

A PRECIPITAÇÃO SOBRE O MARAJÓ-PA: ANÁLISE E TENDÊNCIA AS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Edmir dos Santos Jesus¹

Universidade do Estado do Pará (UEPA)
Belém, PA, Brasil



Altem Nascimento Pontes²

Universidade do Estado do Pará (UEPA)
Belém, PA, Brasil



Nilzele de Vilhena Gomes Jesus³

Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia
Belém, PA, Brasil



Antônio Pereira Junior⁴

Universidade do Estado do Pará (UEPA)
Belém, PA, Brasil

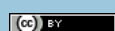


Enviado em 6 jul. 2023 | Aceito em 2 fev. 2025

Resumo: O monitoramento da precipitação de longo prazo desempenha um papel vital na gestão dos recursos hídricos, na prevenção e mitigação de desastres. Na região Amazônica eventos de precipitação extrema causam importantes impactos principalmente aos núcleos de ocupação populacional nas margens dos seus inúmeros rios, que impossibilitam o cultivo de plantações, e deslocamento de saída e o acesso às comunidades para a recebimento de gêneros alimentícios e ajuda médica. Este estudo teve como objetivo identificar a climatologia de precipitação na mesorregião do Marajó, no Pará e avaliar se existe tendência de precipitação significativa, utilizando os dados do *Climate Prediction Center* (CPC) pertencente ao *National Center Environmental Prediction* (NCEP) que contém dados de precipitação medidos em superfície e estimados por satélite. O período de estudo foi de 1979 a 2020 e este conjunto de dados foi utilizado devido a baixíssima densidade de pluviômetros na região. Foi aplicada a metodologia proposta por Mann-Kendall (MK) que é o teste mais apropriado para analisar as alterações climáticas em séries climatológicas. Com relação aos índices de tendência a redução e aumento da precipitação sobre a região, viu-se que na maior parte da região houve tendência de redução no volume de chuvas, tanto na escala anual, quanto na sazonal durante o período analisado.

Palavras-chave: Mann Kendall, Clima, testes não paramétricos.

1. Doutor, Meteorologista. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais na Universidade do Estado do Pará. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4383-5353>. E-mail: edmir.jesus@gmail.com.
2. Doutor, Físico. Universidade do Estado do Pará. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9001-4603>. E-mail: altempontes@gmail.com.
3. Doutora, Meteorologista. Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia – Belém. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9744-5799>. E-mail: nilzele.jesus@sipam.gov.br.
4. Doutor, Biólogo. Universidade do Estado do Pará. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6241-985XX>. E-mail: antonio.junior@uepa.br.



Este artigo está licenciado com uma licença Creative Commons – Atribuição 4.0 Internacional.

PRECIPITATION OVER MARAJÓ-PA: ANALYSIS AND TREND OF CLIMATE CHANGES

Abstract: Long-term precipitation monitoring plays a vital role in water resource management, disaster prevention, and mitigation. In the Amazon region, extreme precipitation events have significant impacts, particularly on population centers along its numerous rivers, which hinder crop cultivation and the movement to and access from communities for receiving food supplies and medical aid. This study aimed to identify the precipitation climatology in the Marajó mesoregion in Pará and assess whether there is a significant precipitation trend, using data from the Climate Prediction Center (CPC) of the National Center for Environmental Prediction (NCEP), which contains precipitation data measured at the surface and estimated by satellite. The study period was from 1979 to 2020, and this dataset was used due to the very low density of rain gauges in the region. The methodology proposed by Mann-Kendall (MK) was applied, which is the most appropriate test for analyzing climate changes in climatological series. Regarding the trend indices for the decrease and increase in precipitation over the region, it was observed that in most of the region there was a trend of reduced rainfall, both on an annual and seasonal scale during the analyzed period.

Keywords: Mann-Kendall (MK), Climate, non-parametric tests.

LA PRECIPITACIÓN SOBRE EL MARAJÓ-PA: ANÁLISIS Y TENDENCIA DE LOS CAMBIOS CLIMÁTICOS

Resumen: El monitoreo de la precipitación a largo plazo desempeña un papel vital en la gestión de los recursos hídricos, en la prevención y mitigación de desastres. En la región amazónica, los eventos de precipitación extrema causan impactos importantes principalmente en los núcleos de ocupación poblacional en las márgenes de sus numerosos ríos, lo que imposibilita el cultivo de plantaciones y dificulta la salida y el acceso de las comunidades para recibir alimentos y asistencia médica. Este estudio tuvo como objetivo identificar la climatología de precipitación en la mesorregión del Marajó, en Pará, y evaluar si existe una tendencia de precipitación significativa, utilizando los datos del Climate Prediction Center (CPC) del National Center for Environmental Prediction (NCEP), que contiene datos de precipitación medidos en superficie y estimados por satélite. El período de estudio fue de 1979 a 2020 y se utilizó este conjunto de datos debido a la muy baja densidad de pluviómetros en la región. Se aplicó la metodología propuesta por Mann-Kendall (MK), que es la prueba más apropiada para analizar los cambios climáticos en series climatológicas. Con respecto a los índices de tendencia de reducción y aumento de la precipitación sobre la región, se observó que en la mayor parte de la región hubo una tendencia a la reducción del volumen de lluvia, tanto a escala anual como estacional, durante el período analizado.

Palabras clave: Mann-Kendall (MK), clima, prueba no paramétrica.



Introdução

Nos últimos anos, muito tem se discutido sobre as mudanças climáticas e suas consequências, as quais seriam altamente danosas à humanidade. Os relatórios publicados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), mostraram que os regimes pluviométricos de várias áreas do planeta estão sendo modificados, com indícios de aumento dos eventos extremos, tanto de secas quanto de excesso de chuvas. Para a região nordeste da América do Sul é esperado que haja o aumento tanto da intensidade, quanto da frequência de precipitações extremas e de inundações pluviais, assim como também é esperado um aumento na duração dos períodos de seca (IPCC, 2021).

Um dos principais problemas decorrentes das mudanças climáticas na Amazônia é a alteração nos padrões de precipitação e temperatura do ar. Pesquisas indicam que a região tem experimentado um aumento das temperaturas médias e mudanças significativas nos regimes de chuvas, com secas mais frequentes e intensas, além de períodos de chuvas concentradas (MARENGO et al. 2011). Essas alterações podem desestabilizar os ecossistemas amazônicos, afetando a dinâmica das florestas, a sobrevivência de espécies e a regeneração da vegetação, o que pode, eventualmente, levar ao "dieback" da floresta, um processo no qual grandes áreas da Amazônia poderiam se converter em savanas (COX et al. 2004). Além dos impactos ambientais, as mudanças climáticas na Amazônia têm profundas implicações sociais. Os povos indígenas e ribeirinhas, que dependem da floresta para sua subsistência, são particularmente vulneráveis. As mudanças nos padrões de chuva e a degradação

dos ecossistemas afetam diretamente a agricultura, a pesca e o acesso à água potável, colocando em risco a segurança alimentar e a saúde dessas populações (BRONDÍZIO et al. 2009).

Na Amazônia, os eventos de precipitação extrema causam importantes impactos principalmente aos núcleos de ocupação populacional nas margens dos seus inúmeros rios, pois as enchentes e inundações impossibilitam o cultivo de plantações, impedindo inclusive a saída e o acesso das comunidades para a obtenção de mantimentos e recebimento de ajuda (CARNEIRO e RIBEIRO, 2020). A exemplo destes impactos tem-se o caso da grande cheia de 2009, citada por Marengo et al. (2010), que atingiu a população ribeirinha, afetando o abastecimento e suprimentos para essas comunidades (OLIVEIRA et al. 2012).

A região do Marajó, no estado do Pará, apresenta um dos maiores volumes pluviométricos do Brasil, com acumulados de chuva anual em torno de 3.000 mm (INMET, 2021). Os acumulados tendem a decrescer de nordeste para sudoeste, decorrente da maneira como se originam os sistemas de circulação ao penetrarem a região (FIGUEROA e NOBRE, 1990; FISCH et al. 1998; GRIMM, 2011).

Segundo Marengo et al. (2001) a maior parte dessa precipitação anual ocorre entre as estações de verão e de outono, tipicamente de dezembro a maio, em associação aos padrões de circulação atmosférica quase-estacionários de grande escala associados principalmente à Zona de Convergência Intertropical - ZCIT (SOUZA e ROCHA, 2006; REIS RIBEIRO, VITORINO e MOURA, 2023). Além da ZCIT, a precipitação no norte da Amazônia também sofre influência de outros sistemas meteorológicos como: Vórtice Ciclônico de Altos Níveis - VCAN (GAN e KOUSKY, 1986; LOPES et al. 2013), Linhas de Instabilidade (LI) e brisa marítima (COHEN et al. 1995). Ademais, os padrões oceano-atmosfera de grande escala que são os ciclos do El Niño Oscilação Sul (ENOS) sobre o Oceano Pacífico e as fases do gradiente meridional inter-hemisférico de anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) sobre o Oceano Atlântico intertropical (NOBRE e SHUKLA, 1996; SOUZA et al. 2000) são um dos principais moduladores de precipitação na região.

Estudos apontam tendência de mudanças climáticas na Amazônia. Autores como Albuquerque et al. (2010) analisaram os dados de precipitação observada convencionalmente e interpolada no espaço, no estado do Pará, de 1978 a 2010, e verificaram uma tendência linear de diminuição de precipitação anual em todas as mesorregiões paraenses. Brito et al. (2014) estudaram diferentes tipos de eventos extremos de precipitação na Amazônia, analisando frequência, intensidade e a contribuição para a climatologia da precipitação acumulada, para o período de 1998 a 2013, e observaram que os extremos de precipitação produziram mais chuvas nos últimos sete anos, atingindo um máximo durante o biênio 2011-2012. Santos et al. (2015) analisaram a tendência da precipitação diária para a Amazônia Brasileira e mostraram que houve tendências significativas no aumento do número de dias com precipitação extrema no noroeste da Amazônia e diminuição do número de dias com precipitação extrema no sul da região. Souza et al. (2017) investigaram os padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia Oriental, usando o teste de Mann-Kendall nos dados de 30 estações meteorológicas nos estados do Pará, Maranhão e Tocantins no período de 1974 a 2014 e seus resultados identificaram sinais de aumento sistemático de precipitação particularmente no oeste, centro e nordeste do Pará, além do norte do Tocantins. Para o regime seco, houve sinais de tendências positivas significantes na direção oeste/sudeste do Pará, contudo ressaltam-se os padrões de neutralidade (sem tendências) em grande parte do Maranhão e alguns setores do norte/nordeste do Pará.

Junior, Jesus e Gomes Jesus (2022) avaliaram a existência de tendência de mudanças climáticas para Dom Eliseu-PA, o qual, aplicaram o teste de Mann-Kendall nos dados anuais de PRP e viram que a climatologia da precipitação apresentou dois períodos distintos, de dezembro a maio a

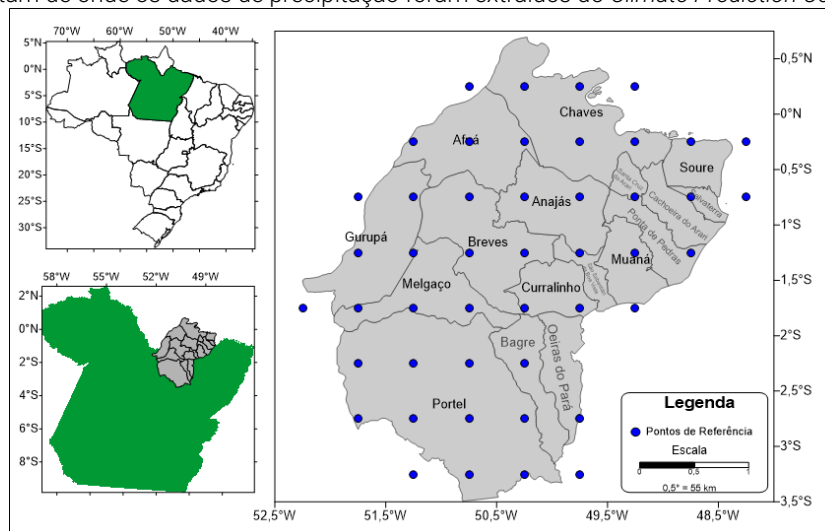
estação chuvosa e de junho a novembro a estação seca, com média anual de 1.640 mm. Sendo que a precipitação anual apresentou tendência significativa de redução, e passível de ser considerada como indício de mudanças climáticas.

Portanto, as investigações científicas apontam a existência de tendência de eventos extremos na Amazônia, todavia como a distribuição de precipitação apresenta uma grande variabilidade espaço-temporal na região, há a necessidade de estudos mais detalhados em regiões específicas. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi analisar a climatologia de precipitação na mesorregião do Marajó no Pará e avaliar se existe tendência de precipitação significativa na região.

Material e métodos

Foram utilizados os dados de precipitação do banco de dados da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), através do *Climate Prediction Center* (CPC), que consiste em uma densa rede observacional ao redor do mundo, interpolada em uma grade de 0,5° (latitude) x 0,5° (longitude) (SILVA et al. 2007). A região de estudo foi o arquipélago do Marajó localizado a nordeste do Pará (Figura 1) devido a pouca quantidade de medições convencionais com série histórica longa igual ou superior a 30 anos adequada para estudos climatológicos; além disso, a série de dados do CPC para a região não apresenta falhas, o que foi outro ponto determinante para a escolha desse conjunto de dados para o presente estudo. Os dados de precipitação extraídos foram diários (https://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/CPC_UNI_PRCP), os quais, foram gerados com base em observações coletadas em plataformas orbitais de satélites (*Geostationary Operational Environmental Satellites*-GOES, METEOSAT, *Geostationary Meteorological Satellite*-GMS, satélites da série *Defense Meteorological Satellite Program*), através de imageadores nos canais infravermelho e microondas, sendo interpolados pelo método de krigagem com os dados de estações de observações de superfícies.

Figura 1 - Localização geográfica da mesorregião do Arquipélago do Marajó no estado do Pará. Os pontos de referência representam de onde os dados de precipitação foram extraídos do *Climate Prediction Center* (CPC).



Fonte: Elaborado pelos Autores (2024)

Os dados do CPC foram tabulados em totais anuais e sazonais, como nos trimestres dezembro-janeiro-fevereiro (DJF), março-abril-maio (MAM), junho-julho-agosto (JJA), setembro-outubro-

novembro (SON) de precipitação no período de janeiro de 1979 a dezembro de 2020, calculando a média aritmética e obtendo assim a climatologia de precipitação dado o conjunto de dados.

Para avaliar a existência de tendência nas séries de precipitação no Marajó, foi aplicado o teste de Mann-Kendall (MK) que consiste em uma técnica estatística não-paramétrica, o qual detecta tendências em séries temporais, ajudando a identificar padrões de aumento ou diminuição em variáveis ambientais (Goossens e Berger, 1986).

O teste de MK compara cada valor da série temporal com os valores restantes, em ordem sequencial, contando o número de vezes em que os termos restantes são maiores que o valor analisado. O método descreve a tendência de uma série temporal de dados, sendo apropriado para casos em que a tendência possa ser assumida como consistente (ou ainda, crescente ou decrescente); portanto, não apresentam qualquer ciclo sazonal ou outra tendência nos dados das observações $x_1, x_2, \dots, x_n$ de uma série temporal. No teste de MK, deseja-se testar a hipótese nula, H_0 , de não existência de tendência, ou seja, as observações x_n são aleatoriamente ordenadas no tempo, contra a hipótese alternativa, H_1 , em que há uma tendência de aumento ou redução (MANN, 1945; KENDALL, 1975). O sinal do teste de MK (S) e sua variância (Var) são definidos de acordo com as equações 1 e 2, respectivamente.

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

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (2)$$

Sendo x_j e x_i valores sequenciais, n é o número de observações e, o sinal obtido da seguinte forma:

$$\text{ sinal } (x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & \text{ se } (x_j - x_i) > 0 \\ 0, & \text{ se } (x_j - x_i) = 0 \\ -1, & \text{ se } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

O valor da estatística de MK é dado por:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}, & \text{ se } S > 0 \\ 0, & \text{ se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}}, & \text{ se } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Folhes e Fisch (2006), Sanches et al. (2013; 2014), Vilanova (2014) sugeriram que ao aplicar o teste de MK, deve-se adotar um nível de significância estatística $\alpha = 0,05$. Dessa forma, valores de Z fora do intervalo $[-1,96; +1,96]$ seriam considerados como tendências significativas de aumento (se $> +1,96$) ou de redução (se $< -1,96$).

Demais cálculos feitos para esta metodologia referem-se, primeiramente, ao nível de significância da tendência porventura detectada, obtido através da comparação com o *valor p*. O valor de p para os dados da amostra pode ser estimado pela probabilidade acumulada da distribuição normal, considerando que se for maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$, aceita-se a hipótese h_0 . Do contrário, a hipótese nula é rejeitada e admite-se que há tendência de aumento ou redução na variável de estudo. Em segundo, o valor τ (tal), calculado através da equação 5 que representa a

medida da força da tendência, em que assume um valor entre -1 e $+1$, onde o sinal indica a direção da tendência.

$$\tau = \frac{2s}{[n(n-1)]} \quad (5)$$

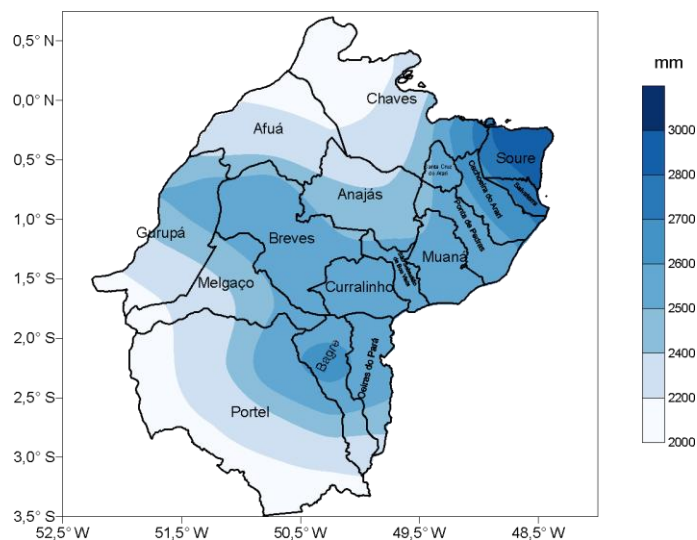
Em que n representa é o número de observações e s o sinal como descrito na equação 1.

Os resultados estatísticos foram feitos utilizando do Software RStudio e em seguida confeccionados em mapas utilizando do Golden Software Surfer versão 13.

Resultados e discussões

A Figura 2 mostra a distribuição espacial média anual (no período de 1979 a 2020) sobre a mesorregião do Marajó que apresenta elevados volumes em todo o seu território, totalizando entre 2.000 e 3.500 mm, e diminuindo de forma gradativa nas direções leste-oeste e nordeste-sudoeste. Os menores valores de chuva ocorrem entre os municípios de Chaves e Afuá, além dos extremos a sudoeste dos municípios de Gurupá, Melgaço e Portel. Os maiores volumes de chuva no cômputo médio anual ocorreram em Soure. Estes elevados volumes se deram principalmente pelos sistemas de grande escala que atuam no período chuvoso como a ZCIT e a borda do VCAN, além dos sistemas precipitantes formados a partir da circulação de brisas marítimas, a destacar as linhas de instabilidade (COHEN et al. 1995, LOPES et al. 2013).

Figura 2 - Precipitação anual para a mesorregião do Marajó-PA. Período de dados: 1979 a 2020 (CPC/NCEP)

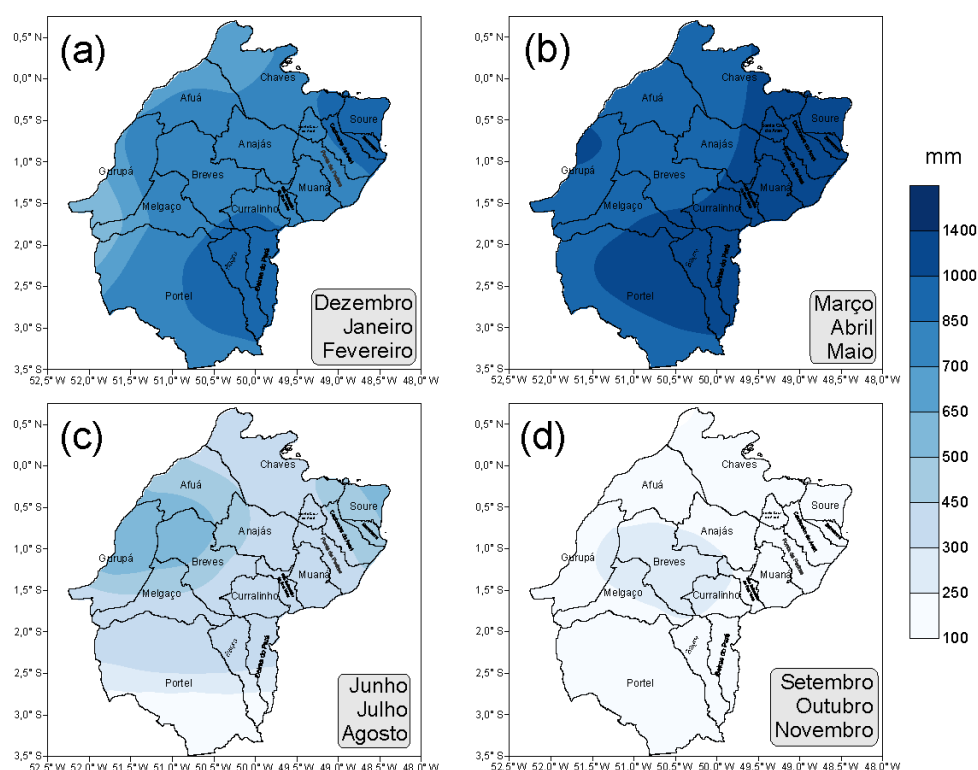


Fonte: Elaborado pelos Autores (2024)

A climatologia de precipitação sazonal da mesorregião do Marajó indica que a região seja caracterizada por dois períodos distintos: a estação chuvosa, que abrange os trimestres DJF e MAM; e estação menos chuvosa nos trimestres de JJA e SON (Figuras 3a-d). Os maiores acumulados de

precipitação ocorreram em MAM, nos setores nordeste e sudeste do Marajó, nas imediações de Soure e Bagre, com acumulados entre 1.100 mm a 1.400 mm (Figura 3b). O principal sistema meteorológico responsável pelos elevados acumulados de chuva em MAM é a Zona de Convergência Intertropical (MARENGO et al. 2001), (SOUZA e ROCHA, 2006; REIS RIBEIRO, VITORINO e MOURA, 2023), pois nesses meses o sistema encontra-se em sua posição mais ao sul. Além desse sistema, há também o VCAN, cuja borda pode causar elevados volumes de chuvas na região durante o verão e outono austral (GAN e KOUSKY, 1986; LOPES et al. 2013).

Figura 3 - Precipitação sazonal para a mesorregião do Marajó para os trimestres: (a) dezembro-janeiro-fevereiro, (b) março-abril-maio, (c) junho-julho-agosto e (d) setembro-outubro-novembro. Período de dados: De 1979 a 2020 (CPC/NCEP)



Fonte: Elaborado pelos Autores (2024)

O trimestre SON (Figura 3d) como sendo o menos chuvoso, mostra acumulado sazonal de precipitação entre 100 e 200 mm nas regiões norte e sul da região; e de 200 a 300 mm ao centro do arquipélago. Nesse período a ZCIT já se encontra na sua posição acima da linha do equador e os sistemas atuantes nessas regiões passam a ser as Linhas de Instabilidade, brisa marítima e a convecção local. De forma que a climatologia anual e sazonal está coerente com a climatologia proposta por Figueroa e Nobre (1990) e INMET (2021).

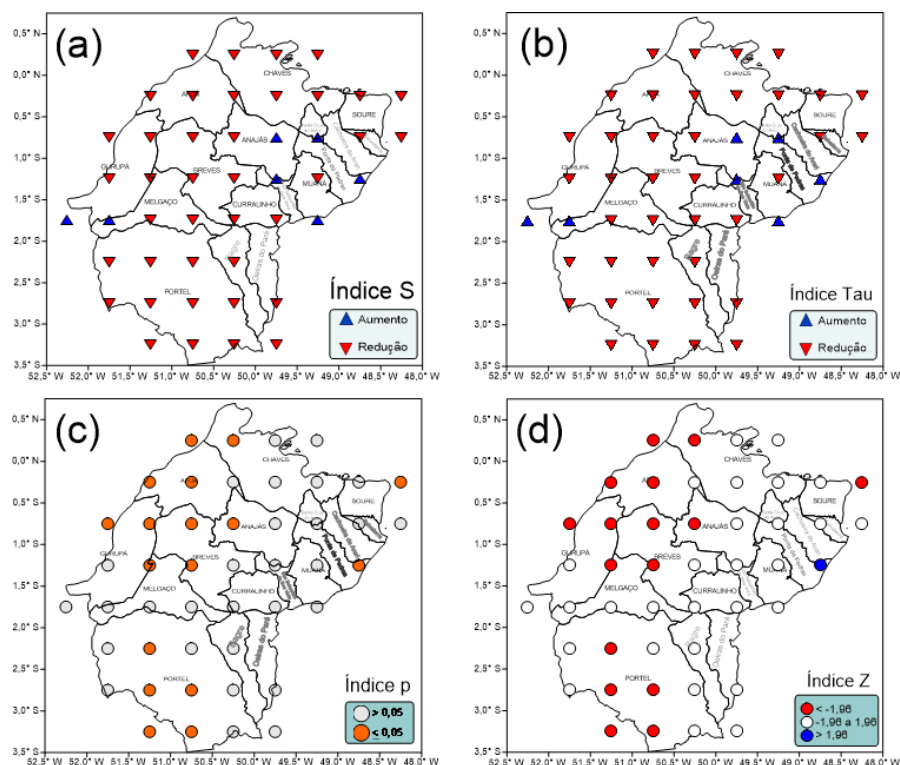
Tendência da precipitação anual

A aplicação do teste de MK nos dados anuais de precipitação do Marajó evidenciou decréscimo temporal, ou seja, os valores de tau e S foram negativos nos pontos de grade da região oeste e sul (Figuras 4a-b). Essa tendência de redução da precipitação foi significativa, sendo representada pelos valores da variável p menores que α (0,05), conforme mostra a Figura 4c. Essas regiões que apresentaram tendência de redução de precipitação, também apresentaram valor de Z inferiores a -1,96, ratificando os resultados obtidos com S e τ (Figura 4d).

Na região leste do Marajó, dois pontos de grade de precipitação também apresentaram tendência significativa (p menor que 0,05), mais precisamente sobre o município de Soure, com tendência de redução de precipitação. Outro ponto com tendência significativa localizou-se sobre Ponta de Pedras, sendo o único local da região que apresentou um aumento de precipitação, com valor de S negativo e Z maior que -1,96. Nos demais pontos analisados, as tendências de precipitação anual não foram significativas.

Em comparação aos resultados obtidos por Albuquerque et al. (2010), os quais analisaram dados de precipitação obtidos por medições convencionais e interpolados espacialmente no período de 1978 a 2010, verificaram uma tendência de diminuição sobre o Marajó. Santos et al. (2015) verificaram que não havia tendência significativa na precipitação, porém, os mesmos utilizaram dos dados de uma única estação meteorológica (único ponto), que para contornar a situação da escassez de registros convencionais utilizaram dos dados provenientes do CPC.

Figura 4 - Estatística do teste de Mann-Kendall da precipitação anual no Marajó-PA com (a) índice S , (b) índice τ , (c) índice p e (d) índice Z

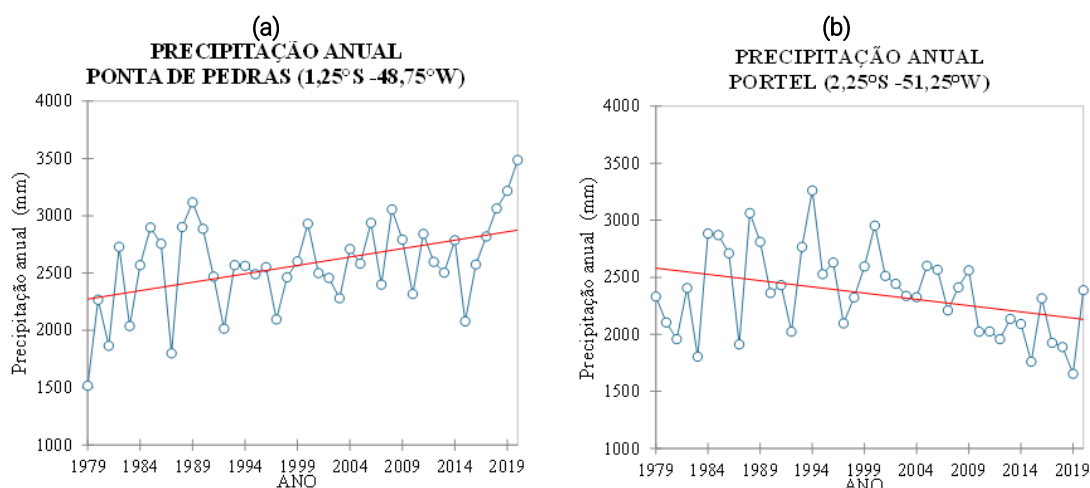


Fonte: Elaborado pelos Autores (2024)

Para ratificar os resultados encontrados na análise espacial das variáveis de tendência da precipitação anual, as Figuras 5a-b mostram a distribuição anual da precipitação sobre o município de Ponta de Pedras, cuja tendência foi positiva e significativa, assim como sobre o município de Portel.

Os acumulados anuais de precipitação de 1979 a 2020 sobre Ponta de Pedras variaram entre 1.518 mm no ano de 1979 a 3.487 mm no ano de 2020, apontando de fato para um aumento de precipitação ao longo do período analisado, conforme indica a reta de tendência linear. Em Portel o mínimo da série temporal de precipitação anual ocorreu no ano de 2019, com 1.655 mm e o máximo em 1988, com 3.260 mm, indicando a tendência de redução de precipitação ao longo do período analisado.

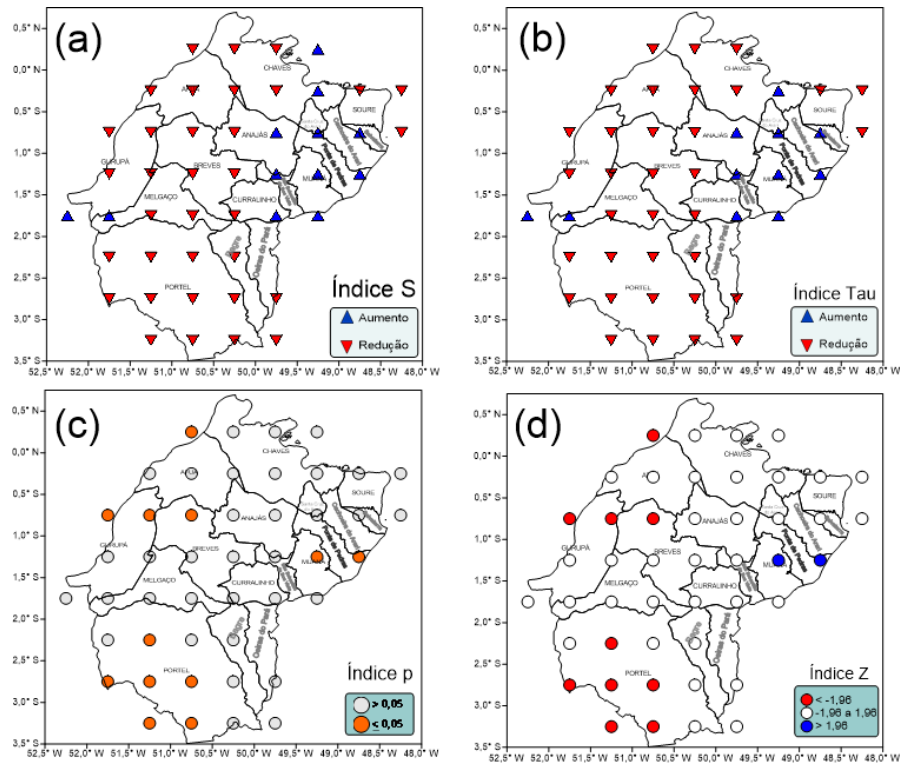
Figura 5 - Precipitação anual em (a) Ponta de Pedras e (b) Portel para o período de 1979 a 2020. A linha vermelha representa a tendência.



Tendência da precipitação sazonal

As Figuras 6a-d mostram a distribuição espacial local dos índices S , Tau , p e Z para o trimestre DJF, respectivamente. De forma geral, toda a região ocidental e sul do Marajó apresentou tendência de redução da precipitação, enquanto as regiões nordeste e leste da região tiveram tendência de aumento, a exceção de alguns pontos no entorno do município de Soure que mostraram baixa na tendência.

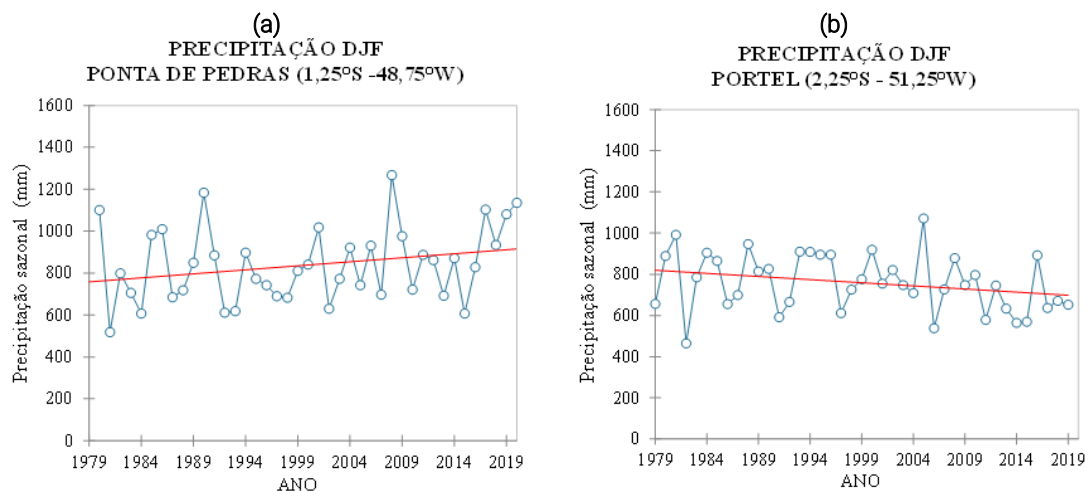
Figura 6 – Estatística do teste de Mann-Kendall da precipitação trimestral (dezembro-janeiro-fevereiro) com (a) índice S, (b) índice Tau, (c) índice p e (d) índice Z.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2024)

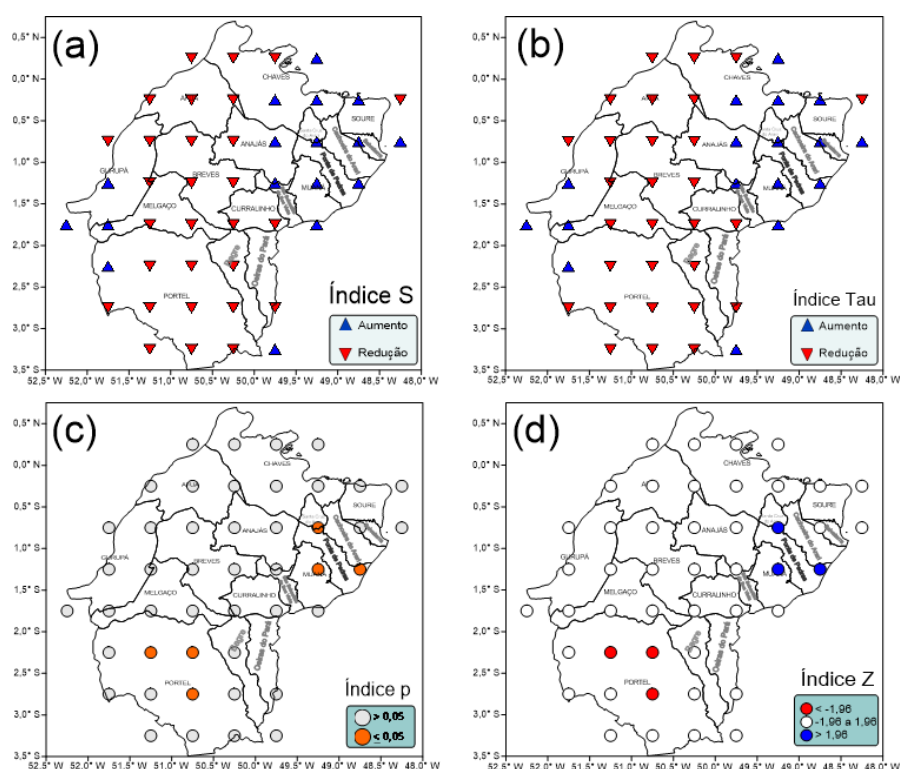
A Figura 7a destaca os acumulados de precipitação anual no município de Ponta de Pedras, os quais, variaram de 518 mm (ano de 1981) a 1.267 mm (ano de 2008), corroborando na existência de aumento na tendência linear. Ao contrário do município de Portel (Figura 7b), em que o valor mínimo (465 mm) ocorreu no ano de 1983 e o valor máximo de 1.070 mm no ano de 2006, demonstrando redução na tendência linear da precipitação.

Figura 7 – Precipitação sazonal (dezembro-janeiro-fevereiro) em (a) Ponta de Pedras e (b) Portel para o período de 1979 a 2020. A linha vermelha é a tendência.



A Figura 8 mostra o trimestre mais chuvoso, com tendência de redução na precipitação identificados na região norte, centro e sul, exceto a região leste e extremo oeste obtiveram tendência de aumento. As tendências mais significativas, representadas pelos resultados dos índices p (Figura 8c) e Z (Figuras 8d) foram dos pontos em Portel (com tendência de redução), e com tendência significativa de aumento em Muaná e nas imediações de Ponta de Pedras. Ressalta-se que o trimestre MAM apresentou menos pontos de tendência significativa quando comparado aos resultados de DJF.

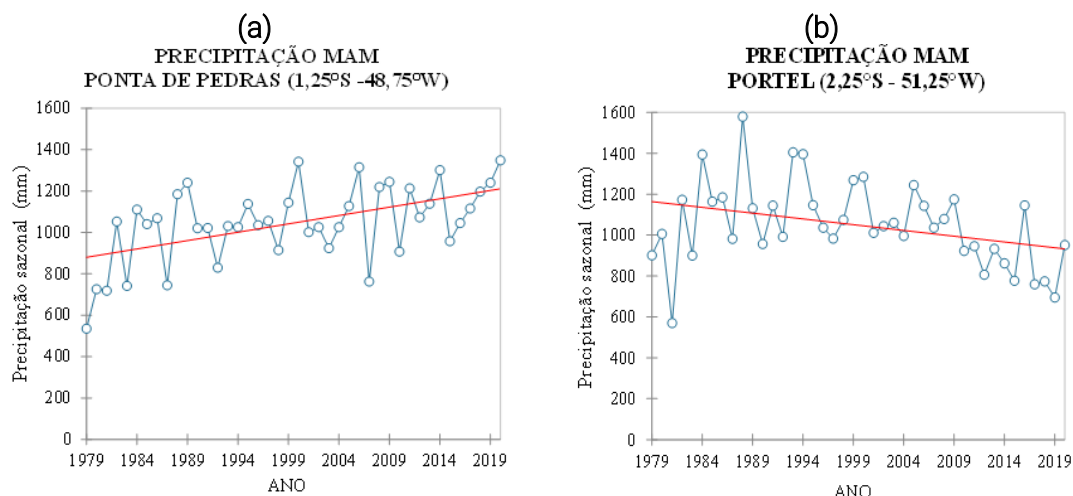
Figura 8 - Estatística do teste de Mann-Kendall da precipitação trimestral (março-abril-maio) com (a) índice S, (b) índice Tau, (c) índice p e (d) índice Z



Fonte: Elaborado pelos Autores (2024)

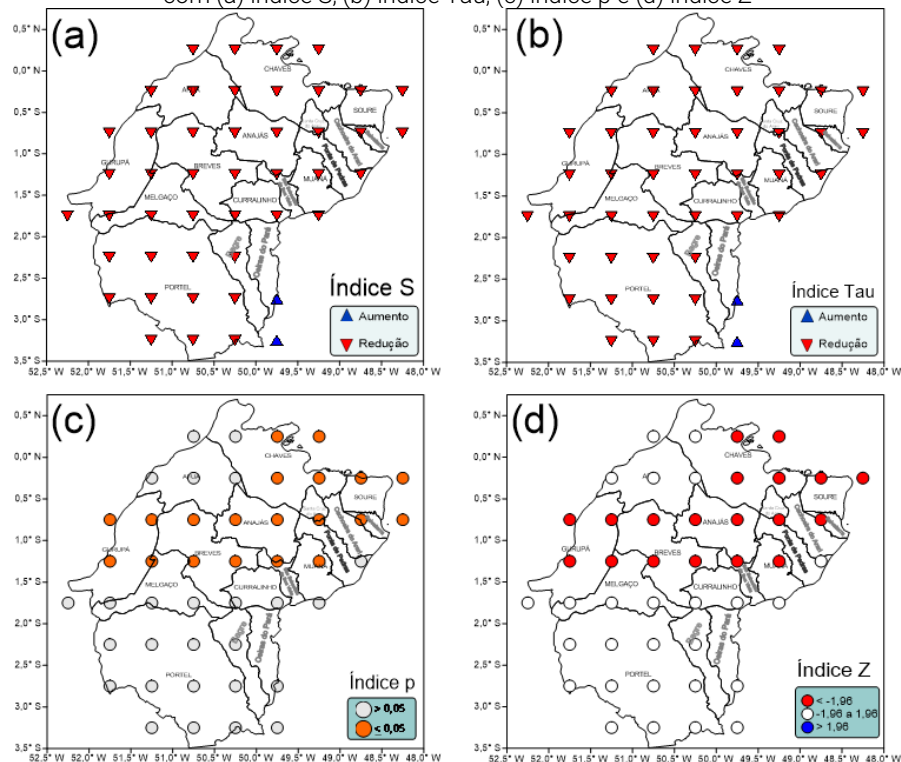
As Figuras 9a-b mostram a distribuição temporal de precipitação do trimestre MAM de dois pontos que apresentaram tendência significativa positiva (Ponta de Pedras) e negativa (Portel). Em Ponta de Pedras, o valor mínimo (535 mm) de precipitação ocorreu no ano de 1979, e máximo com 1.348 mm (Ano de 2020). Por outro lado, em Portel a série sazonal teve tendência de redução na precipitação, com valor mínimo (570 mm) no ano de 1981 e máximo (1.579 mm) no ano de 1988.

Figura 9 - Precipitação sazonal (março-abril-maio) em (a) Ponta de Pedras e (b) Portel para o período de 1979 a 2020. A linha vermelha representa a tendência



O trimestre JJA apresentou tendência de redução de precipitação em grande parte da região como mostra a Figura 10. Nesse trimestre houve uma diferença na distribuição espacial dos pontos que apresentaram tendências significativas em relação à análise feita para a precipitação anual e os trimestres chuvosos. Verificou-se que todas as tendências significativas se concentraram no centro e nordeste do Marajó, no entorno de Gurupá, Breves, Melgaço, Anajás, Muaná, Ponta de Pedras, Chaves e Soure, indicando redução de precipitação justamente no período em que se inicia a estação menos chuvosa da região (Figura 10c-d).

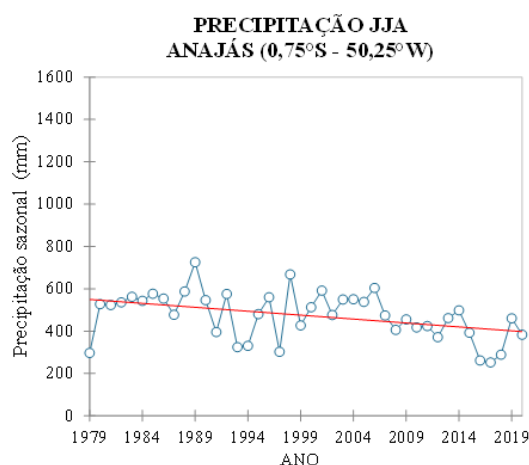
Figura 10 - Estatística do teste de Mann-Kendall da precipitação trimestral (junho-julho-agosto) com (a) índice S, (b) índice Tau, (c) índice p e (d) índice Z



Fonte: Elaborado pelos Autores (2024)

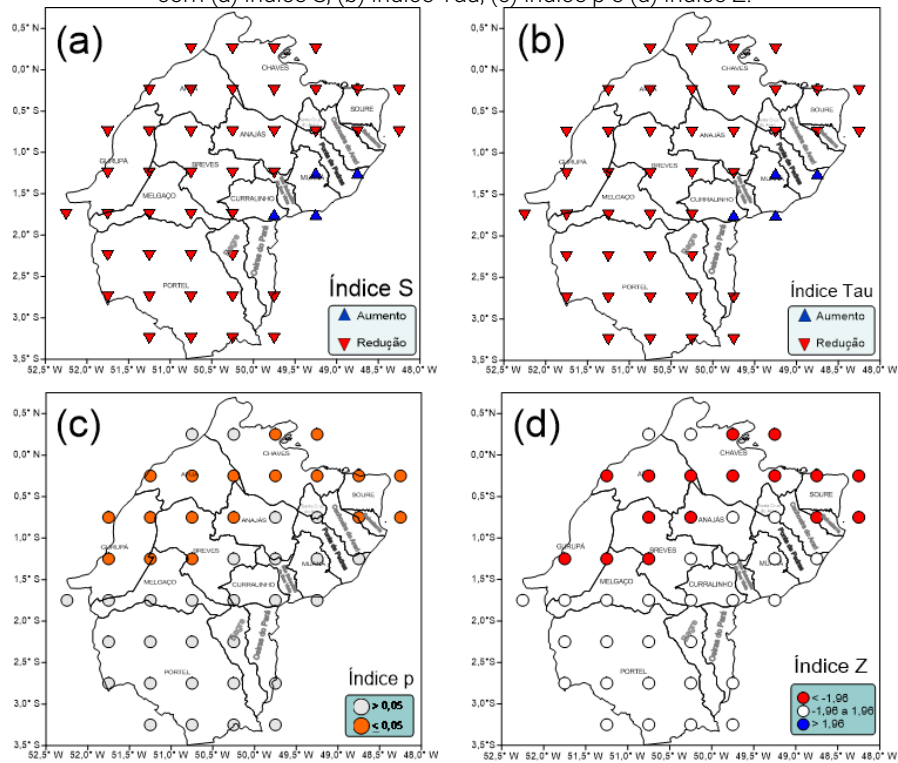
Como todas as tendências significativas foram de redução na precipitação (ver Figura 11), destaca-se apenas um ponto para a análise temporal, o município de Anajás, onde o menor valor acumulado trimestral ocorreu no ano de 2017 (com 251,3 mm) e o máximo com 725,6 mm no ano de 1989. Observa-se que a reta de tendência corrobora com o resultado encontrado através da aplicação do teste de MK, ou seja, houve redução de precipitação sazonal neste município.

Figura 11 – Precipitação sazonal (junho-julho-agosto) em Anajás-PA para o período de 1979 a 2020. A linha vermelha representa a tendência



A Figura 12 representa o auge do trimestre menos chuvoso da região, SON, pois foram verificadas as tendências de redução da precipitação na maior parte do Arquipélago do Marajó. Porém, não de maneira significativa houve a tendência de aumento na região sudeste (em Muaná e Ponta de Pedras) (Figuras 12a-b). Já as tendências significativas se concentraram nos pontos da região norte e oeste e estão associadas à redução de precipitação, como pode ser visto pelos valores de p e Z (Figuras 12c-d).

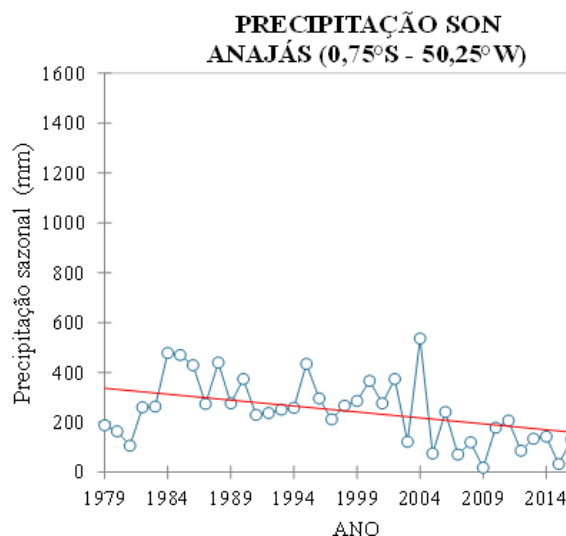
Figura 12- Estatística do teste de Mann-Kendall da precipitação trimestral (setembro-outubro-novembro) com (a) índice S, (b) índice Tau, (c) índice p e (d) índice Z.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2024)

Como no trimestre (SON) (Figura 13) todas as tendências significativas foram negativas, e confirmando este resultado foi utilizada a série temporal de precipitação do período de 1979 a 2020 do trimestre SON para a localidade de Anajás, cujo valor máximo ocorreu no ano de 2004 com volume de 536,1 mm, e mínimo no ano de 2009, com apenas 18,5 mm.

Figura 13 – Precipitação sazonal (setembro-outubro-novembro) em Anajás-PA para o período de 1979 a 2020. A linha vermelha representa a tendência.



Albuquerque et al. (2010) sugeriram que a tendência foi positiva de precipitação sazonal no outono (MAM) para todas as mesorregiões do Pará, incluindo o Marajó, o que não corroborou com

os resultados obtidos neste estudo. Esta diferença deveu-se principalmente pela fonte de dados de precipitação, uma vez que as medições convencionais são escassas na região, o que foi atualizado no presente estudo, devido à utilização dos dados do CPC/NCEP.

Por outro lado, Souza et al. (2017), utilizando apenas de um ponto de dados de precipitação medidos pela estação climatológica convencional em Soure, nordeste do Marajó, verificaram que na estação chuvosa a precipitação apresentava tendência de redução, porém não significativa, estando de acordo com os resultados do trimestre DJF. Já para o período menos chuvoso (ou seco), os seus resultados indicaram neutralidade sobre Soure, enquanto os resultados do presente estudo indicaram que houve uma tendência de redução da precipitação significativa para a mesma região.

Conclusão

Este trabalho identificou diferentes tendências de precipitação variando no espaço e no tempo. Pois, com a climatologia de precipitação sobre o Marajó, identificando os trimestres chuvosos DJF e MAM tendo a atuação da ZCIT como um dos principais sistemas meteorológicos responsáveis pela ocorrência dos elevados volumes de chuva no período do outono austral e os trimestres menos chuvosos JJA e SON pode-se verificar quais as regiões onde as tendências estatísticas foram evidenciadas. Na escala anual e no período chuvoso ficou evidente a tendência de decréscimo da precipitação na região oeste e sul do arquipélago, enquanto que na porção leste marajoara apresentou tendência de aumento. Porém, as tendências significativas foram vistas nas regiões noroeste, sudoeste e leste quando se visualiza os acumulados anual e os trimestres DJF e MAM. No período menos chuvoso (JJA e SON) as tendências significativas de redução da precipitação se concentraram ao norte e centro do arquipélago, resultado preocupante, uma vez que possa causar impactos nas atividades de agricultura e na navegabilidade, o qual dependem do transporte de mantimentos e medicamentos a saúde a toda a região marajoara.

Neste estudo, viu-se que as alterações no regime de precipitação necessitam de investigações complementares e mais profundas, visto que os modelos climáticos de circulação geral da atmosfera apontam como potencializando ou enfraquecendo os mecanismos atmosféricos que geram a precipitação sobre a região. Fatores locais, alterações da cobertura vegetal e degradação ao meio ambiente podem estar contribuindo para as tendências aqui identificadas. As localidades marajoaras que apresentaram tendência significativa de aumento ou redução da precipitação poderão estar mais vulneráveis a fortes impactos adversos quando submetidas aos efeitos de eventos climáticos extremos que tenham o mesmo sinal. Sendo assim, áreas com tendência negativa ou positiva de precipitação estarão muito mais propícias a fortes impactos adversos quando estiverem submetidas a eventos climáticos associados a déficits ou excesso de precipitação.

Portanto, a partir dessas informações, que possam servir de subsídios para novas pesquisas na região marajoara, bem como de ferramentas de auxílio à decisão e preparação da sociedade para a minimização dos possíveis impactos provocados em consequência das alterações nos regimes pluviométricos.

Referências

- ALBUQUERQUE, M. F.; SOUZA, E. B.; OLIVEIRA, M. D. C. F.; SOUZA JÚNIOR, J. A. (2010) Precipitação nas mesorregiões do estado do Pará: climatologia, variabilidade e tendências nas últimas décadas (1978-2008). *Revista Brasileira de Climatologia*, Paraná, v. 6, p.151-168.
- BRONDÍZIO, E. S.; OSTROM, E.; YOUNG, O. R. (2009). Connectivity and the governance of multilevel social-ecological systems: The role of social capital. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 34, p.253-278.
- BRITO, A. L.; VEIGA, J. A. P.; YOSHIDA, M. C. (2014). Extreme rainfall events over the Amazon basin produce significant quantities of rain relative to the rainfall climatology. *Atmospheric and Climate Sciences*, China, v.4, n.2, p.179-191.
- CARNEIRO, K. K. C.; RIBEIRO, P. A. Situações de desastres, enchente dos rios e assistência social: reflexões sobre a realidade de um município amazônico. *Revista Educação e Humanidades*, v. 1, n. 2, p. 255-279, 2020.
- COHEN, J. C. P.; SILVA DIAS, M. A. F.; NOBRE, C. A. (1995) Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: a case study. *Monthly Weather Review*, Boston, v. 123, n.11, p. 3163-3174.
- COX, P. M. et al. Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 78, n. 1-3, p. 137-156, 2004.
- FIGUEROA, S. N.; NOBRE, C. A. (1990) Precipitations distribution over Central and Western Tropical South America. *Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática*, São José dos Campos, v.5, n. 6, p. 36 – 45, 1990.
- FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. (1998) Uma Revisão Geral Sobre o Clima da Amazônia. *ACTA Amazônica*, Manaus, v. 28, n. 2, p. 121-126.
- FOLHES, M. T.; FISCH, G. (2006) Caracterização climática e estudo de tendências nas séries temporais de temperatura do ar e precipitação em Taubaté (SP). *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 1(1),61-71. ISSN: 1980-993X. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92810108>.
- GAN, M. A.; KOUSKY, V. E. (1986) Vórtices ciclônicos da alta troposfera no oceano Atlântico Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Rio de Janeiro, v.1, n.1, p.19-28.
- GOMES, D. L. et al. (2018) Expansão do agronegócio e conflitos socioambientais na Amazônia Marajoara. *Revista Nera*, v. 42, p.135–161.
- GOOSSENS, C.; BERGER, A. (1986) Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. *Annales Geophysicae*, Berlin, v. 4, n. B4, p. 385-400.
- GRIMM, A. M. (2011) Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events and possible effects of climate change. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, California, v.25, n.4, p. 537-554.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) (2022). In *Produção Agrícola Municipal*. 2022. Brasília, Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=destaques>>. Acesso em: 13 ago. 2024
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET) (2022). In ____ *Normais Climatológicas*, Brasília. Disponível em: < <https://clima.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2023.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Synthesis Report (2014). In ____ *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf> Acesso em: 20 dez. 2021.
- JUNIOR, A. P.; JESUS, E. S.; GOMES JESUS, N. V. (2022) Precipitação no sudeste paraense: climatologia, tendência e mudanças climáticas. *Open Science Research VII*. <https://dx.doi.org/10.37885/221010507>
- KENDALL, M.G. (1975) *Rank correlation Methods*. 4.ed. Londres: Charles Griffin. 160p.

- LOPES, M. N. G.; SOUZA, E. B.; FERREIRA, D. B. S. (2013) Climatologia Regional da Precipitação no Estado do Pará. *Revista Brasileira de Climatologia*, Paraná, v. 12, n.9, p. 84-102.
- MANN, H. B. (1945) Non-parametric tests against trend. *Econometria*, New York, v. 13, n. 3, p. 245-259, 1945.
- MARENGO, J. A. et al (2001). Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon basin. *Journal of Climate*, Boston, v. 14, n. 5, p. 833-852.
- MARENGO, J. A. (2009) Long-term trends and cycles in the hydrometeorology of the Amazon basin since the late 1920s. *Hydrological Processes*, New Jersey, v. 23, n. 22, p. 3236- 3244.
- MARENGO, J. et al. (2010). Aquecimento Global e Mudança Climática na Amazônia: Retroalimentação Clima-Vegetação e Impactos nos Recursos Hídricos. *Geophysical Monograph Series*, v. 186, p. 1-24.
- MARENGO, J. A., et al. (2011). The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophysical Research Letters*, v. 38, n. 12, p. 1-5.
- MENEZES, A. J. E. A.; HOMMA, A. K. O.; SCHÖFFEL, E. R. (2012) *Do extrativismo à domesticação: o caso do bacurizeiro no Nordeste Paraense e na Ilha de Marajó*. 1.ed. Belém: Embrapa Amazônia Oriental. 66p.
- NOBRE. P.; SHUKLA, J. (1996) Variations of sea surface temperature, wind stress and rainfall over the tropical Atlantic and South America. *Journal of Climate*, Boston, v.9, n.10, p. 2464-2479.
- OLIVEIRA, V. P.; MAFRA, M. V. P.; SOARES, A. P. A. (2012) Eventos climáticos extremos na Amazônia e suas implicações no município de Manaquiri (AM). *Revista Geonorte*, v. 3, n. 8, p. 977-987.
- PARÁ (Estado). (2015) Diário Oficial do Estado do Pará. Suplemento In: _____. *Plano Plurianual 2016-2019*. Pará. Disponível em: <https://www.ioepa.com.br/pages/2015/12/30/2015.12.30.DOE.suplemento_490.pdf> Acessado em: 06 de jun. 2023.
- REIS RIBEIRO, R. M., VITORINO, M. I., & MOURA, M. do N. (2023). Variabilidade Sazonal da Zona De Convergência Intertropical e sua Influência sobre o Norte da América do Sul. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(5), 2798–2810. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.5.p2798-2810>
- SANCHES, F. O.; VERDUM, R.; FISCH, G. (2013) Estudo de tendência de chuvas de longo prazo. *Rev. Ambiente & Água*, Taubaté, v. 8, n. 3, p. 214-228.
- SANCHES, F. O.; VERDUM, R.; FISCH, G. (2014) Tendência de longo prazo das chuvas diárias no Sudoeste do Rio Grande do Sul: os eventos extremos e a arenização. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 7, n. 6. p. 1100-1109.
- SANTOS, E. B.; LUCIO, P. S.; SILVA, C. M. S. (2015) Análise de tendência da precipitação diária na Amazônia Brasileira. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 8, n. 4. p. 1041-1052.
- SILVA, V. B. S.; KOUSKY, V. E.; SHI, W.; HIGGINS, R. W. (2007) An improved gridded historical daily precipitation analysis for Brazil. *Journal of Hydrometeorology*, Boston, v.8, n. 4, p.847-861.
- SOUZA, E. B.; KAYANO, M. T.; TOTA, J.; PEZZI, L.; FISCH, G.; NOBRE, C. (2000) On the influences of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960-1998. *Acta Amazônica*, Manaus, v. 30, n. 2, p. 305-318.
- SOUZA, E. B.; ROCHA, E. J. P. (2006) Diurnal variations of rainfall in Bragança-PA (eastern Amazon) during rainy season: mean characteristics and extreme events. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, p. 142-152.
- SOUZA, E. B.; FERREIRA, D. B. S.; GUIMARÃES, J. T. F.; FRANCO, V. S.; AZEVEDO, F. T. M.; SOUZA, P. J. O. P. (2017) Padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia Oriental. *Revista Brasileira de Climatologia*, Paraná, v. 21, n. 13, p. 81-93.
- VILA NOVA, M. R. N. (2014) Tendências hidrológicas anuais e sazonais na bacia do rio Paraibuna, Parque Estadual da Serra do Mar (SP). *Sociedade & Natureza*, Uberlândia, v. 26, n. 2, p. 301-316.