível de P-valor = 0.01. Já para dias com chuva iguais ou superiores a 20mm ocorreu a tendência de diminuição da ocorrência desses episódios (declive = -0.11 e $r = -0.35$), com um P-valor = 0.01, contudo a tendência não foi estatisticamente significativa.

A seguir, serão apresentados os volumes de precipitação ≥ 5 mm, ≥ 10 mm, ≥ 20 mm e ≥ 30 mm de Araripina -PE (Figura 75).

Figura 75 - Volumes de precipitação de 5mm, 10mm, 20mm e de 30mm em Araripina.



Fonte: A autora (2020).

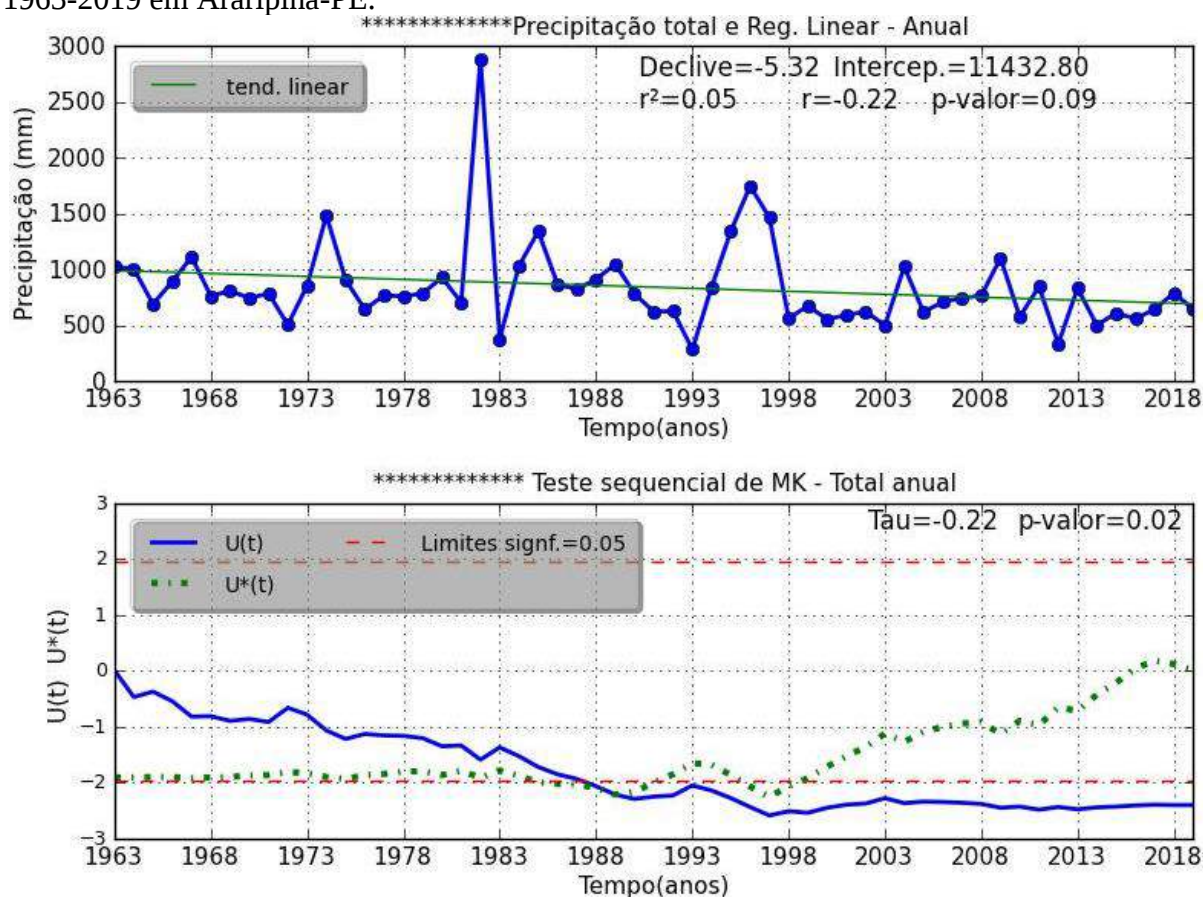
Em todos os cenários observados o volume de precipitação apresenta uma tendência de diminuição, sendo os volumes de precipitação de 20mm e 30mm os mais significantes estatisticamente. Fica evidenciado pela figura anterior que a precipitação no município de Araripina-PE apresentou uma variabilidade, com tendência de diminuição, tanto no volume de chuvas quanto nos extremos de precipitação.

Posteriormente foi analisada a precipitação a 95% de confiança (considerando 51.2mm de precipitação) e a 99% de confiança (considerando 92.3mm de precipitação), ambos apresentando tendência de diminuição da precipitação e P-valor não representativo de significância estatística (Apêndice B). Bem como a precipitação máxima em 1 dia na estação de Araripina-PE com tendência de diminuição não estatisticamente significativo (Apêndice C).

A (Figura 76) mostra a precipitação total, regressão linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall em Araripina-PE. A regressão linear apresentou tendência, contudo, sem significância estatística (declive de -5.32, $r = -0.22$ e $p\text{-valor} = 0.09$). No Teste Sequencial de Mann-Kendall, a curva estatística $U(t)$ e o seu inverso, a estatística $U^*(t)$ se cruzam no final da década de 1980, dentro do intervalo de confiança $1,96 < u(t) < 1,96$ (1,96 correspondendo a $\alpha = 0,05$), e cruza o

limite de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$) também em meados da década de 1980, mostrando tendência com forte significância estatística ($\tau = -0.22$ e $p\text{-valor} = 0.02$).

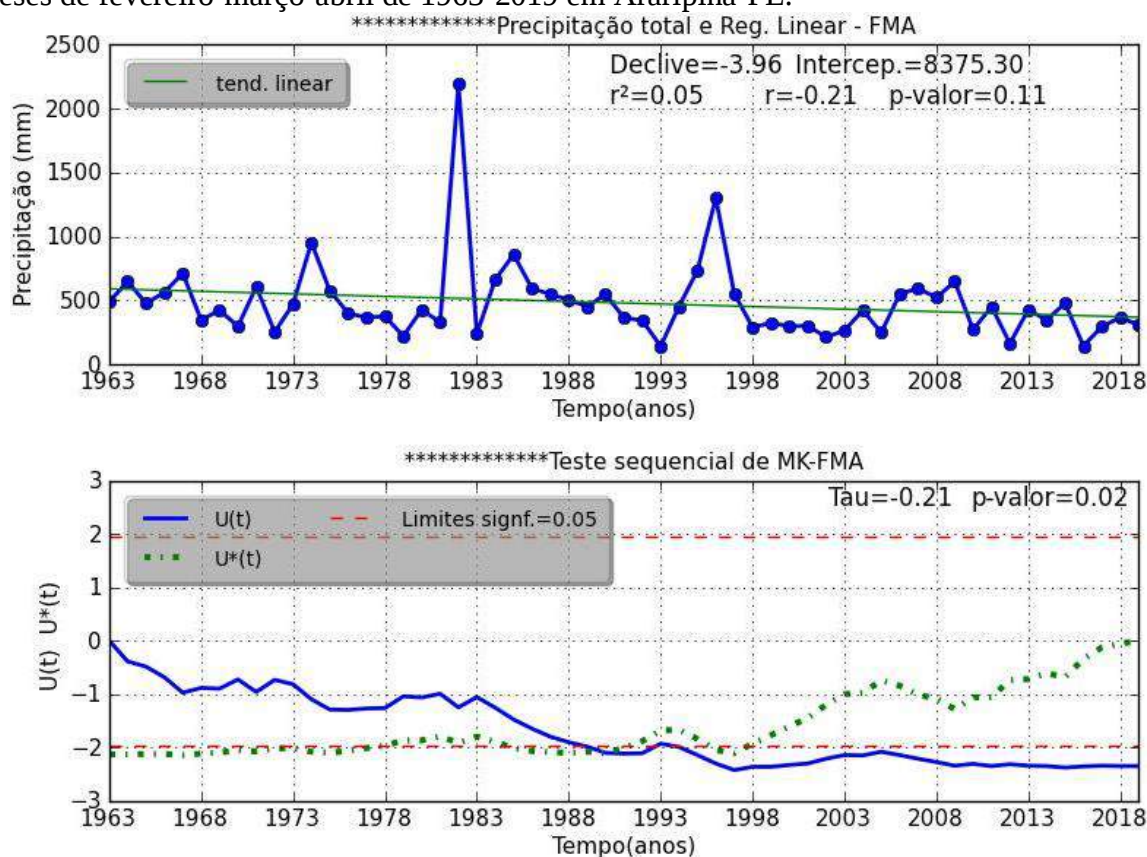
Figura 76 - Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall anual de 1963-2019 em Araripina-PE.



Fonte: A autora (2020).

Em razão de que em Araripina-PE a precipitação total, regressão linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall terem apresentado tendência significativa de queda da precipitação, houve a elaboração do gráfico de precipitação total, regressão linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall no trimestre mais chuvoso do município. A Regressão Linear apresentou tendência significativa de queda (declive = -3.96, $r = -0.21$ e $p\text{-valor} = 0.11$). No Teste Sequencial de Mann-Kendall, a curva estatística $U(t)$ e $U^*(t)$ se cruzam no final da década de 1980, e $U(t)$ cruza o limite de confiança de 95% em meados da década de 1980, mostrando tendência significativa ($\tau = -0.21$ e $p\text{-valor} = 0.00$) (Figura 77).

Figura 77 - Precipitação Total, Regressão Linear e Teste Sequencial de Mann-Kendall nos meses de fevereiro-março-abril de 1963-2019 em Araripina-PE.



Fonte: A autora (2020).

Desse modo, com base nas análises estatísticas realizadas, foi elaborado o gráfico de tendência às mudanças climáticas dos postos pluviométricos estudados com base na precipitação total, regressão linear e Teste de Mann Kendall dos anos de 1963 a 2019 (Tabela 16):

Tabela 16 - Testes estatísticos de tendência dos postos pluviométricos analisados do Submédio São Francisco.

Testes estatísticos	Coefficiente Angular (declive)	P-valor (Precip. Pluviom.)	r	Tau	P-valor (Teste de Mann-Kendall)	Ano de Cruzamento	Limite de Signif.
Itapetim	-4.29	0.13	-0.2	-0.13	0.16	1973	1978/1988
São José do Egito	-2.37	0.28	-0.15	-0.08	0.39	1966	1978
Tuparetama	-5.94	*0.01	-0.32	-0.19	*0.04	1968	1973
Iguaraci	-4.89	*0.01	-0.33	-0.26	*0.00	1975	1973
Ibimirim	-6.37	*0.00	-0.40	-0.25	*0.01	1986	1976
Floresta	-0.63	0.63	-0.06	-0.02	0.84	1963	-
Serra Talhada	-1.8	0.35	-0.13	-0.05	0.6	1973	-
Salgueiro	-3.94	*0.02	-0.31	-0.23	*0.01	1993	1987

<i>Parnamirim</i>	-5.33	*0.01	-0.36	-0.26	*0.00	1970	1970
<i>Sta. Maria da Boa Vista</i>	-6.24	*0.00	-0.47	-0.34	*0.00	1990	1975
<i>Exu</i>	-11.91	*0.00	-0.54	-0.34	*0.00	1975	1970
<i>Araripina</i>	-5.32	0.09	-0.22	-0.22	*0.02	1988	1988

Fonte: A autora (2020).

Salienta-se que, pelos resultados estimados do teste de Mann-Kendall, os postos de Tuparetama, Iguaraci, Ibimirim, Salgueiro, Parnamirim, Sta. Maria da Boa Vista, Exu e Araripina, apresentaram tendência estatística significativa às mudanças climáticas. Segundo Penereiro e Ferreira (2011) o grande diferencial do teste estatístico de Mann-Kendall é que este é um método de análise das mudanças climáticas que permite detectar e localizar de forma aproximada o ponto inicial de determinada tendência, como foi apontado neste trabalho.

A partir desse teste foi possível visualizar que a maior parte das tendências observadas aconteceram em meados da década de 1970, que, segundo Kayano; Oliveira; Andreoli (2009), é um período marcado pelo grande desvio climático associado à Oscilação Decadal do Pacífico, que passou a ser negativa, resultando em aumento de chuvas. Além da atuação de fenômenos como El Niño e La Niña, que nas décadas de 1980/90 coincidiram com uma ODP positiva, o que também coincidiu com a ocorrência dos El Niños mais fortes do século (em 1983, 1997 e 1998).

Em se tratando do volume de precipitação, todos os postos apresentaram tendência de diminuição, excetuando-se o caso de Ibimirim-PE. Essa análise é corroborada por trabalhos como o de Lacerda et al. (2016), a partir da análise de tendência das precipitações e pelos cálculos de balanço hídrico em um município do Submédio São Francisco, onde se constatou a diminuição da precipitação total, diminuição da umidade do solo e aumento da evapotranspiração nas décadas de 1950-60 a 2010, e também pelo trabalho de Silva (2013), que constatou tendência de diminuição da precipitação total anual da intensidade média diária de chuva, e do número de dias em que a precipitação é maior que 10mm e 20mm em Pernambuco.

Souza e Azevedo (2012) verificaram tendências dos índices de detecção de mudanças climáticas derivados da precipitação pluviométrica e das temperaturas máximas e mínimas para um posto da cidade do Recife com o software RClimdex a partir de dados diários de precipitação e temperatura no período de 1961 a 2008. No trabalho, os resultados derivados da precipitação não apresentaram tendências significativas de redução. Por outro lado, diagnosticou-se aumento da frequência de eventos extremos de chuvas a partir da década de 1980, com chuvas diárias superiores a 100 mm.

Os resultados encontrados neste trabalho corroboram com o de Ferreira *et al.* (2017), que ao analisar a precipitação interanual para o posto de Moreilândia-PE e Santa Cruz-PE, também encontrou tendência negativa na série temporal de precipitação, no semiárido pernambucano, entre as décadas de 1970 e 1980. A análise atual também confirma o estudo mais recente no município de Araripina, realizado por (SILVA, E. R. A. C. *et al.*, 2018) no qual a precipitação apresentou variabilidade, com tendência de diminuição, tanto no volume de chuvas quanto nos extremos de precipitação.

Já em outras regiões de Pernambuco os resultados variaram. Barbosa *et al.* (2016), a partir das informações geradas que os índices de precipitação pluviométrica com o software Climap no município de Garanhuns-PE, concluíram que os dados não apresentam uma tendência de aumento significativa, o que não configura um cenário expressivo no âmbito das mudanças climáticas. Dessa forma, salienta-se que estudos que utilizam esses tipos de testes já têm sido desenvolvidos e substanciam resultados importantes.

Pereira *et al.* (2017) em recente estudo realizado no Agreste pernambucano no período de 1963 a 2013, diagnosticaram uma mudança no padrão da precipitação, evidenciando que até o final da década de 1980 havia uma frequência maior dos anos úmidos, e que a partir da década de 1990 houve uma diminuição significativa de anos chuvosos, indicando que os anos secos passaram a predominar na região. Os autores destacaram que nos anos classificados como muito secos foram emitidos documentos oficiais pelos municípios decretando estado de calamidade pública e/ou emergência, ocasionado pela seca e/ou estiagem, com impactos sociais e grandes prejuízos à agricultura e pecuária.

Já estudos mais recentes como o de Silva *et. al* (2018) os autores avaliaram a tendência nos padrões de precipitação interanual ao longo de cerca de 4 décadas de período amostral (1970 a 2012) com base em análises estatísticas no município de Araripina-PE, encontrando resultados interessantes em relação à indicação de alteração no regime pluviométrico na região. Os resultados encontrados pelos autores indicam a importância da análise dos dados intra- anuais e interanuais para identificação de tendências mensais, o que no caso do trabalho realizado por (SILVA, E. R. A. C. *et al.*, 2018), permitiu revelar uma maior distribuição da precipitação em relação aos meses do ano, o que, em longo prazo, poderá acarretar um processo de umidificação da região analisada.

No estudo atual, foi observado que as áreas mais secas da Bacias analisadas apresentam maior variabilidade, com o maior número de eventos intensos. A tendência de todos os postos analisados foi o de diminuição da precipitação pluviométrica, acarretando, nos anos mais recentes, secas mais frequentes, o que pode estar associada a uma maior frequência de

fenômenos como o El Niño. Os resultados sugerem que as Bacias do Submédio São Francisco, contempladas com o Projeto de Transposição, podem ser influenciadas pelas anomalias de TSM, já que a maioria dos postos estudados apresentaram tendência de mudança climática a partir da década de 1970, o que coincidiu com o fim da atuação negativa da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e início da ODP positiva.

4.1.4 Conclusão

O estudo demonstrou que tem havido uma tendência de diminuição da precipitação pluviométrica nas Bacias do Brígida, Terra Nova e Pajeú, tanto em termos de volume quanto de ocorrência dos episódios de chuva. As séries mensais, trimestrais e anuais da precipitação, mostraram que a ocorrência de dias com chuvas acima de 1, 10 e 20mm tiveram diminuição na maioria dos postos analisados, bem como diminuição também no volume de precipitação acima de 5, 10, 20 e 30mm, na maioria das estações das Bacias analisadas.

As bacias apresentaram alta variabilidade da precipitação, que é uma das características marcantes no semiárido do Nordeste. Essa variabilidade mostrou-se acentuada nas Bacias estudadas em função de fatores climáticos, como as características do relevo. Na maioria das estações com altitudes abaixo de 500m, como as de Floresta, Salgueiro, Parnamirim e Santa Maria da Boa Vista, a precipitação foi menor do que 600mm, excetuando-se Serra Talhada, que está mais ao Norte da Bacia do Pajeú, onde os índices de precipitação são maiores e o município de Ibimirim.

As estações à Leste do Pajeú apresentaram tendência de diminuição da precipitação, mas das 7 estações analisadas na Bacia, apenas 3 estações mostraram tendência de mudança climática. A Bacia do Rio Brígida foi a que mais apresentou tendência de diminuição da precipitação em todos os postos analisados, e mesmo nas estações de Exu e Araripina, que ficam acima de 500m de altitude e estão ao Norte da Bacia, a tendência de diminuição da precipitação foi significativa.

Foi observado que, embora a maioria das bacias apresentassem tendência significativa de diminuição da precipitação, nem sempre o trimestre mais chuvoso, que nas Bacias analisadas é o trimestre de fevereiro-março-abril, teve uma tendência de diminuição significativa, o que pode estar relacionado com uma maior distribuição da precipitação ao longo do ano. Dessa forma, seria interessante em trabalhos futuros na região semiárida, discutir a articulação de escalas na análise das precipitações no semiárido, de modo que não fossem analisados apenas a escala interanual da precipitação, pois eles podem mascarar outros processos inerentes à variabilidade intra-anual.

Além disso o estudo demonstrou que para extremos de precipitação superiores a 10mm ocorreu uma tendência significativa de diminuição da frequência desses episódios nas Bacias estudadas, demonstrando que apesar de poder estar havendo uma melhor distribuição das chuvas ao longo do ano, os dados de precipitação interanual revelaram uma tendência estatisticamente significativa de diminuição das chuvas.

O teste estatístico de Mann-Kendall permitiu detectar e localizar de forma aproximada o ponto inicial das tendências, que na maioria dos postos analisados apontou as décadas de 1970 e 1980 como ponto inicial da mudança, o que coincidiu com o final da atuação negativa da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e início da ODP positiva, que pode ser um indicativo da tendência de aumento dos eventos de seca na região. Nas estações pluviométricas estudadas foi observado que os episódios de seca têm aumentado nas últimas duas décadas nas Bacias contempladas com o Projeto de Transposição do Rio São Francisco, no Submédio São Francisco em Pernambuco, o que pode estar associado às anomalias de TSM sobre a precipitação, e a fenômenos de escala global como o El Niño.

Desse modo, este trabalho foi útil por caracterizar e identificar tendências nos padrões de precipitação em Bacias de zonas semiáridas do Submédio São Francisco, que possuem uma grande importância estratégica regional por se tratar de Bacias contempladas pelo Projeto de Transposição do Rio São Francisco, e que apresentam uma alta variabilidade climática, e portanto, uma grande susceptibilidade em relação às mudanças climáticas, o que pode acarretar no futuro problemas em relação à disponibilidade hídrica. Por essa razão, esse estudo lançou luz sobre a dinâmica da precipitação nas Bacias estudadas e as problemáticas inerentes à heterogeneidade do regime pluvial e a tendência às mudanças climáticas nas Bacias do Submédio São Francisco, o que possibilitará, no futuro, o desenvolvimento de estratégias para o planejamento ambiental e para o monitoramento climático em bacias hidrográficas.

Referências

- HENSON, S. A. *et al.* Rapid emergence of climate change in environmental drivers of marine ecosystems. *Nature Communications*, 2017.
- JONES, J. M. *et al.* Assessing recent trends in high-latitude Southern Hemisphere surface climate. *Nature Climate Change*. [S.l: s.n.], 2016
- KOUDAHE, K. *et al.* Trend Analysis in Standardized Precipitation Index and Standardized Anomaly Index in the Context of Climate Change in Southern Togo. *Atmospheric and Climate Sciences*, 2017.
- MADSEN, H. *et al.* Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology*, 2014.
- MECHLER, R.; BOUWER, L. M. Understanding trends and projections of disaster losses and climate change: is vulnerability the missing link? *Climatic Change*, 2015.

- ROBINS, P. E. *et al.* *Impact of climate change on UK estuaries: A review of past trends and potential projections. Estuarine, Coastal and Shelf Science*. [S.l: s.n.], 2016
- SALVADOR, M. D. A. CLIMAP – APLICATIVO PARA ANÁLISE DE DADOS CLIMÁTICOS - VERSÃO 3.0. *Revista Brasileira de Climatologia*, 2017.
- SILVA, E. R. A. C. *et al.* ANÁLISE DA TENDÊNCIA TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA INTERANUAL E INTRA-ANUAL NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO. *Revista Brasileira de Climatologia*, 2018.
- TANG, K. H. D. *Climate change in Malaysia: Trends, contributors, impacts, mitigation and adaptations. Science of the Total Environment*. [S.l: s.n.], 2019
- THOMPSON, D. W. J. *et al.* Quantifying the role of internal climate variability in future climate trends. *Journal of Climate*, 2015.
- WORKU, G. *et al.* Observed changes in extremes of daily rainfall and temperature in Jemma Sub-Basin, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019.
- YUE, S.; PILON, P.; CAVADIAS, G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 2002.

4.2 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE NORMALIZAÇÃO DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO PARA BACIAS DO SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO

Resumo: A complexidade inerente à análise de séries hidrológicas e à formulação de modelos capazes de representar a dinâmica de uma Bacia hidrográfica representa um desafio na busca de metodologias que possam salientar aspectos de interesse e prover uma base de dados confiável para estudos de previsibilidade. Nesse sentido o tratamento dos dados hidrológicos é fundamental para a escolha da metodologia de análise adequada para diferentes estudos. Ao utilizar a abordagem de wavelets é imprescindível a escolha da normalização dos dados, para que as especificidades da série sejam identificadas e correlacionadas com fenômenos de interesse. Desse modo, o objetivo do trabalho foi comparar dois métodos diferentes de normalização de dados pluviométricos para escolha da melhor abordagem para identificação de correlações entre os dados pluviométricos das sub-bacias do Pajeú, Terra Nova e Brígida, no Submédio São Francisco em Pernambuco, com os principais moduladores das condicionantes atmosféricas na região. Para tal, foi comparada a normalização proposta por Cazelles, que consiste na normalização feita com base na razão entre o desvio padrão e a média global da série, com a metodologia de análise de wavelets utilizada por Kayano, onde a normalização é feita com base no desvio padrão e média de cada mês. Os resultados demonstraram que o método de normalização proposto por Cazelles apresenta melhor resultado quando a correlação se dá entre fenômenos que possuem relação em alta frequência, nas escalas de tempo intrasazonal, sazonal, semianual, anual, bianual e até 4 anos. Já o método proposto por Kayano apresentou melhor resposta quando a relação que se dá com fenômenos de baixa frequência, por serem normalizados mês a mês, salientando a escala interdecadal e destacando os extremos da precipitação em relação ao grid temporal. O estudo foi importante por indicar um melhor método e análise para avaliação de dados de precipitação no Submédio São Francisco e assim proporcionar um melhor diagnóstico e previsibilidade.

Palavras-chave: Anomalias de TSM, variabilidade da precipitação, índices climáticos, coerência wavelet.

4.2.1 Introdução

A *wavelet* é uma função capaz de decompor e descrever (ou representar) outra função originalmente descrita no domínio do tempo, de forma a podermos analisar a função modificada em distintas escalas de tempo e frequência (COHEN, 2019; GOMES; VELHO, 2015; LILLY; OLHEDE, 2009; PARAMESWARIAH; COX, 2002). Nesse sentido, as funções *wavelets* são importantes ferramentas de processamento de sinais, muito aplicadas na compressão de dados, eliminação de ruído, separação de componentes no sinal, identificação de singularidades, detecção de auto-semelhança, etc. (DAUBECHIES, I, 1993; GIRON-SIERRA, 2017; MALLAT, STEPHANE, 2009; RIOUL; VETTERLI, 1991; RUSTAMOV; GUIBAS, 2019; WEEKS, 2007).

Embora a análise de Fourier seja adequada para quantificar componentes periódicos constantes em uma série temporal, ela não é capaz de caracterizar sinais cujo conteúdo de frequência muda com o tempo. Por outro lado, uma decomposição de Fourier pode determinar

todos os componentes espectrais incorporados em um sinal e não fornece nenhuma informação sobre quando eles estão presentes (CAZELLES, BERNARD; CAZELLES; CHAVEZ, 2014; DAUBECHIES, I, 1993). Ao contrário da análise de Fourier, na análise de wavelets existem dificuldades na obtenção de uma normalização adequada que preserve todas as características interessantes das séries estudadas.

O tratamento dos dados é algo essencial para a análise das wavelets. Entre as várias abordagens desenvolvidas para análise de dados não estacionários, a análise de wavelets é uma das que mais se destaca, no entanto, elas apresentam limitações relacionadas aos diferentes métodos de normalização utilizados, pois o desempenho de um modelo está diretamente ligado à disponibilidade, à quantidade e à qualidade dos dados de entrada utilizados (KÜHN-KAUFFELDT *et al.*, 2013).

Existem inúmeros desafios quanto à preservação das características marcantes nas séries amostrais. Desse modo, é preciso se atentar ao fato de que séries temporais possuem quatro principais padrões: **I) variações cíclicas ou ciclos** - flutuações nos valores da variável com duração superior a um ano, e que se repetem com certa periodicidade; **II) tendência** - é o comportamento de longo prazo da série, e é caracterizado por um desenvolvimento suave durante o período de observações. Em séries hidrológicas, tendências não constantes são atribuídas a alterações nas características da bacia, como mudanças na cobertura do solo ou mudanças climáticas; **III) sazonalidade** - flutuações nos valores da variável com duração inferior a um ano, e que se repetem todos os anos, geralmente em função das estações do ano (portanto, se os dados forem registrados anualmente não haverá influência da sazonalidade na série); **IV) variações irregulares ou ruído** - no ruído, estão concentrados os fatores aleatórios que compõem a série, sendo uma base sobre a qual a série temporal se desenvolve, podendo ser removido com métodos de normalização. O ruído pode ser subdividido em termos totalmente aleatórios (ruído branco) e aqueles que guardam ainda certo nível de dependência com outros termos da própria série. Assim, os três primeiros padrões representam componentes determinísticos e podem, a princípio, ser determinados para fins preditivos e um método satisfatório de extração de informação de uma série temporal teria como produto, além dos termos determinísticos, uma série de ruído branco (KOTTEGODA; HORDER, 1980).

A decomposição da série permite então, a identificação dos componentes atuantes no conjunto de dados explorados, possibilitando a obtenção de índices e/ou equações para previsibilidade da dinâmica futura da série. Dessa forma, ao utilizar a abordagem com as wavelets é imprescindível a escolha da normalização dos dados, para que as especificidades da série sejam identificadas e correlacionadas com fenômenos de interesse.

Nesse sentido, este trabalho foi realizado com o objetivo de comparar dois métodos diferentes de normalização de dados pluviométricos para escolha da melhor abordagem para identificação de correlações entre os dados pluviométricos de 3 sub-bacias do Submédio São Francisco em Pernambuco com os principais moduladores das condicionantes atmosféricas na região.

Foram utilizados neste trabalho duas metodologias de normalização de dados, a primeira utilizada por (CAZELLES, BERNARD *et al.*, 2007) e proposta por (TORRENCE; COMPO, 1998), que consiste na transformação das séries temporais estudadas em raiz quadrada, sendo todas as séries filtradas e normalizadas antes das análises, sendo essa normalização feita com base na razão entre o desvio padrão e a média global da série. E a metodologia de análise de wavelets utilizada por Kayano, onde a normalização é feita com base no desvio padrão e média de cada mês.

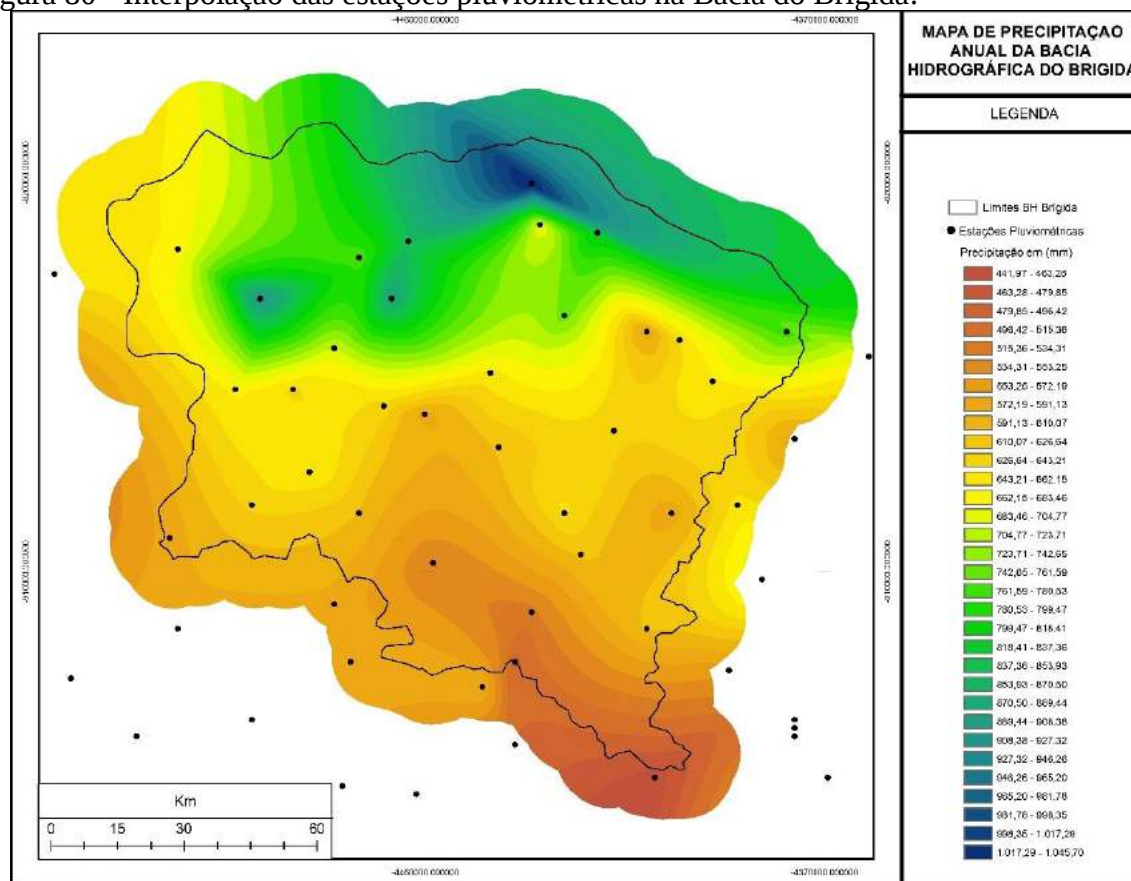
O objetivo deste estudo é avaliar dois métodos de normalização que identifique os componentes aleatórios da série de precipitação e que utilize uma medida normalizada que garanta a comparação entre fenômenos ocorridos em regiões com distintas características climáticas, bem como para estabelecer diferenciações entre um mesmo fenômeno ocorrido em momentos históricos distintos.

4.2.2 Material e Métodos

4.2.2.1 Delimitação e caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende as Bacias hidrográficas pernambucanas dos rios Pajeú, Terra Nova e Brígida, inseridas no âmbito do Eixo Norte do Projeto de Transposição do Rio São Francisco, onde foram selecionados postos para análise dos dados de precipitação e os dados foram interpolados através do método *Natural Neighbor* no ArcGis (Figuras 78, 79 e 80):

Figura 80 - Interpolação das estações pluviométricas na Bacia do Brígida.



Fonte: A autora (2020).

4.2.2.2 Dados pluviométricos.

Os dados trabalhados nessa primeira etapa foram os dados de precipitação de 7 postos pluviométricos selecionados na Bacia do Pajeú-PE com dados de 1963 a 2019, portanto de 55 anos nos municípios de Ibimirim, Serra Talhada, Itapetim, São José do Egito, Igaraci, Floresta e Tuparetama. Foram trabalhados os dados de precipitação de 1 posto pluviométrico selecionado na Bacia do Terra Nova-PE com dados de 1963 a 2019, no município de Salgueiro. Por último, foram trabalhados os dados de precipitação de 4 postos pluviométricos selecionado na Bacia do Brígida-PE, com dados de 1963 a 2019, nos municípios de Parnamirim, Santa Maria da Boa Vista, Exu e Araripina (Tabela 17).

Tabela 17 - Dados pluviométricos das Bacias do Pajeú, Terra Nova e Brígida.

CÓDIGO	ESTAÇÃO	LAT	LONG	ALT	PRECIP ANUAL	FALHAS	FALHAS (correção)
APAC 155	ITAPETIM	7°37'67"	37°20'06"	638	625.2	7,9% (1990 -1992)	Estação 92 e 40 ≤ 1%

APAC 92	S. JOSE DO EGITO	7°44'04"	37°28'06"	625	627.7	4,11% (1991 - 1992)	Estação 40 $\leq 1\%$
APAC 296/151	TUPARETAMA	7°71'67"	37°35'	580	593.7	3,2% (1991)	Estação 529 e 69 $\leq 1\%$
APAC 69/148	IGUARACI	7°50'	37°23'	595	610.9	1,48%	Estação 502 $\leq 1\%$
APAC 424/14	IBIMIRIM	8°38'33"	37°63'33"	454	601.1	1,55%	Estação 234 $\leq 1\%$
APAC 266/87	FLORESTA	8°41'67"	37°93'33"	449	459.1	1,7	Estação 468, 234 e 93 $\leq 1\%$
APAC 12	SERRA TALHADA	7°93'06"	38°28'89"	480	645	1,57%	Estação 485 e 13 $\leq 1\%$
APAC 8	SALGUEIRO	8°4'	39°7'	415	576.4	1,17	Estação 226 $\leq 1\%$
APAC 172	PARNAMIRIM	8°08'89"	39°57'75"	395	487.5	1,2%	Estação 413, 233, 235 $\leq 1\%$
APAC 242/187	SANTA MARIA DA BOA VISTA	8°42'33"	39°95'42"	406	474.2	0,13%	Estação 245, 247 $\leq 1\%$
APAC 51/550	EXU	7°51'61"	39°72'94"	526	739.1	1,37%	Estação 362 $\leq 1\%$
APAC 2/225	ARARIPINA	7°57'67"	40°50'58"	639	843.2	0,13%	Estação 3 e 36 $\leq 1\%$

Fonte: A autora (2020).

4.2.2.3 Aplicação das wavelets contínuas e de coerência.

Para análise de como o conteúdo da frequência de um sinal muda com o tempo foi utilizada a transformada de *wavelet* contínua (CWT). Além disso, a análise de fases foi usada para caracterizar a associação entre duas séries temporais conforme recomendado por (CAZELLES, B., 2018; CAZELLES, BERNARD *et al.*, 2007; CAZELLES, BERNARD; CAZELLES; CHAVEZ, 2014).

A função *wavelet* Morlet, que consiste em uma onda plana de período determinado, finita em extensão, multiplicada por uma gaussiana, foi utilizada neste trabalho, e é com frequência aplicada na análise de sinais considerados “naturais”. A decomposição da *wavelet* é, portanto, uma representação linear do sinal onde a variação é preservada (DAUBECHIES, I, 1993).

Essa função foi escolhida pelo fato de possuir um formato característico semelhante aos identificados na série-temporal analisada. A ondaleta Morlet é complexa e possui características semelhantes às de sinais meteorológicos, tais como simetria ou assimetria, e variação temporal brusca ou suave. Segundo a literatura, este é um critério para escolha da função ondaleta (Weng e Lau, 1994; Morettin, 1999). A *wavelet* Morlet é definida por:

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} \exp(i^2 \omega_0 t) \exp(-t^2/2) \quad (1)$$

Este wavelet é o produto de um complexo exp sinusoidal ($i^2 \omega_0 t$) multiplicado por um envelope Gaussiano ($\exp(-t^2/2)$), onde $\psi(t)$ é a função de dois parâmetros, t é o tempo, o termo $\pi^{-1/4}$ é um fator de normalização para garantir a variação da unidade e o termo ω_0 é a frequência angular central da wavelet, de caráter adimensional com valor igual a 6, para que neste caso particular, possa satisfazer a condição de admissibilidade. Todos introduzidos no “script” de programação do Software Matlab®. O período de anos dos ciclos e a escala temporal dominante foram obtidos por programação no Software Matlab® com comandos específicos.

A decomposição de uma função com a aplicação de *wavelets* é denominada como transformada *wavelet*. O conceito fundamental da transformada *wavelet* é ser uma transformada proporcional e pontual à escala. Ou seja, ela estuda o sinal em escalas diversas e desloca-se analisando cada uma das partes do sinal até que todas as estruturas coerentes que compõe o sinal sejam encontradas. Portanto, é apropriada para analisar eventos irregularmente distribuídos e séries temporais que contêm potência não-estacionária em várias diferentes frequências sendo ideal por preservar fenômenos locais, não-periódicos e multiescalares, como dados de precipitação pluviométrica.

Nesse sentido, as wavelets contínuas (CWs) produzem uma decomposição redundante no sentido de que as informações extraídas de uma determinada escala se sobrepõem ligeiramente às extraídas de escalas vizinhas. No entanto, as CWs são mais robustas ao ruído quando comparadas com outros esquemas de decomposição. Desse modo, a transformada de *wavelet* contínua decompõe uma função definida no domínio da frequência, em uma outra função definida no domínio do tempo e frequência, determinada por:

$$W_{x(a,\tau)} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi * \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{*a,\tau}(t) dt \quad (2)$$

Onde:

$W_{x(a,\tau)}$ = coeficiente *wavelet*;

Os parâmetros a e τ denotam a dilatação (fator de escala) e a translação (mudança de tempo), respectivamente;

o fator $\frac{1}{\sqrt{a}}$ normaliza as wavelets para que tenham variação unitária e, portanto, sejam comparáveis para todas as escalas a ;

* representa a forma complexa do conjugado;

$x(t)$ = o sinal;

$\psi(t)$ = função de dois parâmetros, um para a posição no tempo τ e outro para a escala das wavelets a .

Sendo assim, a transformação wavelet pode ser pensada como uma correlação cruzada de um sinal $x(t)$ com um conjunto de wavelets $\psi((t - \tau) / a)$ de várias “larguras” ou escalas a , em diferentes posições no tempo τ . Os coeficientes da wavelet, $W_{x(a,\tau)}$, representam assim a contribuição das escalas a em diferentes posições horárias τ . Na equação (2), o fator $\frac{1}{\sqrt{a}}$ em linha normaliza as wavelets para que tenham variação unitária e, portanto, sejam comparáveis para todas as escalas a , conforme proposto por (CAZELLES, BERNARD; CAZELLES; CHAVEZ, 2014).

Por meio da utilização de *wavelet*, é possível estimar o espectro de potência *wavelet* eq. (3), que é a repartição da variância entre o parâmetro de escala a e a diferente localização de tempo t . Ressaltando-se que o parâmetro de escala *wavelet* a é inversamente proporcional à frequência central da *wavelet*.

$$S_x(f(\text{escala}), t(\text{tempo})) = |W_x(f, t)|^2 \quad (3)$$

Vale ressaltar que o parâmetro de escala wavelet a é inversamente proporcional à frequência central da wavelet f_0 . Desta forma, deve-se considerar a relação da escala a com a sua frequência central quando for escolher a wavelet. Para a wavelet Morlet, podemos notar que de fato temos $f \cong \frac{1}{a}$ para $f_0 = 2\pi$.

Portanto, a escala a pode ser substituída pelo período p ou frequência f , facilitando bastante a interpretação das análises de wavelets. Escolhida a função wavelet, com a utilização da transformada wavelet inversa Eq. (4), pode-se recuperar o sinal original integrando a

transformada em todos os locais e intervalos, permitindo filtrar o sinal bruto com o objetivo de encontrar em determinado período escolhido seus componentes oscilatórios.

$$S(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{|a|^2} W(a, \tau) \psi_{(a, \tau)}(t) da d\tau \text{ onde } C = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|F(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega \quad (4)$$

sendo C constante, denominada como constante de admissibilidade da função wavelet.

As wavelets contínuas foram elaboradas utilizando-se duas normalizações diferentes, a normalização proposta por Cazelles (2007), com base no desvio padrão e média global da série, onde as séries temporais de incidência foram transformadas em raiz quadrada (Equação 5), e a normalização utilizada por (DA SILVA, D. F., 2017) que calcula a média e o desvio padrão mensalmente (Equação 6). Todas as séries estudadas foram normalizadas antes da comparação. A utilização das duas normalizações pretende salientar as diferenças dos resultados, que podem ser utilizados para diferentes tipos de análise.

4.2.2.3.1 Normalização de Cazelles

$$N_{cazelles} = \sqrt{\frac{(x - \text{média}(x))}{\text{desvpad}(x)}} \quad (5)$$

Em que: $N_{cazelles}$ é a normalização da precipitação no ano $j = 1, 2, 3, \dots, N$ e mês $i = 1, 2, 3, \dots, 12$, feita com base na raiz quadrada da precipitação no ano $j = 1, 2, 3, \dots, N$ e mês $i = 1, 2, 3, \dots, 12$, além da média global e no desvio padrão de toda a série.

4.2.2.3.2 Normalização de Kayano

$$N_{Kayano} = A_{Vari,j} = \frac{(Vari,j - \text{Var}l)}{\sigma_i} \quad (6)$$

Em que: $A_{Vari,j}$ é a anomalia normalizada da precipitação no ano $j = 1, 2, 3, \dots, N$ e mês $i = 1, 2, 3, \dots, 12$; $Vari,j$ é a precipitação no ano $j = 1, 2, 3, \dots, N$ e mês $i = 1, 2, 3, \dots, 12$; $\text{Var}l$ e σ_i são a média climatológica e o desvio padrão do mês i .

Todas as análises referentes à wavelet usaram algoritmos originais desenvolvidos no Matlab R2019b. A caixa de ferramentas inclui algoritmos para a transformada *wavelet* contínua (CWT) e coerência *wavelet*. Esses algoritmos incorporam análises cruzadas e procedimentos estatísticos adaptados.

A ferramenta principal utilizada para processar os dados foi o WaveletToolbox do MatLab™, composta por várias opções de processamento e aplicações para analisar e sintetizar sinais, imagens e dados que possuem comportamento regular pontuado com mudanças abruptas.

Dessa forma, a análise da *Wavelet* pode auxiliar na interpretação dos dados de séries temporais não estacionárias em várias escalas e revelar recursos que, de outra forma, não poderiam ser identificados. Os espectros de ondeletas são representados utilizando-se uma escala de cores que representam sua magnitude. Esta escala varia em tons de azul ao vermelho à medida que cresce a magnitude do espectro. Para isso é importante definir as escalas apresentadas pelos espectros para um melhor entendimento das figuras que aparecerão posteriormente. A Tabela 18 mostra as escalas de tempo utilizadas:

Tabela 18 - Escalas de tempo usadas nos espectros de ondeletas.

Escala	Nome	Valor (em meses)
<0.25	Intrasazonal	Entre 1 e 2
0.25	Sazonal	3
0.5	Semianual	6
1	Anual	12
2	Bianual	24
4	4 anos	48
>8 anos	Decenal	96 a 192

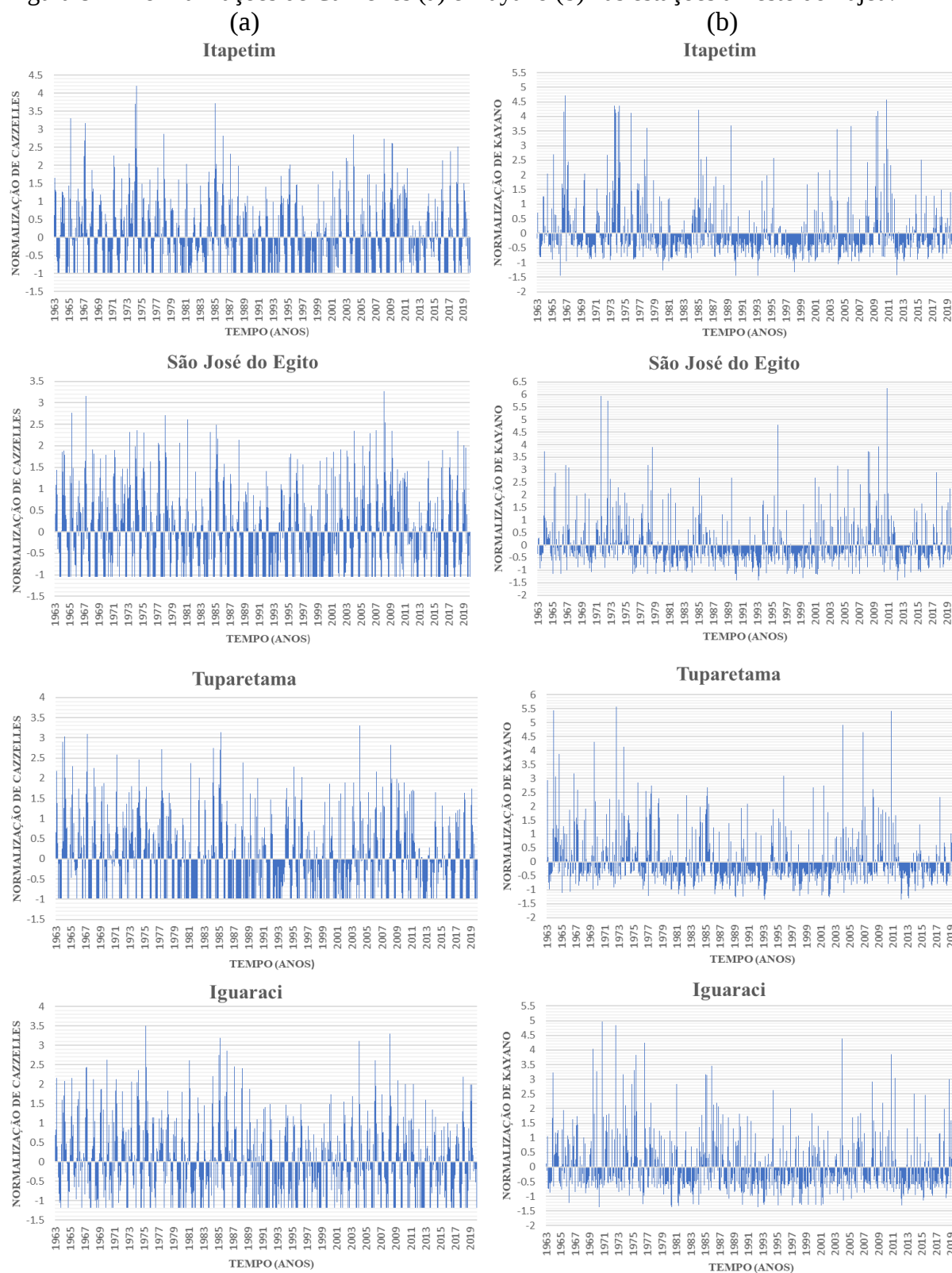
Fonte: CERQUEIRA (2010), adaptado pelo autor (2020).

4.2.3 Resultados e discussão

4.2.3.1 Comparação das *wavelets* contínuas através de diferentes normalizações

Os resultados a seguir apresentam as diferenças entre as normalizações propostas por Cazzelles (a) e Kayano (b) na análise das *wavelets* nas estações analisadas na parte Leste da Bacia do Pajeú-PE (Figura 81).

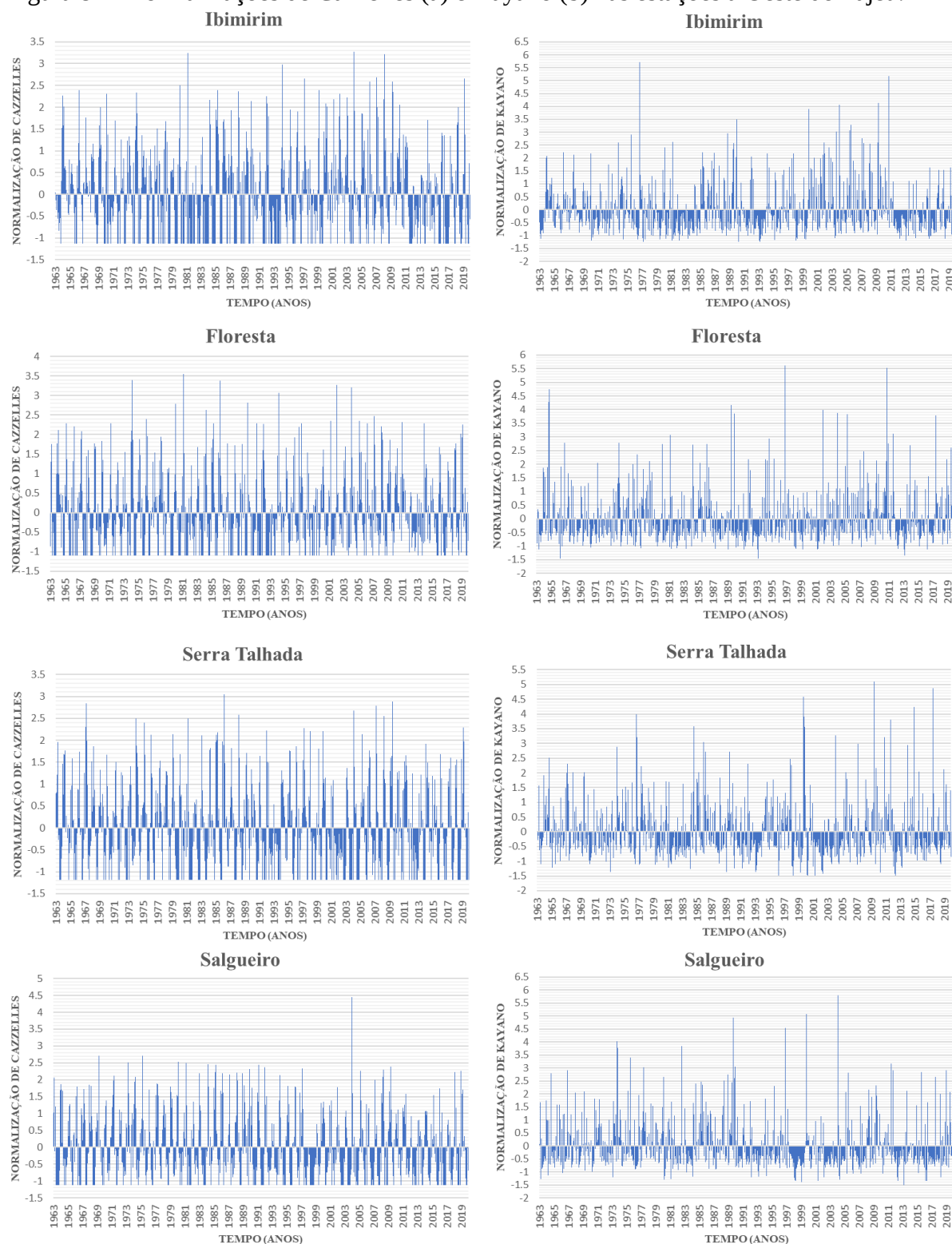
Figura 81 - Normalizações de Cazzelles (a) e Kayano (b) nas estações a Leste do Pajeú.



Fonte: A autora (2020).

Os resultados a seguir apresentam as diferenças entre as normalizações propostas por Cazzelles (a) e Kayano (b) na análise das *wavelets* nas estações analisadas na parte Oeste da Bacia do Pajeú-PE (Figura 82).

Figura 82 - Normalizações de Cazzelles (a) e Kayano (b) nas estações a Oeste do Pajeú.



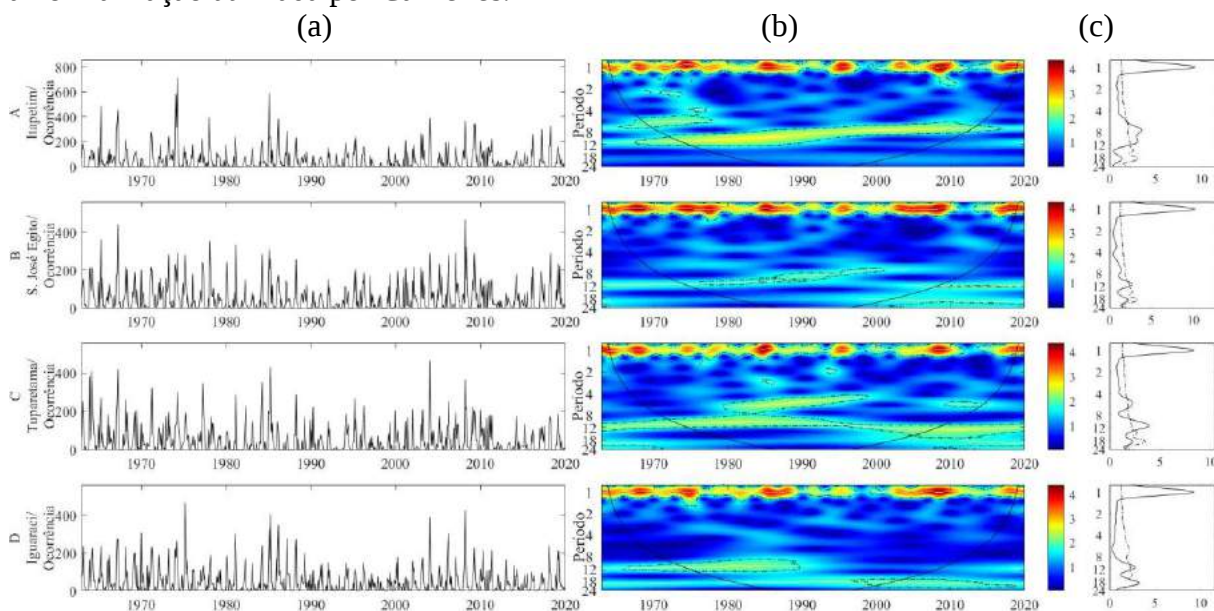
Fonte: A autora (2020).

Nota-se que os extremos da série em (a) são suavizados enquanto em (b) os extremos de precipitação ficam mais evidentes. Essas duas normalizações foram testadas para comparação da metodologia de análise mais adequada para perceptibilidade de determinados

fenômenos. No trabalho, foi utilizada a transformada de *wavelet* contínua (CWT) para analisar como o conteúdo da frequência de um sinal muda com o tempo, pois a abordagem *wavelet* permite descrever a evolução das características oscilantes de uma série temporal.

A Figura 83a apresenta os totais mensais pluviométricos nas estações localizadas nos municípios de Itapetim, São José do Egito, Tuparetama e Iguaraci dos anos de 1963 a 2019. Na Figura 83b é apresentado o espectro *wavelet* de potência a partir da normalização utilizada por Cazelles para os totais mensais pluviométricos das 4 estações localizadas na parte Ocidental da Bacia do Pajeú e Salgueiro na Bacia do Terra Nova. O valor dá a informação da potência relativa numa determinada escala que vai de 1 a 6 anos e num certo período de tempo, que na figura 83b vai de 1963 a 2019, mostrando as oscilações reais das *wavelets* individuais e a variância da série ao nível confiança de 95%. E em 83c, o Espectro de potência global (EPG). Por simples observação desta figura, pode-se identificar a concentração da potência no domínio da frequência ou do tempo.

Figura 83 - Análise da precipitação a Leste da Bacia do Pajeú através da *wavelet* contínua, com a normalização utilizada por Cazelles.



Descrição: a) Série temporal de precipitação nas estações pluviométricas de Itapetim, São José do Egito, Tuparetama e Iguaraci b) Espectro *wavelet* de potência (EWP) normalizado, calculado a partir da função *wavelet* de Morlet para a precipitação dos postos pluviométricos A, B, C e D, em que os contornos sombreados correspondem às variâncias normalizadas significativas a nível de 5%, e as maiores potências sendo representadas em cores mais avermelhadas. A curva em forma de U representa o cone de influência, no qual o efeito de borda é importante; c) Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível confiança de 95%. Fonte: A autora (2020).

Na figura 83(a) é apresentada a precipitação mensal das estações estudadas em que a informação da potência relativa na escala de 0 a 800mm em relação à temporalidade de 1963 a

2019, mostrando as oscilações reais das *wavelets* individuais. Na figura 81b o EWP demonstrou que a escala de potência nas 4 estações variou dentro do período de 1 ano, portanto fica clara a concentração de potência na banda 1, o que demonstra que essa série temporal tem um sinal anual forte e uma alta frequência anual. Também se salienta que na estação A, entre 1965 a 1980 houve picos significantes a nível de 5% no período de 6 anos (83c) e períodos de seca entre de 1990 a 1992, de 1998 a 2000 e de 2012 a meados de 2015. Na estação A observou-se variabilidade da precipitação com frequência de 4 a 6 anos e no período de 6 a 12 anos. Na estação B a mesma tendência se confirmou, menos a resposta da precipitação na Banda 6, houve resposta da precipitação com um pico de significância em 10-12 anos.

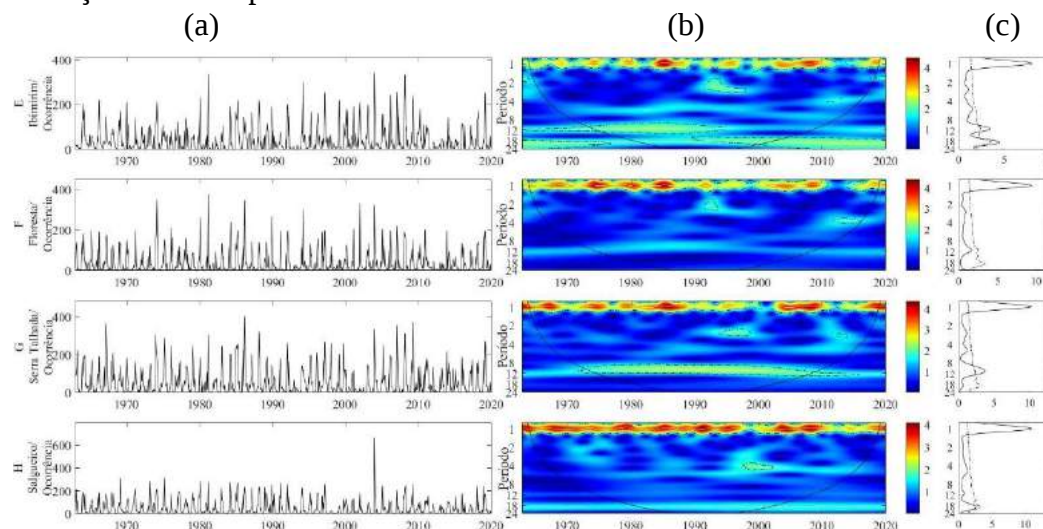
Na estação C, correspondente a Tuparetama, os períodos secos aparentam ser mais extensos e há resposta da precipitação entre 2 e 3 anos, contudo não é significativa, mas há um pico de significância na banda 6. E na estação C houve variabilidade da precipitação com frequência de 1 a 3 anos, de 4 a 6 anos e grande variância de 8 a 15 anos, com significância a nível de 5%.

Em 83D a série temporal possui um sinal anual forte e uma alta frequência anual. Também apresentando seca nos mesmos anos que as outras séries e alta potência em determinados anos, que são indicativos dos anos de maior pluviosidade, como em 1975 e 2008 e um período de 10-12 anos e 20-22 com significância estatística (c).

A alta frequência sazonal das estações pluviométricas é inerente às séries de dados, no entanto os demais períodos que apresentam frequência salientam que existem sistemas atmosféricos responsáveis pela dinâmica pluviométrica das estações analisadas no semiárido pernambucano, por essa razão o estudo procurou não apenas demonstrar que existe a atuação de sistemas atmosféricos em diferentes frequências, como indicar quando esses sistemas foram atuantes e por qual período.

A seguir encontram-se as *wavelets* de potência das estações de Ibimirim (A), Floresta (B), Serra Talhada (C) e Salgueiro (D), seguida pelo gráfico representativo do espectro global da *wavelet*, que fornecem uma estimativa não tendenciosa e consistente do espectro de potência verdadeiro da série, assim pode-se caracterizar a variabilidade da série. Nos espectros globais, observa-se que as séries estudadas têm uma periodicidade anual, sendo esta uma característica verdadeira do sinal (Figura 84).

Figura 84 - Análise da precipitação a Oeste da Bacia do Pajeú através da wavelet contínua, com a normalização utilizada por Cazelles.



Descrição: a) Série temporal de precipitação nas estações pluviométricas de Ibimirim, Floresta, Serra Talhada e Salgueiro b) Espectro *wavelet* de potência (EWP) normalizado, calculado a partir da função *wavelet* de Morlet para a precipitação dos postos pluviométricos E, F, G e H, em que os contornos sombreados correspondem às variâncias normalizadas significativas a nível de 5%, e as maiores potências sendo representadas em cores mais avermelhadas. A curva em forma de U representa o cone de influência, no qual o efeito de borda é importante; c) Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível confiança de 95%. Fonte: A autora (2020).

Na figura 84(a) é apresentada a precipitação mensal das estações estudadas que se encontram a Oeste da Bacia, tem-se então a informação da potência relativa na escala de 0 a 800mm em relação à temporalidade de 1963 a 2019, mostrando as oscilações reais das *wavelets* individuais.

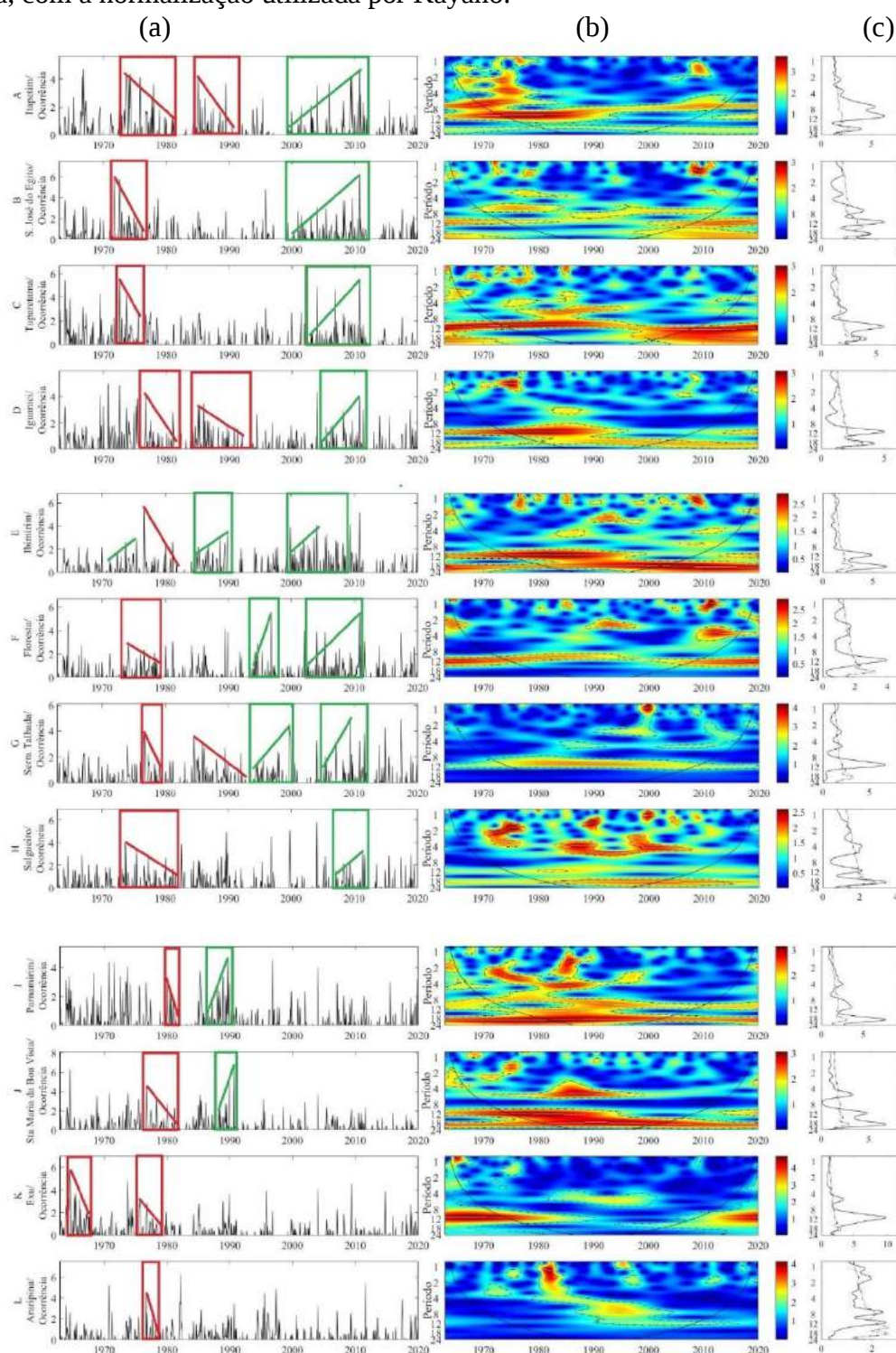
Para todas as estações analisadas o EWP apresenta uma potência média que responde mais na banda 1, também se observa tanto os anos secos como os úmidos na série (quando a potência diminui consideravelmente nesta banda, isto significa um ano seco e quando a potência é máxima significa um ano úmido). A EWP foi eficiente ao demonstrar os anos mais chuvosos com maior potência (em vermelho) e em identificar anos mais secos, como em meados de 1996 a 1998 e meados de 2012, pois já que os índices pluviométricos foram baixos, isso provocou uma redução da potência nesta banda.

Na estação E, a maior frequência é sazonal, como nas demais, no entanto no período de 10-12 anos e de 16-20 anos há precipitação de potência média, o que indica que existe um sistema atuando nessa região em determinados anos. Na estação F, que corresponde a estação de Floresta, além da frequência sazonal, a variabilidade das chuvas também ocorre em ciclos, que podem variar num período de 12 a 25 anos numa escala temporal que vai de 1980 a 2016. Na estação G observa-se a variabilidade das chuvas também em baixas frequências, que variam de 1970 a 2005 de 10-12 anos e observa-se também uma potência moderada na precipitação em

relação a outras bandas, e na estação H(c), existe um pico de significância entre o período de 4 e 6 anos e de 16-18 anos, porém não é estatisticamente significativo.

Na figura a seguir tem-se a wavelet contínua elaborada a partir da normalização utilizada por Kayano (Figura 85).

Figura 85 - Análise da precipitação da Bacia do Pajeú, Terra Nova e Brígida através da wavelet contínua, com a normalização utilizada por Kayano.



Descrição: a) Série temporal de precipitação nas estações pluviométricas estudadas em que os contornos e as linhas vermelhas mostram a tendência de diminuição da precipitação em determinados anos e os contornos e as linhas

verdes mostram a tendência de aumento da precipitação; b) Espectro *wavelet* de potência (EWP) normalizado, calculado a partir da função *wavelet* de Morlet para a precipitação dos postos pluviométricos A, B, C, D, E, F, G, H, em que os contornos sombreados correspondem às variâncias normalizadas significativas a nível de 5%, e as maiores potências sendo representadas em cores mais avermelhadas. A curva em forma de U representa o cone de influência, no qual o efeito de borda é importante; c) Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível confiança de 95%. Fonte: A autora (2020).

Na figura 85(a) é apresentada a precipitação mensal normalizada através do método de Kayano nos anos de 1963 a 2019 nas estações estudadas, mostrando as oscilações reais das *wavelets* individuais. Contrariamente às *wavelets* contínuas estimadas utilizando-se a normalização de Cazzelles, onde em todas as estações analisadas o EWP apresenta uma potência média maior na banda 1, as *wavelets* contínuas estimadas utilizando-se a normalização de Kayano apresentaram maior potência entre 4 a 12 anos, principalmente nas escalas de 4-6 anos e de 8-12 anos, o que denota que a precipitação nas estações estudadas são fortemente influenciadas por fenômenos que atuam no módulo decenal.

Observa-se que tanto os anos secos como os úmidos na série (quando a potência diminui consideravelmente nesta banda, isto significa um ano seco e quando a potência é máxima significa um ano úmido). A EWP foi eficiente ao demonstrar os anos mais chuvosos com maior potência (em vermelho) e em identificar anos mais secos, como em meados de 1996 a 1998 e meados de 2012, pois já que os índices pluviométricos foram baixos, isso provocou uma redução da potência nesta banda.

Na estação A, a frequência mais representativa é decenal, como nas demais, com foco no período de 10-12 anos e de 16-20 anos observa-se que há precipitação de potência média, o que indica que existe um sistema atuando nessa região em determinados anos. Na estação B, que corresponde a estação de Floresta, além da frequência sazonal, a variabilidade das chuvas também ocorre em ciclos, que podem variar num período de 12 a 25 anos numa escala temporal que vai de 1980 a 2016. Na estação C observa-se a variabilidade das chuvas também em baixas frequências, que variam de 1970 a 2005 de 10-12 anos e observa-se também uma potência moderada na precipitação em relação a outras bandas, e na estação D(c), existe um pico de significância entre o período de 10-12 anos.

A estação de Salgueiro, na Bacia do Terra Nova apresenta 2-4 anos na década de 1970 e 4-6 anos entre 1985 e 2010. Na parte Sul da Bacia do Brígida, que é a parte mais chuvosa da bacia, constata-se a variabilidade das chuvas no período de 10-12 anos. Já na parte norte da bacia a variabilidade é maior na escala de 10-12 anos e de 18-22 anos.

Pode-se perceber que o EPG de Kayano salientou consideravelmente os aspectos interdecadais da variabilidade da precipitação, mais do que a variabilidade relacionada a

fenômenos de alta frequência. Diferentes normalizações podem enfatizar certos aspectos de interesse da série. Em trabalhos realizados por (CAZELLES, BERNARD *et al.*, 2005, 2007; CAZELLES, BERNARD; CAZELLES; CHAVEZ, 2014) o autor relaciona diferentes tipos de dados que possuem coerência com fenômenos de alta frequência.

O autor, em trabalho realizado com a finalidade de correlacionar a influência não estacionária do El Niño nas epidemias síncronas de dengue na Tailândia, encontrou maior relação na escala de tempo de 2-3 anos, enquanto na escala interdecadal a resposta não foi expressiva. Isso demonstra que fenômenos que ocorrem com uma alta frequência, como epidemias de dengue, são mais bem explorados quando utilizada essa normalização de dados.

Já em trabalho realizado por (DA SILVA, D. F., 2017) na aplicação de análises de wavelets para detecção de ciclos e extremos pluviométricos no Leste do Nordeste brasileiro utilizando a normalização proposta por KAYANO, MARY T.; ANDREOLI, (2007) e utilizado recentemente em importantes trabalhos na América do Sul (KAYANO, MARY TOSHIE; ANDREOLI; SOUZA, 2019; KAYANO, MARY TOSHIE; CAPISTRANO, 2014), identificou variabilidade nas escalas temporais de 7, 11 e 22 anos, o que pode ser mais facilmente relacionado com ciclos do ENOS, Dipolo do O. Atlântico e Ciclo de Manchas Solares no Leste do Nordeste brasileiro

4.2.4 Conclusão

O trabalho demonstrou que diferentes normalizações aplicadas nos dados de precipitação podem realçar aspectos interessantes das séries de precipitação. Na normalização utilizada por Cazzelles o modelo enfatiza os fenômenos sazonais por se tratar de fenômenos fortemente perceptíveis. Desse modo, o modelo da CW com a normalização de Cazzelles pode ser utilizado para um conjunto de dados que apresenta maior EWP nas escalas de tempo intrasazonal, sazonal, semianual, anual e até bianual, por suavizar os extremos.

Na análise com a normalização de Kayano os resultados são refinados, já que eles são normalizados mês a mês, mostrando os detalhes na escala temporal interdecadal e destacando os extremos da precipitação em relação ao grid temporal. Portanto ao analisar a relação da precipitação com índices como El Niño, TSA, ODP, manchas solares, etc, indica-se a normalização proposta por Kayano.

4.3 ANÁLISE WAVELET DA VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO SOBRE BACIAS SEMIÁRIDAS DO SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO EM FUNÇÃO DAS TELECONEXÕES A ANOMALIAS CLIMÁTICAS EM LARGA ESCALA

Resumo: A análise wavelet de uma série temporal fornece informações sobre a evolução dos componentes periódicos ao longo do tempo e permite a quantificação da associação não estacionária entre duas séries temporais. O objetivo do trabalho é utilizar a wavelet contínua e wavelet de coerência para análise correlacional da influência das anomalias de TSM sobre a variabilidade da precipitação em bacias receptoras da transposição do Rio São Francisco em Pernambuco, com base em índices climáticos e em dados pluviométricos. Para analisar os conjuntos de dados, foram realizados: (I) decomposição de wavelet e espectros de potência de wavelet, que determinam os modos de oscilação significativos; (II) padrões de coerência wavelet, que descrevem associações locais nos domínios do tempo e da frequência; (III) ângulos de fase, que indicam o sinal da associação, seja em fase ou fora de fase; e (IV) a evolução das componentes periódicas de cada série no modo de oscilação mais significativo. Foram analisadas as séries temporais de 12 estações pluviométricas de 1963 a 2019 e foi verificado que as oscilações interdecadais (10-12 anos e 18-22anos) foram consideradas mais significativas do que as oscilações interanuais (1-8 anos) para todas as estações selecionadas. Da mesma forma, a coerência de onda foi significativa e a diferença de fase entre os componentes principais dos extremos de precipitação mensal e índices climáticos eram altamente variáveis no tempo e na periodicidade. A análise de coerência de wavelet mostra que tanto o ENOS quanto ODP modulam a variabilidade interanual (4-6 anos) e tanto o ENOS quanto a ODP modulam a variabilidade interdecadal. Índices como o TSA e o SAOD, estimados no Atlântico, mostraram alta coerência com os dados de precipitação na região, estando inclusive na mesma fase. Nos últimos anos a frequência das secas aumentou, o que coincidiu com uma maior frequência de fenômenos como o El Niño. No entanto as oscilações de TSM no Atlântico representaram maior coerência em relação aos índices formulados no Pacífico Tropical. O estudo foi interessante por evidenciar as relações entre as variabilidades locais dos dados de precipitação pluviométrica e os mecanismos atmosféricos regionais e de larga escala, revelando as relações entre os dados, se essas relações são contínuas no tempo ou transitórias, e em quais frequências.

PALAVRAS-CHAVE: Anomalias de TSM, variabilidade da precipitação, índices climáticos, coerência wavelet.

4.3.1 Introdução

A coerência dos padrões climáticos de circulação atmosférica em larga escala pode explicar adequadamente as variabilidades hidroclimáticas de longo prazo. Alguns autores salientam que as variabilidades interanuais e interdecadais da precipitação são fortemente teleconectadas a flutuações climáticas de baixa frequência e em larga escala (CHANG, N. BIN *et al.*, 2017; ELSANABARY; GAN; MWALE, 2014; JIANG *et al.*, 2014). Essas conexões temporais e regionais entre a variabilidade das variáveis hidroclimáticas e as anomalias climáticas em larga escala e baixa frequência, podem aprofundar a compreensão da dinâmica

física do ciclo hidrológico e levar a uma melhor análise e previsão da frequência hidrológica (KHEDUN *et al.*, 2014; TAN; GAN; SHAO, 2016).

Nos últimos trinta anos a transformada de *wavelets* tem sido aplicada de maneira satisfatória a sinais de características não-estacionárias, por serem funções matemáticas que cortam dados em diferentes componentes de frequência e estudam cada componente com uma resolução correspondente à sua escala. Desse modo, as ferramentas *wavelets* podem ser usadas para elementos reais da natureza, com o objetivo de encontrar padrões significativos em dados que possam ser extraídos por operadores matemáticos, fazendo o reconhecimento desses padrões. Existem vários tipos de *wavelets* citados na literatura, de modo que o uso de uma ou outra está associado à aplicação. Nos últimos anos os estudos da Transformada *wavelet* contínua (CWT) e da Coerência *Wavelet* (CW) têm sido utilizados como uma técnica na análise de dados meteorológicos e climáticos, possibilitando extrair informações úteis a partir de séries temporais.

Segundo Gurgel (2013), a Coerência *Wavelet* (CW) pode ser entendida como uma técnica com base na Transformada *Wavelet* Contínua, advinda do desenvolvimento da teoria das *wavelets*, permitindo detectar semelhanças e correlações entre duas grandezas, entre eventos temporais, em termos de tempo-escala, frequência e energia. Desse modo, quando há duas grandezas, é possível analisar por meio das *wavelets*, como suas respectivas ocorrências estão correlacionadas (TORRENCE; COMPO, 1998; TORRENCE; WEBSTER, 1999).

No campo da meteorologia, a obtenção de informações que correlacionem grandezas meteorológicas é de extrema importância para a predição de estados futuros, uma vez que se têm muitas variáveis envolvidas na ocorrência de um único evento. Muitos estudos ao redor do mundo têm utilizado as *wavelets* para entendimento dos fenômenos climáticos e sua relação com a dinâmica climática de determinadas regiões do globo. Autores como JIANG *et al.* (2019) recentemente avaliaram de eventos extremos de precipitação e sua relação com na China, LIU, F. *et al.* (2017) utilizou as *wavelets* para análise dos impactos do ENSO nas variações em grande escala na descarga de sedimentos na China Meridional.

EKHTIARI *et al.* (2019) estudaram os efeitos em múltipla escala das temperaturas da superfície do mar na precipitação global. WANG, X. *et al.* (2019) estudaram a variabilidade multiescalar da precipitação e sua teleconexão com anomalias climáticas em larga escala numa cidade chinesa. Também recentemente LI, J.; ZHAO; IQBAL (2019) analisaram os padrões de variação de precipitação extrema e relação com o clima atmosférico na província de Sichuan, na China, de 1961 a 2017 com análise da *wavelet* contínua.

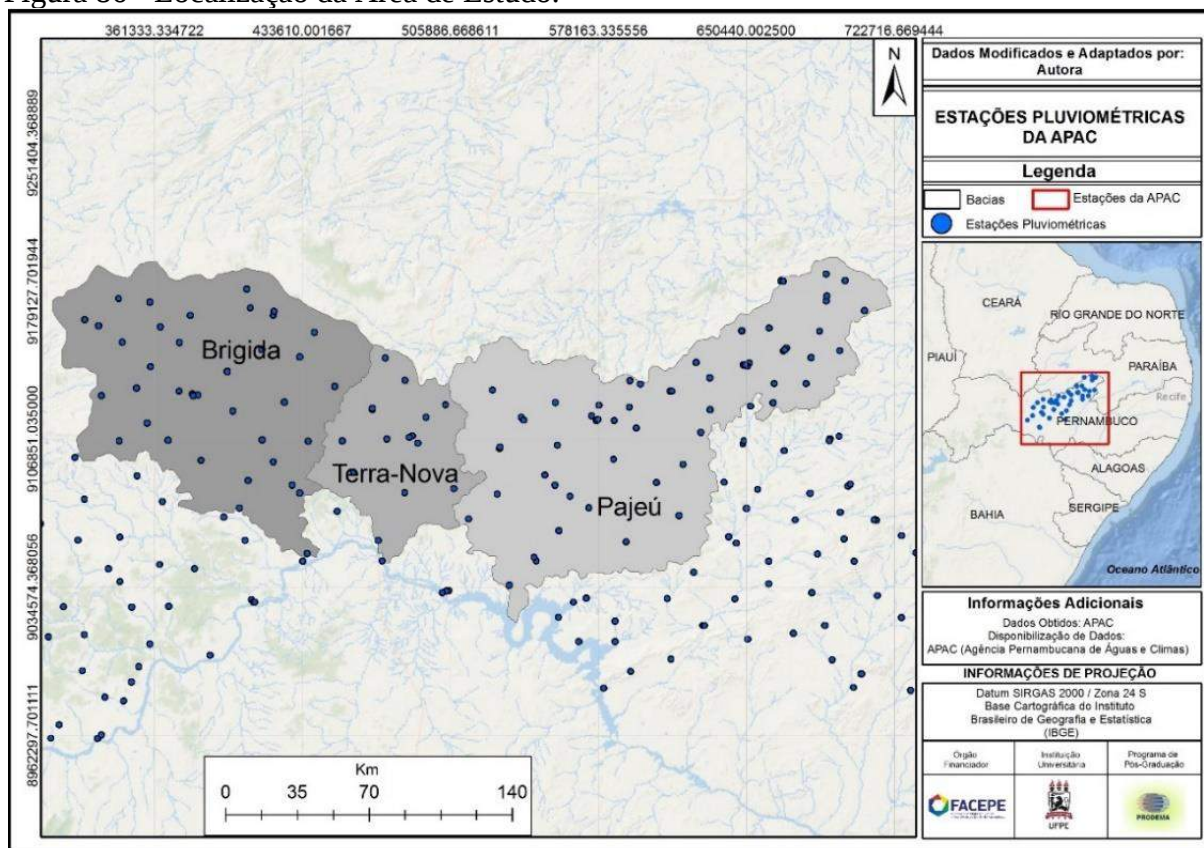
Nesse sentido, fica claro o potencial dessa ferramenta para as mais diversas análises envolvendo a precipitação, clima, produção de sedimentos, vazão etc. Por essa razão as *wavelets* serão trabalhadas neste estudo para o entendimento dos diversos fenômenos que convergem para a dinâmica da precipitação no semiárido nordestino, em especial, para as Bacias localizadas no Submédio São Francisco e as suas relações com os diversos fenômenos em larga escala relacionados às anomalias de TSM.

Para isso, o objetivo do trabalho é utilizar a wavelet contínua e wavelet de coerência para análise correlacional da influência das anomalias de TSM sobre a variabilidade da precipitação em bacias receptoras da transposição do Rio São Francisco em Pernambuco, com base em índices climáticos e em dados pluviométricos.

4.3.2 Material e Métodos

A área de estudo compreende as Bacias hidrográficas pernambucanas dos rios Pajeú, Terra Nova e Brígida, inseridas no âmbito do Eixo Norte do Projeto de Transposição do Rio São Francisco. E a precipitação na Bacia varia de 383mm a cerca de 1200mm nas altitudes mais elevadas das Bacias (Figura 86):

Figura 86 - Localização da Área de Estudo.



Fonte: A autora (2020).

4.3.2.1 Dados pluviométricos.

Os dados trabalhados nessa primeira etapa foram os dados de precipitação de 7 postos pluviométricos selecionados na Bacia do Pajeú-PE com dados de 1963 a 2019, portanto de 55 anos nos municípios de Ibimirim, Serra Talhada, Itapetim, São José do Egito, Igaraci, Floresta e Tuparetama (Tabela 19).

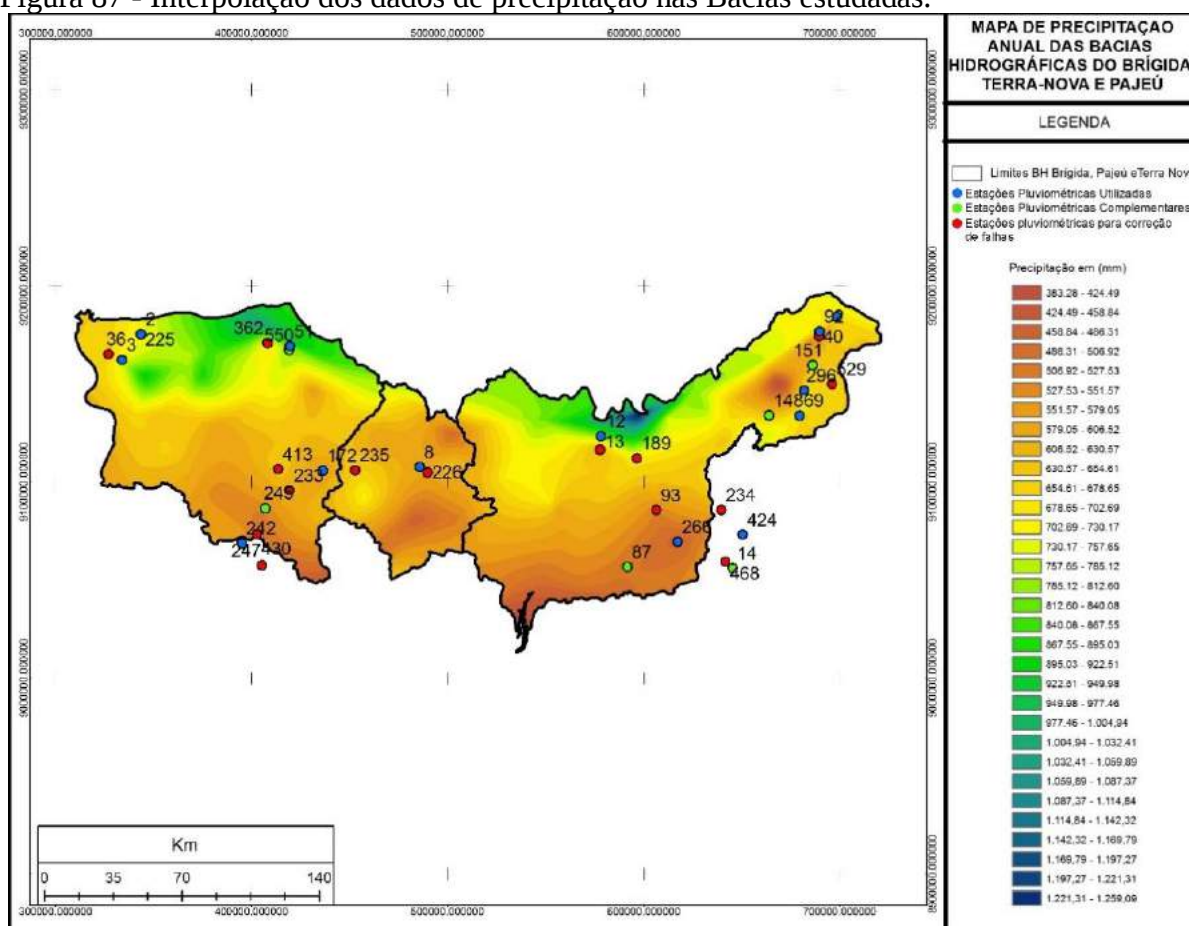
Tabela 19 - Dados pluviométricos das Bacias do Pajeú, Terra Nova e Brígida.

CÓDIGO	ESTAÇÃO	LAT	LONG	ALT	PRECIP ANUAL	FALHAS	FALHAS (correção)
APAC 155	ITAPETIM	7°37'67"	37°20'06"	638	625.2	7,9% (1990 -1992)	Estação 92 e 40 ≤ 1%
APAC 92	S. JOSE DO EGITO	7°44'04"	37°28'06"	625	627.7	4,11% (1991 - 1992)	Estação 40 ≤ 1%
APAC 296/151	TUPARETAMA	7°71'67"	37°35'	580	593.7	3,2% (1991)	Estação 529 e 69 ≤ 1%
APAC 69/148	IGUARACI	7°50'	37°23'	595	610.9	1,48%	Estação 502 ≤ 1%
APAC 424/14	IBIMIRIM	8°38'33"	37°63'33"	454	601.1	1,55%	Estação 234 ≤ 1%
APAC 266/87	FLORESTA	8°41'67"	37°93'33"	449	459.1	1,7	Estação 468, 234 e 93 ≤ 1%
APAC 12	SERRA TALHADA	7°93'06"	38°28'89"	480	645	1,57%	Estação 485 e 13 ≤ 1%
APAC 8	SALGUEIRO	8°4'	39°7'	415	576.4	1,17	Estação 226 ≤ 1%
APAC 172	PARNAMIRIM	8°08'89"	39°57'75"	395	487.5	1,2%	Estação 413, 233, 235 ≤ 1%
APAC 242/187	SANTA MARIA DA BOA VISTA	8°42'33"	39°95'42"	406	474.2	0,13%	Estação 245, 247 ≤ 1%
APAC 51/550	EXU	7°51'61"	39°72'94"	526	739.1	1,37%	Estação 362 ≤ 1%
APAC 2/225	ARARIPINA	7°57'67"	40°50'58"	639	843.2	0,13%	Estação 3 e 36 ≤ 1%

Fonte: A autora (2020).

Foi realizada a interpolação dos dados de precipitação pelo método Natural Neighbor, com base na média de precipitação de cada posto, para seleção dos postos de análise e dos postos que seriam utilizados para a correção das falhas dos dados de precipitação nas Bacias estudadas (Figura 87).

Figura 87 - Interpolação dos dados de precipitação nas Bacias estudadas.



Fonte: A autora (2020).

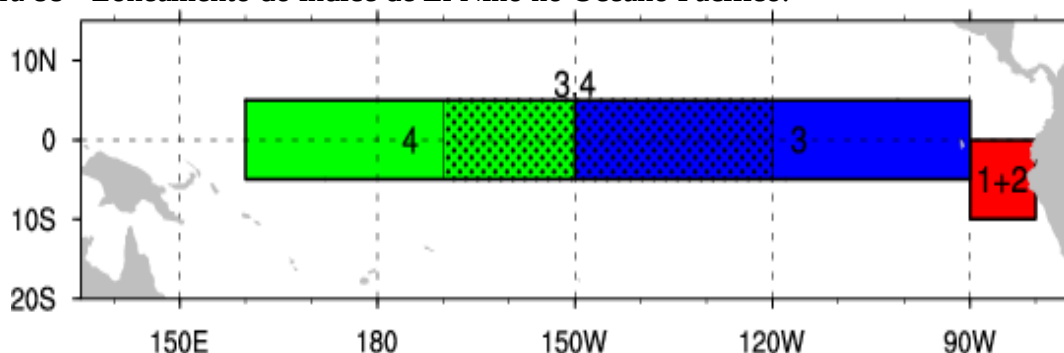
4.3.2.2 Dados de El Niño.

Os dados mensais de TSM foram obtidos através do Earth System Research Laboratory - ESRL da NOAA: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>, correspondendo às médias mensais de TSM no período compreendido entre janeiro de 1963 a dezembro de 2019 selecionados a partir de 4 zonas de monitoramento do Pacífico Equatorial, sendo elas:

- Niño 1 + 2 (0-10S, 90W-80W): A região de Niño 1 + 2 é a menor e a mais oriental das regiões de Niño SST e tende a ter a maior variação dos índices Niño SST.
- Niño 3 (5N-5S, 150W-90W): Esta região já foi o foco principal para monitorar e prever o El Niño, mas atualmente as pesquisas sugerem que a região principal para monitoramento das interações oceano-atmosfera acopladas para o ENSO fica mais a oeste (Trenberth, 1997). Assim, o Niño 3.4 e o ONI tornaram-se favorecidos na definição dos eventos El Niño e La Niña.

- Niño 3.4 (5N-5S, 170W-120W): As anomalias de Niño 3.4 podem ser consideradas como representando os SSTs equatoriais médios no Pacífico desde a linha de dados até a costa sul-americana. Os eventos El Niño ou La Niña são definidos quando os SSTs Niño 3.4 excedem $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ por um período de seis meses ou mais.
- Niño 4 (5N-5S, 160E-150W): O índice Niño 4, captura anomalias de SST no Pacífico equatorial central. Essa região tende a ter menos variação do que as outras regiões de Niño. O zoneamento do El Niño pode ser visualizado a seguir (Figura 88).

Figura 88 - Zoneamento do índice de El Niño no Oceano Pacífico.



Fonte: <https://climatedataguide.ucar.edu/>

4.3.2.3 Dados de Oscilação Decadal do Pacífico (ODP)

O índice ODP é um conjunto de dados globais mensais de temperatura da superfície do mar realizada em uma grade de $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ no Pacífico Norte, baseado na Temperatura da Superfície do Mar Reconstruída Estendida (ERSST Versão 5) da NOAA. As anomalias são padronizadas em 1950-2000 média mensal do período base e desvios-padrão. Os dados são medidos pela NOAA Physical Sciences Laboratory e foram obtidos através da página <https://psl.noaa.gov/data/correlation/pdo.data>.

4.3.2.4 Dados de Índice de Oscilação do Sul (SOI)

O Índice de Oscilação do Sul (SOI) é um índice padronizado com base nas diferenças de pressão do nível do mar observadas entre o Taiti e Darwin, na Austrália. O SOI é medido por diversas agências, diferindo entre elas pela normalização, e neste trabalho foram comparadas 4 normalizações do SOI disponibilizados por 4 órgãos de monitoramento. A metodologia usada para calcular o SOI está disponível abaixo:

$$\text{SOI} = \frac{(\text{Tahiti padronizado} - \text{Darwin padronizado})}{(\text{desvio padrão mensal})}$$

SOI 1 – O Working Group on Surface Pressure fornece o SOI (da CRU) baseado no método proposto por Ropelewski e Jones (1987) e disponibilizado através da página: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/soi/>.

SOI 2 – O National Centers for Environmental Information do NOAA fornece os dados do SOI através da página: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>.

SOI 3 – Esse SOI é de sinal mensal com base na padronização mensal. Essa versão 'SO Darwin' do SOI é de alta qualidade e altamente correlacionada com a versão completa (Tahiti-Darwin) do SOI. É disponibilizada pelo Climate Analysis Section, NCAR, Boulder, USA, Trenberth (1984) e pode ser adquirida através da página: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/southern-oscillation-indices-signal-noise-and-tahitidarwin-slp-soi>.

SOI 4 - Esse SOI é de ruído mensal com base na padronização mensal. Contém o ruído-SOI (Tahiti padronizado + Darwin padronizado), onde a padronização é feita usando a abordagem descrita por Trenberth (1984) e é disponibilizada pelo Climate Analysis Section, NCAR, Boulder, USA, podendo ser adquirida através da página: <https://climatedataguide.ucar.edu/sites/default/files/SOI.noise.txt>.

4.3.2.5 Dados do Índice Trans Polar (TPI)

O TPI é definido como a diferença de pressão do nível do mar normalizada entre Hobart (43°S, 147°E), no estado insular da Tasmânia (Austrália), e Stanley (Malvinas ou Ilhas Falkland, 52°S, 58°W), um arquipélago localizado no sul do Oceano Atlântico, na plataforma continental da Patagônia. Os dados médios mensais da pressão do nível do mar de Stanley foram obtidos a partir de valores sub-diários disponíveis on-line em <http://cru.uea.ac.uk/cru/data/tpi/>.

4.3.2.6 Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO)

O índice AMO é baseado na temperatura da superfície do mar, fornecendo uma maneira simples e concisa de descrever a variabilidade climática multidecadal no Atlântico Norte. O índice referente ao sinal AMO é baseado em padrões espaciais na variabilidade da SST após a remoção dos efeitos da forçante antrópica na temperatura, revelando padrões naturais de longo prazo na temperatura da superfície do mar. Os dados médios mensais são medidos pela NOAA Earth System Research Laboratory e foram obtidos a partir da página: https://www.daculaweather.com/4_amo_index.php.

4.3.2.7 Dados de Oscilação do Atlântico Norte (NAO)

NAO 1 - A partir de Previsão NOAA Climate Prediction Center (CPC), que consiste em um dipolo norte-sul de anomalias, com um centro localizado sobre a Groenlândia e o outro centro de sinal oposto, que mede as latitudes centrais do Atlântico Norte entre 35°N e 40°N

NAO 2 – Esse NAO é feito a partir dos dados do Climate Data Center (CDC) e combina partes dos padrões do Atlântico Leste e do Atlântico Oeste originalmente identificados por Wallace e Gutzler (1981) para a temporada de inverno. Também consiste em um dipolo norte-sul de anomalias, com um centro localizado sobre a Groenlândia e o outro centro de sinal oposto, abrangendo as latitudes centrais do Atlântico Norte entre 35 ° N e 40 ° N.

NAO 3 – Também chamada de NAO Jones, disponibilizada pelo CRU (HURRELL, 1995; JONES, P. D.; JONSSON; WHEELER, 1997). O NAO aqui é definido como a diferença de pressão normalizada entre uma estação nos Açores e uma na Islândia. O NAO calculado a partir de Gibraltar e SW Islândia também é dado (Jones et al., 1997).

4.3.2.8 Dados de Índice Tropical do Atlântico Norte (TNA)

Anomalia da média do SST mensal de 5,5N a 23,5N e 15W a 57,5W. Os conjuntos de dados HadISST e NOAA OI 1x1 são usados para criar o índice. Os dados médios mensais são medidos pela NOAA's Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory e disponibilizados pela NOAA Physical Sciences Laboratory, sendo obtidos através da página: <https://psl.noaa.gov/data/correlation/tna.data>

4.3.2.9 Dados de Índice do Atlântico Sul Tropical (TSA)

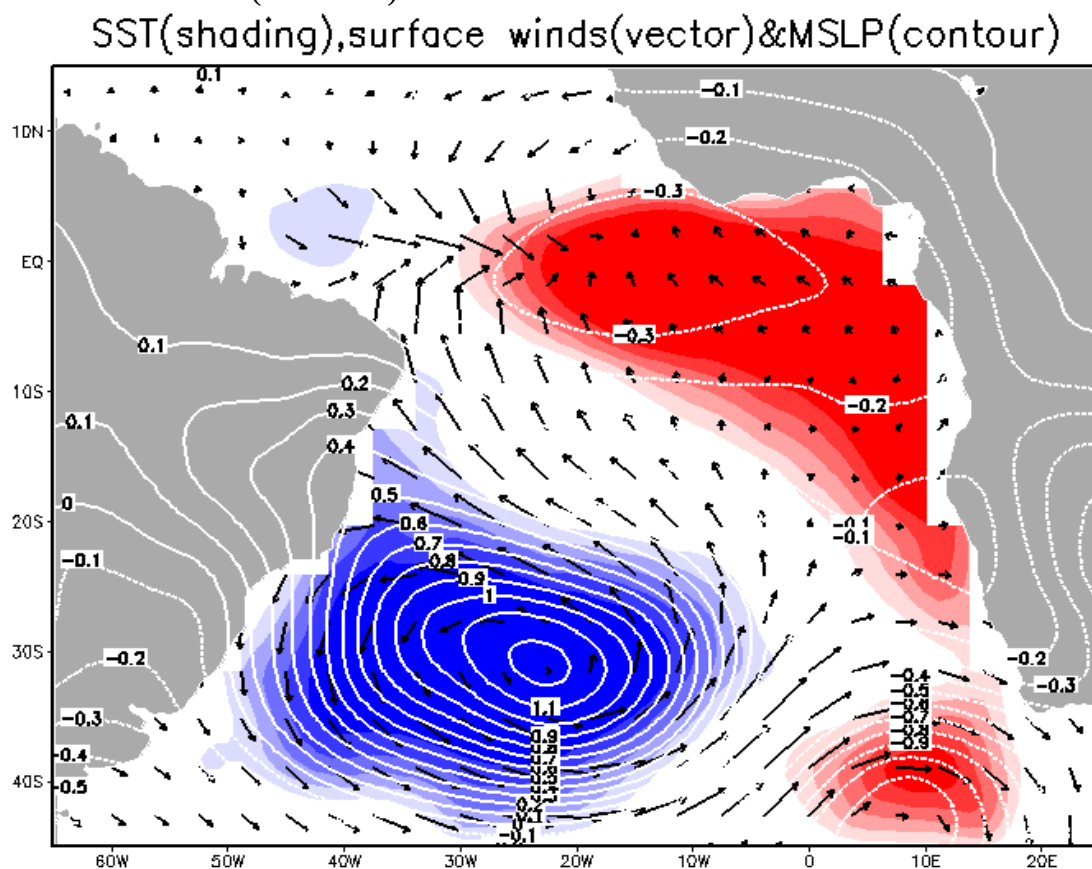
O índice baseia-se na anomalia da média do SST mensal nas coordenadas 0-20S e 10E-30W. Os conjuntos de dados HadISST e NOAA OI 1x1 são usados para criar o índice. Os dados médios mensais são medidos pela NOAA's Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory e disponibilizados pela NOAA Physical Sciences Laboratory, sendo obtidos através da página: <https://psl.noaa.gov/data/correlation/tsa.data>

4.3.2.10 Dados de Índice de Dipolos do Oceano Atlântico Sul (SAODI)

O índice proposto consiste no monitoramento do mecanismo de aquecimento das águas superficiais nas costas da África Equatorial Oeste/Central, associado ao resfriamento simultâneo de magnitude semelhante nas costas Argentina-Uruguai-Brasil, usando conjuntos

de dados observacionais e de reanálise de 1950 a 2008. Esses padrões de temperatura da superfície do mar (SST) são acoplados ao campo de circulação atmosférica e aos climas regionais (Figura 89).

Figura 89 - Temperatura da superfície do mar (cores: vermelho, aquecimento; azul, resfriamento), anomalias dos ventos na superfície associados ao SAOD (vetores) e pressão média do nível do mar (contornos).



Uma medida simples do dipolo, o SAOD Index (SAODI) é definido diferindo a anomalia SST normalizada média do domínio (SSTA) dos dois centros de intenso aquecimento e resfriamento associados ao SAOD, a saber:

$$\text{SAODI} = [\text{SSTA}]_{\text{NEP}} - [\text{SSTA}]_{\text{SWP}}$$

onde os colchetes indicam médias do domínio, os subscritos mostram as duas regiões nas quais as médias do SSTA são calculadas. Esses domínios são descritos por suas localizações no Oceano Atlântico Sul como o polo nordeste (NEP: 10°E-20°W, 0°-15°S) e o polo Sudoeste (SWP: 10°-40°W, 25°S-40°S).

Esse índice é reproduzido de perto pelas séries temporais do modo SAOD, determinadas pela decomposição de valor singular da SST do Oceano Atlântico Sul e pela pressão média do nível do mar (NNAMCHI; LI, 2011; NNAMCHI; LI; ANYADIKE, 2011). Os dados médios mensais são disponibilizados pelos autores até o ano de 2016 em: <http://ljp.gcess.cn/dct/page/65592>.

4.3.2.11 Dados de Manchas solares

Rigozo et al. (2001) reconstruíram o número de Wolf Rz para um período de 1000 anos, utilizando a transformada wavelet para decompor a série em níveis de frequência e a análise por regressão iterativa para encontrar as principais periodicidades, amplitudes e fases. A série mensal é disponibilizada pela NOAA através da página: https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/Data/sunspot.long.data

4.3.2.12 Aplicação das wavelets contínuas e de coerência

Para análise de como o conteúdo da frequência de um sinal muda com o tempo foi utilizada a transformada de *wavelet* contínua (CWT). Já para quantificar as dependências entre duas séries temporais, foram realizadas análises de coerência de *wavelets* entre os dados das estações pluviométricas e os principais fenômenos climáticos atuantes sobre o semiárido, em razão da coerência da *wavelet* permitir verificar se diferentes modos periódicos de duas séries temporais tendem a oscilar simultaneamente (subindo e descendo juntos e quantificando a sincronia de duas séries temporais). Além disso, a análise de fases foi usada para caracterizar a associação entre essas duas séries temporais conforme recomendado por (CAZELLES, B., 2018; CAZELLES, BERNARD *et al.*, 2007; CAZELLES, BERNARD; CAZELLES; CHAVEZ, 2014).

A função *wavelet* Morlet, que consiste em uma onda plana de período determinado, finita em extensão, multiplicada por uma gaussiana, foi a utilizada neste trabalho, e é com frequência aplicada na análise de sinais considerados “naturais”. Esta função foi escolhida pelo fato de possuir um formato característico semelhante aos identificados na série-temporal analisada. A ondaleta Morlet é complexa e possui características semelhantes às de sinais meteorológicos, tais como simetria ou assimetria, e variação temporal brusca ou suave. Segundo a literatura, este é um critério para escolha da função ondaleta (Weng e Lau, 1994; Morettin, 1999). A *wavelet* Morlet é definida por:

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} \exp^{i^2 \omega_0 t} \exp^{-t^2/2} \quad (1)$$

Este wavelet é o produto de um complexo exp sinusoidal ($i^2 \omega_0 t$) multiplicado por um envelope Gaussiano ($\exp(-t^2/2)$), onde $\psi(t)$ é a função de dois parâmetros, t é o tempo, o termo $\pi^{-1/4}$ é um fator de normalização para garantir a variação da unidade e o termo ω_0 é a frequência angular central da wavelet, de caráter adimensional com valor igual a 6, para que neste caso particular, possa satisfazer a condição de admissibilidade. Todos introduzidos no “script” de programação do Software Matlab®. O período de anos dos ciclos e a escala temporal dominante foram obtidos por programação no Software Matlab® com comandos específicos.

Em seguida a transformada de *wavelet* contínua (CW) decompõe uma função definida no domínio da frequência, em uma outra função definida no domínio do tempo e frequência, determinada por:

$$W_{x(a,\tau)} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi * \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{*a,\tau}(t) dt \quad (2)$$

Onde:

$W_{x(a,\tau)}$ = coeficiente *wavelet*;

Os parâmetros a e τ denotam a dilatação (fator de escala) e a translação (mudança de tempo), respectivamente;

o fator $\frac{1}{\sqrt{a}}$ normaliza as wavelets para que tenham variação unitária e, portanto, sejam comparáveis para todas as escalas a ;

$*$ representa a forma complexa do conjugado;

$x(t)$ = o sinal;

$\psi(t)$ = função de dois parâmetros, um para a posição no tempo τ e outro para a escala das wavelets a .

Sendo assim, a transformação wavelet pode ser pensada como uma correlação cruzada de um sinal $x(t)$ com um conjunto de wavelets $\psi((t - \tau) / a)$ de várias “larguras” ou escalas a , em diferentes posições no tempo τ . Os coeficientes da wavelet, $W_{x(a,\tau)}$, representam assim a contribuição das escalas a em diferentes posições horárias τ . Na equação (2), o fator $\frac{1}{\sqrt{a}}$ em linha normaliza as wavelets para que tenham variação unitária e, portanto, sejam comparáveis

para todas as escalas a , conforme proposto por (CAZELLES, BERNARD; CAZELLES; CHAVEZ, 2014).

Por meio da utilização de *wavelet*, é possível estimar o espectro de potência *wavelet* eq. (3), que é a repartição da variância entre o parâmetro de escala a e diferentes localizações de tempo t . Ressaltando-se que o parâmetro de escala *wavelet* a é inversamente proporcional à frequência central da *wavelet*.

$$S_x(f(\text{escala}), t(\text{tempo})) = |W_x(f, t)|^2 \quad (3)$$

Vale ressaltar que o parâmetro de escala *wavelet* a é inversamente proporcional à frequência central da *wavelet* f_0 . Desta forma, deve-se considerar a relação da escala a com a sua frequência central quando for escolher a *wavelet*. Para a *wavelet* Morlet, podemos notar que de fato temos $f \cong \frac{1}{a}$ para $f_0 = 2\pi$.

Em muitas aplicações, é desejável quantificar as relações estatísticas entre dois sinais não estacionários. Diferentes definições são apresentadas para o cálculo da coerência *wavelet* com o objetivo de quantificar as relações estatísticas entre duas séries temporais. Desse modo, a metodologia seguida neste trabalho para calcular a coerência é a proposta por (CAZELLES, BERNARD *et al.*, 2005) onde a coerência deriva-se do cálculo das *wavelets* contínuas nas duas séries para formulação do espectro cruzado, que é a coerência. A coerência é utilizada para determinação da associação entre dois sinais, $x(\tau)$ e $y(\tau)$, (Equação 4), portanto, a função de coerência é uma medida direta da correlação entre os espectros de duas séries temporais, sendo definida como o espectro cruzado normalizado pelo espectro de cada sinal (CAZELLES, BERNARD *et al.*, 2007), como mostrado a seguir:

$$R_{x,y}(f, \tau) = \frac{|\langle W_{x,y}(f, \tau) \rangle|^2}{|\langle W_x(f, \tau) \rangle|^2 |\langle W_y(f, \tau) \rangle|^2} \quad (4)$$

tal que $W_{x,y}(f, \tau) = W_x(f, \tau)W_y^*(f, \tau)$ expressa a transformada *wavelet* cruzada, $W_x(f, \tau)$ e $W_y(f, \tau)$ representam a transformada *wavelet* das séries $x(\tau)$ e $y(\tau)$, respectivamente. Os colchetes angulares em torno dos termos indicam suavização no tempo e na frequência. Com a coerência é possível estimar o quanto duas séries temporais não estacionárias $x(\tau)$ e $y(\tau)$ estão relacionadas nas diferentes frequências e ao longo do tempo.

O $R_{x,y}(f, \tau)$ varia de 0 a 1 e indica uma forte ou fraca relação para valores altos ou baixos, respectivamente, e apresenta uma relação linear perfeita quando $R_{x,y}(f, \tau) = 1$ entre dois sinais em determinada frequência e tempo. Desta forma, com a utilização do gráfico de coerência com *wavelet* pode-se diferenciar no espaço tempo-frequência a intensidade da relação e identificar mudanças tanto ao nível de frequência quanto do tempo.

Adicionalmente, pode-se calcular a fase com *wavelets* possibilitando caracterizar a relação entre sinais. A diferença de fase com *wavelets* gera informações a respeito do sinal da relação e a análise de fases é usada para caracterizar a associação entre duas séries temporais conforme recomendado por (CAZELLES, B., 2018; CAZELLES, BERNARD *et al.*, 2007; CAZELLES, BERNARD; CAZELLES; CHAVEZ, 2014). Pelo fato da wavelet Morlet referir-se a uma wavelet complexa, $\Im(W_x(f, \tau))$ pode ser escrita como $|\Im(W_x(f, \tau))|$ (isto é, em termos do seu módulo) e fase Eq. (5):

$$\phi_x(f, \tau) = \tan^{-1} \left(\frac{\Im(W_x(f, \tau))}{\Re(W_x(f, \tau))} \right), \quad (5)$$

De maneira semelhante, a diferença de fase com a transformada wavelet e o atraso instantâneo de tempo $\Delta T(\tau)$ entre duas séries temporais $x(t)$ e $y(t)$ são escritos matematicamente na Eq. (6) e (7), respectivamente.

$$\phi_{x,y}(f, \tau) = \tan^{-1} \left(\frac{\Im(W_{x,y}(f, \tau))}{\Re(W_{x,y}(f, \tau))} \right) \quad (6)$$

tal que $\Im$ representa a parte imaginária e $\Re$ a parte real.

e também o intervalo de tempo instantâneo $\Delta T(\tau)$ entre as séries temporais $x(t)$ e $y(t)$. Este intervalo de tempo é calculado como:

$$\Delta T(\tau) = \frac{\phi_{x,y}(f, \tau)}{2\pi F(\tau)} \quad (7)$$

tal que:

$$F(\tau) = \frac{\int_{f_1}^{f_2} f |W_{x,y}(f, \tau)| df}{\int_{f_1}^{f_2} |W_{x,y}(f, \tau)| df} \quad (8)$$

corresponde à frequência instantânea estabelecida em uma banda de frequência ou periódica escolhida.

As wavelets contínuas e de coerência foram elaboradas utilizando-se a normalização utilizada por (DA SILVA, D. F., 2017) que calcula a média e o desvio padrão mensalmente (Equação 9). Todas as séries estudadas foram normalizadas antes da comparação.

$$AVari,j = \frac{(Vari,j - Var\bar{t})}{\sigma_i} \quad (9)$$

Em que: $AVari,j$ é a anomalia normalizada da precipitação no ano $j = 1, 2, 3, \dots, N$ e mês $i = 1, 2, 3, \dots, 12$; $Vari,j$ é a precipitação no ano $j = 1, 2, 3, \dots, N$ e mês $i = 1, 2, 3, \dots, 12$; $Var\bar{t}$ e σ_i são a média climatológica e o desvio padrão do mês i .

Todas as análises referentes à wavelet usaram algoritmos originais desenvolvidos no WaveletToolbox do Matlab R2019b, composta por várias opções de processamento e aplicações para analisar e sintetizar sinais, imagens e dados que possuem comportamento regular pontuado com mudanças abruptas. A caixa de ferramentas inclui algoritmos para a transformada *wavelet* contínua (CWT) e coerência *wavelet* (utilizada neste trabalho para análise de como o conteúdo da frequência de um sinal muda com o tempo).

Esses algoritmos incorporam análises cruzadas e procedimentos estatísticos adaptados e algoritmos para a coerência wavelet, que permite verificar se diferentes modos periódicos de duas séries temporais tendem a oscilar simultaneamente (subindo e descendo juntos e quantificando a sincronia de duas séries temporais).

Posteriormente foram realizadas análises de coerência de wavelets, utilizada para quantificar as dependências entre duas séries temporais, entre os dados das estações pluviométricas estudadas e as principais anomalias climáticas atuantes sobre o semiárido. Dessa forma, a análise da Wavelet pode auxiliar na interpretação dos dados de séries temporais não estacionárias em várias escalas e revelar recursos que, de outra forma, não poderiam ser identificados.

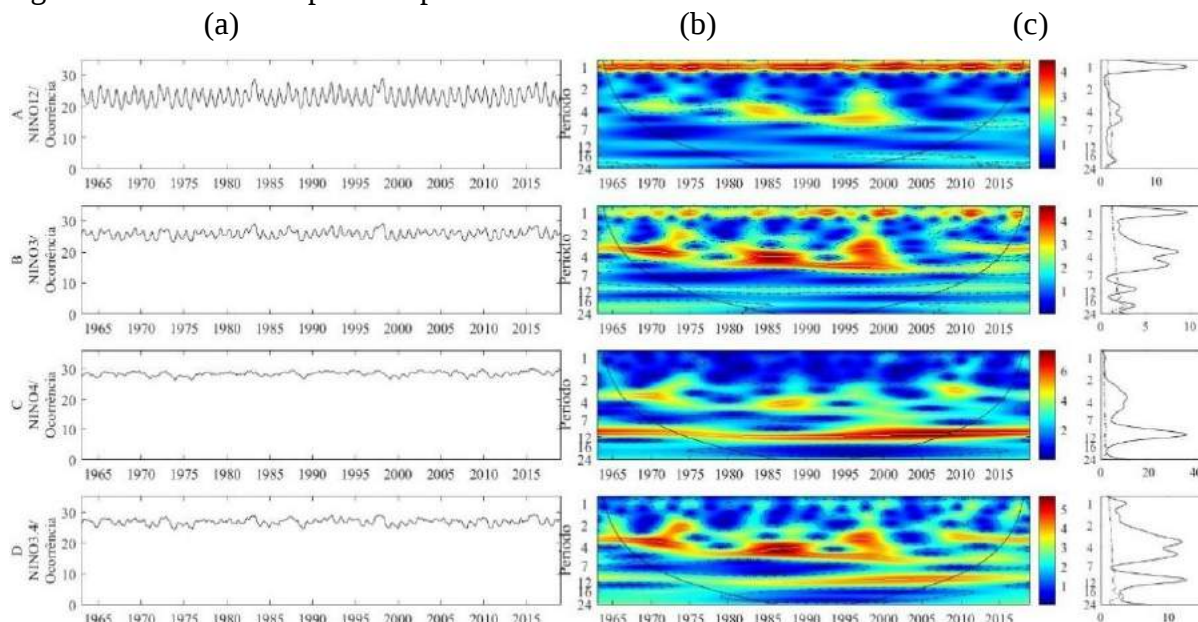
4.3.3 Resultados e discussão

4.3.3.1 Espectro de potência da *wavelet* em relação ao El Niño de 1963 a 2019

Na Figura 90, em (a) é apresentada a Temperatura mensal na Superfície do Mar (TSM) nas áreas correspondentes à influência do El Niño 1+2 (A), Niño 3 (B), Niño 4 (C) e Niño 3.4 (D) nos anos de 1963 a 2019. Esses anos fazem parte de ciclos de fenômenos climáticos como ENOS, Dipolo do Atlântico, Ciclo de manchas solares e Oscilação Decadal do Pacífico. Em (b)

observa-se o espectro de potência da *wavelet*, que representa o valor absoluto ao quadrado da Transformada de *Wavelet*, e denota a variância da série ao nível confiança de 95%. E em (c) o Espectro de potência global (EPG) do El Niño.

Figura 90 - Análise temporal de potência do El Niño.



Descrição: a) Série temporal da Temperatura da Superfície do Mar ($^{\circ}\text{C}$), na zona correspondente ao El Niño 1+2 (A), Niño 3 (B), Niño 4 (C) e Niño 3.4 (D); b) Espectro *wavelet* de potência (EWP) normalizado, calculado a partir da função *wavelet* de Morlet para a temperatura do El Niño A, B, C e D, em que os contornos sombreados correspondem às variâncias normalizadas significativas a nível de 5%, e as maiores potências sendo representadas em cores mais avermelhadas. A curva em forma de U representa o cone de influência, no qual o efeito de borda é importante; c) Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível confiança de 95%. Fonte: A autora (2020).

Na figura 90(a) a TSM mensal (a) entre A, B, C e D traz a informação da potência relativa na escala de 0 a 30°C do El Niño e em relação à temporalidade, que vai de 1963 a 2019, mostrando as oscilações reais das *wavelets* individuais, e não apenas o seu valor. A Figura 88a demonstra que há certa diferença entre as temperaturas em zonas diferentes do Pacífico, o que já é bem caracterizado pela literatura, podendo-se identificar a concentração da potência no domínio da frequência ou do tempo.

Em (b) o EWP demonstrou que a escala de potência relativa ao período que vai de 1 a 25 anos na série histórica, variou entre os fenômenos observados. No EWP da linha A fica clara a concentração de potência na banda 1, o que demonstra que essa série temporal tem um sinal anual forte e uma alta frequência anual. A série também mostra que entre 3 e 6 anos, portanto em períodos de baixa frequência, há picos significantes a nível de 5%.

Em relação a EWP B a concentração de potência fica entre os anos de 1 e 2 anos, principalmente dentro do mesmo ano, mas também entre 2 a 7 anos, portanto, tanto em períodos de baixa como de alta frequência. Essa relação pode ser visualizada no espectro global da *wavelet* (c), que calcula uma estimativa não tendenciosa e consistente do espectro de potência real da série, assim pode-se caracterizar melhor a variabilidade da série. E entre os anos de 1980 e 2000 houve anos de forte El Niño 3, apresentando um sinal forte principalmente entre os anos de 1985 a 1990 no período de 3 a 6 anos.

O EWP da linha C mostrou poucos picos acima de 5% de significância entre o período que vai de 1 a 2 anos, já entre as bandas 2 a 7, a série apresenta concentração de potência, principalmente entre os anos de 1965 e 1975, com potência maior em meados de 1970 e de 1985 até 1989, mostrando que a série tem baixa a média frequência. Também há alta potência em períodos de 2 a 7 anos, e de 8 a 12 anos.

Já o El Niño 3.4, é o que se encontra mais relacionado, com base na literatura, à precipitação no Nordeste brasileiro. Observa-se o EWP da linha D que em alguns anos houve significância entre os períodos de 1 a 2 anos, notando-se que os anos em que houve picos significantes dentro desse intervalo, como nos anos de 1990 a 2000 foram anos de em que houve menos chuva nas séries históricas de precipitação estudadas. Mas a maior potência da temperatura ocorre em períodos de 2 a 7 anos. Foi entre 1985 e 1990 que o El Niño 3.4 apresentou maior potência. Também pode-se visualizar que num período de 8 a 12 anos, entre os anos de 1995 a aproximadamente 2010, houve uma potência de média a alta, o que indica que o El Niño também pode ter influência nessa frequência.

Nota-se também através do EWP da linha D, o aumento da frequência do El Niño da década de 1990 até recentemente, o que é corroborado pelos trabalhos de CAI *et al.* (2014) e TIMMERMAN *et al.* (2018), sendo o El Niño 2015-2016, um dos mais fortes dos últimos 145 anos (BARNARD *et al.*, 2017) e pode estar relacionado ao aquecimento global caracterizando, desse modo, uma mudança nos padrões climáticos.

TEDESCHI; GRIMM; CAVALCANTI (2016) também estudaram a influência do ENSO durante a primavera e o verão austral na América do Sul. Seus resultados revelaram uma maior influência do ENSO no centro e sul do Brasil, durante a estação chuvosa nessas regiões. No entanto, eles apontaram que durante a ocorrência de episódios centrais do ENSO, as chuvas na América do Sul tropical também podem ser afetadas, sugerindo que o ENSO também possa ter uma relação de longo prazo tanto com os anos secos como os chuvosos no Nordeste brasileiro, o que é corroborado por autores como (DA SILVA, D. F., 2017; NÓBREGA; SANTIAGO, 2014).

4.3.3.2 Espectro de potência da *wavelet* em relação ao Índice de Oscilação Sul e ODP

Na Figura 91, em (a) são apresentados 4 índices formulados em regiões diferentes do Oceano Pacífico nos anos de 1963 a 2019. Em (b) observa-se o espectro de potência da *wavelet* correspondente aos 4 índices. E em (c) o Espectro de potência global (EPG) da série.

Figura 91 - Análise temporal de potência do SOI.

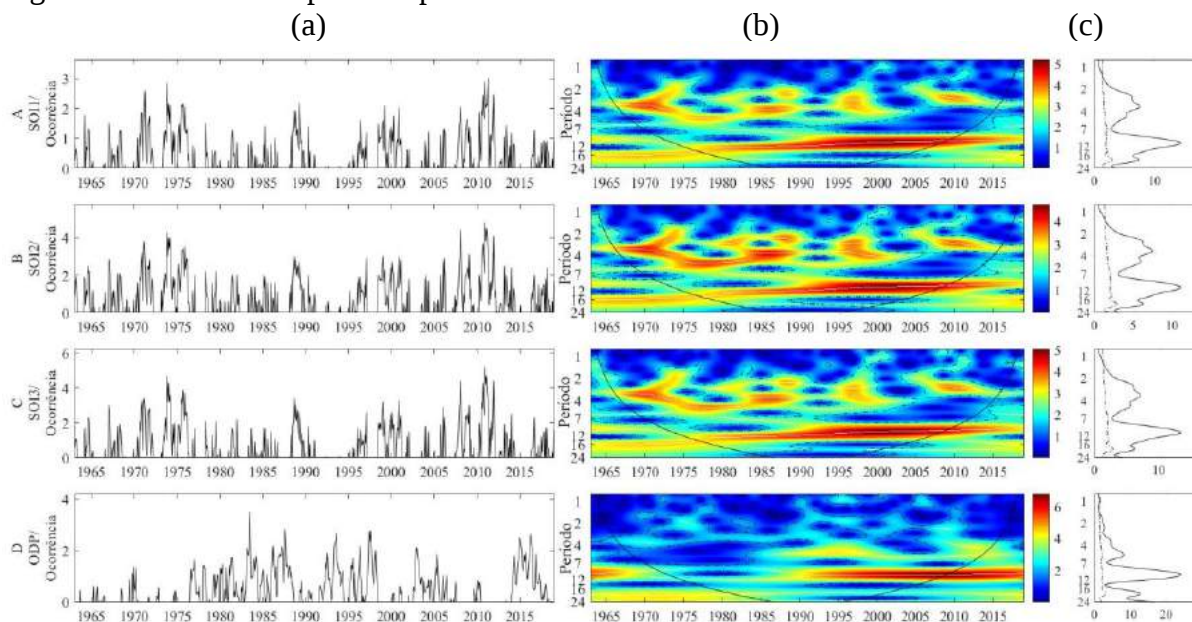


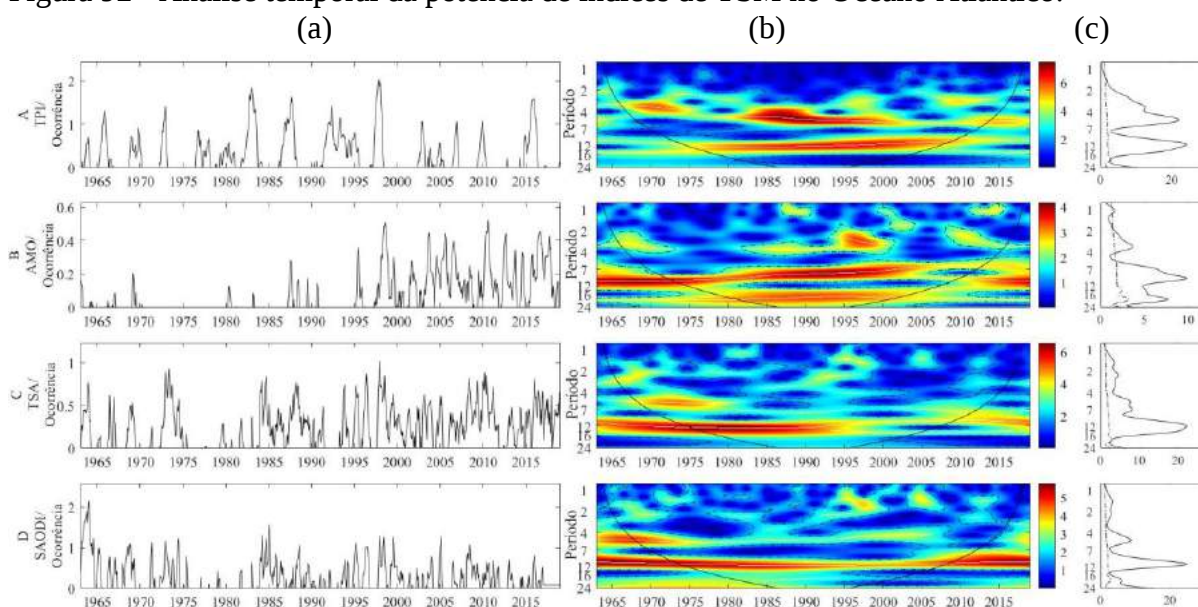
Figura 89 – a) Série temporal do Índice de Oscilação Sul (SOI) observados por diferentes métodos, SOI1(A), SOI2 (B), SOI3 (C) e ODP (D); b) Espectro wavelet de potência (EWP) normalizado, calculado a partir da função wavelet de Morlet os índices SOI1, SOI2, SOI3 e ODP, em que os contornos sombreados correspondem às variâncias normalizadas significativas a nível de 5%, e as maiores potências sendo representadas em cores mais avermelhadas. A curva em forma de U representa o cone de influência, no qual o efeito de borda é importante; c) Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível confiança de 95%. Fonte: A autora (2020).

Na figura 91(a) os dados A, B, C e D apresentam-se normalizados (a), para que fique mais simples analisar tanto os dados de pressão como temperatura de 1963 a 2019, mostrando as oscilações reais das *wavelets* individuais. Nota-se que os 3 primeiros índices avaliados são semelhantes entre si com um médio a alto nível de potência entre o intervalo de 2 a 6 anos, com o SOI2 e 3 respondendo mais nessa frequência (B), bem como uma alta potência na frequência de 8 a 16 anos em A, B e C. Excetuando-se a ODP(D), que apresenta média potência em 3-5 anos e maior intensidade de potência na frequência de 8 a 12 anos.

4.3.3.3 Espectro de potência da *wavelet* em relação ao Dipolo do Atlântico

Na Figura 92, em (a) são apresentados 4 índices formulados em diferentes regiões do Atlântico Sul nos anos de 1963 a 2019, O TPI (A), AMO (B), TSA (C), SAODI (D). Em (b) observa-se o espectro de potência da *wavelet* correspondente aos 4 índices, que abarca um período de 25 anos. E em (c) o Espectro de potência global (EPG) da série.

Figura 92 - Análise temporal da potência de índices de TSM no Oceano Atlântico.



Descrição: a) Série temporal dos índices referentes à TSM no Atlântico Sul, tais como o TPI (A), AMO (B), TSA (C) E SAODI (D); b) Espectro wavelet de potência (EWP) normalizado, calculado a partir da função wavelet de Morlet os índices TPI, AMO, TSA e SAODI, em que os contornos sombreados correspondem às variâncias normalizadas significativas a nível de 5%, e as maiores potências sendo representadas em cores mais avermelhadas. A curva em forma de U representa o cone de influência, no qual o efeito de borda é importante; c) Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível confiança de 95%. Fonte: A autora (2020).

Observa-se que o TPI (92a) entre 1983 e 2000 apresenta uma elevada potência no período de 3 a 6 anos, e nos períodos de 10 a 12 anos, entre 1978 e 2008, também apresentou alta potência. A figura 92c apresenta um alto EPG num período de 3 a 6 anos e de 10 a 12 anos como consequência da EWP.

Em (92a) nota-se que o índice AMO de 1963 a 1987 apresentava valores baixos, e a partir 1990 houve um aumento. Em (b), o AMO apresenta 1985 a 2000 uma média a alta frequência no período 2-4 anos, e numa frequência menor de 6-12 anos entre 1963 até 2005, e de 16 a 20 anos entre meados de 1980 a 2000. O AMO no período de 5 a 20 anos apresentou alta potência, principalmente de 1963 a 2005.

Já os índices TSA, que é um indicador de temperatura na superfície do Golfo da Guiné, e o SAODI, medido na África Equatorial Oeste/Central, apresentaram respostas semelhantes, com o TSA apresentando maior magnitude, principalmente de 1963 a 1995 no período de 10 a 13 anos e o SAODI, entre os anos de 1965 e 1975 no período de 10 a 12 anos. É importante observar que em praticamente toda a série histórica observada, os dados são estatisticamente significativos levando-se em consideração o EPG (92c). O TSA e o SAODI ainda são índices pouco utilizados no Brasil.

4.3.3.4 Espectro de potência da *wavelet* em relação aos Índices do Atlântico Norte

Na Figura 93, em (a) são apresentados 3 índices NAO1 (A), NAO2 (B) e TNA (C), formulados em regiões diferentes do Atlântico Norte nos anos de 1963 a 2019. Em (b) observa-se o espectro de potência da *wavelet* correspondente aos 4 índices. E em (c) o Espectro de potência global (EPG) da série.

Figura 93 - Análise temporal da potência de índices de TSM no Oceano Atlântico Norte.

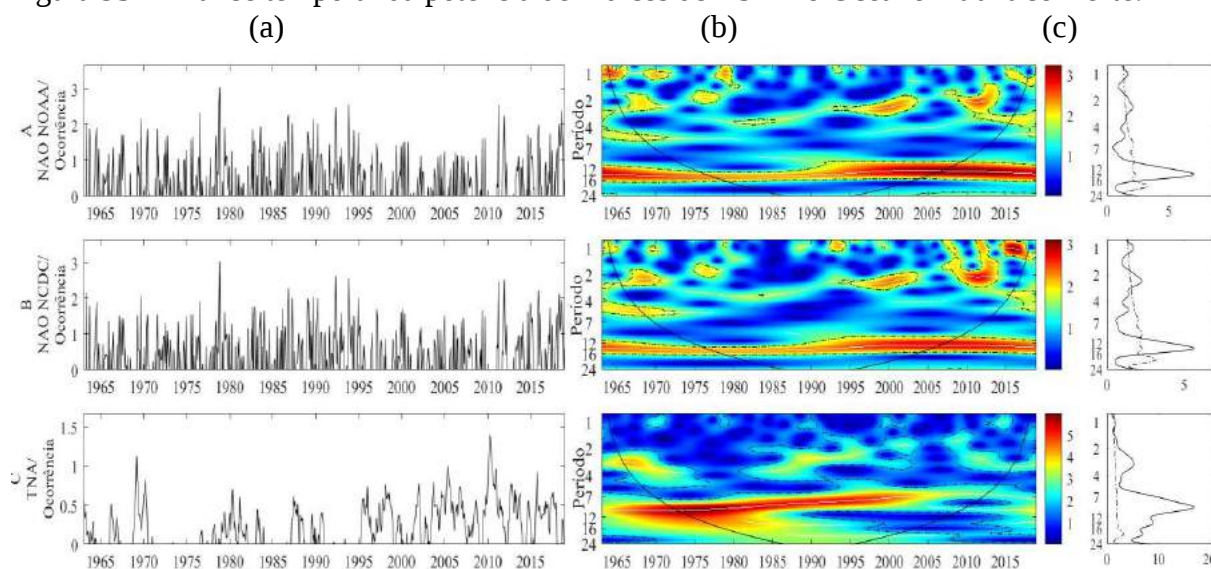


Figura 91 – a) Série temporal de Índices climáticos do Atlântico Norte observados por diferentes métodos, NAO1 (A), NAO2 (B) e TNA (C); b) Espectro *wavelet* de potência (EWP) normalizado, calculado a partir da função *wavelet* de Morlet os índices NAO1 (A), NAO2 (B) e TNA (C), em que os contornos sombreados correspondem às variâncias normalizadas significativas a nível de 5%, e as maiores potências sendo representadas em cores mais avermelhadas. A curva em forma de U representa o cone de influência, no qual o efeito de borda é importante; c) Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%. Fonte: A autora (2020).

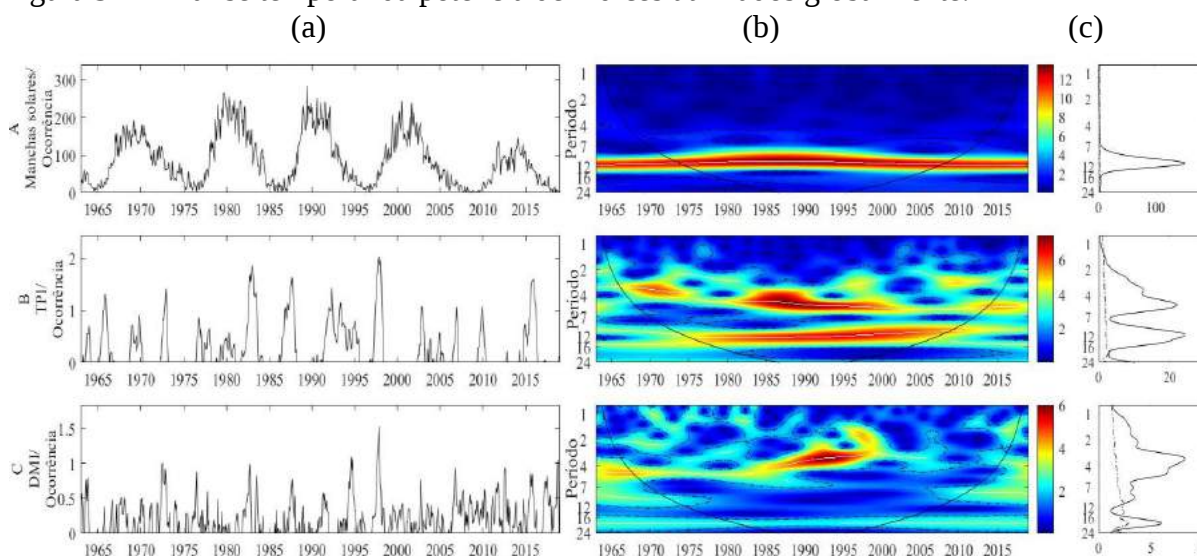
Na Figura 93a, pode-se observar que o NAO (A) e (B) no período de 10-15 anos apresentou forte potência em todos os anos, com o NAO (A) tendo maior magnitude. O TNA (C) de 1965 a 2005 teve alta potência no período de 7-25 anos, o que pode ter representado um

ciclo. O TNA apresentou significância ao nível de confiança de 95%, e a maioria dos contornos sombreados, bem como as maiores potências, estando dentro do cone de influência no TNA.

4.3.3.5 Espectro de potência da *wavelet* de vários índices de 1963 a 2019

Na Figura 92, em (a) são apresentados 3 índices formulados em regiões diferentes do Atlântico Norte nos anos de 1963 a 2019. Em (b) observa-se o espectro de potência da *wavelet* correspondente aos 3 índices. E em (c) o Espectro de potência global (EPG) da série. Os dados trabalhados foram o das Manchas solares, ODP, índice transpolar (TPI) e Índice do modo dipolo do Oceano Índico (DMI).

Figura 94 - Análise temporal da potência de índices utilizados globalmente.



Descrição: a) Série temporal de Índices variados que podem ter relação com a precipitação no semiárido observados por diferentes métodos, Manchas Solares (A), TPI (B) e DMI (C); b) Espectro *wavelet* de potência (EWP) normalizado, calculado a partir da função *wavelet* de Morlet estão as Manchas Solares (A), TPI (B) e DMI (C), em que os contornos sombreados correspondem às variâncias normalizadas significativas a nível de 5%, e as maiores potências sendo representadas em cores mais avermelhadas. A curva em forma de U representa o cone de influência, no qual o efeito de borda é importante; c) Espectro de potência global (EPG), com o contorno tracejado indicando que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%. Fonte: A autora (2020).

A figura 94A apresenta a série de manchas solares onde fica claro que a série representa um ciclo, o EWP representa a frequência das manchas solares como tendo praticamente a mesma frequência, num período que compreende de 10-12 anos, o que corrobora com o ciclo de 11 anos apontado por Kerr (1996) e Molion (2005).

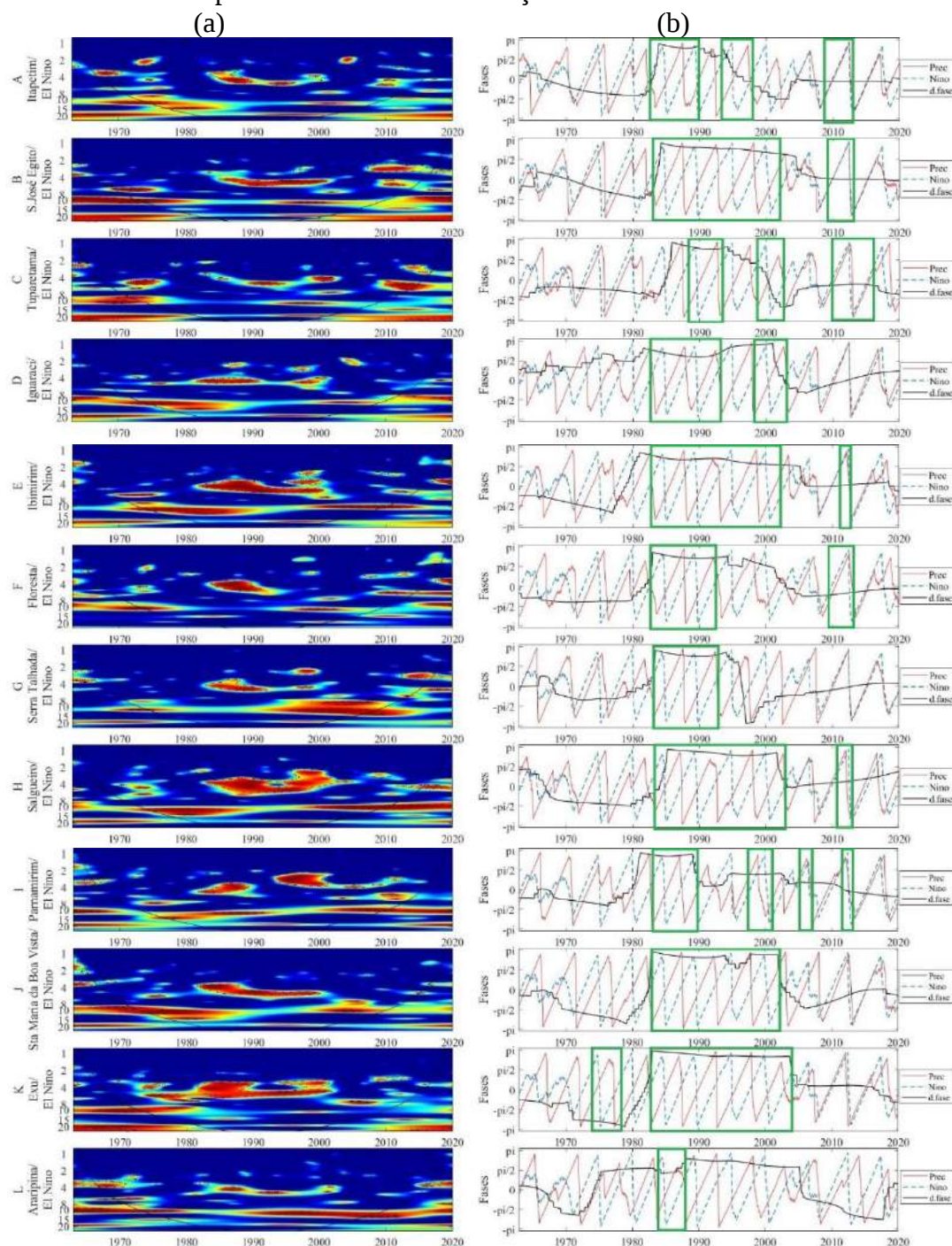
Dentre os dados selecionados vemos que a ODP e o TPI possuem maior abrangência no período analisado, que vai de 1 a 7 anos, entre 1965 e 2019. E as maiores magnitudes foram observadas no TPI e DMI, no entanto o DMI não apresentou grande coerência com os dados trabalhados nas estações.

4.3.3.6 Espectro de coerência das Wavelets em relação aos fenômenos climáticos e às estações pluviométricas analisadas

4.3.3.6.1 Espectro de coerência da precipitação em relação ao El Niño na periodicidade de 4-6 anos.

Na Figura 95 encontram-se as wavelets de coerência das estações estudadas:

Figura 95 - Análise temporal da coerência das estações estudadas com o *El Niño*.



Descrição: Coerência de *wavelets* e análises de fases de séries temporais de precipitação nas Bacias estudadas e o El Niño 3.4. O painel esquerdo representa a coerência de *wavelets*. Azul, baixa coerência; vermelho, alta coerência.

As linhas pontilhadas mostram um nível de significância de 5%. O cone de influência (curva preta) indica a região não influenciada pelos efeitos das bordas. Os painéis da direita representam as análises de fase entre os dois parâmetros observados (azul e vermelho), com base em *wavelets* para a faixa periódica de 4 a 6 anos. Fonte: A autora (2020).

Este espectro foi obtido pela integração do espectro de potência da *Wavelet* relacionado aos dados de precipitação pluviométrica entre os anos de 1963 a 2019 e a TSM da região do El Niño 3.4 de 1963 a 2019 num período que compreende de 1 a 25 anos, onde encontram-se as frequências, seguida pelo gráfico da coerência do período entre 4 a 6 anos. A Coerência *Wavelet* apresenta valores entre 0(zero) e 1(um). Para valores de próximos de 1(um) a correlação é alta. Para valores de próximos de 0(zero) a correlação é baixa.

Percebe-se que as oscilações das séries temporais de precipitação são dominadas pelo modo anual, mas também têm um modo comum de oscilação estatisticamente significativo com o El Niño em torno de um período de 4 a 6 anos. Nota-se, através da coerência entre os dados do El Niño e das estações trabalhadas, que a relação do El Niño com a precipitação no semiárido parece ser maior a Oeste da Bacia do Pajeú do que a Leste. No entanto o período em que a *wavelet* indica coerência entre os dados é entre os anos de 1985 a 2000, excetuando-se as duas primeiras estações que apresentam menor coerência com o El Niño.

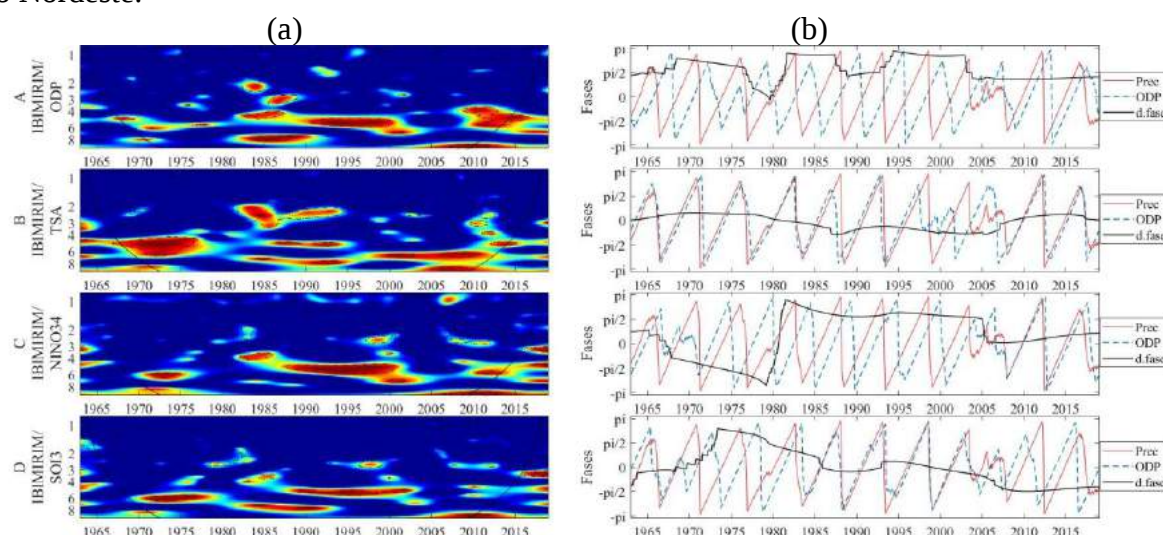
O período que mais apresentou coerência foi o de 4 a 6 anos, o que pode ser representado no gráfico das fases 93b. A linha tracejada representa os dados do El Niño e a linha vermelha pelos dados de precipitação. A linha preta corresponde à diferença de fase. Pode-se então dizer que os dados das chuvas nas estações estudadas estão relacionados ao El Niño no período de 1985 a 2000, no entanto existe uma diferença na fase, ou seja, os dois eventos não são simultâneos no período, mas estão relacionados mesmo assim. A partir de 2008, no entanto, os dados estiveram praticamente na mesma fase, no entanto, por estarem fora do cone de influência, os dados não são têm significância.

Nota-se ainda que em razão da diferença de fase se encontrar positiva, a precipitação apresenta-se antes do El Niño, o que pode estar relacionado ao fenômeno observado por (TOSHIE KAYANO; VALÉRIA ANDREOLI; FERREIRA DE SOUZA, 2011) de que o oceano Pacífico tropical e Oceano Índico são influenciados pelo Atlântico tropical dentro de uma escala de tempo de uma estação e que o Nordeste pode ser mais influenciado pela dinâmica do Oceano Atlântico do que pelo Oceano Pacífico.

A seguir encontram-se as *wavelets* de coerência da estação de Ibimirim (A). Este espectro é obtido pela integração do espectro de potência da *Wavelet* relacionado aos dados de precipitação pluviométrica entre os anos de 1963 a 2019 da estação Ibimirim e os índices ODP,

TSA. NIÑO 3.4 e SOI3 seguida pelo gráfico da coerência do período entre 4 a 6 anos. A Coerência *Wavelet* apresenta valores entre 0(zero) e 1(um). Para valores de próximos de 1(um) a correlação é alta. Para valores de próximos de 0(zero) a correlação é baixa (Figura 96).

Figura 96 - Análise temporal da coerência das estações analisadas com índices mais estudados no Nordeste.



Descrição: Coerência de *wavelets* (entre 1 e 10 anos) e análises de fases de séries temporais de precipitação na estação pluviométrica de Ibimirim na Bacia do Pajeú-PE e a ODP (A), TSA (B), El Niño 3.4 (C) e o SOI3 (D). O painel (a) representa a coerência de *wavelets*. Azul, baixa coerência; vermelho, alta coerência. As linhas pontilhadas mostram um nível de significância de 5%. O cone de influência (curva preta) indica a região não influenciada pelos efeitos das bordas. Os painéis (b) representam as análises de fase entre os dois parâmetros observados (azul e vermelho), com base em *wavelets* para a faixa periódica de 4 a 6 anos. Fonte: A autora (2020).

A figura 96 mostra as análises de coerência *wavelet* entre precipitação e os índices oceânicos ODP, TSA, NIÑO 3.4 e SOI3 para a precipitação média em Ibimirim. De modo geral, os resultados mostram oscilações coerentes não contínuas estatisticamente significativas ao nível de 5% para a periodicidade 4-6 anos entre a precipitação e os quatro índices analisados. A precipitação coincidiu principalmente com a SST (TSA) em três períodos principais: 1965-1980, 1985-1995 e 2000-2010.

Também foram observadas coerências nas periodicidades 2-3 anos entre 1980 e 1995 entre precipitação e TSA, enquanto o índice NIÑO 3.4 coincidiu com a precipitação em uma região principal nas bandas 4-6 anos entre 1985 e 2005. Duas regiões principais correspondentes também foram encontradas entre precipitação e ODP, a primeira de 1990 a 2005 e a segunda de 2010 a 2015.

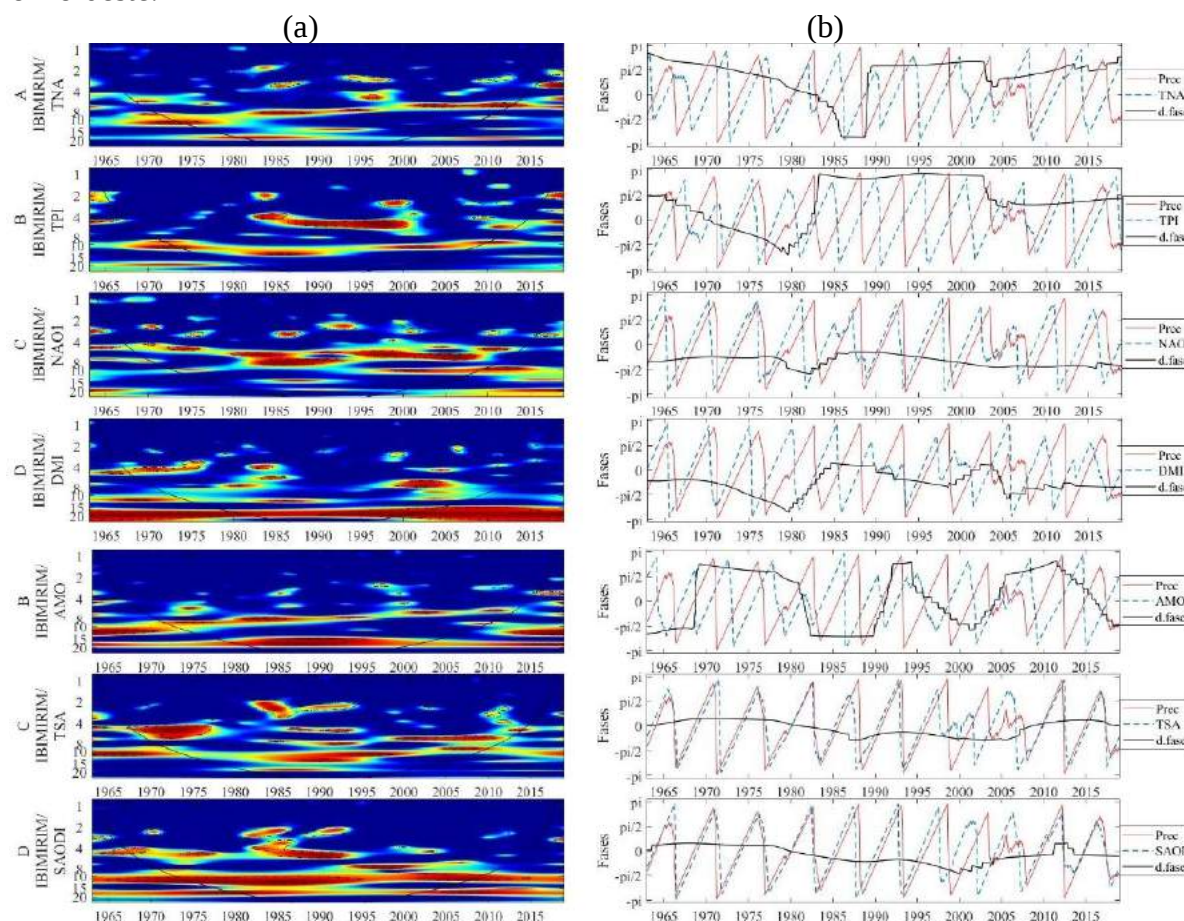
Apesar do caráter sazonal da precipitação, todos os sinais foram fracamente associados na escala sazonal (anual). Essas associações foram caracterizadas por relações defasadas no tempo (gráficos à direita) com as oscilações de precipitação precedendo o índice ODP e quase

perfeitamente em fase com as mudanças de TSA e SOI3 nas periodicidades 4-6 anos, pois quando a fase se apresenta mais próxima a 0, isso indica que as séries são simultâneas e que as oscilações ocorrem praticamente ao mesmo tempo.

Na figura 97 encontram-se as *wavelets* de coerência da estação de Ibimirim (A) com os dados menos usuais de índices de sistemas atuantes em diferentes regiões, para que sejam levantadas possibilidades sobre a influência desses sistemas entre os anos de 1963 a 2019 e os índices oceânicos TNA, TPI, NAO e DMI, AMO, TSA e SAODI, seguida pelo gráfico da coerência do período entre 4 a 6 anos. A Coerência *Wavelet* apresenta valores entre 0(zero) e 1(um). Para valores de próximos de 1(um) a correlação é alta. Para valores de próximos de 0(zero) a correlação é baixa (Figura 97).

4.3.3.6.2 Espectro de coerência da precipitação em relação a índices pouco estudados no Nordeste na periodicidade de 4-6 anos.

Figura 97 - Análise temporal da coerência numa estação do Pajeú com índices pouco estudados no Nordeste.



Descrição: Coerência de *wavelets* (entre 1 e 10 anos) e análises de fases de séries temporais de precipitação na estação pluviométrica de Ibimirim na Bacia do Pajeú-PE e a TNA (A), TPI (B), NAO (C) e o DMI (D). O painel (a) representa a coerência de *wavelets*. Azul, baixa coerência; vermelho, alta coerência. As linhas pontilhadas mostram um nível de significância de 5%. O cone de influência (curva preta) indica a região não influenciada

pelos efeitos das bordas. Os painéis (b) representam as análises de fase entre os dois parâmetros observados (azul e vermelho), com base em *wavelets* para a faixa periódica de 4 a 6 anos. Fonte: A autora (2020).

A figura 97 mostra as análises de coerência *wavelet* entre precipitação e os índices oceânicos TNA, TPI, NAO e DMI para a precipitação média em Ibimirim. De modo geral, os resultados mostram oscilações coerentes não contínuas estatisticamente significativas ao nível de 5% para a periodicidade 4-6 anos entre a precipitação e os três primeiros índices analisados, excetuando-se o DMI, que apresenta coerência dentro do cone de influência apenas no período de 19-21 anos entre os anos de 1990 e 2000. A precipitação coincidiu principalmente NAO de 1980 a 2010.

Não foram observadas coerências significativas nas periodicidades 2-3 anos nos dados. Apesar do caráter sazonal da precipitação, todos os sinais foram fracamente associados na escala sazonal (anual). Essas associações foram caracterizadas por relações defasadas no tempo (gráficos à direita) com as oscilações da NAO precedendo a precipitação e quase perfeitamente em fase com as mudanças nas periodicidades 4-6 anos, pois quando a fase se apresenta mais próxima a 0, isso indica que as séries são simultâneas e que as oscilações ocorrem praticamente ao mesmo tempo.

O TPI de 1983 a 2000 apresentou forte coerência entre os dados na periodicidade 4-6 anos e coerência entre no 1984 a 1988 e 2000 e 2005 no período de 10-12 anos. O AMO apresentou forte coerência no período de 15-18 anos entre 1984 a 1994. A precipitação coincidiu principalmente com a SST (TSA) em três períodos principais: 1965-1980, 1985-1995 e 2000-2010.

Um aspecto interessante salientado pela análise de KAYANO, MARY TOSHIE; ANDREOLI; SOUZA (2019) é que a Oscilação Interdecadal do Pacífico (ODP) e a Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO) influenciam de diferentes maneiras as teleconexões relacionadas à La Niña (LN) na América do Sul.

Também foram observadas coerências nas periodicidades 2-3 anos entre 1980 e 1995 entre precipitação e TSA, enquanto o índice NIÑO 3.4 (Figura 95a) coincidiu com a precipitação em uma região principal nas bandas 4-6 anos entre 1985 e 2005. Nota-se que a TSA e a precipitação estão praticamente na mesma fase, explicitando a relação entre a estação e a dinâmica do Oceano Atlântico com os dados medidos no Golfo da Guiné.

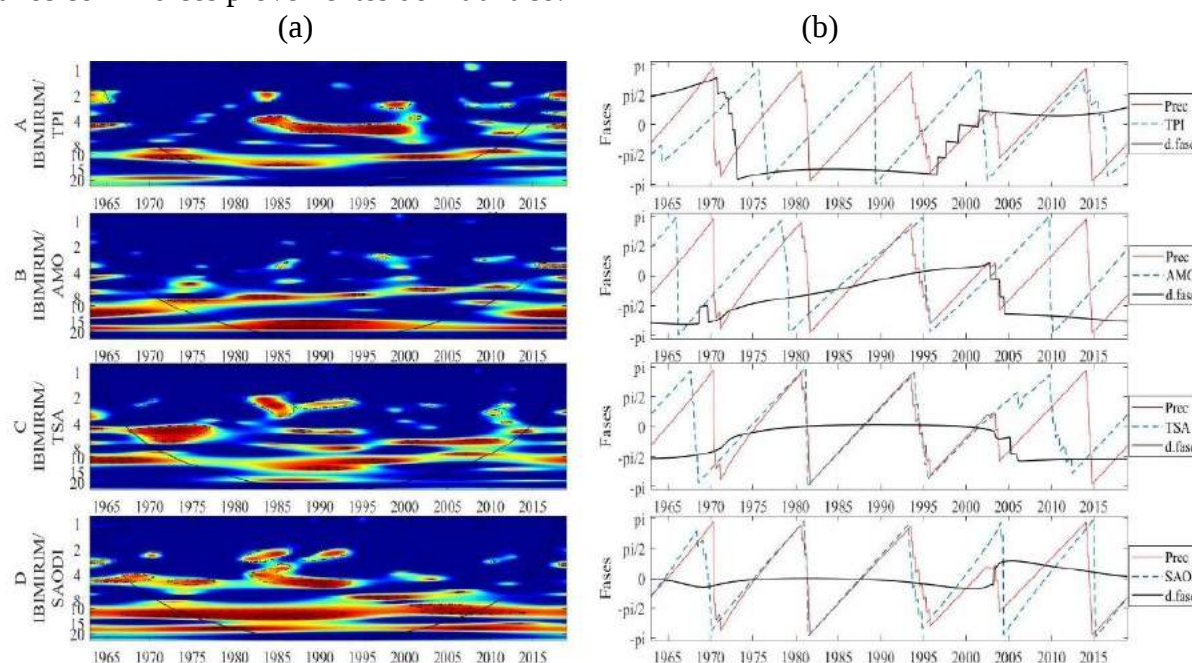
Apesar do caráter sazonal da precipitação, todos os sinais foram fracamente associados na escala sazonal (anual). Essas associações foram caracterizadas por relações defasadas no tempo (gráficos à direita) com as oscilações de precipitação precedendo o índice TPI e quase perfeitamente em fase com as mudanças de TSA e SAODI nas periodicidades 4-6 anos, pois quando a fase se apresenta mais próxima a 0, isso indica que as séries são simultâneas e que as

oscilações ocorrem praticamente ao mesmo tempo. Salientando que na periodicidade de 10-12 anos há forte coerência entre os anos de 1975 a 1995, dentro do cone de influência, e de 2002 a 2012, extrapolando o cone de influência, mas sinalizando ainda um ciclo.

4.3.3.7 Espectro de coerência das Wavelets em relação aos fenômenos climáticos na periodicidade de 10-12 anos.

Todos os índices apresentaram o sinal entre os períodos 10-12 anos, essa periodicidade levou à formulação do gráfico da fase levando-se em consideração a periodicidade essa mesma periodicidade, como pode ser visualizado a seguir na figura 98b:

Figura 98 - Análise temporal da coerência numa estação do Pajeú na periodicidade de 10-12 anos com índices provenientes do Atlântico.



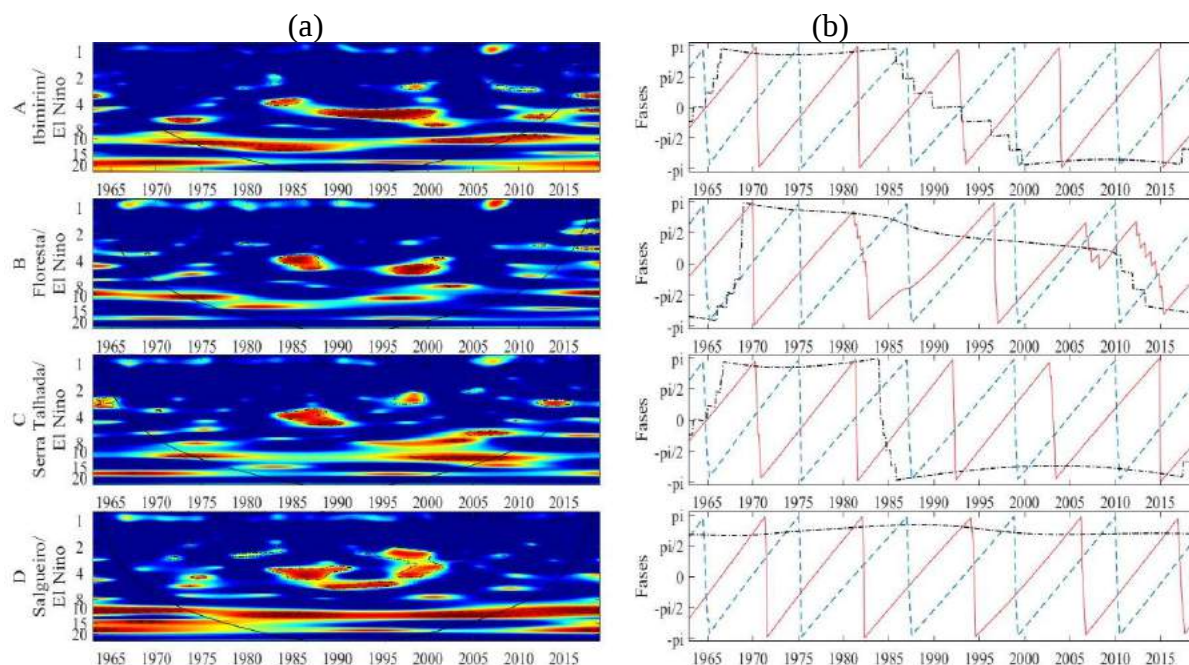
Descrição: Coerência de *wavelets* (entre 1 e 25 anos) e análises de fases de séries temporais de precipitação na estação pluviométrica de Ibimirim na Bacia do Pajeú-PE e a TPI (A), AMO (B), TSA (C) e SAODI (D). O painel (a) representa a coerência de *wavelets*. Azul, baixa coerência; vermelho, alta coerência. As linhas pontilhadas mostram um nível de significância de 5%. O cone de influência (curva preta) indica a região não influenciada pelos efeitos das bordas. Os painéis (b) representam as análises de fase entre os dois parâmetros observados (azul e vermelho), com base em *wavelets* para a faixa periódica de 12 a 14 anos. Fonte: A autora (2020).

Como pode ser observado, apenas na TPI a fase não é coincidente, sendo os anos de 1984 a 1988 os de maior coerência, no entanto a precipitação apresenta uma defasagem em relação ao tempo, com a TPI ocorrendo primeiro e a precipitação ocorrendo depois. E o SAODI apresentando maior coerência nesse período, o que demonstra que o aquecimento da superfície nas costas da África Equatorial Oeste pode ser a chave para explicar a dinâmica da precipitação

no semiárido do Submédio São Francisco entre 1975 a 1993 e de 2002 a 2008 (dentro do cone de influência). Desse modo fica mais claro no gráfico que os fenômenos que se originam no Atlântico demonstram ocorrer na mesma fase da pluviosidade na região pesquisada.

A seguir encontram-se as *wavelets* de coerência da estação de Ibimirim (A). Este espectro é obtido pela integração do espectro de potência da *Wavelet* relacionado aos dados de precipitação pluviométrica entre os anos de 1963 a 2019 e a TSM da região do El Niño 3.4 de 1963 a 2019 num período que compreende de 1 a 25 anos, onde encontram-se as frequências, seguida pelo gráfico da coerência do período entre 10 a 12 anos. A Coerência *Wavelet* apresenta valores entre 0(zero) e 1(um). Para valores de próximos de 1(um) a correlação é alta. Para valores de próximos de 0(zero) a correlação é baixa (Figura 98).

Figura 99 - Análise temporal da coerência numa estação do Pajeú na periodicidade de 10-12 anos com o El Nino.

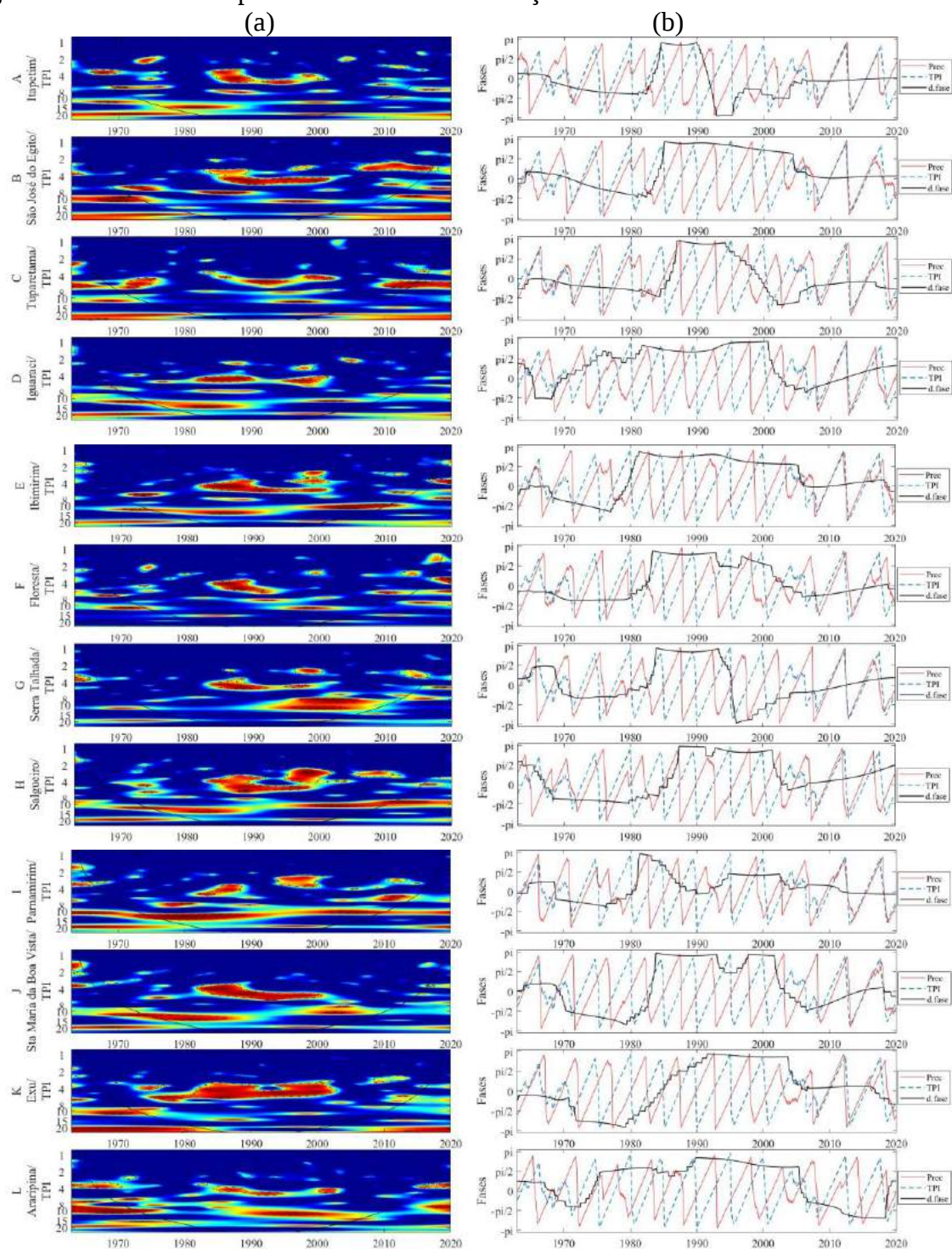


Descrição: Coerência de *wavelets* (entre 1 a 25 anos) e análises de fases de séries temporais de precipitação na estação pluviométrica de estações na Bacia do Pajeú-PE e a TPI (A), AMO (B), TSA (C) e SAODI (D). O painel (a) representa a coerência de *wavelets*. Azul, baixa coerência; vermelho, alta coerência. As linhas pontilhadas mostram um nível de significância de 5%. O cone de influência (curva preta) indica a região não influenciada pelos efeitos das bordas. Os painéis (b) representam as análises de fase entre os dois parâmetros observados (azul e vermelho), com base em *wavelets* para a faixa periódica de 10 a 12 anos. Fonte: A autora (2020).

A seguir encontram-se as *wavelets* de coerência das estações de Itapetim (A), São José do Egito (B), Tuparetama (C), Igaraci (D), Ibimirim (E), Floresta (F), Serra Talhada (G), Salgueiro (H), Parnamirim (I), Sta. Maria da Boa Vista (F), Exu (K) e Araripina (L), em relação ao TSA (Figura 100).

4.3.3.8 Espectro de coerência das Wavelets em relação aos fenômenos climáticos na periodicidade de 10-12 anos no Oceano Atlântico.

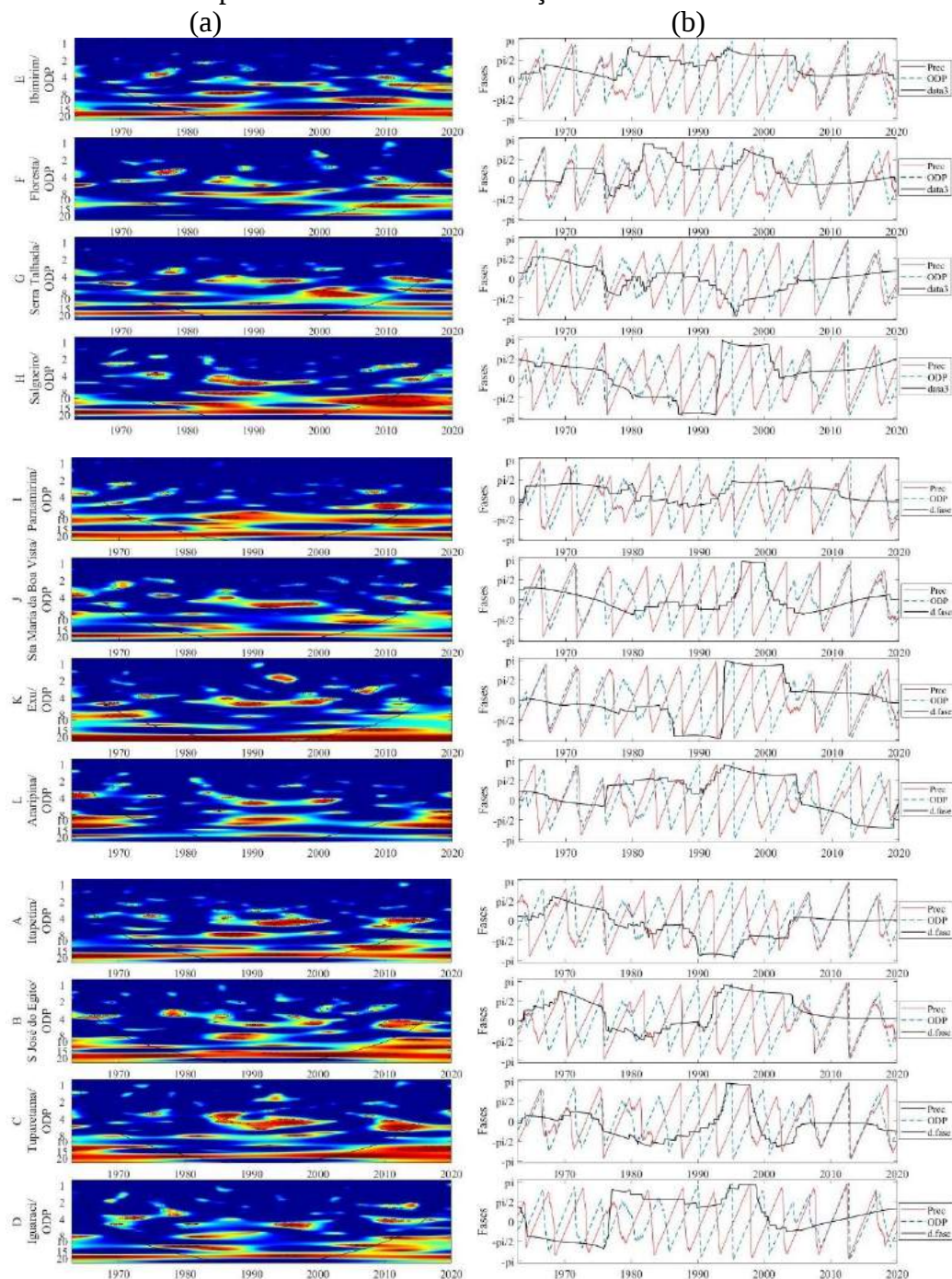
Figura 100 - Análise temporal da coerência das estações estudadas com o TPI.



Descrição: Coerência de *wavelets* e análises de fases de séries temporais de precipitação entre municípios vizinhos nas Bacias do Pajeú-PE, Terra Nova-PE, Brígida-PE e o TPI. O painel esquerdo representa a coerência de *wavelets*. Azul, baixa coerência; vermelho, alta coerência. As linhas pontilhadas mostram um nível de significância de 5%. O cone de influência (curva preta) indica a região não influenciada pelos efeitos das bordas. Os painéis da direita representam as análises de fase entre os dois parâmetros observados (azul e vermelho), com base em *wavelets* para a faixa periódica de 4 a 6 anos. Fonte: A autora (2020).

A seguir encontram-se as *wavelets* de coerência das estações de Itapetim (A), São José do Egito (B), Tuparetama (C), Igaraci (D), Ibimirim (E), Floresta (F), Serra Talhada (G), Salgueiro (H), Parnamirim (I), Sta. Maria da Boa Vista (J), Exu (K) e Araripina (L), em relação à ODP (Figura 101).

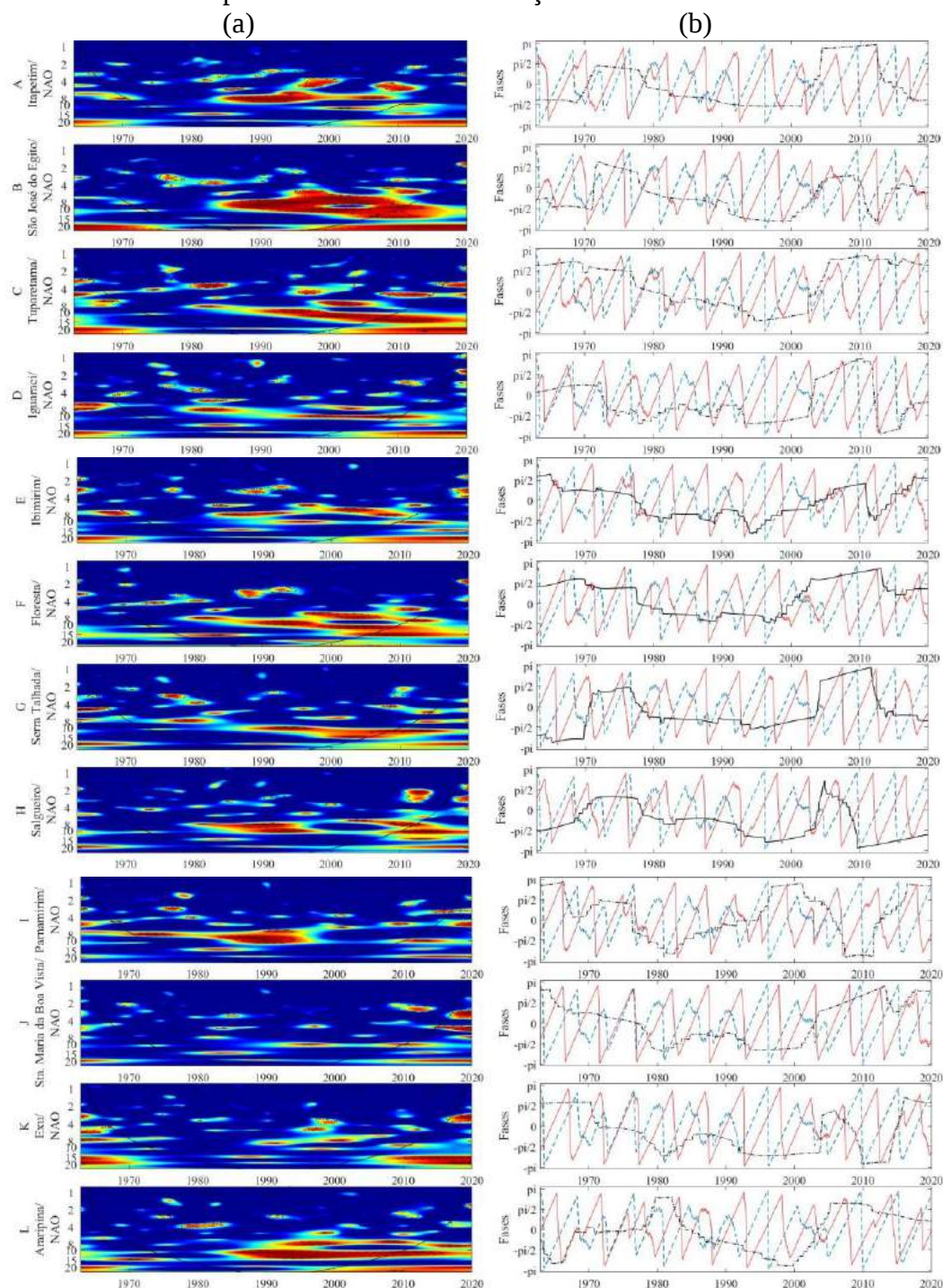
Figura 101 - Análise temporal da coerência das estações estudadas com a ODP.



Descrição: Coerência de wavelets e análises de fases de séries temporais de precipitação entre municípios vizinhos nas Bacias do Pajeú-PE, Terra Nova-PE, Brígida-PE e a ODP. O painel esquerdo representa a coerência de *wavelets*. Azul, baixa coerência; vermelho, alta coerência. As linhas pontilhadas mostram um nível de significância de 5%. O cone de influência (curva preta) indica a região não influenciada pelos efeitos das bordas. Os painéis da direita representam as análises de fase entre os dois parâmetros observados (azul e vermelho), com base em *wavelets* para a faixa periódica de 4 a 6 anos. Fonte: A autora (2020).

A seguir encontram-se as *wavelets* de coerência das estações estudadas em relação ao NAO, onde observa-se que o NAO possui mais relação com a precipitação principalmente a Leste da Bacia do Pajeú e na frequência de 7-10 anos (Figura 102).

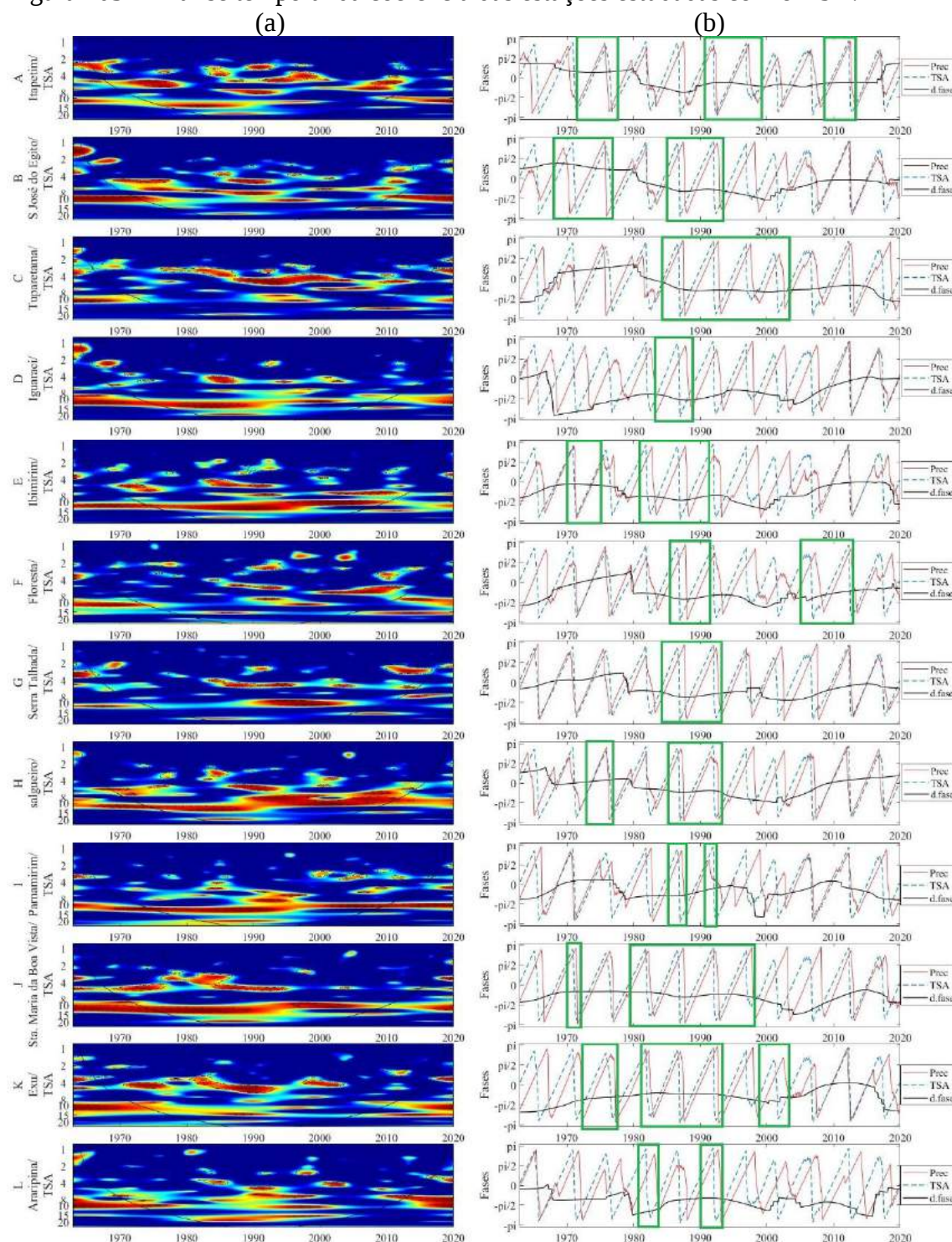
Figura 102 - Análise temporal da coerência das estações estudadas com o NAO.



Descrição: Coerência de wavelets e análises de fases de séries temporais de precipitação entre municípios vizinhos nas Bacias do Pajeú-PE, Terra Nova-PE, Brígida-PE e o NAO. O painel esquerdo representa a coerência de wavelets. Azul, baixa coerência; vermelho, alta coerência. As linhas pontilhadas mostram um nível de significância de 5%. O cone de influência (curva preta) indica a região não influenciada pelos efeitos das bordas. Os painéis da direita representam as análises de fase entre os dois parâmetros observados (azul e vermelho), com base em wavelets para a faixa periódica de 4 a 6 anos. Fonte: A autora (2020).

A seguir encontram-se as *wavelets* de coerência das estações estudadas em relação ao TSA onde a coerência ocorre em várias frequências (Figura 103).

Figura 103 - Análise temporal da coerência das estações estudadas com o TSA.



Descrição: Coerência de wavelets e análises de fases de séries temporais de precipitação entre municípios vizinhos nas Bacias do Pajeú-PE, Terra Nova-PE, Brígida-PE e o TSA. O painel esquerdo representa a coerência de wavelets. Azul, baixa coerência; vermelho, alta coerência. As linhas pontilhadas mostram um nível de significância de 5%. O cone de influência (curva preta) indica a região não influenciada pelos efeitos das bordas. Os painéis da direita representam as análises de fase entre os dois parâmetros observados (azul e vermelho), com base em wavelets para a faixa periódica de 4 a 6 anos. Fonte: A autora (2020).

O espectro da TSA é obtido pela integração do espectro de potência da *Wavelet* relacionado aos dados de precipitação pluviométrica entre os anos de 1963 a 2019 da TSA onde encontram-se as frequências, seguida pelo gráfico da coerência do período entre 4 a 6 anos. As associações foram caracterizadas por uma relação quase perfeitamente em fase entre a TSA e a precipitação nas periodicidades 4-6 anos, pois quando a fase se apresenta mais próxima a 0, isso indica que as séries são simultâneas e que as oscilações ocorrem praticamente ao mesmo tempo. A precipitação coincidiu principalmente com a SST (TSA) em três períodos principais: 1965-1980, 1985-1995 e 2000-2010.

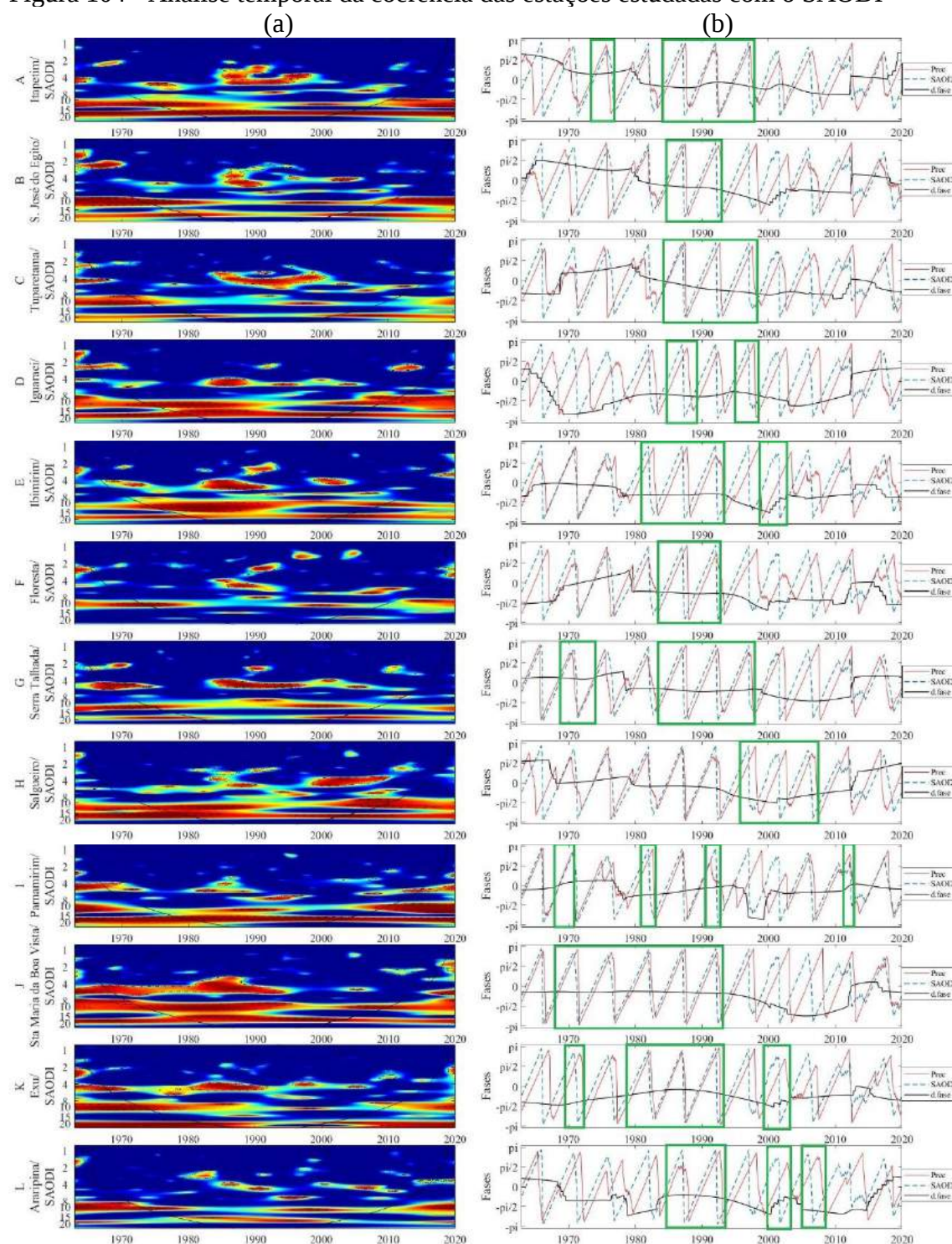
Em todos os períodos a TSA está em fase com a precipitação, no entanto os períodos que foram analisados foram apenas o que apresentaram coerência. Também foram observadas coerências nas periodicidades 2-3 anos e 4-6 anos na TSA nas estações analisadas, enquanto o índice NIÑO 3.4 coincidiu com a precipitação em uma região principal nas bandas 4-6 anos entre 1985 e 2005. E quase perfeitamente em fase com as mudanças de TSA e SOI3 nas periodicidades de 4-6 anos.

Outro índice medido no Atlântico é o SAOdipole (SAOD). Segundo (NNAMCHI; LI; ANYADIKE, 2011) os resultados demonstraram que o setor quente do Atlântico e a parte sudoeste da costa Argentina-Uruguaí-Brasil são constantemente correlacionados em todos os meses e que um episódio típico de SAOD tem um ciclo de vida de cerca de oito meses, embora a intensidade de pico em que as anomalias do SST sejam evidentemente acopladas aos campos de circulação atmosférica e anomalia de precipitação durem quatro meses durante o inverno austral (maio-agosto).

Esse mecanismo de interação atmosfera-oceano acoplado parece ser único e independente da influência direta do El Niño, baseado no Oceano Pacífico, ou da variabilidade global do SST. O SAOD pode fornecer uma estrutura útil para investigar a variabilidade climática e para previsões aprimoradas, especialmente em partes da África e das Américas, e alguns resultados preliminares já são indicados, por exemplo, o SAOD é anomalias de precipitação mais amplamente relacionadas nessas regiões, especialmente durante o inverno austral (NNAMCHI; LI; ANYADIKE, 2011).

A seguir encontram-se as *wavelets* de coerência das estações de Itapetim (A), São José do Egito (B), Tuparetama (C), Iguaraci (D), Ibimirim (E), Floresta (F), Serra Talhada (G), Salgueiro (H), Parnamirim (I), Sta. Maria da Boa Vista (F), Exu (K) e Araripina (L), em relação ao SAOD (Figura 104).

Figura 104 - Análise temporal da coerência das estações estudadas com o SAODI



Descrição: Coerência de *wavelets* e análises de fases de séries temporais de precipitação entre municípios vizinhos nas Bacias do Pajeú-PE, Terra Nova-PE, Brígida-PE e o SAODI. O painel esquerdo representa a coerência de *wavelets*. Azul, baixa coerência; vermelho, alta coerência. As linhas pontilhadas mostram um nível de significância de 5%. O cone de influência (curva preta) indica a região não influenciada pelos efeitos das bordas. Os painéis da direita representam as análises de fase entre os dois parâmetros observados (azul e vermelho), com base em *wavelets* para a faixa periódica de 4 a 6 anos. Fonte: A autora (2020).

Com relação ao Oceano Atlântico, o modo dipolo tropical, que se manifesta como uma estrutura assimétrica anômala no campo de temperatura da superfície do mar (SST) sobre o Equador, relacionada a uma circulação equatorial, foi associada por (SERVAIN; LEGLER, 1986) às variabilidades climáticas regionais, bem como às anomalias de precipitação no Sahel e a dinâmica de precipitação no Nordeste brasileiro. O índice SAOD medido na área de influência da Corrente fria de Benguela e do deserto do Calaari apresentou forte coerência com a precipitação no semiárido, estando na mesma fase que a precipitação na área estudada em diversos períodos da série amostral.

Desse modo, observa-se que as séries estudadas possuem uma periodicidade anual, apresentando espectros globais da *wavelet* característicos. Estes espectros globais podem ser usados para analisar a variabilidade temporal da região e compará-los com o regime pluviométrico de outras regiões, podendo ser usados para definir zonas hidrologicamente homogêneas. Sendo assim, a caracterização dos regimes locais de chuvas pode melhorar a previsão hidrológica de curto e longo prazo, auxiliando na formação de uma visão estratégica que possa analisar, prevenir e mitigar os impactos dos efeitos dos fenômenos climáticos atuantes no semiárido do Submédio São Francisco.

Percebe-se que os índices medidos no pacífico apresentam frequências semelhantes, mas com diferentes espectros de potência e em anos diferentes. Tanto o *El Niño* 3.4, que será usado para o teste de coerência com os dados de estação, como os demais índices SOI e ODP apresentam alta potência no período de 8 a 12 anos, e o SOI e *El Niño* apresenta alto nível de potência entre o intervalo de 2 a 6 anos.

Desse modo, as estimativas de temperatura da superfície do mar e a variabilidade da pressão do nível do mar associados a extremos climáticos (secas e inundações) no nordeste do Brasil (NEB), estratificados de acordo com as fases do El Niño-Oscilação Sul (ENSO) apresentaram o EPG em períodos semelhantes.

Autores como (KAYANO, MARY T.; ANDREOLI, 2006, 2007) já salientavam que a TSM no oceano Pacífico na área correspondente ao ENOS na faixa equatorial, apresenta uma variabilidade interanual do ciclo, bem como uma variabilidade interdecenal, que também apresenta padrões espaciais de TSM similares, bem como as diferenças na força das teleconexões ENSO para as chuvas na América do Sul podem estar relacionadas à ODP, o que cria um pano de fundo para que essas teleconexões sejam potencializadas quando a ENSO e a ODP estiverem na mesma fase.

O gráfico da coerência do *El Niño* no período entre 10 a 12 anos revela que há coerência entre o *El Niño* e os dados de precipitação no período analisado no entanto há uma relação de

defasagem da fase entre os dados, assim como o TPI, analisado na figura 97, o que demonstra que o Atlântico influencia na precipitação mais do que o Pacífico nessa frequência, o que corrobora com a sugestão, não comprovada anteriormente pelos trabalhos de Kayano; Andreoli (2006) e Kayano; Andreoli; Souza (2011) de que a variabilidade da SST do Atlântico tropical Sul estivesse mais relacionado à dinâmica da precipitação em algumas zonas climáticas no Brasil.

Atualmente a área estudada passou por um período recente de secas prolongadas, que se estendeu de 2012 a 2017, que coincidiu com uma maior frequência da atuação do *El Niño*. Embora esses anos estejam fora do cone de influência analisado, pôde-se perceber que a dinâmica das chuvas na região do Eixo Norte da Transposição do Rio São Francisco está atualmente em fase com o *El Niño*.

As análises dos autores Kayano; Andreoli; Souza (2011) indicaram que apenas 36% das vezes uma previsão baseada no ENSO para o clima NEB seria correta. Essa porcentagem relativamente baixa ocorre principalmente porque as variações interanuais do clima NEB estão mais intimamente ligadas aos modos de variabilidade SST do Atlântico Sul do que ao modo de variabilidade do Pacífico tropical e que os padrões de anomalia SST de fevereiro a abril no Atlântico tropical para casos secos e úmidos que não estão diretamente relacionados ao ENSO podem ser encontrados meses antes da estação chuvosa do NEB. Os autores alertam que essas análises são particularmente fortes no Atlântico Sul tropical onde as variações de SST nos meses anteriores à estação das chuvas deveriam ser cuidadosamente monitoradas nas atividades de diagnóstico.

De acordo com estudos elaborados por (ÁVILA; BRITO, 2015) de 1925 a 1946, o clima do Nordeste brasileiro encontrava-se sob os efeitos de uma (ODP) positiva, com *El Niños* mais fortes e frequentes. De 1947 a 1976, no entanto, a ODP passou a ser negativa, resultando em aumento de chuvas. Já nas décadas de 1980/90, a oscilação tornou-se novamente positiva, o que coincidiu com a ocorrência dos *El Niños* mais fortes do século (em 1983, 1997 e 1998).

A partir de 1999, novamente a ODP passou à fase negativa e a influência do *La Niña* foi maior do que o do *El Niño*, devendo permanecer assim até 2025 (MOLION, 2005), coincidindo com a ocorrência de intensos períodos de chuva no Nordeste, nos anos 2000, 2001, 2006, 2008 e 2009, enquanto nos outros anos as secas foram mais amenas. Dessa forma, segundo Silva et al. (2011), no Submédio São Francisco, a associação das mesmas fases de *El Niño* Oscilação Sul e Oscilação Decadal do Pacífico tendem a promover diminuição nas chuvas na fase quente dos dois eventos, e aumento nas chuvas, quando na fase fria dos dois eventos.

4.3.3.9 Adequação da análise da dinâmica da precipitação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

Segundo o Ministério das relações exteriores (2020), dentre os elementos orientadores da posição brasileira sobre a agenda de desenvolvimento pós-2015 e a adequação aos ODS estão: a) a promoção do tratamento transversal da mudança do clima, por meio da inclusão em objetivos e metas correlatos; b) ênfase no combate à mudança do clima como algo essencial para a promoção do desenvolvimento sustentável e para a erradicação da pobreza; c) ressaltar a centralidade dos princípios e provisões da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), incluindo o princípio das responsabilidades comuns, porém diferenciadas; d) Promover a implantação de energia limpa, incluindo as tecnologias de baixas ou zero emissões; e) Apoiar a transferência de tecnologia para processos de soluções de baixo carbono em infraestrutura e na indústria; **f)** reforçar a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados à mudança do clima e às catástrofes naturais, ampliando a capacidade de resposta aos desafios e às oportunidades associadas à mudança do clima; **g)** promover políticas públicas que permitam a adaptação e mitiguem os impactos das mudanças climáticas, com ênfase nas comunidades mais vulneráveis; **h)** incentivar o desenvolvimento de sistemas de monitoramento, prevenção e alerta de risco de desastres naturais; i) fomentar iniciativas de educação ambiental para a conscientização sobre mudança do clima e sobre prevenção e preparação para desastres naturais decorrentes de seus efeitos adversos, bem como a difusão de tecnologias sociais de adaptação às mudanças climáticas.

Desse modo, o presente trabalho apresenta contribuições importantes em relação aos elementos orientadores f, g e h apresentados, pois visa fomentar, a partir do resultado das análises, um arcabouço teórico-metodológico útil para estudos climáticos no semiárido que se utilizem de modelagem pluviométrica, análise de variabilidade e tendência da precipitação, bem como as relações da precipitação com fenômenos globais de larga escala. Esses estudos são imprescindíveis pois precedem a geração de cenários de previsões climáticas, sendo capazes de prestar auxílio no gerenciamento dos recursos hídricos em bacias hidrográficas, tornando-se possível propor alternativas com alguns anos, ou até mesmo algumas décadas de antecedência, visando a adaptação aos riscos relacionados à mudança do clima, auxiliando no desenvolvimento de melhores sistemas de monitoramento, prevenção e alerta de risco de desastres naturais causados pela seca na região do Submédio São Francisco e, por fim, contribuindo para o planejamento ambiental e tomada de decisão em políticas públicas que

possam prever e mitigar desastres naturais relacionados às secas na região pesquisada, que possui uma população altamente vulnerável a impactos ambientais relacionados ao clima.

4.3.4 Conclusão

- As análises padronizadas de precipitação, *wavelet* e coerência *wavelet* foram aplicadas para examinar a variabilidade temporal da precipitação mensal e anual e para determinar o efeito das flutuações climáticas na variabilidade da precipitação. Os resultados demonstraram que os mecanismos de larga escala que mais atuam na precipitação da região semiárida possuem maior relação com a TSM no Atlântico do que a fenômenos ocorridos no Oceano Pacífico.
- O *El Niño* apresentou forte coerência com a precipitação nas estações analisadas, indicando que o fenômeno está relacionado à ocorrência de chuvas na região, não apenas às secas, no entanto, o *El Niño* demonstra um atraso de fase em relação à precipitação. Nos últimos anos o *El Niño* tem apresentado maior frequência, bem como os eventos de seca nas bacias analisadas, estando na mesma fase, o que demonstra que na última década a dinâmica das chuvas tem sido fortemente influenciada pelo *El Niño*.
- Índices como o SAODI e TSA, pouco utilizados no Brasil, apresentaram forte coerência com a precipitação, estando na mesma fase dos dados pluviométricos das séries analisadas, o que confirma que os dados medidos no Golfo da Guiné e na costa da África Oeste e Central possuem relação com a precipitação no semiárido, ao passo que o único índice no Atlântico Norte que respondeu bem à análise foi o NAO, que apresentava apenas uma pequena defasagem em relação à precipitação.
- O estudo, realizado através de um método robusto de análise de séries temporais altamente complexas, pode auxiliar na prevenção dos impactos relacionados à variabilidade das chuvas no semiárido do Submédio São Francisco por evidenciar as relações entre as variabilidades locais dos dados de precipitação pluviométrica e os mecanismos atmosféricos regionais e de larga escala, revelando as relações entre os dados, se essas relações são contínuas no tempo ou transitórias, e em quais frequências. Essas descobertas têm implicações, tanto para a validade de estudos anteriores, que atribuem certas tendências climáticas de longo prazo a ciclos climáticos internos de baixa frequência, quanto para a perspectiva de previsibilidade climática decadal.

➤ Sugere-se que as mudanças nos padrões climáticos da região em estudo podem estar relacionadas ao aquecimento global. Por esse aspecto, este trabalho se insere no objetivo número 13 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que prevê o combate às mudanças climáticas e seus impactos. E, nesse sentido, o trabalho produz resultados que, no futuro, podem ser utilizados em estudos sobre a dinâmica climática em ambientes semiáridos, previsão dos impactos das mudanças climáticas no Eixo Norte do Projeto de Transposição do Rio São Francisco e para o planejamento ambiental e tomada de decisão em políticas públicas que possam prever e mitigar desastres naturais, como as secas, na região abarcada pela pesquisa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 ANÁLISE DE TENDÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO

O estudo demonstrou variação nos padrões de precipitação pluviométrica, proveniente da atuação de diferentes sistemas meteorológicos na região, o que caracteriza as Bacias pela grande heterogeneidade na distribuição das chuvas em função dos fatores climáticos, tais como: a continentalidade, massas de ar e características topográficas. Dessa forma, os resultados sugerem uma tendência de diminuição nos padrões pluviométricos em todos os postos analisados.

O volume e a ocorrência de chuvas também apresentaram diminuição nos postos analisados, principalmente na década de 1970 e meados da década de 1980, coincidindo com o final da atuação negativa da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e início da ODP positiva. A frequência de precipitações abaixo da média histórica tem se intensificado nas Bacias do Eixo Norte da Transposição do Rio São Francisco, principalmente após a década de 1990, o que é um indicativo da tendência de aumento dos eventos de seca na região, que coincide com o aumento da frequência do *El Niño* e da influência das anomalias de TSM sobre a variabilidade da precipitação nas Bacias receptoras do Projeto de Transposição do Rio São Francisco.

As séries mensais, trimestrais e anuais da precipitação, mostraram que a ocorrência de dias com chuvas acima de 1, 10 e 20mm tiveram diminuição na maioria dos postos analisados, bem como diminuição também no volume de precipitação acima de 5, 10, 20 e 30mm, na maioria das estações das Bacias analisadas.

As bacias apresentaram alta variabilidade da precipitação, que é uma das características marcantes no semiárido do Nordeste. Essa variabilidade mostrou-se acentuada nas Bacias estudadas em função de fatores climáticos, como as características do relevo. Na maioria das estações com altitudes abaixo de 500m, como as de Floresta, Salgueiro, Parnamirim e Santa Maria da Boa Vista, a precipitação foi menor do que 600mm, excetuando-se Serra Talhada, que está mais ao Norte da Bacia do Pajeú, onde os índices de precipitação são maiores e o município de Ibimirim. As estações à Leste do Pajeú apresentaram tendência de diminuição da precipitação, mas das 7 estações analisadas na Bacia, apenas 3 estações mostraram tendência de mudança climática. A Bacia do Rio Brígida foi a que mais apresentou tendência de diminuição da precipitação em todos os postos analisados, e mesmo nas estações de Exu e Araripina, que ficam acima de 500m de altitude e estão ao Norte da Bacia, a tendência de diminuição da precipitação foi significativa.

Foi observado que, embora a maioria das bacias apresentassem tendência significativa de diminuição da precipitação, nem sempre o trimestre mais chuvoso, que nas Bacias analisadas é o trimestre de fevereiro-março-abril, teve uma tendência de diminuição significativa, o que pode estar relacionado com uma maior distribuição da precipitação ao longo do ano. Dessa forma, seria interessante em trabalhos futuros na região semiárida, discutir a articulação de escalas na análise das precipitações no semiárido, de modo que não fossem analisados apenas a escala interanual da precipitação, pois eles podem mascarar outros processos inerentes à variabilidade intra-anual.

Além disso o estudo demonstrou que para extremos de precipitação superiores a 10mm ocorreu uma tendência significativa de diminuição da frequência desses episódios nas Bacias estudadas, demonstrando que apesar de poder estar havendo uma melhor distribuição das chuvas ao longo do ano, os dados de precipitação interanual revelaram uma tendência estatisticamente significante de diminuição das chuvas.

O teste estatístico de Mann-Kendall permitiu detectar e localizar de forma aproximada o ponto inicial das tendências, que na maioria dos postos analisados apontou as décadas de 1970 e 1980 como ponto inicial da mudança, o que coincidiu com o final da atuação negativa da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e início da ODP positiva, que pode ser um indicativo da tendência de aumento dos eventos de seca na região. Nas estações pluviométricas estudadas foi observado que os episódios de seca têm aumentado nas últimas duas décadas nas Bacias contempladas com o Projeto de Transposição do Rio São Francisco, no Submédio São Francisco em Pernambuco, o que pode estar associado às anomalias de TSM sobre a precipitação, e a fenômenos de escala global como o *El Niño*.

Desse modo, este trabalho foi útil por caracterizar e identificar tendências nos padrões de precipitação em Bacias de zonas semiáridas do Submédio São Francisco, que possuem uma grande importância estratégica regional por se tratar de Bacias contempladas pelo Projeto de Transposição do Rio São Francisco, e que apresentam uma alta variabilidade climática, e portanto, uma grande susceptibilidade em relação às mudanças climáticas, o que pode acarretar no futuro problemas em relação à disponibilidade hídrica.

Por essa razão, esse estudo lançou luz sobre a dinâmica da precipitação nas Bacias estudadas e as problemáticas inerentes à heterogeneidade do regime pluvial e a tendência às mudanças climáticas nas Bacias do Submédio São Francisco. O estudo é imprescindível em razão da necessidade de entendimento da dinâmica hidrológica regional, o que possibilitará no futuro o desenvolvimento de estratégias que levem em consideração a disponibilidade hídrica das Bacias estudadas, permitindo o desenvolvimento de estratégias de planejamento ambiental

e monitoramento climático em bacias hidrográficas, o que está diretamente em consonância com as boas práticas de conservação ambiental.

5.2 ANÁLISE DA DIFERENÇA ENTRE NORMALIZAÇÕES NA ANÁLISE DAS WAVELETS

➤ O trabalho demonstrou que diferentes normalizações aplicadas nos dados de precipitação podem realçar aspectos interessantes das séries de precipitação. Na normalização utilizada por Cazelles o modelo enfatiza os fenômenos sazonais por se tratar de fenômenos fortemente perceptíveis. Desse modo, o modelo da CW com a normalização de Cazelles pode ser utilizado para um conjunto de dados que apresenta maior EWP nas escalas de tempo intrasazonal, sazonal, semianual, anual e até bianual, por suavizar os extremos. A normalização de Cazelles mostra-se melhor para análise de frequências multianuais de séries que possuem uma pequena variância, por essa razão esse método se mostrou melhor para análise das manchas solares por possuir variâncias bastante regulares, ao contrário do volume de chuvas no semiárido, que se caracteriza por possuir alta variabilidade interanual e intraanual, contando com séries com variâncias e médias que mudam bastante ao longo do tempo.

Na análise com a normalização de Kayano os resultados são refinados, já que eles são normalizados mês a mês, mostrando os detalhes na escala temporal interdecadal e destacando os extremos da precipitação em relação ao grid temporal. Portanto ao analisar a relação da precipitação com índices como *El Niño*, TSA, ODP, manchas solares etc., indica-se a normalização proposta por Kayano.

Na comparação dos dois diferentes métodos de normalização de dados pluviométricos para escolha da melhor abordagem para identificação de correlações entre os dados pluviométricos das sub-bacias do Pajeú, Terra Nova e Brígida, no Submédio São Francisco em Pernambuco, com os principais moduladores das condicionantes atmosféricas na região. Para tal, foi comparada a normalização proposta por Cazelles, que consiste na normalização feita com base na razão entre o desvio padrão e a média global da série, com a metodologia de análise de *wavelets* utilizada por Kayano, onde a normalização é feita com base no desvio padrão e média de cada mês.

Os resultados demonstraram que o método de normalização proposto por Cazelles apresenta melhor resultado quando a correlação se dá entre fenômenos que possuem relação em alta frequência, nas escalas de tempo intrasazonal, sazonal, semianual, anual, bianual e até 4 anos. Já o método proposto por Kayano apresentou melhor resposta quando a relação que se dá

com fenômenos de baixa frequência, por serem normalizados mês a mês, salientando a escala interdecadal e destacando os extremos da precipitação em relação ao grid temporal. O estudo foi importante por indicar um melhor método e análise para avaliação de dados de precipitação no Submédio São Francisco e assim proporcionar um melhor diagnóstico e previsibilidade.

5.3 ANÁLISE DAS WAVELETS CONTÍNUAS E DE COERÊNCIA

➤ As análises padronizadas de precipitação, *wavelet* contínua e coerência *wavelet* foram aplicadas para examinar a variabilidade temporal da precipitação mensal e anual e para determinar o efeito das flutuações climáticas na variabilidade da precipitação. As análises de coerência de *wavelet*, foi utilizada para quantificar as dependências entre duas séries temporais, entre os dados das estações pluviométricas estudadas e as principais anomalias climáticas atuantes sobre o semiárido.

Desse modo, a análise da Wavelet pôde auxiliar na interpretação dos dados de séries temporais não estacionárias em várias escalas e revelar recursos que, de outra forma, não poderiam ser identificados. Os resultados demonstraram que os mecanismos de larga escala que mais atuam na precipitação da região semiárida possuem maior relação com a TSM no Atlântico do que a fenômenos ocorridos no Oceano Pacífico.

O *El Niño* apresentou forte coerência com a precipitação nas estações analisadas, indicando que o fenômeno está relacionado à ocorrência de chuvas na região, não apenas às secas, no entanto, o *El Niño* demonstra um atraso de fase em relação à precipitação. Nos últimos anos o *El Niño* tem apresentado maior frequência, bem como os eventos de seca nas bacias analisadas, estando na mesma fase, o que demonstra que na última década a dinâmica das chuvas tem sido fortemente influenciada pelo *El Niño*.

Índices como o SAODI e TSA, pouco utilizados no Brasil, apresentaram forte coerência com a precipitação, estando na mesma fase dos dados pluviométricos das séries analisadas, o que confirma que os dados medidos no Golfo da Guiné e na costa da África Oeste e Central possuem relação com a precipitação no semiárido, ao passo que o único índice no Atlântico Norte que respondeu bem à análise foi o NAO, que apresentava apenas uma pequena defasagem em relação à precipitação.

O estudo, realizado através de um método robusto de análise de séries temporais altamente complexas, pode auxiliar na prevenção dos impactos relacionados à variabilidade das chuvas no semiárido do Submédio São Francisco por evidenciar as relações entre as variabilidades locais dos dados de precipitação pluviométrica e os mecanismos atmosféricos

regionais e de larga escala, revelando as relações entre os dados, se essas relações são contínuas no tempo ou transitórias, e em quais frequências. Essas descobertas têm implicações, tanto para a validade de estudos anteriores, que atribuem certas tendências climáticas de longo prazo a ciclos climáticos internos de baixa frequência, quanto para a perspectiva de previsibilidade climática decadal.

Sugere-se que as mudanças nos padrões climáticos da região em estudo podem estar relacionadas ao aquecimento global. Por esse aspecto, este trabalho se insere no objetivo número 13 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que prevê o combate às mudanças climáticas e seus impactos. E, nesse sentido, o trabalho produz resultados que, no futuro, podem ser utilizados em estudos sobre a dinâmica climática em ambientes semiáridos, previsão dos impactos das mudanças climáticas no Eixo Norte do Projeto de Transposição do Rio São Francisco e para o planejamento ambiental e tomada de decisão em políticas públicas que possam prever e mitigar desastres naturais, como as secas, na região abarcada pela pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABBOTT, B. W. BISHOP K, ZARNETSKE J. P. *et al.* A water cycle for the Anthropocene. **Hydrological Processes**, 2019.
- ABE, C. A. LOBO, F.D.L.; DIBIKE, Y.B.; COSTA, M.P.D.F.; DOS SANTOS, V.; NOVO, E.M.L.M. Modelling the effects of historical and future land cover changes on the hydrology of an Amazonian basin. **Water (Switzerland)**, 2018.
- ALAIFARI, R. DAUBECHIES, I., GROHS, P. *et al.* Stable Phase Retrieval in Infinite Dimensions. **Foundations of Computational Mathematics**, 2018.
- ALEXANDER, M. A.; HALIMEDA KILBOURNE, K.; NYE, J. A. Climate variability during warm and cold phases of the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) 1871-2008. **Journal of Marine Systems**, 2014.
- ALIZADEH, F.; ROUSHANGAR, K.; ADAMOWSKI, J. Investigating monthly precipitation variability using a multiscale approach based on ensemble empirical mode decomposition. **Paddy and Water Environment**, 2019.
- ALMEIDA, A. R. *et al.* ICA feature extraction for the location and classification of faults in high-voltage transmission lines. **Electric Power Systems Research**. [S.l: s.n.], 2017
- ANDREOLI, R. V. *et al.* A influência da Temperatura da Superfície do Mar dos oceanos Pacífico e Atlântico na variabilidade de precipitações em Fortaleza. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2004.
- ANH, N. T. N. *et al.* **Wavelet-Artificial Neural Network Model for Water Level Forecasting**. 2018, [S.l: s.n.], 2018.
- ANTOINE, J.-P. *et al.* Beyond wavelets. **Two-Dimensional Wavelets and their Relatives**. [S.l: s.n.], 2009. .
- ARNBJERG-NIELSEN, K. *et al.* Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage systems: a review. **Water Science and Technology**. [S.l: s.n.], 2013
- ASSIS, J. M. O. DE *et al.* Influência dos oceanos Pacífico e Atlântico tropicais sobre os índices climáticos da precipitação na bacia do Submédio São Francisco. **Revista Brasileira de Climatologia**, 2018.
- ASSIS, J. M. O. DE; SOUZA, W. M. DE; SOBRAL, M. DO C. Análise climática da precipitação no submédio da bacia do Rio São Francisco com base no índice de anomalia de chuva. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, 2015.
- ATKINSON, K.; HAN, W. **Theoretical numerical analysis: A functional analysis framework**. [S.l: s.n.], 2009.
- ÁVILA, P. L. R.; BRITO, J. I. B. DE. Relação entre a Oscilação Decadal do Pacífico e a variabilidade de precipitação de Campina Grande, PB. **Ciência e Natura**, 2015.
- BAE, D. H.; JUNG, I. W.; LETTENMAIER, D. P. Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju Basin, Korea. **Journal of Hydrology**, 2011.
- BARNARD, P. L. *et al.* Extreme oceanographic forcing and coastal response due to the 2015-2016 El Niño. **Nature Communications**, 2017.
- BARROS, V. *et al.* IPCC, 2012 - Glossary of Terms. **Managing the Risks of Extreme Events and**

Disasters to Advance Climate Change Adaptation, 2012.

BARTON, A. D. *et al.* **Anthropogenic climate change drives shift and shuffle in North Atlantic phytoplankton communities**. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016.

BARTUZI, E. *et al.* **Unconstrained biometric recognition based on thermal hand images**. 2018, [S.l: s.n.], 2018.

BERNARDES, E.; DOMINGUES, M. O.; MENDES, O. **Transformada wavelet contínua bidimensional: explorando a variabilidade direcional e em escala para a análise de sinais espaciais**. 2016, [S.l: s.n.], 2016.

BEZERRA, A. C. N.; CAVALCANTI, E. P. Energia estática sobre o norte e nordeste do Brasil relacionada com a temperatura da superfície do mar. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2008.

BIGG, C. Evident atoms: visuality in Jean Perrin's Brownian motion research. **Studies in History and Philosophy of Science Part A**, 2008.

BOSILOVICH, M. G.; SCHUBERT, S. D. Water vapor tracers as diagnostics of the regional hydrologic cycle. **Journal of Hydrometeorology**, 2002.

BRADLEY, R. S. Climate and Climatic Variation. **Paleoclimatology**. [S.l: s.n.], 2015.

BURRUS, C. S.; GOPINATH, R. A.; GUO, H. **Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms: A Primer**. [S.l: s.n.], 1998.

CABALLERO-GILL, R. P.; HERBERT, T. D.; DOWSETT, H. J. 100-kyr Paced Climate Change in the Pliocene Warm Period, Southwest Pacific. **Paleoceanography and Paleoclimatology**, 2019.

CAI, W. *et al.* Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. **Nature Climate Change**, 2014.

CARAIANI, P. Stylized facts of business cycles in a transition economy in time and frequency. **Economic Modelling**, 2012.

CAZELLES, B. Using wavelets to revisit the role of local and global climatic forcing on the dengue epidemics. **International Journal of Infectious Diseases**, 2018.

CAZELLES, BERNARD *et al.* Nonstationary influence of El Niño on the synchronous dengue epidemics in Thailand. **PLoS Medicine**, 2005.

CAZELLES, BERNARD *et al.* *Time-dependent spectral analysis of epidemiological time-series with wavelets*. **Journal of the Royal Society Interface**. [S.l: s.n.], 2007

CAZELLES, BERNARD; CAZELLES, K.; CHAVEZ, M. Wavelet analysis in ecology and epidemiology: Impact of statistical tests. **Journal of the Royal Society Interface**, 2014.

CERQUEIRA, K. F.; DOS SANTOS, F. D. A.; AQUINO, C. M. S. Análise das precipitações pluviométricas em trecho do médio curso da Bacia Hidrográfica do rio Poti (Piauí), a partir do Índice de Anomalia de Chuva (IAC). **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, 2019.

CHANG, N. BIN *et al.* The impact of global unknown teleconnection patterns on terrestrial precipitation across North and Central America. **Atmospheric Research**, 2017.

- CHANG, P.; JI, L.; LI, H. A decadal climate variation in the tropical Atlantic Ocean from thermodynamic air-sea interactions. **Nature**, 1997.
- CHANG, X. *et al.* Characterizing effects of monsoons and climate teleconnections on precipitation in China using wavelet coherence and global coherence. **Climate Dynamics**, 2019.
- CHIANG, J. C. H.; VIMONT, D. J. Analogous Pacific and Atlantic meridional modes of tropical atmosphere-ocean variability. **Journal of Climate**, 2004.
- CHIKHALIKAR, A. M.; DHARWADKAR, N. V. Enhanced Brain Tumor Detection using Segmentation based on Discrete Wavelet Transform. **International Journal of Research in Advent Technology**, 2019.
- CHOI, J.; CHOI, C.; KIM, J. Impacts of climate change under ipcc rcp scenarios on streamflow and water quality in the youngsan basin, south korea. **Disaster Advances**, 2013.
- CHOPRA, S.; MARFURT, K. J. **Choice of mother wavelets in CWT spectral decomposition**. 2015, [S.l: s.n.], 2015.
- CLARK, M. P. *et al.* Improving the representation of hydrologic processes in Earth System Models. **Water Resources Research**, 2015.
- COHEN, M. X. A better way to define and describe Morlet wavelets for time-frequency analysis. **NeuroImage**, 2019.
- CORTES OSORIO, J.; CANO GARZÓN, H.; CHAVES OSORIO, J. Del Análisis De Fourier A Las Wavelets - Transformada Continua Wavelet (Cwt). **Scientia et Technica**, 2007.
- COUMOU, D.; RAHMSTORF, S. A decade of weather extremes. **Nature Climate Change**. [S.l: s.n.], 2012.
- CROWLEY, T. J. Causes of climate change over the past 1000 years. **Science**, 2000.
- DA SILVA, D. F. Aplicação de Análises de Ondas para Detecção de Ciclos e Extremos Pluviométricos no Leste do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2017.
- DAUBECHIES, I. Wavelets - Algorithms and Applications - Meyer, Y. **Science**, 1993.
- DAUBECHIES, INGRID. Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets II. Variations on a Theme. **SIAM Journal on Mathematical Analysis**, 1993.
- DAUBECHIES, INGRID. **Ten Lectures on Wavelets**. [S.l: s.n.], 1992.
- DAUBECHIES, INGRID; MAES, S. A Nonlinear Squeezing of the Continuous Wavelet Transform Based on Auditory Nerve Models. **WAVELETS in Medicine and Biology**. [S.l: s.n.], 2019.
- DAUBECHLES, I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets. **Fundamental Papers in Wavelet Theory**. [S.l: s.n.], 2009.
- DE ALENCAR, D. B. *et al.* Different Models for Forecasting Wind Power Generation: Case Study. **Energies**, 2017.
- DONAT, M. G. *et al.* More extreme precipitation in the world's dry and wet regions. **Nature Climate Change**, 2016.

- DONOHUE, A. *et al.* The interannual variability of tropical precipitation and interhemispheric energy transport. **Journal of Climate**, 2014.
- DREMIN, I. M.; IVANOV, O. V.; NECHITAİLO, V. A. Wavelets and their applications. **Uspekhi Fizicheskikh Nauk**, 2001.
- EINSTEIN, A. **Investigations on the Theory of the Brownian Movement**. Translated By. Dover, New York, 1956.
- ELSANABARY, M. H.; GAN, T. Y.; MWALE, D. Application of wavelet empirical orthogonal function analysis to investigate the nonstationary character of Ethiopian rainfall and its teleconnection to nonstationary global sea surface temperature variations for 1900-1998. **International Journal of Climatology**, 2014.
- EMANUEL, K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. **Nature**, 2005.
- ENFIELD, D. B. *et al.* How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures? **Journal of Geophysical Research: Oceans**, 1999.
- ESPINOZA, J. C. *et al.* The Major Floods in the Amazonas River and Tributaries (Western Amazon Basin) during the 1970-2012 Period: A Focus on the 2012 Flood. **Journal of Hydrometeorology**, 2013.
- FISCHER, E. M.; KNUTTI, R. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. **Nature Climate Change**, 2015.
- FRÖLICHER, T. L.; FISCHER, E. M.; GRUBER, N. Marine heatwaves under global warming. **Nature**. [S.l: s.n.], 2018.
- FUSO NERINI, F. *et al.* Connecting climate action with other Sustainable Development Goals. **Nature Sustainability**. [S.l: s.n.], 2019.
- GAO, R. X. *et al.* **From Fourier Transform to Wavelet Transform: A Historical Perspective**. *Wavelets*. [S.l: s.n.], 2011.
- GARGOUR, C. *et al.* A short introduction to wavelets and their applications. **IEEE Circuits and Systems Magazine**, 2009.
- GAUGHAN, A. E. *et al.* Inter- and Intra-annual precipitation variability and associated relationships to ENSO and the IOD in southern Africa. **International Journal of Climatology**, 2016.
- GHILAIFAN, A. *et al.* Two-dimensional discrete wavelets transform for optical phase extraction: application on speckle correlation fringes. **Optical Engineering**, 2016.
- GIORGI, F. *et al.* Higher hydroclimatic intensity with global warming. **Journal of Climate**, 2011.
- GIRON-SIERRA, J. M. **Digital Signal Processing with Matlab Examples**, Volume 3. [S.l: s.n.], 2017.
- GOLDSTEIN, L. J.; SUDING, K. N. Intra-annual rainfall regime shifts competitive interactions between coastal sage scrub and invasive grasses. **Ecology**, 2014.
- GOMES, J.; VELHO, L. **From Fourier Analysis to Wavelets**. [S.l: s.n.], 2015.
- GONZÁLEZ-CONCEPCIÓN, C.; GIL-FARIÑA, M. C.; PESTANO-GABINO, C. Wavelet power

spectrum and cross-coherency of Spanish economic variables. **Empirical Economics**, 2018.

GOODMAN, R. W. Discrete Wavelet Transforms. **Discrete Fourier and Wavelet Transforms**. [S.l: s.n.], 2016.

GOSWAMI, J. C.; CHAN, A. K. **Fundamentals of Wavelets: Theory, Algorithms, and Applications: Second Edition**. [S.l: s.n.], 2010.

GRAPS, A. An Introduction to Wavelets. **IEEE Computational Science and Engineering**, 1995.

GROSSMANN, A.; MORLET, J. Decomposmon of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. **Fundamental Papers in Wavelet Theory**. [S.l: s.n.], 2009.

GUILLEN, D. *et al.* Partial discharges location in transformer winding using wavelets and Kullback-Leibler divergence. **Electric Power Systems Research**, 2016.

HAAR, A. Zur Theorie der orthogonalen Funktionensysteme (On the theory of orthogonal function systems). **Math. Ann.**, 1910.

HAAR, D. TER. Obituary: Hendrik Casimir 1909–2000. **Physics World**, 2000.

HAN, Y.; LI, J.; TAN, C. Besov spaces via wavelets on metric spaces endowed with doubling measure, singular integral, and the T1 type theorem. **Mathematical Methods in the Applied Sciences**, 2017.

HANSEN, G.; STONE, D. Assessing the observed impact of anthropogenic climate change. **Nature Climate Change**, 2016.

HARIHARAN, G.; KANNAN, K. Review of wavelet methods for the solution of reaction-diffusion problems in science and engineering. **Applied Mathematical Modelling**. [S.l: s.n.], 2014.

HENSON, S. A. *et al.* Rapid emergence of climate change in environmental drivers of marine ecosystems. **Nature Communications**, 2017.

HERRERA-ALCÁNTARA, O.; GONZÁLEZ-MENDOZA, M. Correction to: Inverse formulas of parameterized orthogonal wavelets **Computing**. [S.l: s.n.], 2019.

HOLMGREN, M. *et al.* Effects of interannual climate variability on tropical tree cover. **Nature Climate Change**, 2013.

HUGHES, J. R. *et al.* Electrophysiological Studies on Uremic Patients - Comparison of Peritoneal Dialysis and Hemodialysis. **Clinical EEG and Neuroscience**, 1980.

HURRELL, J. W. Decadal trends in the North Atlantic oscillation: Regional temperatures and precipitation. **Science**, 1995.

HUSSAIN, S. J. Epileptic Seizure Detection Using Wavelets and EMD. 2018, [S.l: s.n.], 2018.

ICSU. Sustainable Development Goals and targets. **International council for science**, 2015.

IPCC. **Climate Change 2007 Synthesis Report**. [S.l: s.n.], 2007.

IPCC. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers and Technical Summary**. [S.l: s.n.], 2014a.

IPCC. **IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2014**. [S.l: s.n.], 2014b.

JATOBÁ, L.; SILVA, A. F.; GALVÍNCIO, J. D. Climate dynamics of the semiarid region in Petrolina - PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 2017.

JAWERTH, B.; SWELDENS, W. Overview of wavelet based multiresolution analyses. **SIAM Review**, 1994.

JESCHKE, S. *et al.* Water surface wavelets. **ACM Transactions on Graphics**, 2018.

JIANG, R. *et al.* Assessment of extreme precipitation events and their teleconnections to El Niño Southern Oscillation, a case study in the Wei River Basin of China. **Atmospheric Research**, 2019.

JIANG, R. *et al.* Spatiotemporal variability of Alberta's seasonal precipitation, their teleconnection with large-scale climate anomalies and sea surface temperature. **International Journal of Climatology**, 2014.

JONES, J. M. *et al.* Assessing recent trends in high-latitude Southern Hemisphere surface climate. **Nature Climate Change**. [S.l: s.n.], 2016.

JONES, P. D.; JONSSON, T.; WHEELER, D. Extension to the North Atlantic oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland. **International Journal of Climatology**, 1997.

KAISER, G.; HUDGINS, L. H. A Friendly Guide to Wavelets. **Physics Today**, 1995.

KALLWEIT, R. S.; WOOD, L. C. The limits of resolution of zero-phase wavelets. **Geophysics**, 1982.

KARCZ, I.; KERSEY, D. Experimental study of free-surface flow instability and bedforms in shallow flows. **Sedimentary Geology**, 1980.

KARL, T. R.; TRENBERTH, K. E. *Modern Global Climate Change*. **Science**. [S.l: s.n.], 2003.

KARTHIGA, R.; NARASIMHAN, K. **Automated Diagnosis of Breast Cancer Using Wavelet Based Entropy Features**. 2018, [S.l: s.n.], 2018.

KAYANO, MARY T.; ANDREOLI, R. V. Relations of South American summer rainfall interannual variations with the Pacific Decadal Oscillation. **International Journal of Climatology**, 2007.

KAYANO, MARY T.; ANDREOLI, R. V. Relationships between rainfall anomalies over northeastern Brazil and the El Niño-Southern Oscillation. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, 2006.

KAYANO, MARY TOSHIE; ANDREOLI, R. V.; SOUZA, R. A. F. DE. El Niño–Southern Oscillation related teleconnections over South America under distinct Atlantic Multidecadal Oscillation and Pacific Interdecadal Oscillation backgrounds: La Niña. **International Journal of Climatology**, 2019.

KAYANO, MARY TOSHIE; CAPISTRANO, V. B. How the Atlantic multidecadal oscillation (AMO) modifies the ENSO influence on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, 2014.

KHEDUN, C. P. *et al.* A copula-based precipitation forecasting model: Investigating the interdecadal modulation of ENSO's impacts on monthly precipitation. **Water Resources Research**, 2014.

KIM, J. *et al.* Impacts of changes in climate and land use/land cover under IPCC RCP scenarios on streamflow in the Hoeya River Basin, Korea. **Science of the Total Environment**, 2013.

- KLAPPER, J. Discrete Fourier Analysis and Wavelets. **Journal of Applied Statistics**, 2010.
- KNAPP, A. K. *et al.* Consequences of More Extreme Precipitation Regimes for Terrestrial Ecosystems. **BioScience**, 2008.
- KNUTSON, T. R.; TULEYA, R. E.; KURIHARA, Y. Simulated increase of hurricane intensities in a CO₂-warmed climate. **Science**, 1998.
- KOTTEGODA, N. T.; HORDER, M. A. Daily flow model based on rainfall occurrences using pulses and a transfer function. *Journal of Hydrology*, 1980.
- KOUDAHE, K. *et al.* Trend Analysis in Standardized Precipitation Index and Standardized Anomaly Index in the Context of Climate Change in Southern Togo. **Atmospheric and Climate Sciences**, 2017.
- KÜHN-KAUFFELDT, M. *et al.* **Electron temperature and density measurement of tungsten inert gas arcs with Ar-He shielding gas mixture**. 2013, [S.l: s.n.], 2013.
- KUMP, L. R. Paleoclimates: Understanding climate change past and present. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, 2011.
- KURTHS, J. *et al.* Unravelling the spatial diversity of Indian precipitation teleconnections via a non-linear multi-scale approach. **Nonlinear Processes in Geophysics**, 2019.
- LAO, J.; NIE, H.; JIANG, Y. Revisiting the investor sentiment–stock returns relationship: A multi-scale perspective using wavelets. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, 2018.
- LELIS, T. A. *et al.* Impactos causados pelas mudanças climáticas nos processos erosivos de uma bacia hidrográfica: Simulação de cenários. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, 2011.
- LEPIK, Ü.; HEIN, H. Haar wavelets. **Mathematical Engineering**. [S.l: s.n.], 2014.
- LI, W.; MONTI, A.; PONCI, F. Fault detection and classification in medium voltage dc shipboard power systems with wavelets and artificial neural networks. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 2014.
- LILLY, J. M.; OLHEDE, S. C. Generalized morse wavelets as a superfamily of analytic wavelets. **IEEE Transactions on Signal Processing**, 2012.
- LILLY, J. M.; OLHEDE, S. C. Higher-order properties of analytic wavelets. **IEEE Transactions on Signal Processing**, 2009.
- LIU, C.-L. A Tutorial of the Wavelet Transform. **History**, 2010.
- LIU, F. *et al.* Impacts of ENSO on multi-scale variations in sediment discharge from the Pearl River to the South China Sea. **Geomorphology**, 2017.
- LU, R.; DONG, B.; DING, H. Impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the Asian summer monsoon. **Geophysical Research Letters**, 2006.
- MADAKUMBURA, G. D. *et al.* Event-to-event intensification of the hydrologic cycle from 1.5 °C to a 2 °C warmer world. **Scientific Reports**, 2019.

- MADSEN, H. *et al.* Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. **Journal of Hydrology**, 2014.
- MALLAT, S. Multiresolution approximation and wavelets. **Trans Am Math Soc**, 1989.
- MALLAT, STEPHANE. **A Wavelet Tour of Signal Processing**. [S.l: s.n.], 2009.
- MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Revista Climanálise**, 2016.
- MECHLER, R.; BOUWER, L. M. Understanding trends and projections of disaster losses and climate change: is vulnerability the missing link? **Climatic Change**, 2015.
- MÉLICE, J. L.; SERVAIN, J. The tropical Atlantic meridional SST gradient index and its relationships with the SOI, NAO and Southern Ocean. **Climate Dynamics**, 2003.
- MOHR, S. *et al.* Daubechies wavelets for linear scaling density functional theory. **Journal of Chemical Physics**, 2014.
- MOLION, L. C. B. Considerações sobre o aquecimento global antropogênico. **Informe Agropecuário (Belo Horizonte)**, 2008.
- NASON, G. P.; SILVERMAN, B. W. The Discrete Wavelet Transform In S. **Journal of Computational and Graphical Statistics**, 1994.
- NNAMCHI, H. C.; LI, J. Influence of the South Atlantic Ocean dipole on West African summer precipitation. **Journal of Climate**, 2011.
- NNAMCHI, H. C.; LI, J.; ANYADIKE, R. N. C. Does a dipole mode really exist in the South Atlantic Ocean? **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, 2011.
- NÓBREGA, R. S.; SANTIAGO, G. A. C. F. Tendência De Temperatura Na Superfície Do Mar Nos Oceanos Atlântico E Pacífico E Variabilidade De Precipitação Em Pernambuco. **Mercator**, 2014.
- O'GORMAN, P. A. Precipitation Extremes Under Climate Change. **Current Climate Change Reports**. [S.l: s.n.], 2015.
- O&APOS;GORMAN, P. A. Sensitivity of tropical precipitation extremes to climate change. **Nature Geoscience**, 2012.
- OKI, T.; ENTEKHABI, D.; HARROLD, T. I. The global water cycle. **Geophysical Monograph Series**. [S.l: s.n.], 2004.
- OLIVEIRA, P. T.; SANTOS E SILVA, C. M.; LIMA, K. C. Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, 2017.
- PAGLIAROLI, T. *et al.* Wavelet analysis ultra-thin metasurface for hypersonic flow control. **Applied Acoustics**, 2020.
- PARAMESWARIAH, C.; COX, M. Frequency characteristics of wavelets. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2002.
- PECL, G. T. *et al.* Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. **Science**. [S.l: s.n.], 2017.

PELTO, B. M. *et al.* Oceanographic and Climatic Change in the Bering Sea, Last Glacial Maximum to Holocene. **Paleoceanography and Paleoclimatology**, 2018.

PEREIRA, T. A. DA S. *et al.* Key climate oscillation factors controlling precipitation variability during the dry season in eastern northeast Brazil: Study case of Mundaú and Paraíba do Meio river basins. **Water (Switzerland)**, 2018.

PERRIN, J. Mouvement brownien et réalité moléculaire. **Ann. Chim. Phys.**, 1909.

PFAHL, S.; O'GORMAN, P. A.; FISCHER, E. M. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. **Nature Climate Change**, 2017.

PIMENTEL, E. A. A wavelets-based analysis of the Phillips curve hypothesis for the Brazilian economy, 1980-2011. **Economia Aplicada**, 2013.

PRAKASH, A. Wavelet and its Applications. **International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology**, 2018.

RECKIEN, D. *et al.* Climate change, equity and the Sustainable Development Goals: an urban perspective. **Environment and Urbanization**, 2017.

REGUERO, B. G.; LOSADA, I. J.; MÉNDEZ, F. J. A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming. **Nature Communications**, 2019.

RIOUL, O.; VETTERLI, M. Wavelets and Signal Processing. **IEEE Signal Processing Magazine**, 1991.

ROBINS, P. E. *et al.* Impact of climate change on UK estuaries: A review of past trends and potential projections. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. [S.l: s.n.], 2016.

ROLAND, N. G. Fourier and wavelet representations of functions. **Electronic Journal of Undergraduate Mathematics**, 2000.

ROSENZWEIG, C.; NEOFOTIS, P. Detection and attribution of anthropogenic climate change impacts. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, 2013.

ROUSHANGAR, K.; NOURANI, V.; ALIZADEH, F. A multiscale time-space approach to analyze and categorize the precipitation fluctuation based on the wavelet transform and information theory concept. **Hydrology Research**, 2018.

RUSTAMOV, R. M.; GUIBAS, L. J. Wavelets on graphs via deep learning. **Signals and Communication Technology**. [S.l: s.n.], 2019.

SACHS, J. D. *et al.* Six Transformations to achieve the Sustainable Development Goals. **Nature Sustainability**, 2019.

SALINAS, S. R. A. Einstein e a teoria do movimento browniano. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 2005.

SALVADOR, M. D. A. CLIMAP – APLICATIVO PARA ANÁLISE DE DADOS CLIMÁTICOS - VERSÃO 3.0. **Revista Brasileira de Climatologia**, 2017.

SANCHEZ RODRIGUEZ, R.; ÜRGE-VORSATZ, DI.; BARAU, A. S. Sustainable Development Goals and climate change adaptation in cities. **Nature Climate Change**. [S.l: s.n.]. 2018.

- SANTOS, C. A. G. *et al.* Hybrid wavelet neural network approach for daily inflow forecasting using Tropical Rainfall Measuring Mission data. **Journal of Hydrologic Engineering**, 2019.
- SEN ROY, S. Water. **Springer Climate**. [S.l: s.n.], 2018.
- SENEVIRATNE, S. I. *et al.* No pause in the increase of hot temperature extremes. **Nature Climate Change**. [S.l: s.n.], 2014.
- SERVAIN, J.; LEGLER, D. M. Empirical orthogonal function analyses of tropical Atlantic sea surface temperature and wind stress: 1964–1979. **Journal of Geophysical Research**, 1986.
- SHARGHI, E. *et al.* Application of different clustering approaches to hydroclimatological catchment regionalization in mountainous regions, a case study in Utah State. **Journal of Mountain Science**, 2018.
- SHEFFIELD, J.; WOOD, E. F.; RODERICK, M. L. Little change in global drought over the past 60 years. **Nature**, 2012.
- SIFUZZAMAN, M.; ISLAM, M. R.; ALI, M. Z. Application of Wavelet Transform and its Advantages Compared to Fourier Transform. **Journal of Physical Sciences**, 2009.
- SILLMANN, J.; ROECKNER, E. Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change. **Climatic Change**, 2008.
- SILVA, E. R. A. C. *et al.* Análise da tendência temporal da precipitação pluviométrica interanual e intra-anual no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Climatologia**, 2018.
- SILVA, E. R. A. C. *et al.* Estimativa do Estresse Hidrológico na Bacia Hidrográfica do Riacho do Pontal-PE / Hydrological stress estimate in Pontal watershed-PE. **Caderno de Geografia**, 2016.
- SOLOMON, S. *et al.* IPCC fourth assessment report (AR4). **Climate change**, 2007.
- SONG, X. *et al.* Multiscale Spatio-Temporal Changes of Precipitation Extremes in Beijing-Tianjin-Hebei Region, China during 1958–2017. **Atmosphere**, 2019.
- STASZEWSKI, W. J.; GIACOMIN, J. **Application of the wavelet based FRFs to the analysis of nonstationary vehicle data**. 1997, [S.l: s.n.], 1997.
- STEINMAN, B. A.; MANN, M. E.; MILLER, S. K. Atlantic and Pacific multidecadal oscillations and Northern Hemisphere temperatures. **Science**, 2015.
- STERN, D. I.; KAUFMANN, R. K. Anthropogenic and natural causes of climate change. **Climatic Change**, 2014.
- SUN, F.; RODERICK, M. L.; FARQUHAR, G. D. Rainfall statistics, stationarity, and climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 2018.
- SUYUNDYKOV, R.; PUECHMOREL, S.; FERR, L. **Wavelet Coefficients of Levy Process Wavelet Coefficients of Levy Process**. 2010, [S.l: s.n.], 2010.
- TAN, X.; GAN, T. Y.; SHAO, D. Wavelet analysis of precipitation extremes over Canadian ecoregions and teleconnections to large-scale climate anomalies. **Journal of Geophysical Research**, 2016.
- TANG, K. H. D. Climate change in Malaysia: Trends, contributors, impacts, mitigation and

adaptations. **Science of the Total Environment**. [S.l: s.n.], 2019.

TEDESCHI, R. G.; GRIMM, A. M.; CAVALCANTI, I. F. A. Influence of Central and East ENSO on precipitation and its extreme events in South America during austral autumn and winter. **International Journal of Climatology**, 2016.

THOMPSON, D. W. J. *et al.* Quantifying the role of internal climate variability in future climate trends. **Journal of Climate**, 2015.

TIMMERMAN, A. *et al.* El Niño–Southern Oscillation complexity. **Nature**. [S.l: s.n.], 2018
TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 1998.

TORRENCE, C.; WEBSTER, P. J. Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system. **Journal of Climate**, 1999.

TOSHIE KAYANO, M.; VALÉRIA ANDREOLI, R.; FERREIRA DE SOUZA, R. A. Evolving anomalous SST patterns leading to ENSO extremes: Relations between the tropical Pacific and Atlantic Oceans and the influence on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, 2011.

TRENBERTH, K. E. Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for rainfall rates and climate change. **Climatic Change**, 1998.

TRENBERTH, K. E. *et al.* Global warming and changes in drought. **Nature Climate Change**. [S.l: s.n.], 2014.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T.; SHEPHERD, T. G. Attribution of climate extreme events. **Nature Climate Change**. [S.l: s.n.], 2015.

UNITED NATIONS. **The Sustainable Development Agenda - United Nations Sustainable Development**. About. [S.l: s.n.], 2018.

VISHNY, R.; ZINGALES, L. Corporate finance. **Journal of Political Economy**. [S.l: s.n.], 2017.

WANG, X. *et al.* Multiscale Variability of Precipitation and Their Teleconnection with Large-scale Climate Anomalies: A Case Study of Xi'an City, China. **Journal of Coastal Research**, 2019.

WANG, Y. *et al.* Time series modeling of pertussis incidence in China from 2004 to 2018 with a novel wavelet based SARIMA-NAR hybrid model. **PLoS ONE**, 2018.

WARD, D. E. *Where has the jugular venous pressure gone?* **British Journal of Cardiology**. [S.l: s.n.], 2014.

WEEKS, M. **Digital signal processing Using MATLAB and Wavelets**. [S.l: s.n.], 2007.

WELSTEAD, S. Daubechies Wavelets. **Fractal and Wavelet Image Compression Techniques**. [S.l: s.n.], 2009.

WORKU, G. *et al.* Observed changes in extremes of daily rainfall and temperature in Jemma Sub-Basin, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. **Theoretical and Applied Climatology**, 2019.

WRIGHT, C.; LYONS, J. A. A method of searching for radial velocity anomalies in the lower mantle using interfering signals. **Pure and Applied Geophysics PAGEOPH**, 1980.

WRIGHT, N. M. *et al.* No Change in Southern Ocean Circulation in the Indian Ocean From the Eocene Through Late Oligocene. **Paleoceanography and Paleoclimatology**, 2018.

XU, D. *et al.* Synchronous 500-year oscillations of monsoon climate and human activity in Northeast Asia. **Nature Communications**, 2019.

XU, L. *et al.* Improving the North American multi-model ensemble (NMME) precipitation forecasts at local areas using wavelet and machine learning. **Climate Dynamics**, 2019.

YAN, R.; GAO, R. X.; CHEN, X. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications. **Signal Processing**, 2014.

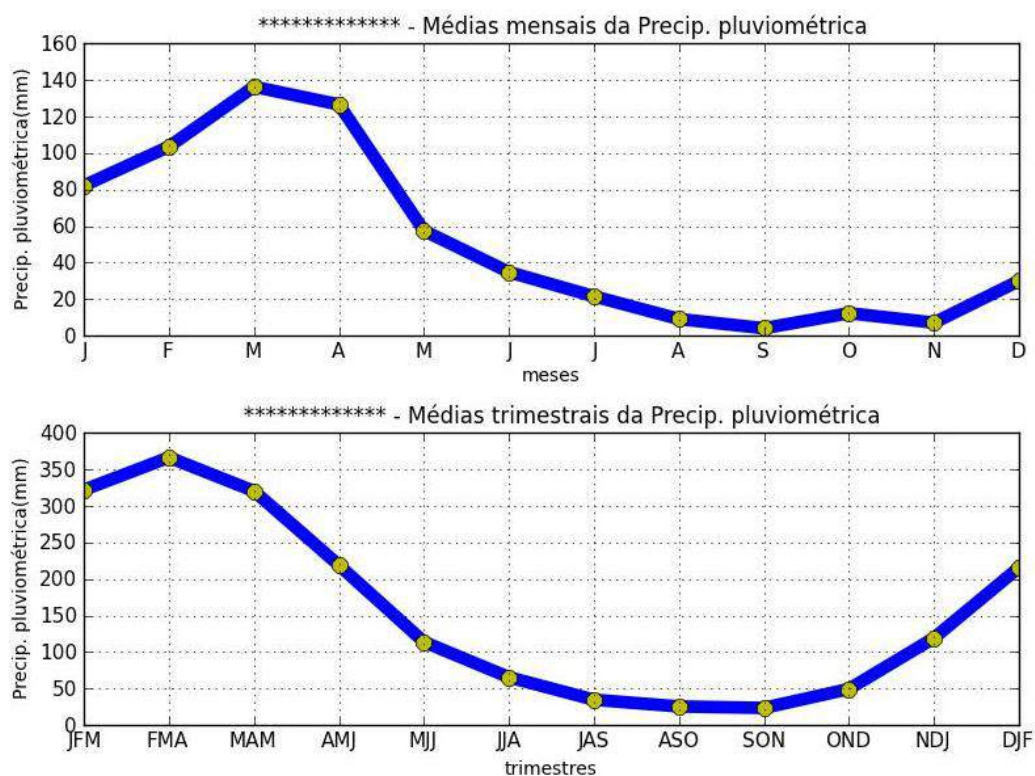
YANG, L.; YANG, L.; HAMORI, S. Determinants of dependence structures of sovereign credit default swap spreads between G7 and BRICS countries. **International Review of Financial Analysis**, 2018.

YUE, S.; PILON, P.; CAVADIAS, G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. **Journal of Hydrology**, 2002.

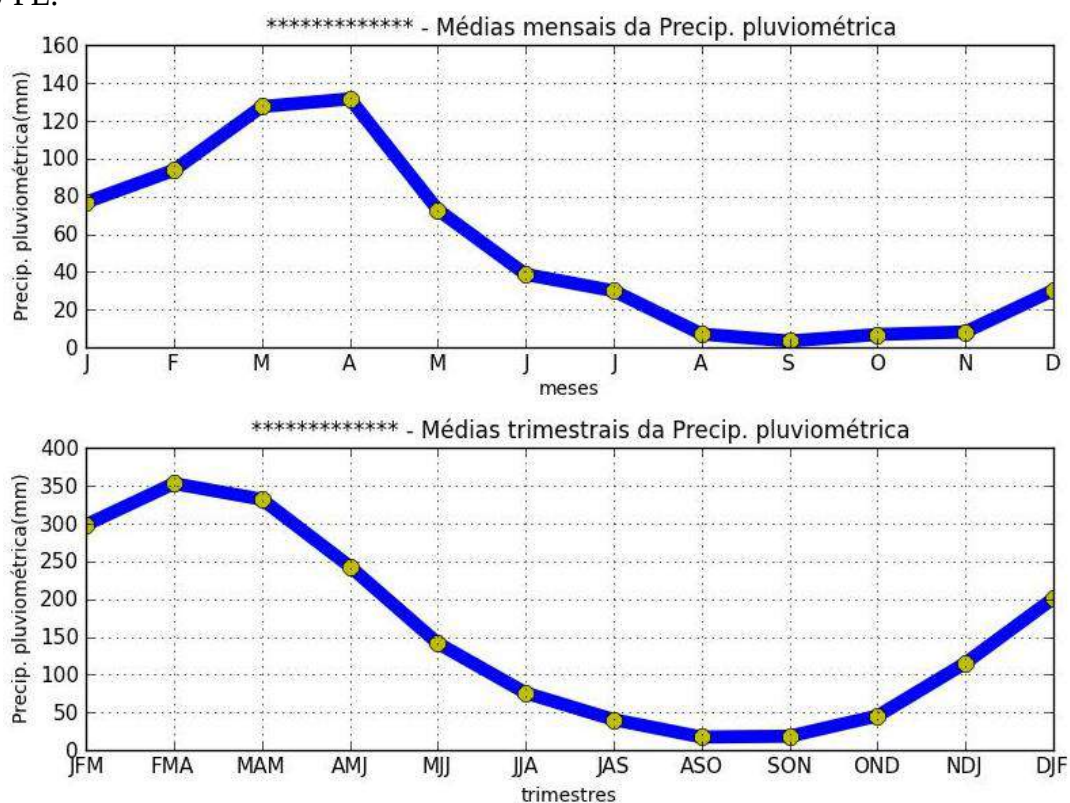
ZHANG, J. *et al.* The effects of monsoons and climate teleconnections on the Niangziguan Karst Spring discharge in North China. **Climate Dynamics**, 2017.

APÊNDICE A - MÉDIAS HISTÓRICAS MENSAIS E TRIMESTRAIS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA

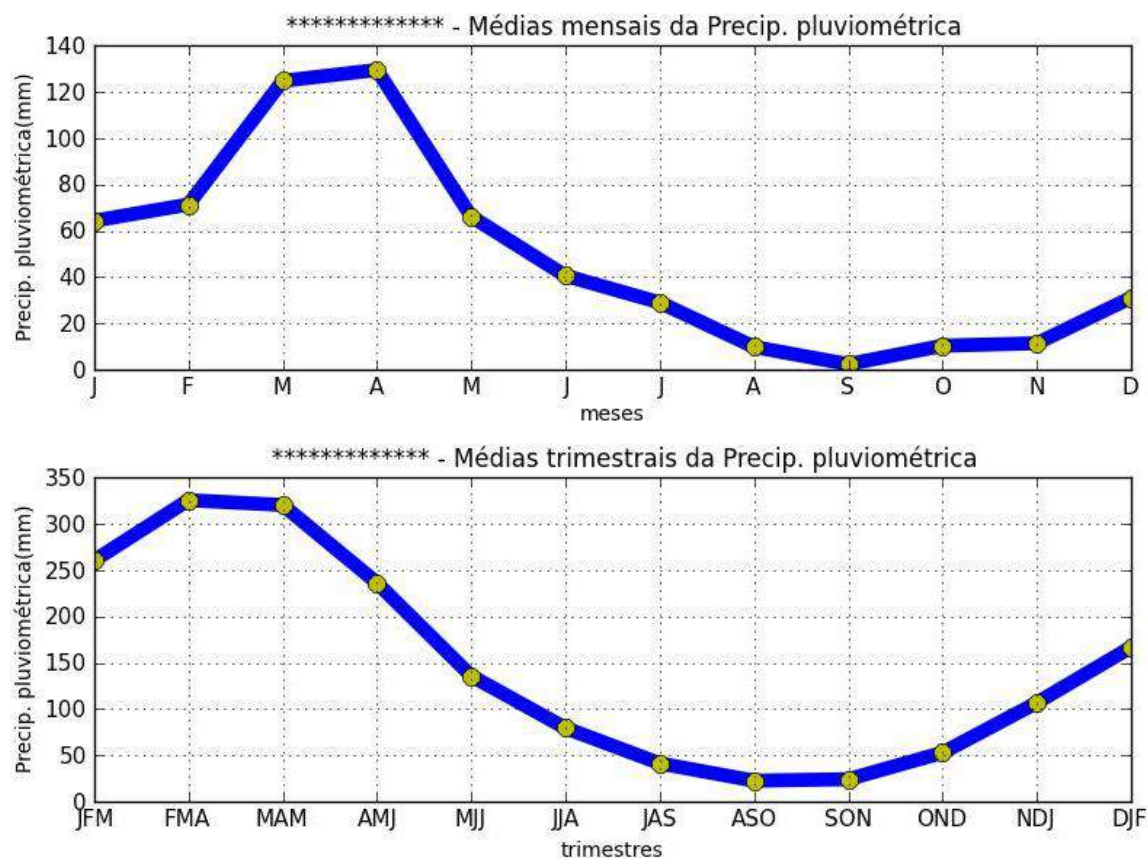
I-A. Médias históricas mensais e trimestrais de precipitação pluviométrica em Itapetim.



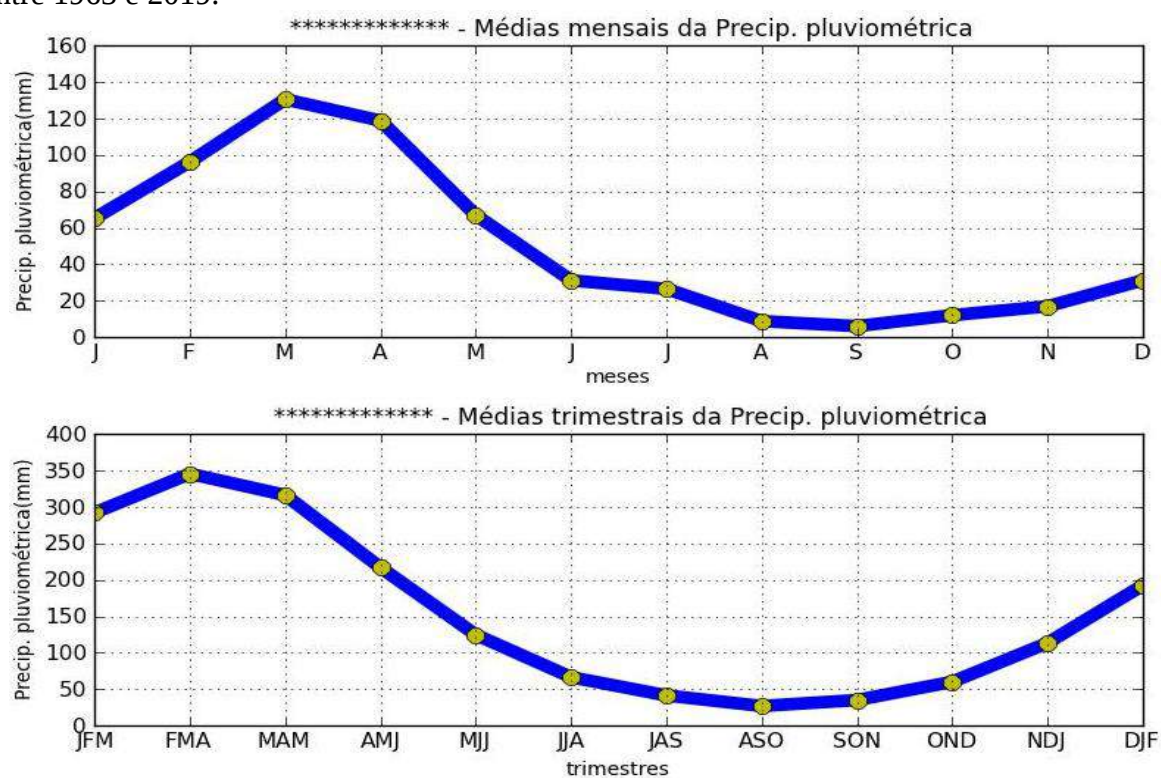
II-A. Médias históricas mensais e trimestrais de precipitação pluviométrica em São José do Egito-PE.



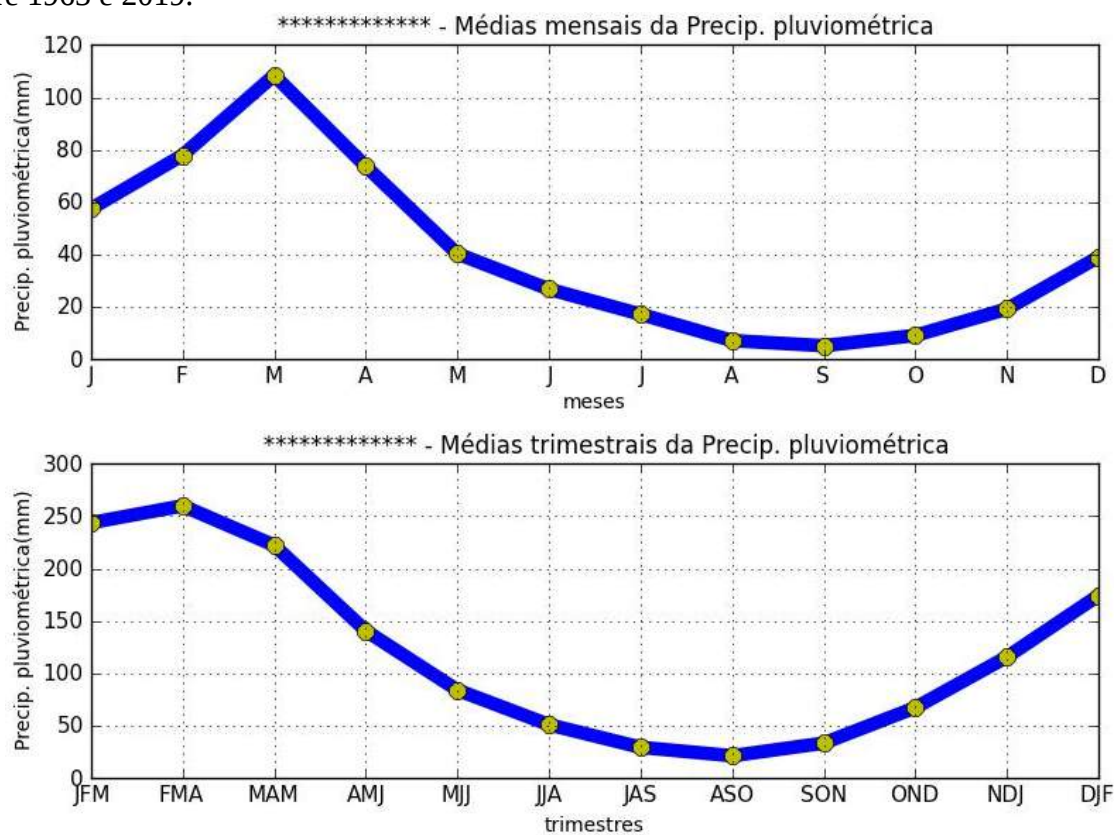
III-A. Médias históricas mensais e trimestrais de precipitação pluviométrica em Tuparetama.



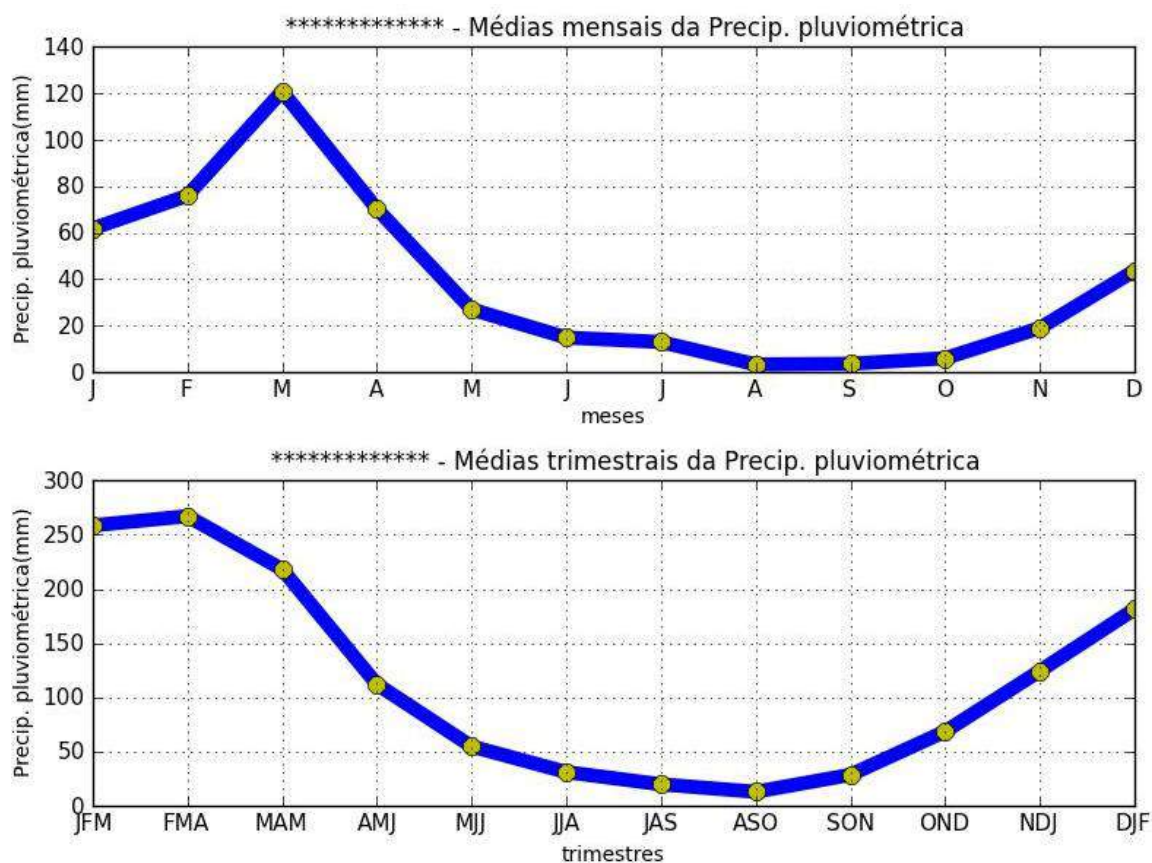
IV-A. Médias históricas mensais e trimestrais de precipitação pluviométrica em Iguaraci-PE entre 1963 e 2019.



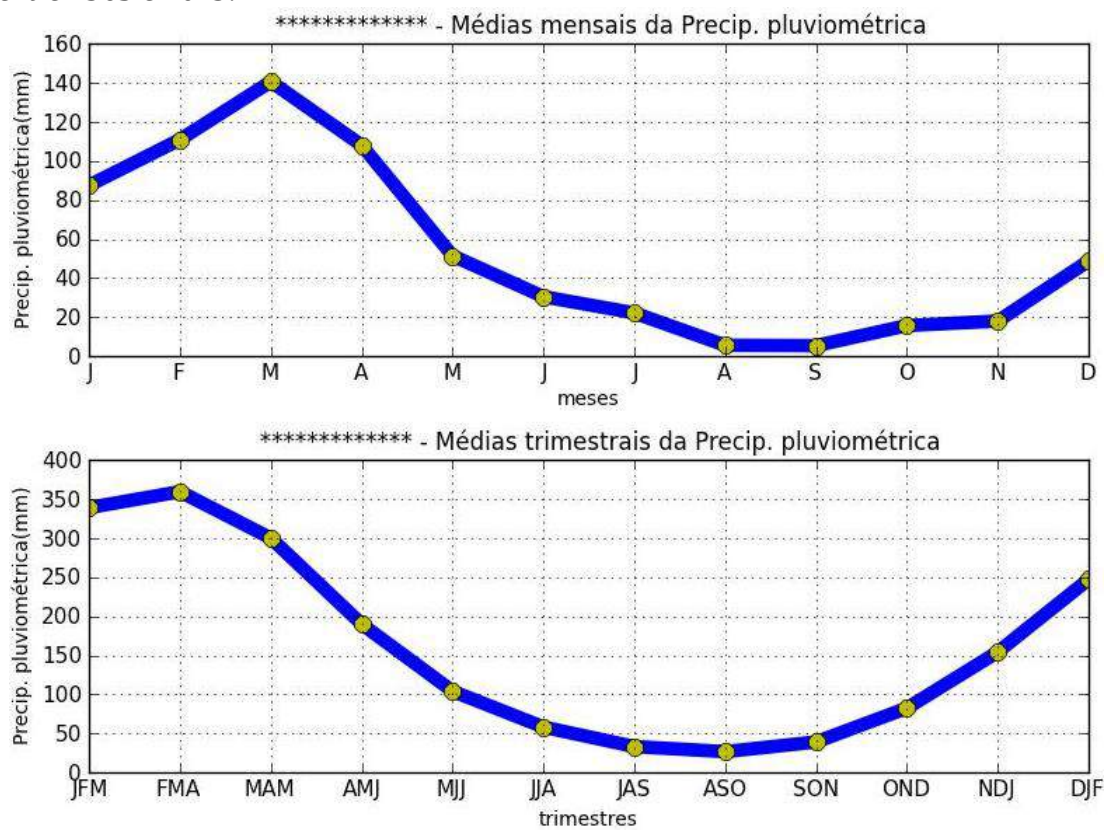
V-A. Médias históricas mensais e trimestrais de precipitação pluviométrica em Ibimirim-PE entre 1963 e 2019.



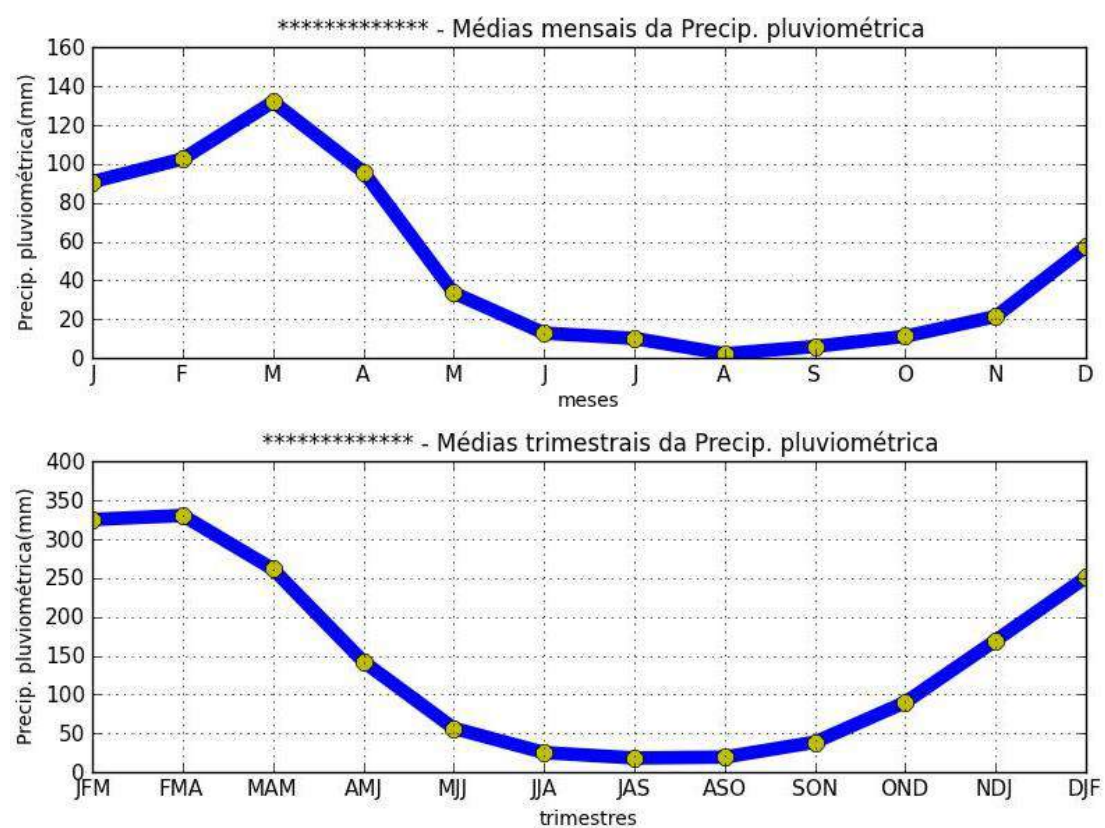
VI-A. Médias históricas mensais e trimestrais de precipitação pluviométrica em Floresta-PE entre 1963 e 2019.



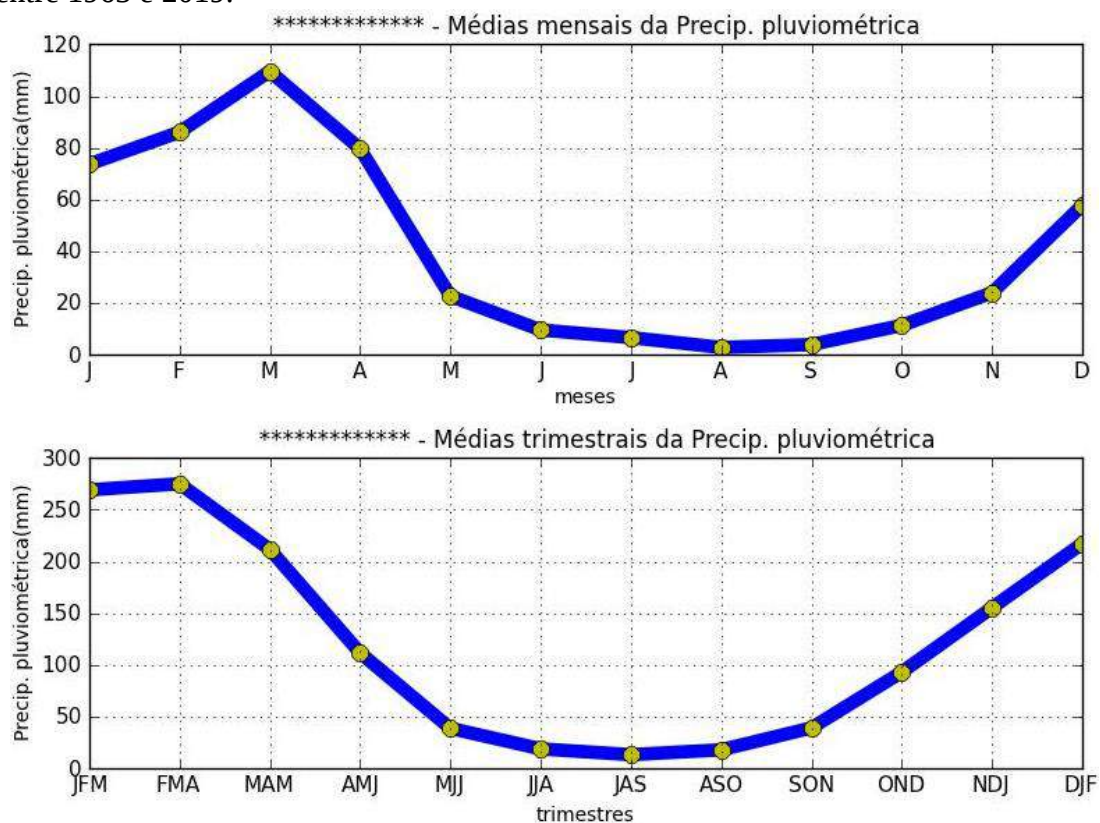
VII-A. Médias históricas mensais e trimestrais de precipitação pluviométrica em Serra Talhada-PE entre 1963 e 2019.



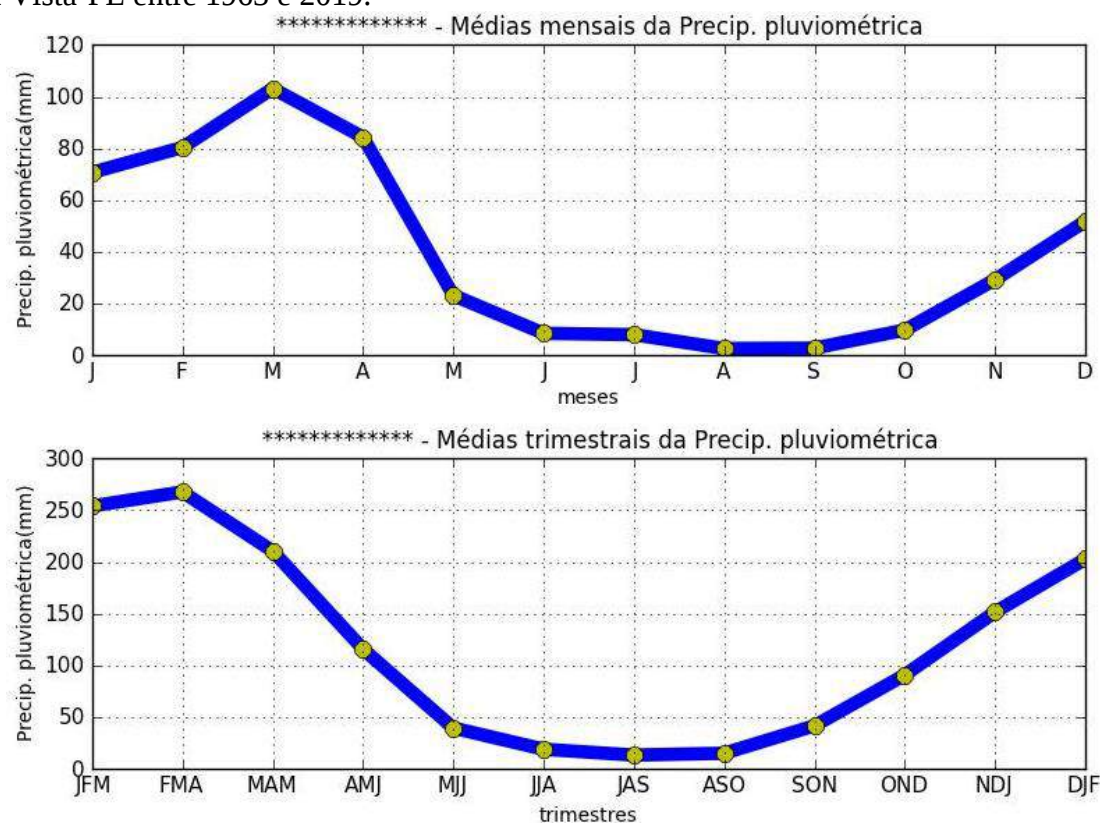
VIII-A. Médias históricas mensais e trimestrais de precipitação pluviométrica em Salgueiro-PE entre 1963 e 2019.



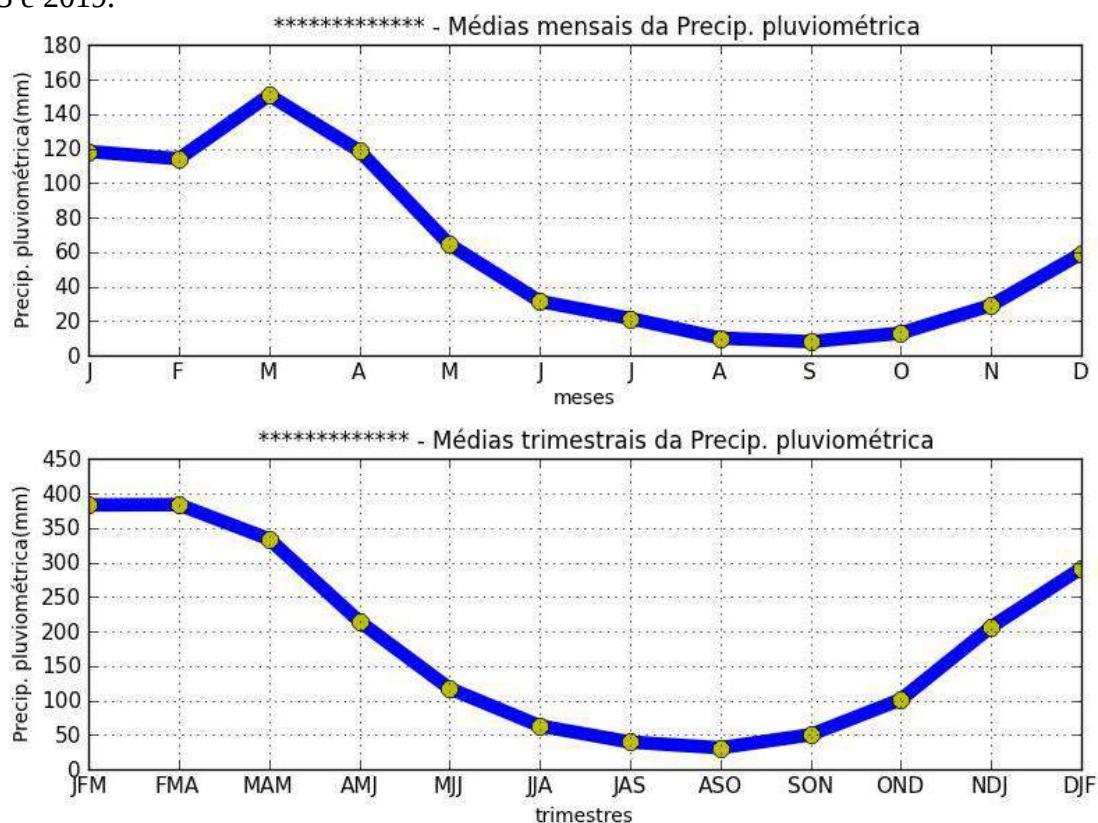
IX-A. Médias históricas mensais e trimestrais de precipitação pluviométrica em Parnamirim-PE entre 1963 e 2019.



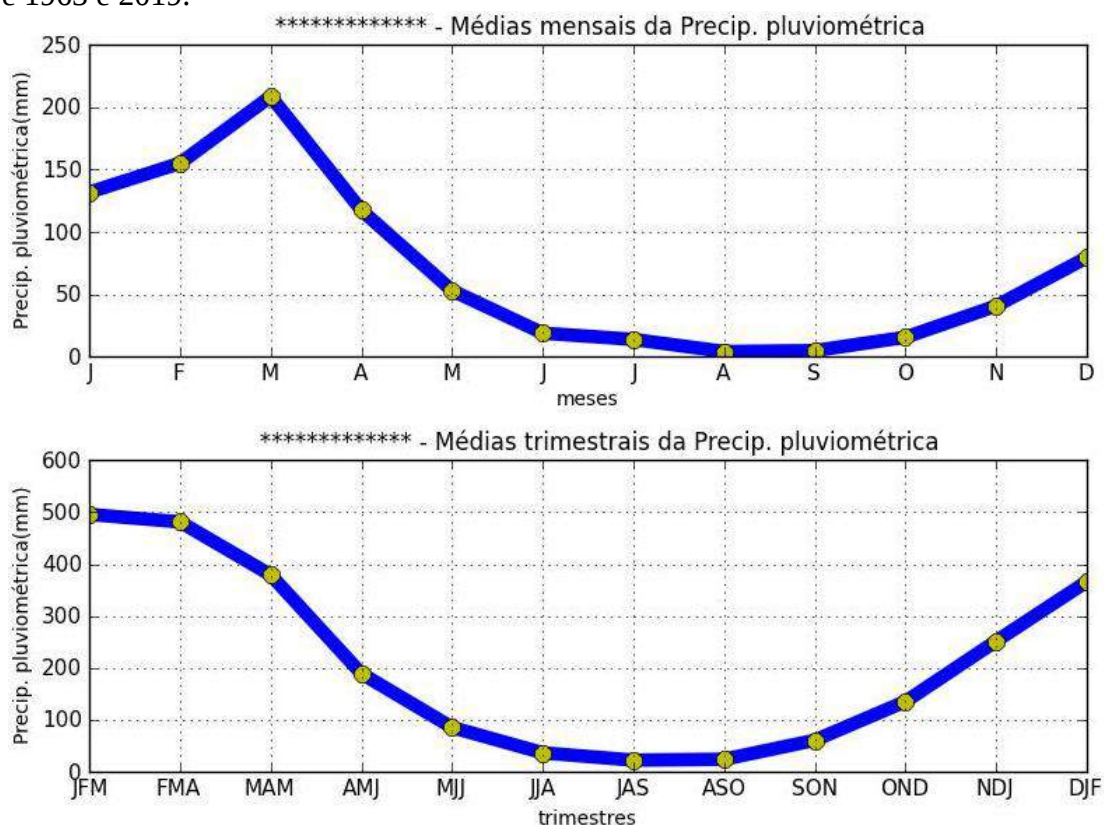
X-A. Médias históricas mensais e trimestrais de precipitação pluviométrica em Santa Maria da Boa Vista-PE entre 1963 e 2019.



XI-A. Médias históricas mensais e trimestrais de precipitação pluviométrica em Exu-PE entre 1963 e 2019.

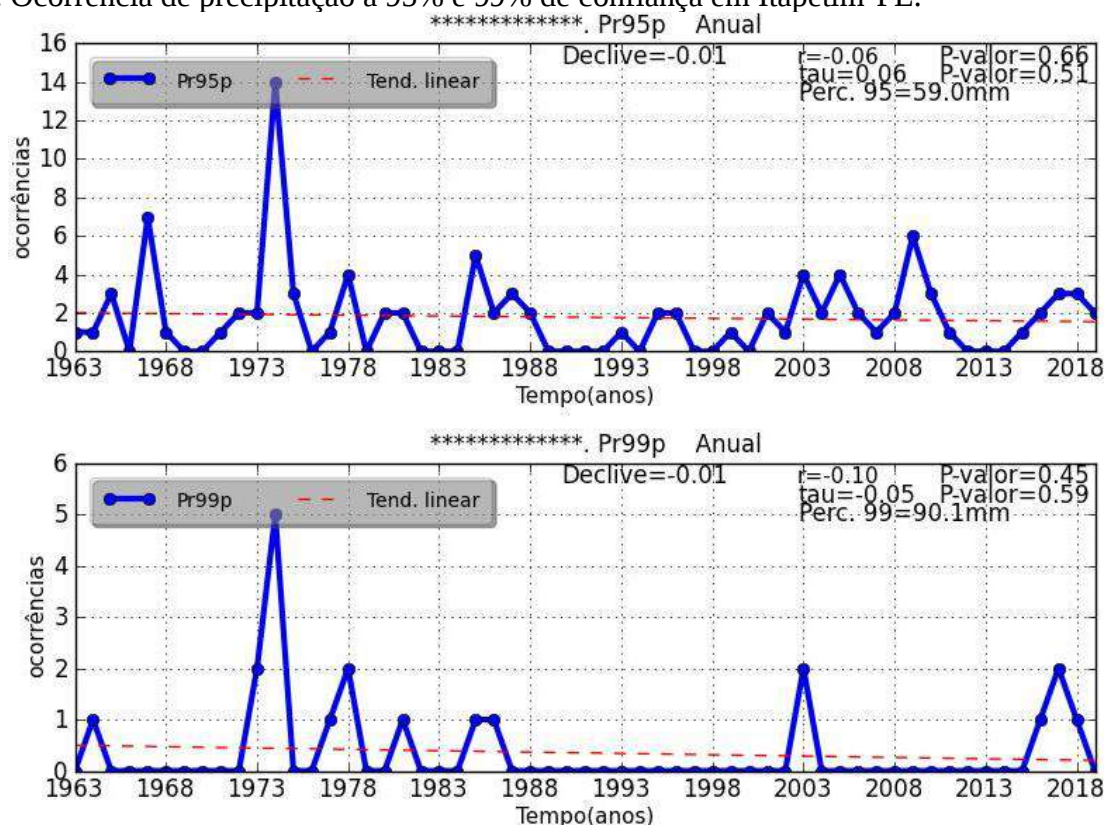


XII-A. Médias históricas mensais e trimestrais de precipitação pluviométrica em Araripina-PE entre 1963 e 2019.

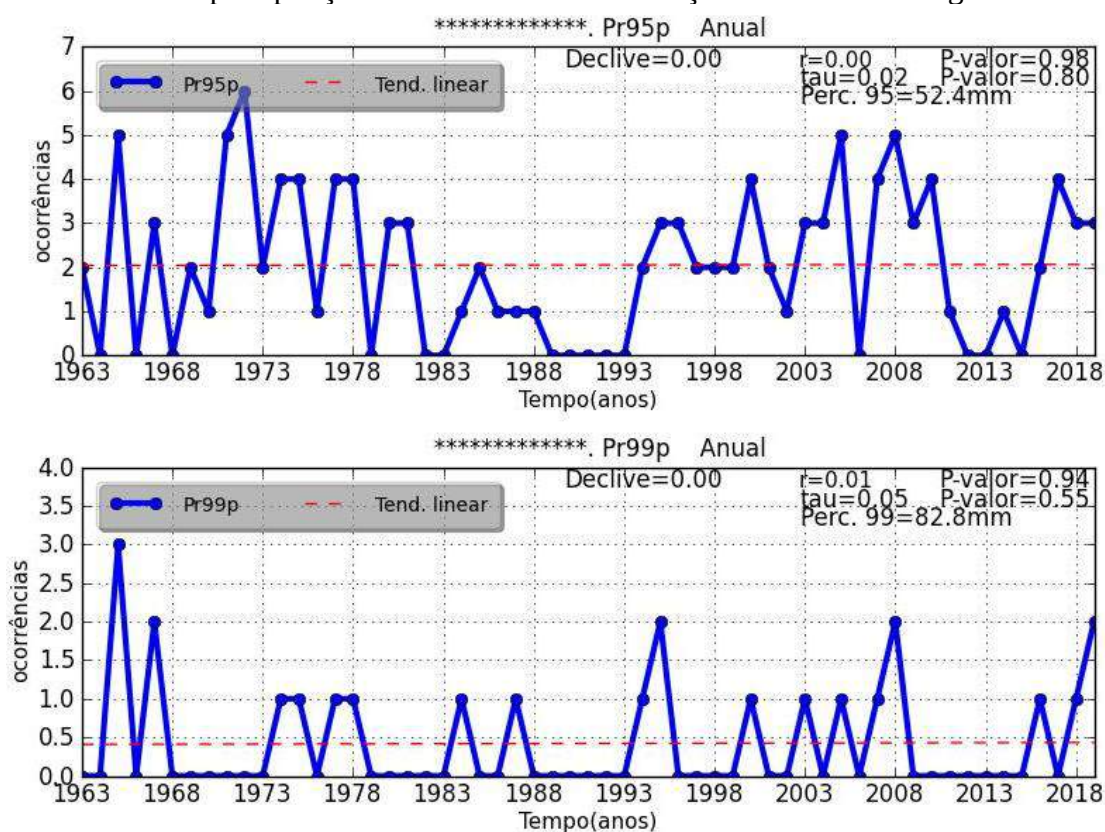


APÊNDICE B - OCORRÊNCIA DE PRECIPITAÇÃO A 95% E 99% DE CONFIANÇA

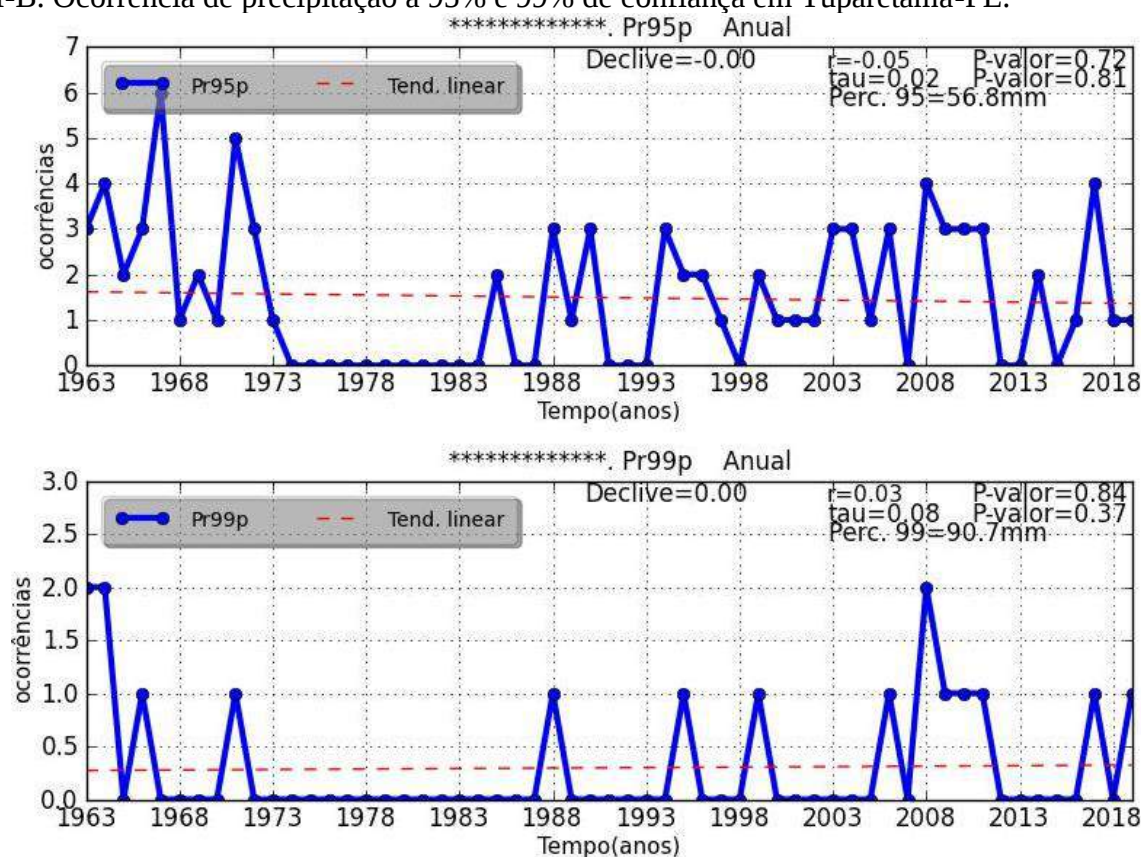
I-B. Ocorrência de precipitação a 95% e 99% de confiança em Itapetim-PE.



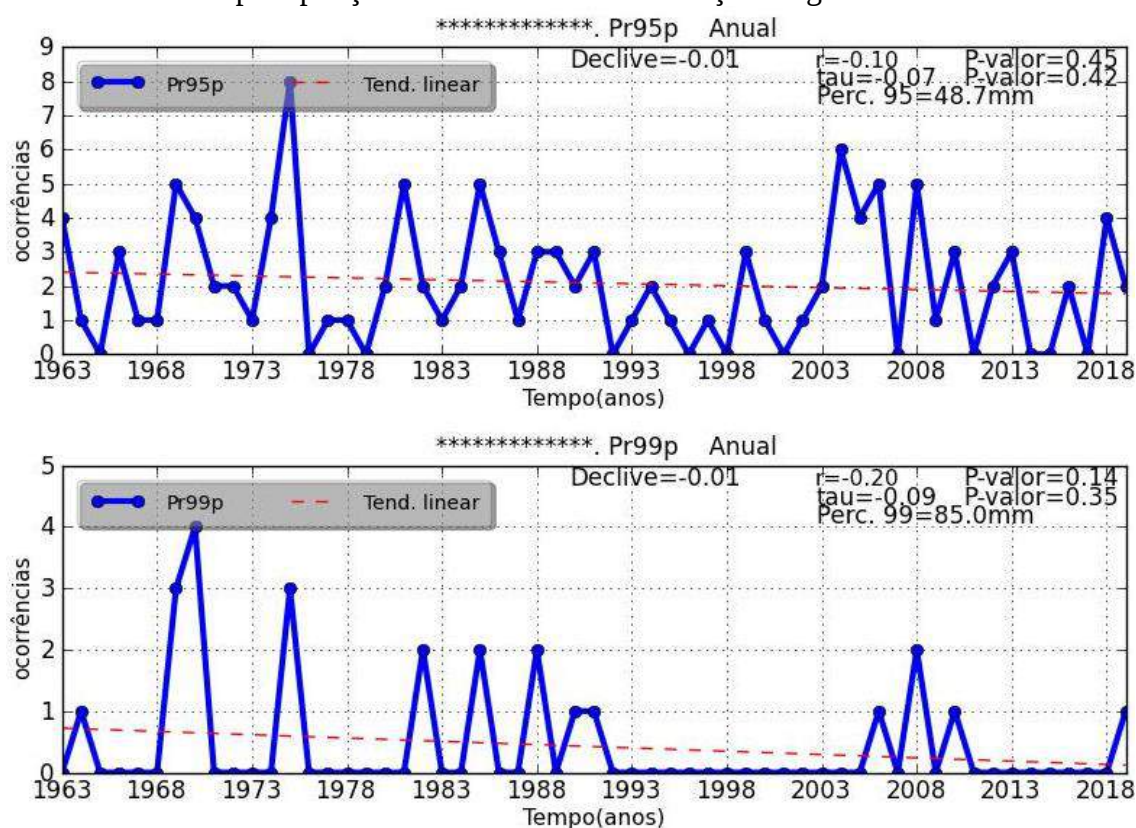
II-B. Ocorrência de precipitação a 95% e 99% de confiança em São José do Egito.



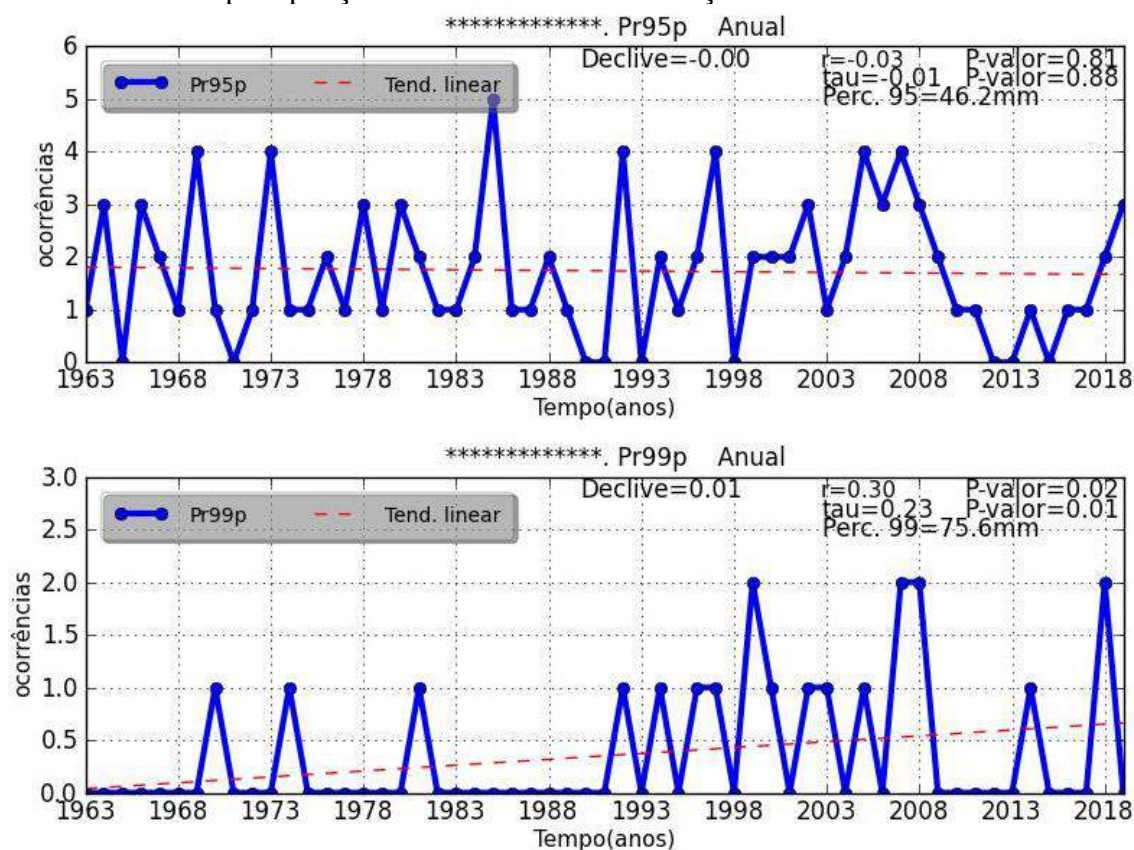
III-B. Ocorrência de precipitação a 95% e 99% de confiança em Tuparetama-PE.



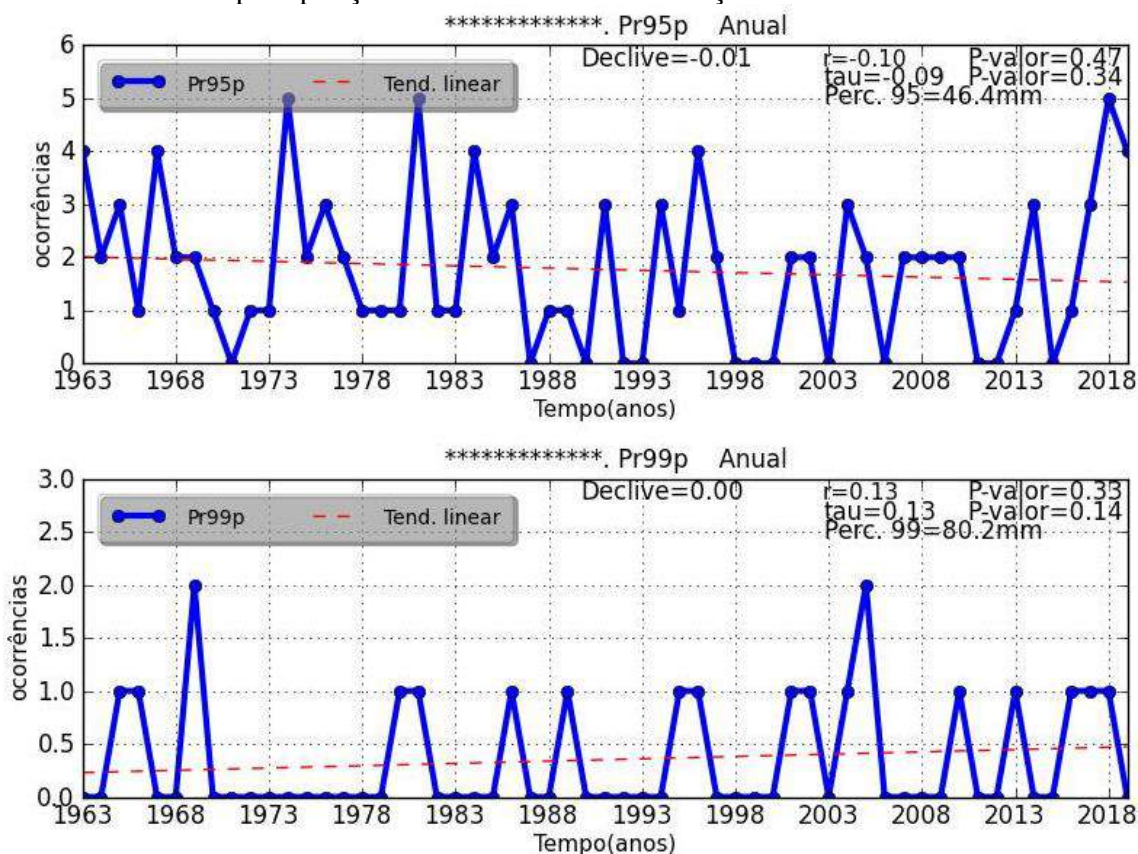
IV-B. Ocorrência de precipitação a 95% e 99% de confiança em Iguaraci-PE.



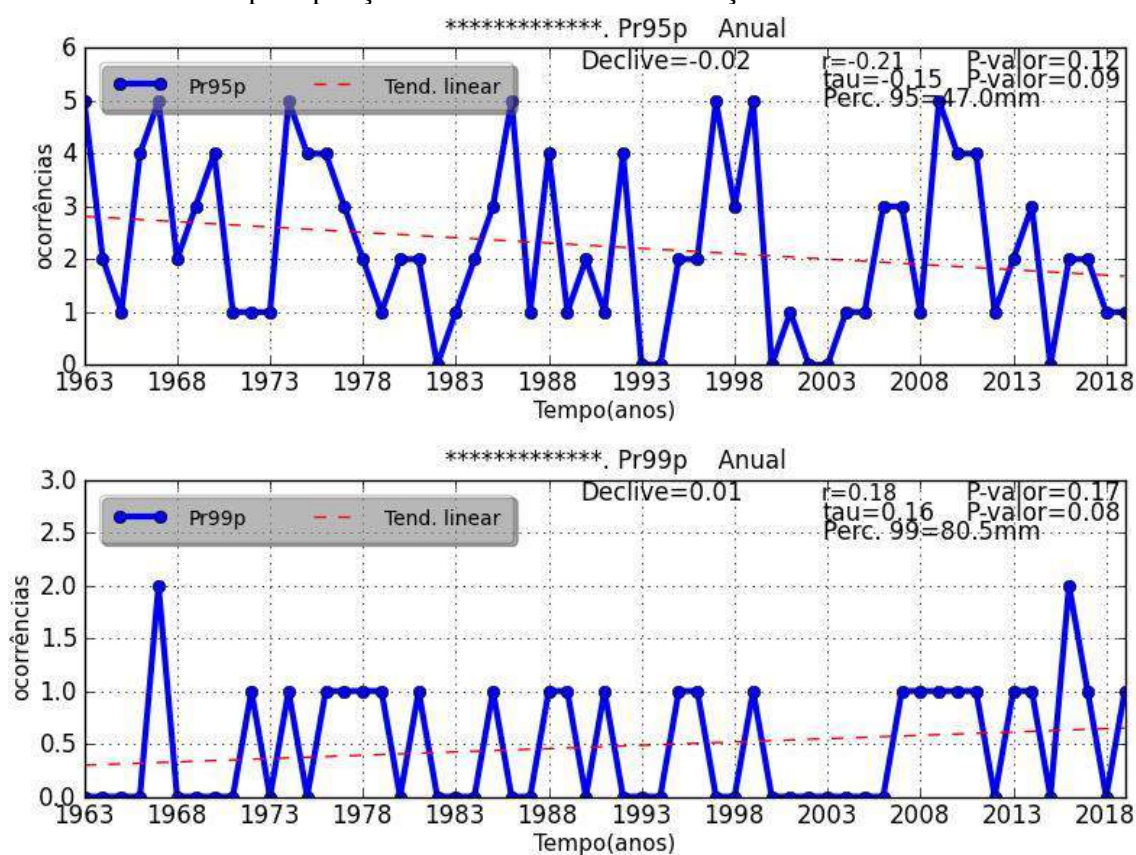
V-B. Ocorrência de precipitação a 95% e 99% de confiança em Ibimirim-PE.



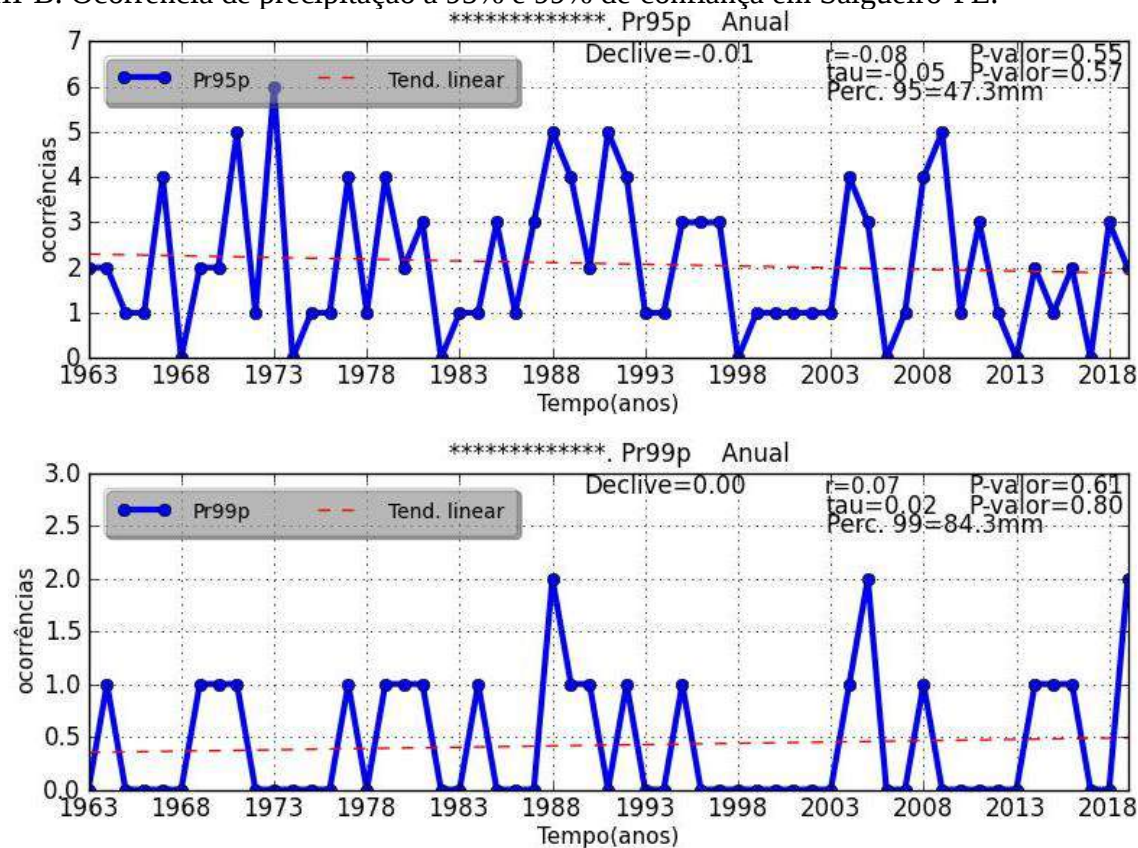
VI-B. Ocorrência de precipitação a 95% e 99% de confiança em Floresta-PE.



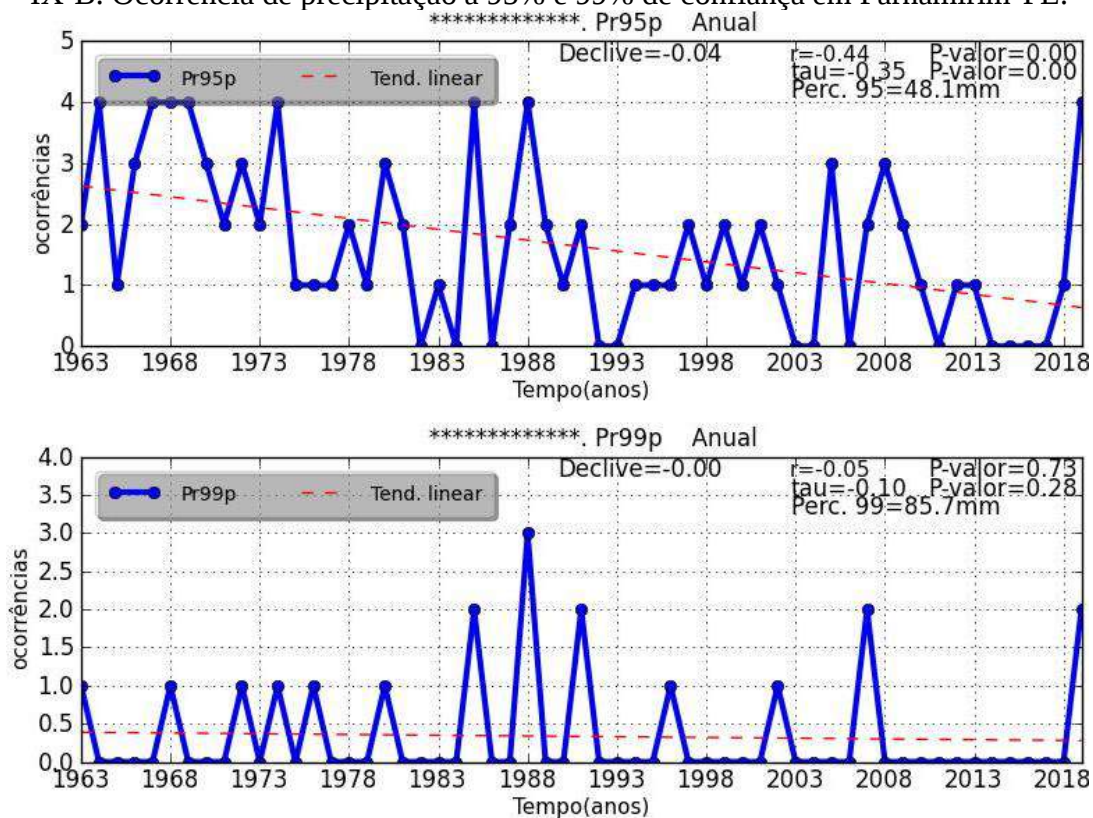
VII-B. Ocorrência de precipitação a 95% e 99% de confiança em Serra Talhada-PE.



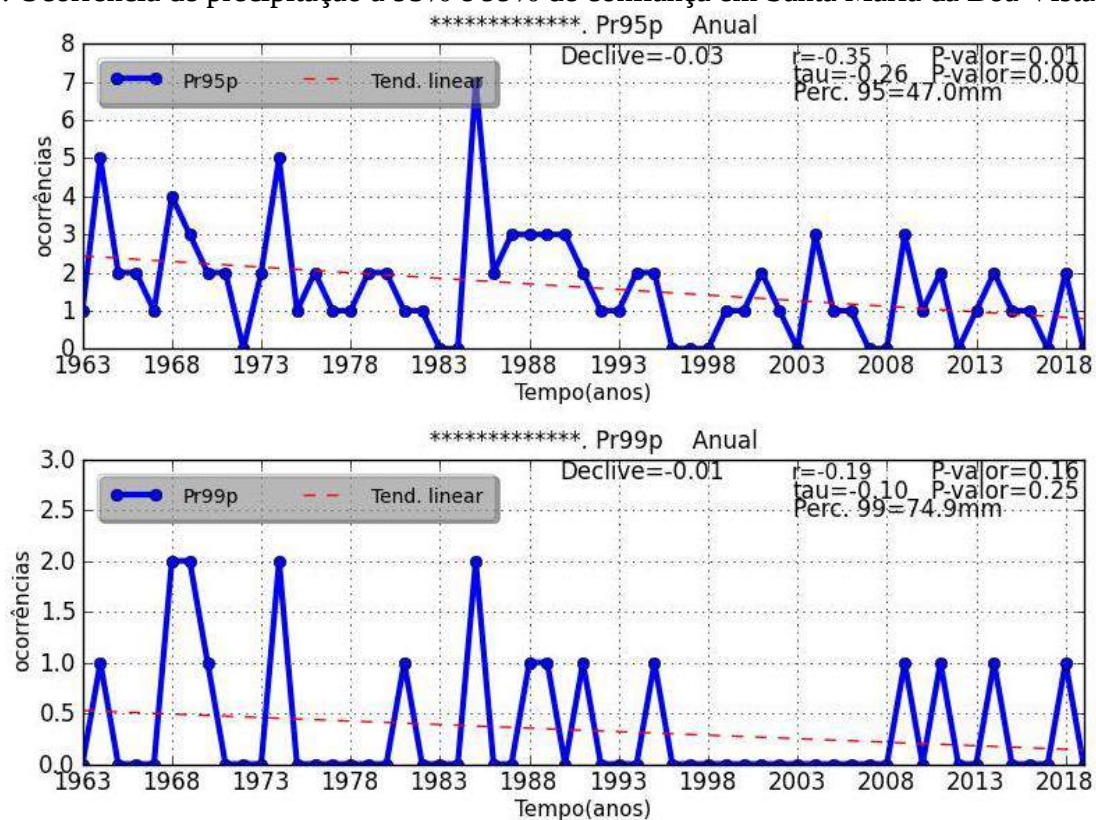
VIII-B. Ocorrência de precipitação a 95% e 99% de confiança em Salgueiro-PE.



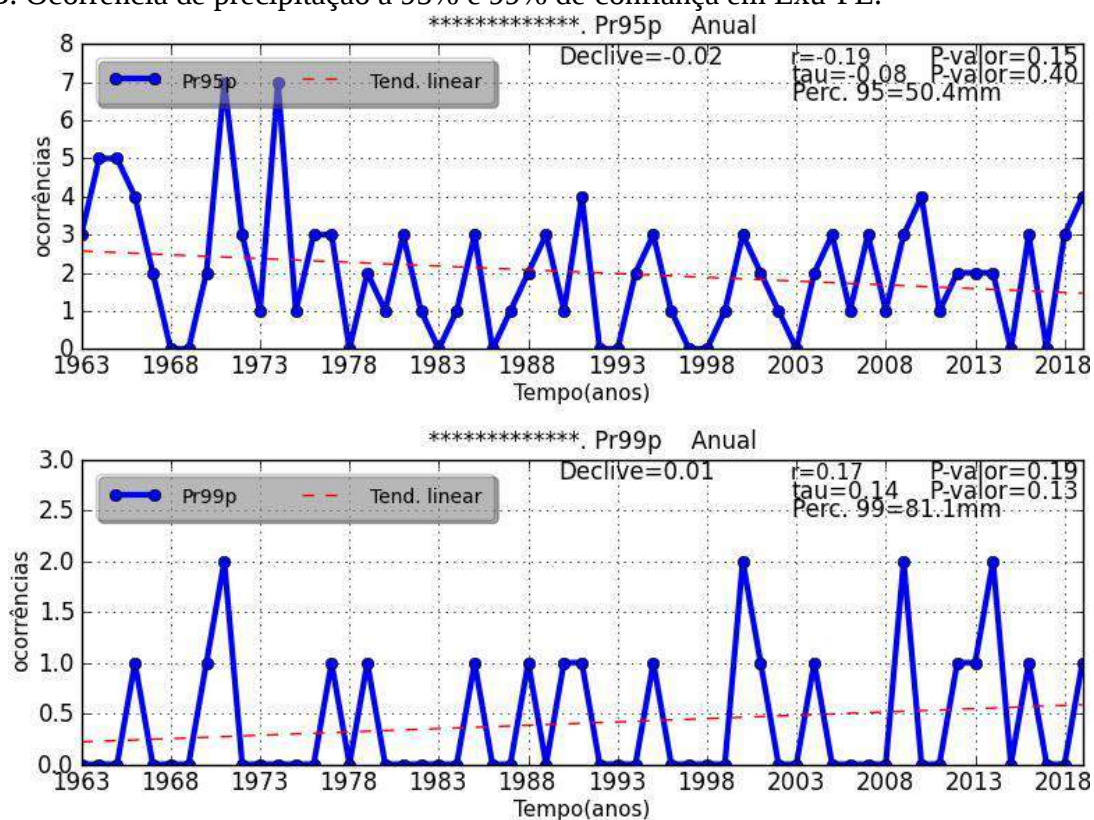
IX-B. Ocorrência de precipitação a 95% e 99% de confiança em Parnamirim-PE.



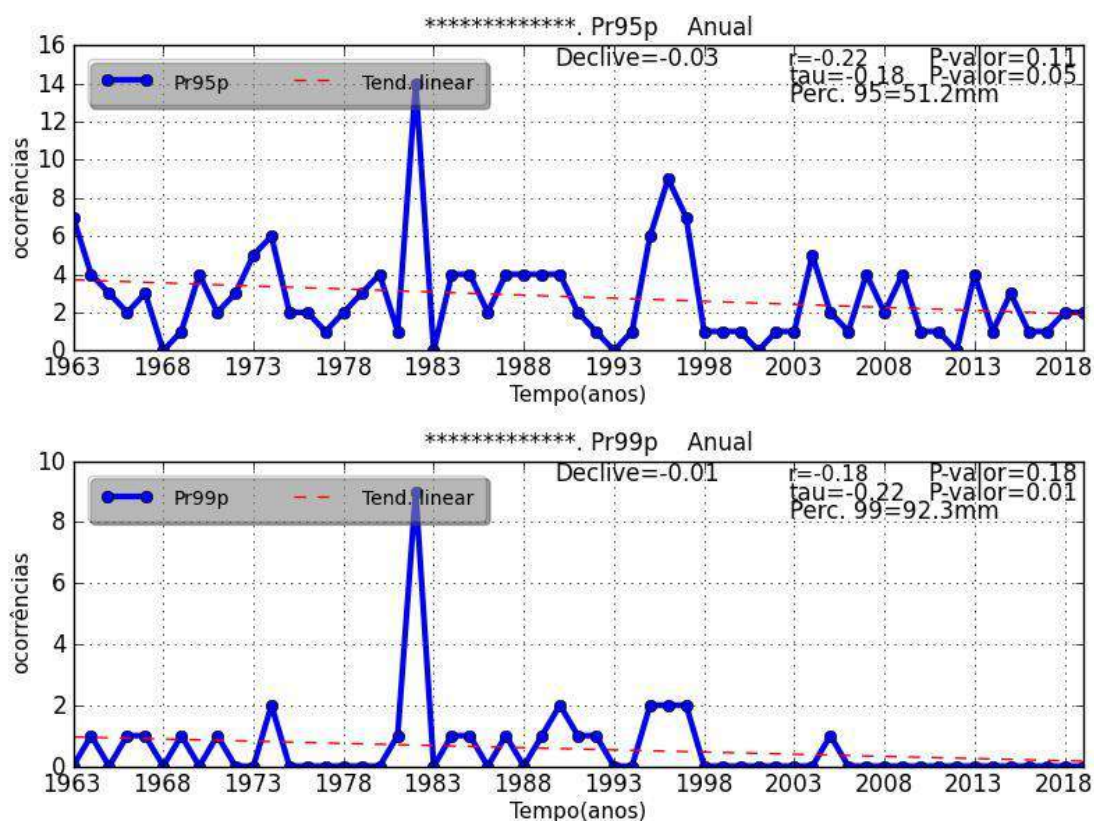
X-B. Ocorrência de precipitação a 95% e 99% de confiança em Santa Maria da Boa Vista.



XI-B. Ocorrência de precipitação a 95% e 99% de confiança em Exu-PE.

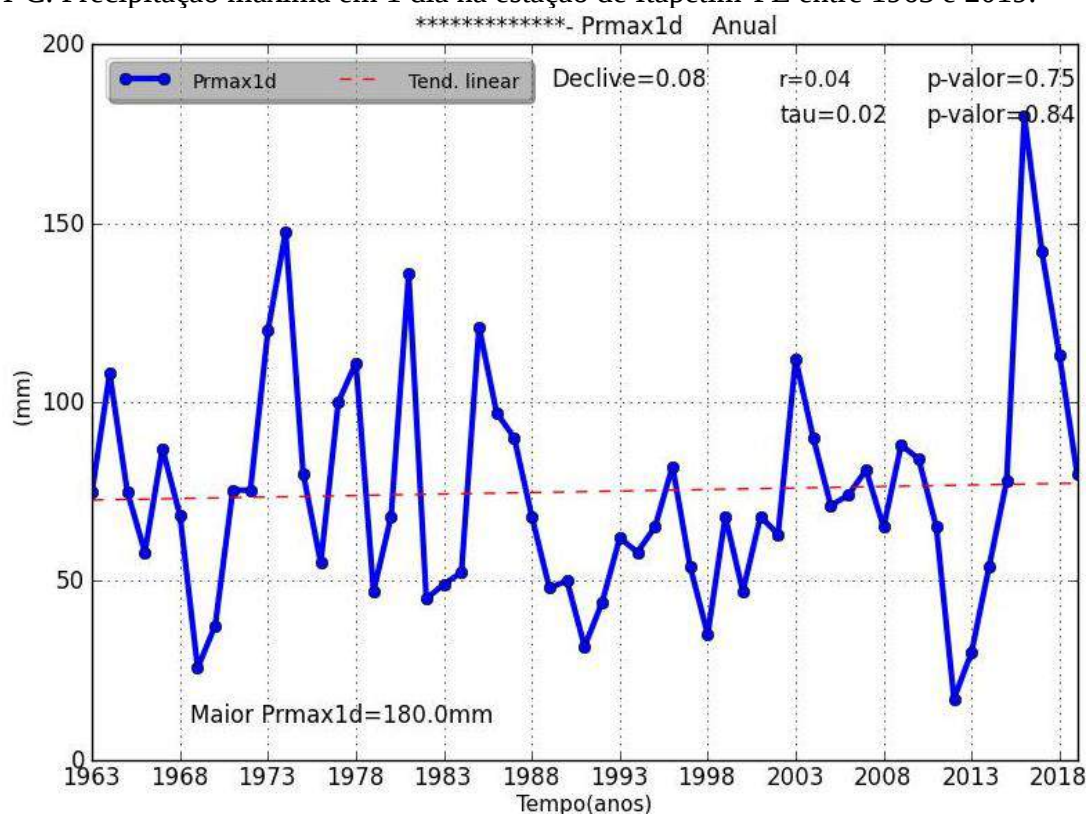


XII-B. Ocorrência de precipitação a 95% e 99% de confiança em Araripina-PE.

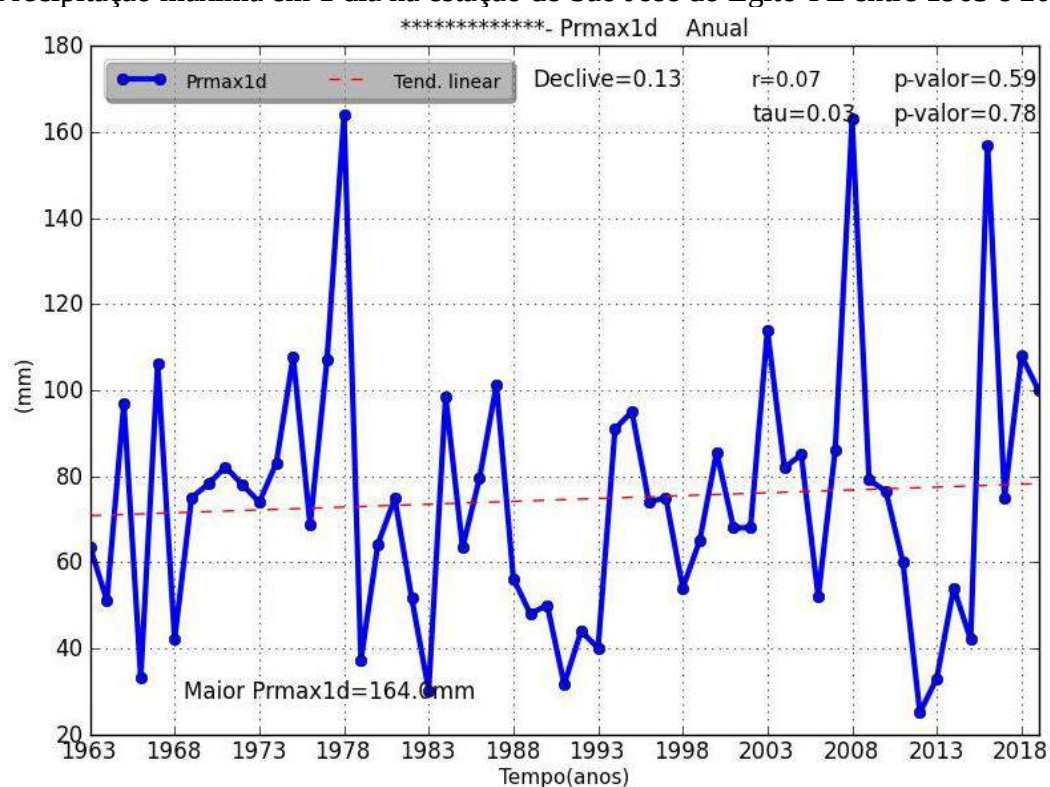


APÊNDICE C - PRECIPITAÇÃO MÁXIMA EM 1 DIA

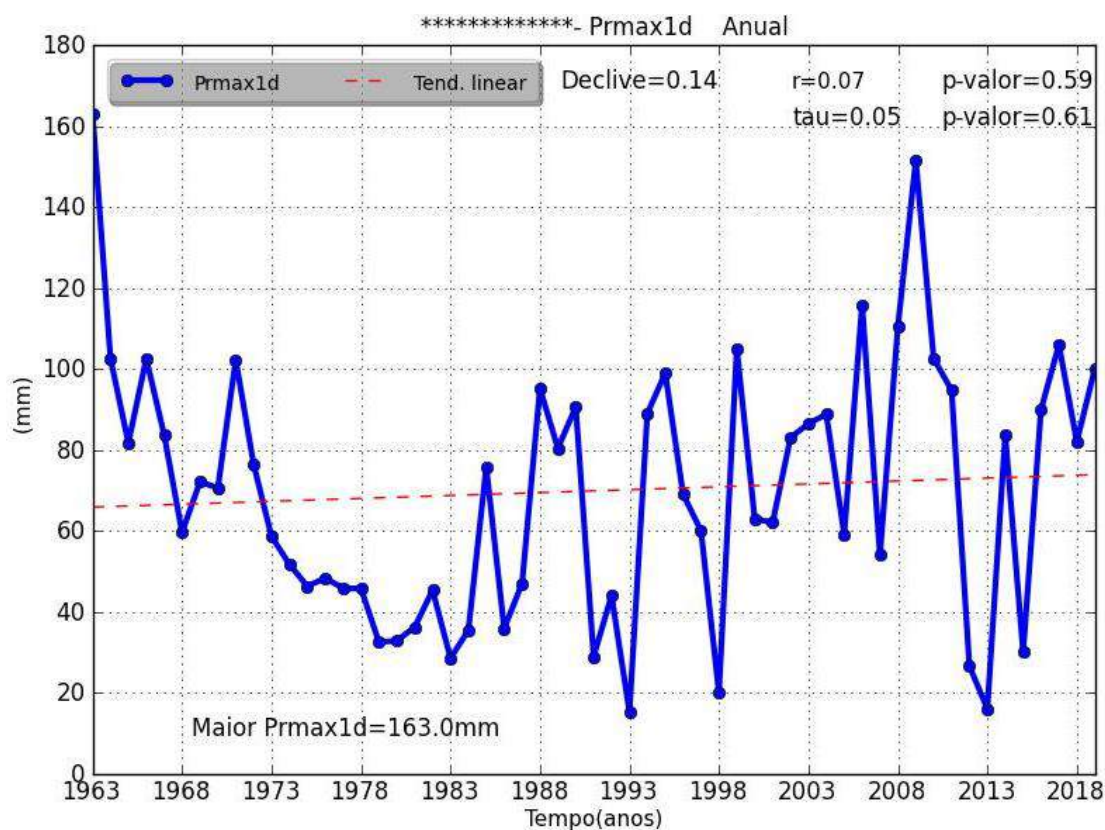
I-C. Precipitação máxima em 1 dia na estação de Itapetim-PE entre 1963 e 2019.



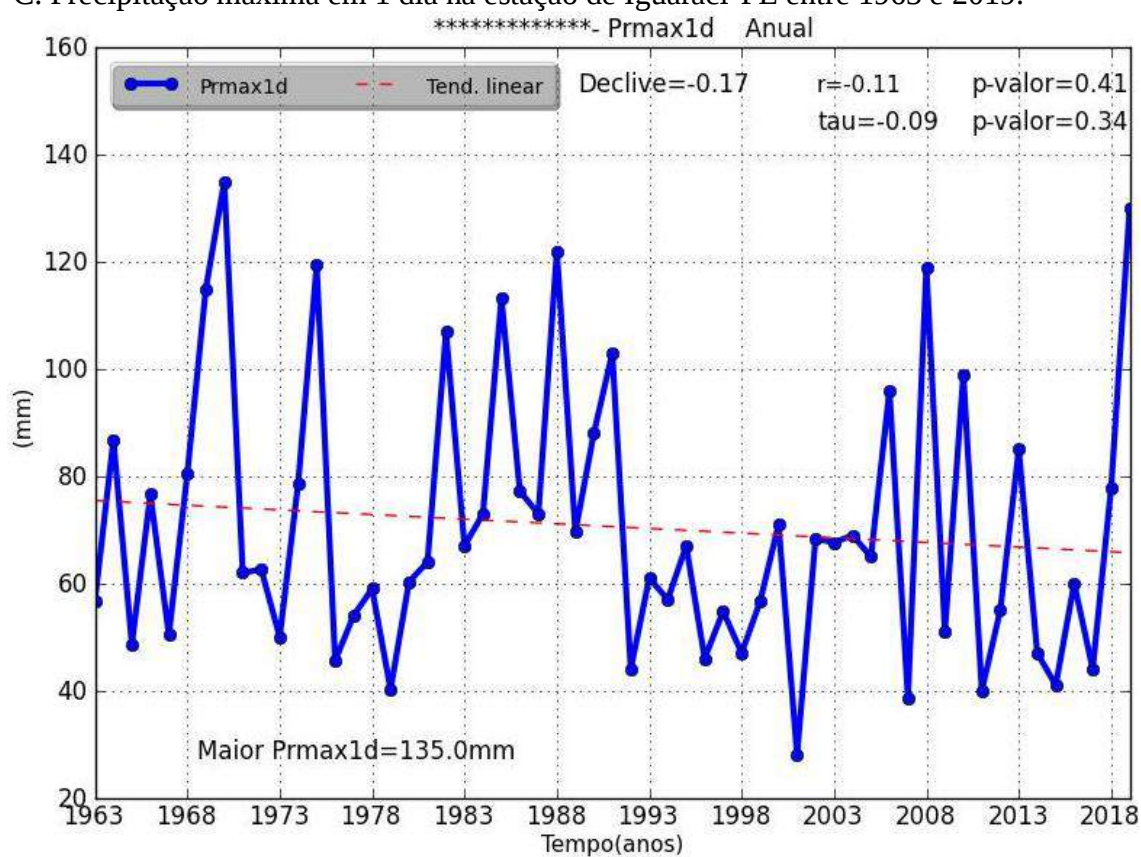
II-C. Precipitação máxima em 1 dia na estação de São José do Egito-PE entre 1963 e 2019.



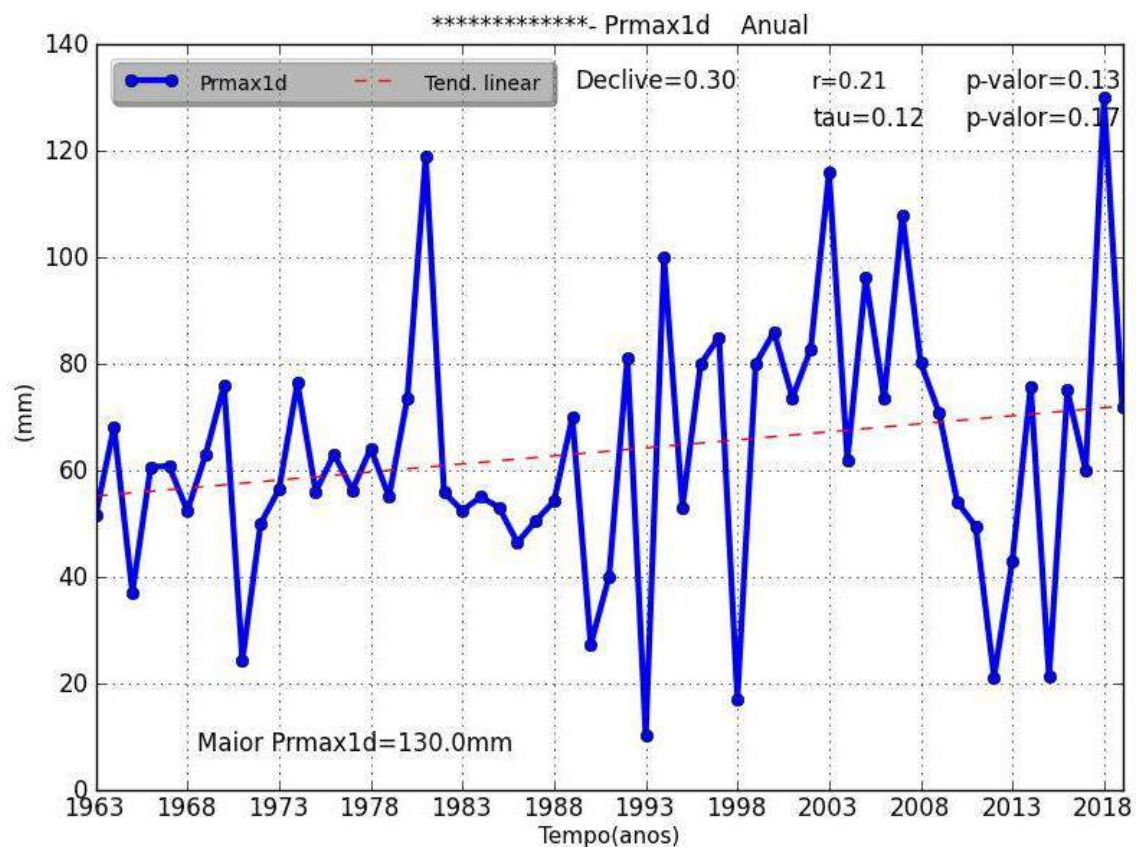
III-C. Precipitação máxima em 1 dia na estação de Tuparetama-PE entre 1963 e 2019.



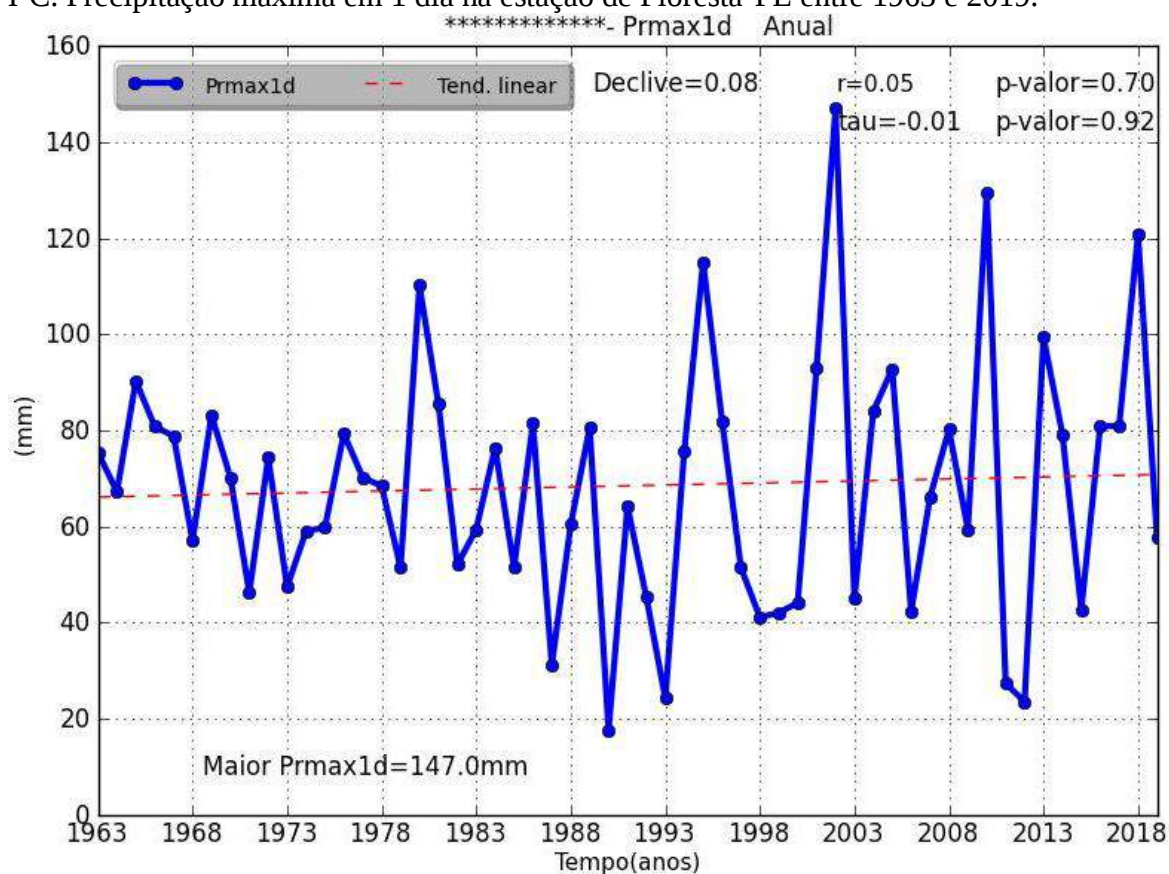
IV-C. Precipitação máxima em 1 dia na estação de Iguaraci-PE entre 1963 e 2019.



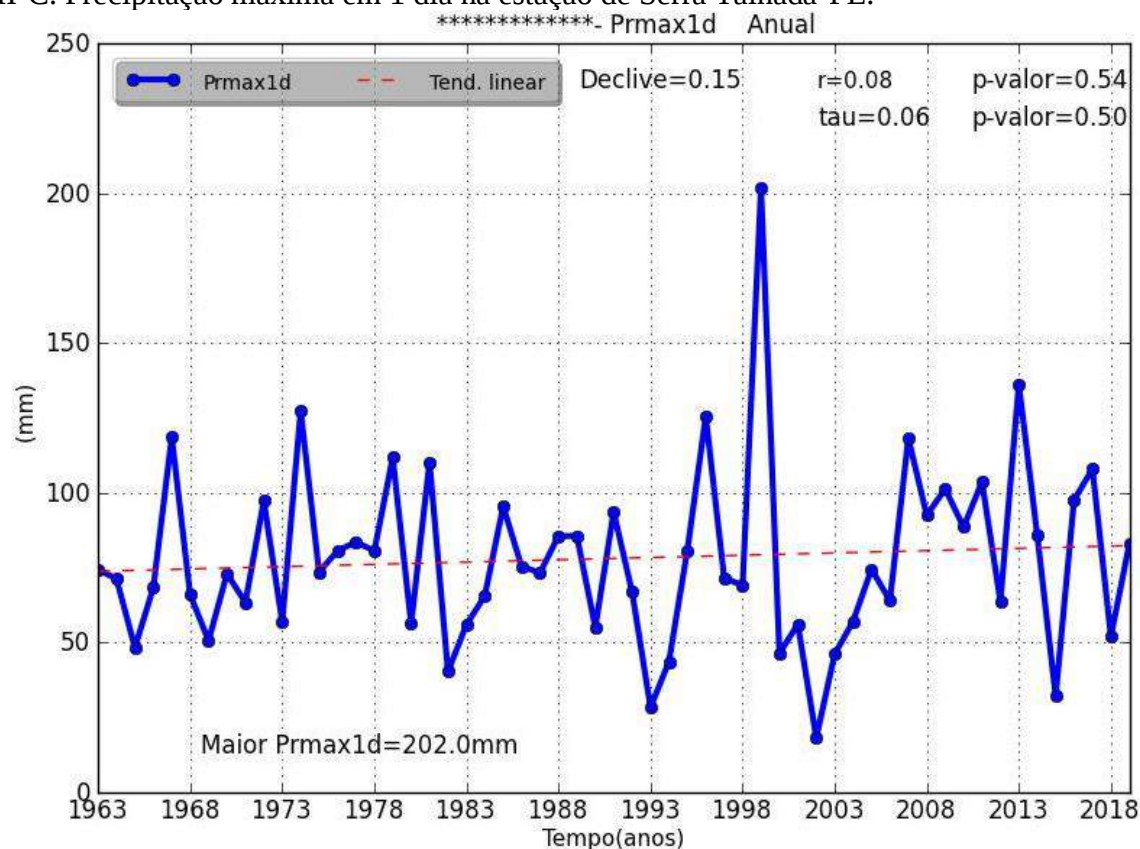
V-C. Precipitação máxima em 1 dia na estação de Ibimirim-PE entre 1963 e 2019.



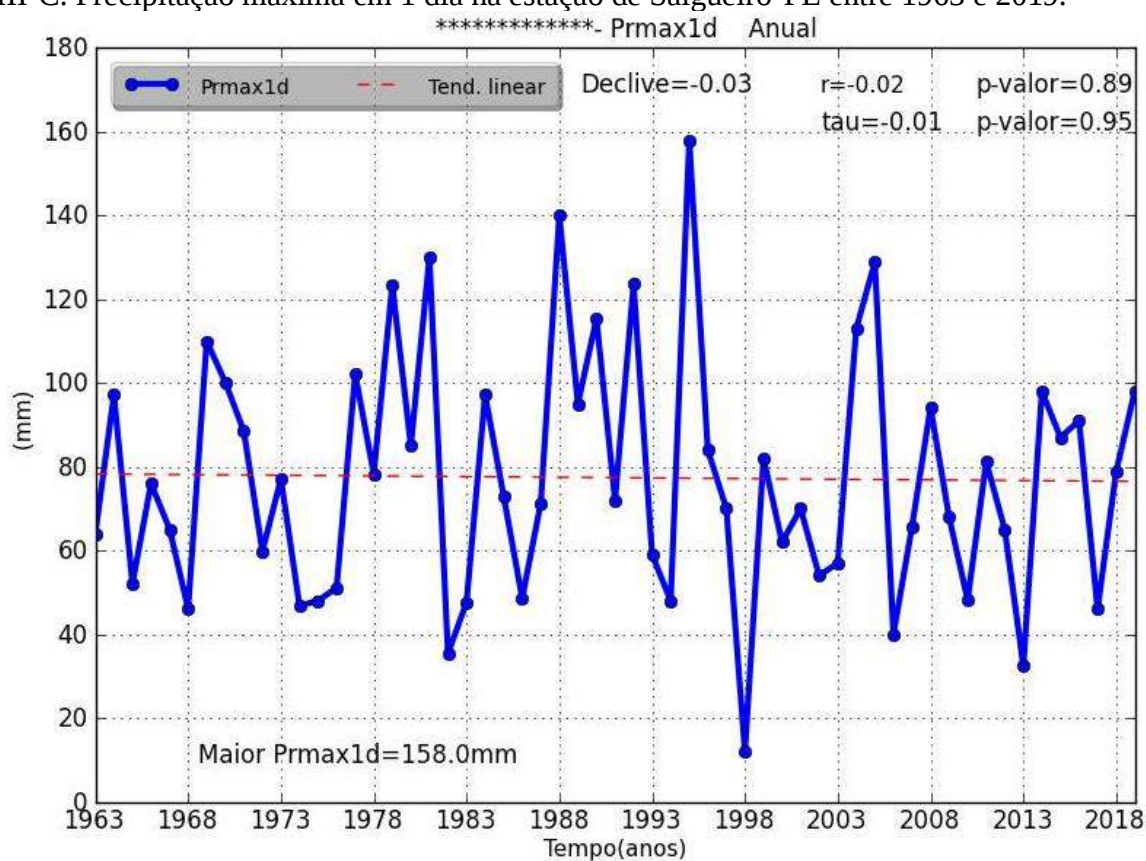
VI-C. Precipitação máxima em 1 dia na estação de Floresta-PE entre 1963 e 2019.



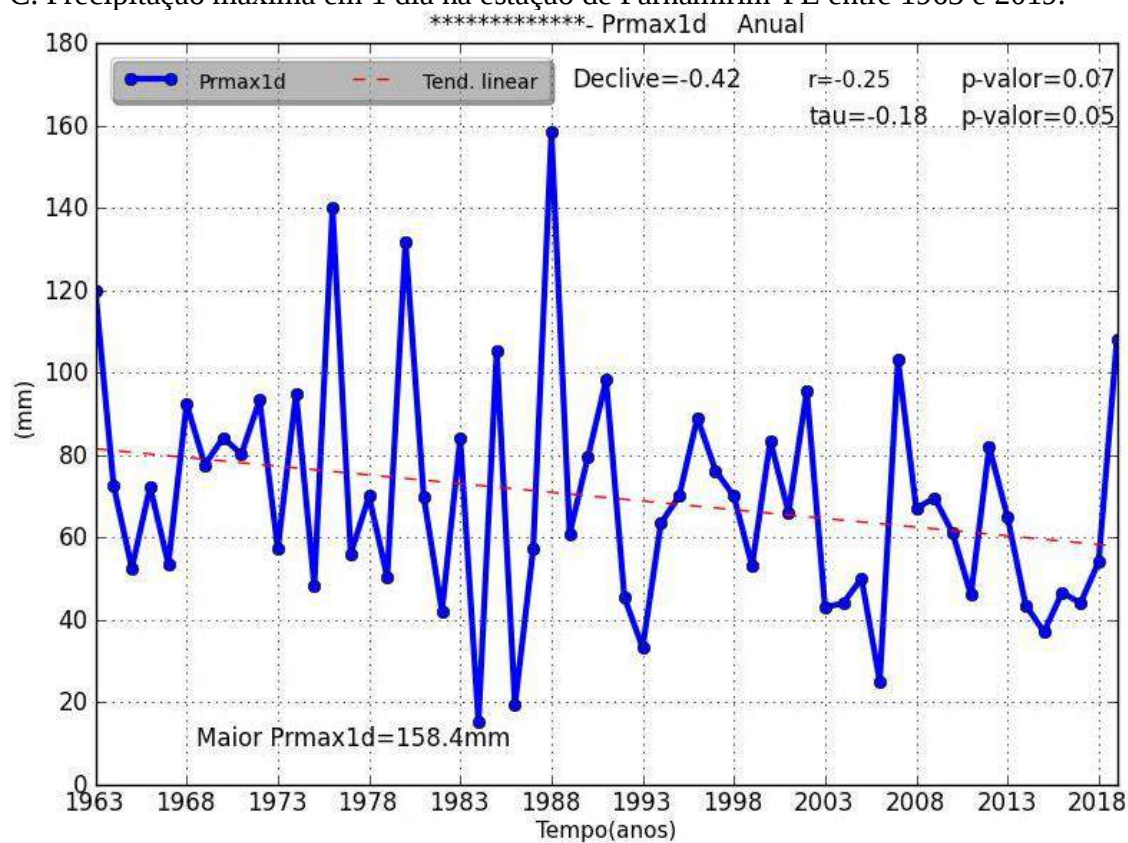
VII-C. Precipitação máxima em 1 dia na estação de Serra Talhada-PE.



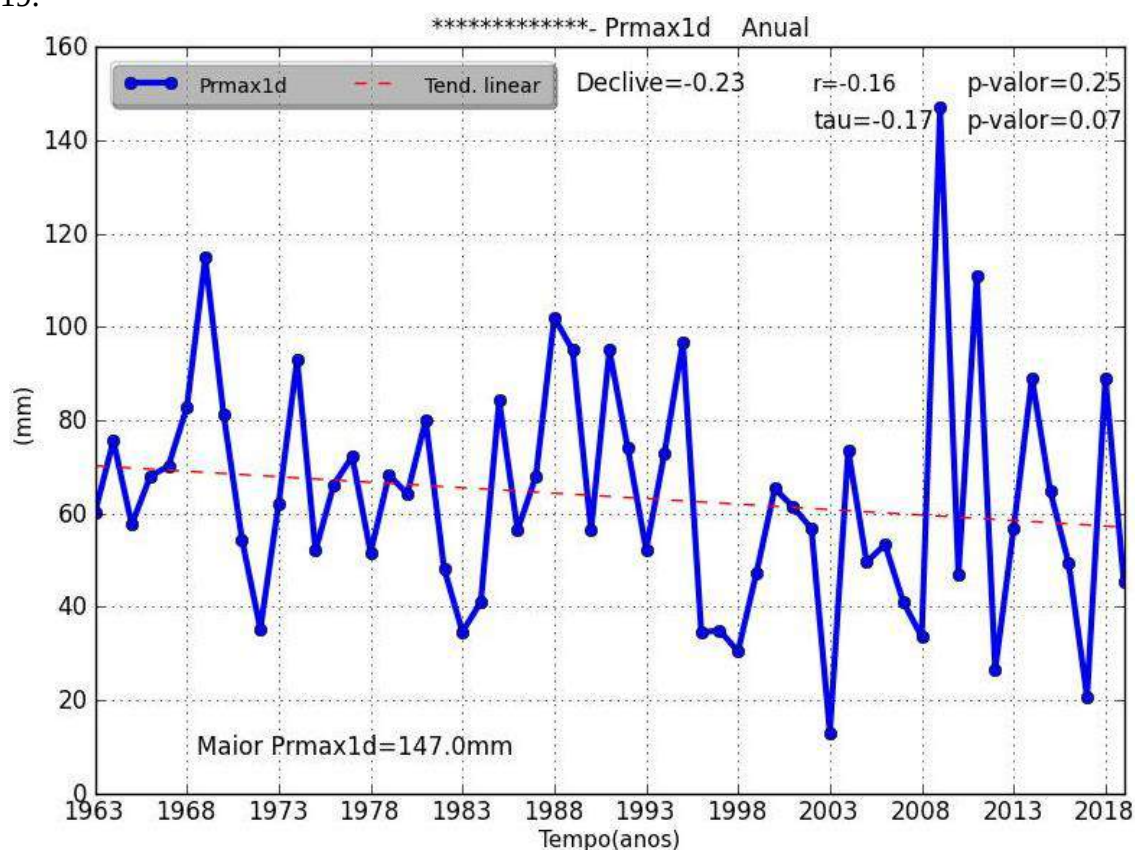
VIII-C. Precipitação máxima em 1 dia na estação de Salgueiro-PE entre 1963 e 2019.



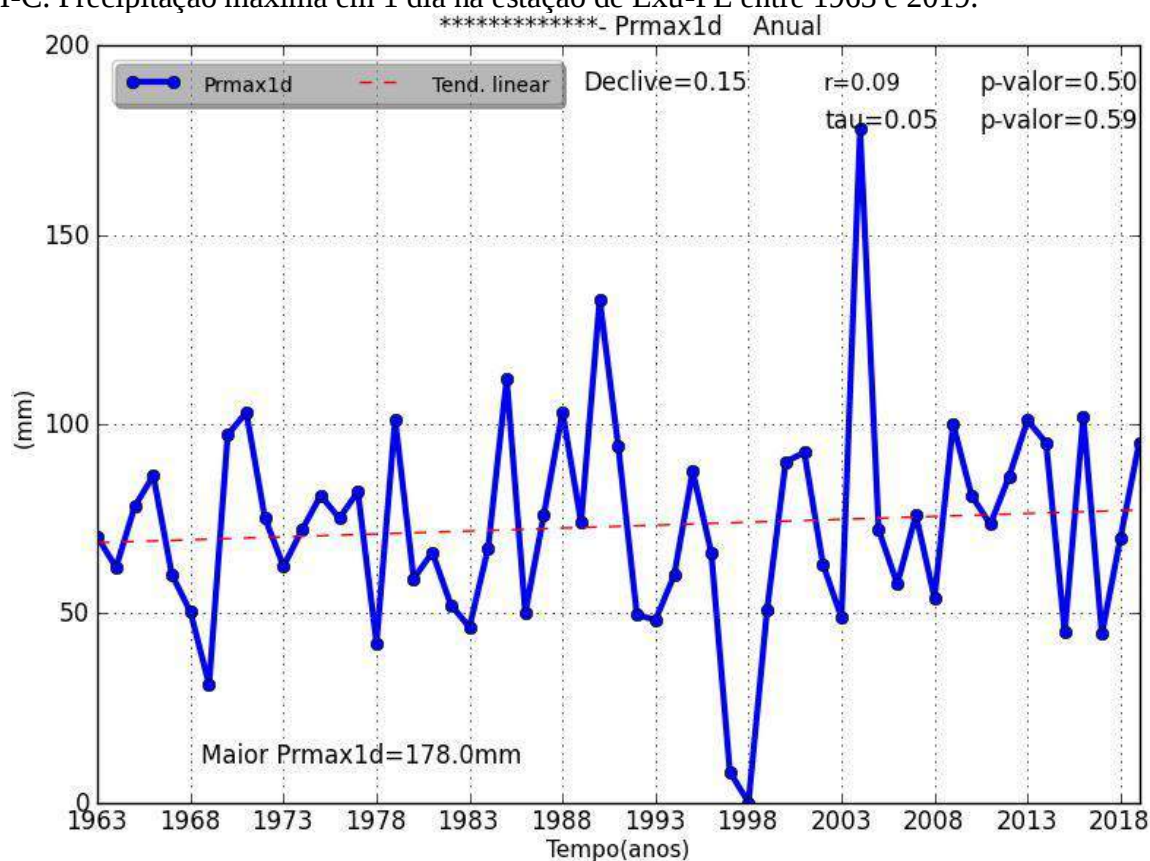
IX-C. Precipitação máxima em 1 dia na estação de Parnamirim-PE entre 1963 e 2019.



X-C. Precipitação máxima em 1 dia na estação de Santa Maria da Boa Vista-PE entre 1963 e 2019.



XI-C. Precipitação máxima em 1 dia na estação de Exu-PE entre 1963 e 2019.



XII-C. Precipitação máxima em 1 dia na estação de Araripina-PE entre 1963 e 2019.

