

Secas em ascensão e precipitação em declínio na Amazônia: diagnóstico estatístico de extremos climáticos ao longo de quase meio século

Increasing drought and declining precipitation in the Amazon:
a statistical assessment of climate extremes over nearly half a century

Aumento de las sequías y disminución de la precipitación en la Amazonía: diag-
nóstico estadístico de los extremos climáticos a lo largo de casi medio siglo

Sécheresses en hausse et précipitations en baisse en Amazonie : analyse statisti-
que des extrêmes climatiques sur près d'un demi-siècle

Data da submissão: 17 de julho de 2025 **Data da aprovação:** 22 de setembro de 2025

*Nilzele de Vilhena Gomes Jesus¹
Cleber Assis dos Santos²
Letícia Karyne da Silva Cardoso³*

Resumo

Este estudo tem como objetivo identificar mudanças nos padrões de precipitação e na ocorrência de eventos extremos na Amazônia, no período de 1979 a 2024. As análises foram regionalizadas em cinco sub-regiões: Noroeste (NW), Nordeste (NE), Oeste (W), Leste (E) e Sudeste (SE). Utilizou-se de dados mensais de precipitação do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), via Climate Prediction Center (CPC). Eventos extremos secos e chuvosos foram definidos com base nos valores abaixo do percentil 15% e acima do percentil 85%, respectivamente. Para identificar tendências temporais, aplicou-se regressão linear simples, com teste t de Student para verificar a significância estatística. Os resultados apontam redução significativa na precipitação mensal, especialmente nas sub-regiões E e SE. Verificou-se também aumento na frequência de eventos secos extremos em todas as sub-regiões, com maior intensidade em SE, sugerindo crescente vulnerabilidade à estiagem. Os eventos extremos chuvosos apresentaram tendência de redução, mas com menor consistência estatística. Conclui-se que o regime pluviométrico da Amazônia se tornou mais irregular, com predomínio de extremos secos, o que acarreta riscos à sustentabilidade ecológica, à segurança hídrica e à resiliência das populações. Os resultados reforçam a necessidade de políticas públicas de adaptação climática e de sistemas regionais de monitoramento.

Palavras-chave: mudanças climáticas; regressão linear; ENOS.

¹ Analista em Ciência e Tecnologia do Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia - CENSIPAM. Doutora em Meteorologia pela Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. E-mail: nilzele.jesus@sipam.gov.br.

² Analista em Ciência e Tecnologia do Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia - CENSIPAM. Doutor em Ciência do Sistema Terrestre pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. E-mail: cleber.santos@sipam.gov.br.

³ Analista em Ciência e Tecnologia do Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia - CENSIPAM. Mestre em Meteorologia pela Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. E-mail: leticia.cardoso@sipam.gov.br

Abstract

The objective of this study is to identify changes in precipitation patterns and the occurrence of extreme events in the Amazon from 1979 to 2024. The analysis was regionalized into five sub-regions: Northwest (NW), Northeast (NE), West (W), East (E), and Southeast (SE). Monthly precipitation data from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), via the Climate Prediction Center (CPC), were used. Extreme dry and wet events were defined based on values below the 15% percentile and above the 85% percentile, respectively. To identify temporal trends, simple linear regression was applied, and statistical significance was assessed using the Student's t-test. Results show a statistically significant reduction in monthly precipitation, particularly in the E and SE sub-regions. There was also an increase in the frequency of extreme dry events across all sub-regions, with SE showing the highest intensity, suggesting growing vulnerability to drought. In contrast, extreme wet events showed a decreasing trend, although with less statistical consistency. The findings indicate that the Amazon rainfall regime has become more irregular, with a predominance of dry extremes, posing risks to ecological sustainability, water security, and local population resilience. These results underscore the urgent need for climate adaptation policies and regional climate monitoring systems in the Amazon.

Keywords: climate change; linear regression; ENSO.

Resumen

Este estudio tiene como objetivo identificar cambios en los patrones de precipitación y en la ocurrencia de eventos extremos en la Amazonía entre 1979 y 2024. Los análisis se regionalizaron en cinco subregiones: Noroeste (NW), Noreste (NE), Oeste (W), Este (E) y Sureste (SE). Se utilizaron datos mensuales de precipitación del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), a través del Climate Prediction Center (CPC). Los eventos extremos secos y lluviosos se definieron con base en valores por debajo del percentil 15% y por encima del percentil 85%, respectivamente. Para identificar tendencias temporales, se aplicó regresión lineal simple, con la prueba t de Student para verificar la significancia estadística. Los resultados señalan una reducción significativa en la precipitación mensual, especialmente en las subregiones E y SE. También se observó un aumento en la frecuencia de eventos secos extremos en todas las subregiones, con mayor intensidad en SE, lo que sugiere una creciente vulnerabilidad a la sequía. Los eventos extremos lluviosos mostraron una tendencia a la disminución, aunque con menor consistencia estadística. Se concluye que el régimen pluviométrico de la Amazonía se ha vuelto más irregular, con predominio de extremos secos, lo que genera riesgos para la sostenibilidad ecológica, la seguridad hídrica y la resiliencia de las poblaciones. Los resultados refuerzan la necesidad de políticas públicas de adaptación climática y de sistemas regionales de monitoreo.

Palabras clave: cambio climático; regresión lineal; ENSO.

Résumé

Cette étude vise à identifier les changements dans les régimes de précipitations et l'occurrence d'événements extrêmes en Amazonie sur la période allant de 1979 à 2024. Les analyses ont été régionalisées en cinq sous-régions : Nord-Ouest (NW), Nord-Est (NE), Ouest (W), Est (E) et Sud-Est (SE). Les données mensuelles de précipitations proviennent de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), via le Climate Prediction Center (CPC). Les événements extrêmes secs et humides ont été définis sur la base de valeurs inférieures au 15^e percentile et supérieures au 85^e percentile, respectivement. Pour identifier les tendances temporelles, une régression linéaire simple a été appliquée, accompagnée du test t de Student pour en vérifier la signification statistique. Les résultats indiquent une diminution significative des précipitations mensuelles, en particulier dans les sous-régions E et SE. Une augmentation de la fréquence des épisodes extrêmes de sécheresse a été observée dans toutes les sous-régions, avec une intensité plus marquée dans la région SE, suggérant une vulnérabilité croissante à l'aridité. Les épisodes extrêmes de précipitations montrent une tendance à la baisse, bien que de manière statistiquement moins consistante. Il en ressort que le régime pluviométrique amazonien est devenu plus irrégulier, avec une prédominance des extrêmes secs, ce qui représente un risque pour la durabilité écologique, la sécurité hydrique et la résilience des populations. Ces résultats soulignent la nécessité de politiques d'adaptation climatique et de systèmes régionaux de surveillance.

Mots-clés: changement climatique ; régression linéaire ; ENSO

1 INTRODUÇÃO

A região Amazônica abriga a maior floresta tropical do planeta e uma das maiores redes hidrográficas do mundo. Além disso, estudos conduzidos por Nobre et al. (2016) evidenciam o papel crucial que essa região desempenha na regulação do clima, tanto em escala regional quanto global. A precipitação é um dos principais elementos meteorológicos da região, sustentando ecossistemas diversos, o ciclo hidrológico e as atividades socioeconômicas das populações locais, incluindo agricultura, pesca, transporte fluvial e abastecimento de água (Marengo, 2008). A região é caracterizada por um regime de precipitação predominantemente elevado, com médias anuais entre 1.500 e 3.000 mm em grande parte da sua área, sendo marcada por sazonalidade moderada e forte influência de sistemas atmosféricos de grande escala (Figueroa; Nobre, 1990).

A distribuição da precipitação na Amazônia é modulada por fenômenos de variabilidade climática relacionados a anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) nos oceanos Pacífico e Atlântico tropicais. O fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), com suas fases El Niño (aquecimento anômalo das TSM) e La Niña (resfriamento anômalo das TSM) no Pacífico Equatorial, está associado a déficits e excessos de precipitação na região, especialmente durante o verão austral (Aceituno, 1988; Nobre; Shukla, 1996; Marengo et al., 2001; Ronchail et al., 2002). Além do ENOS, o padrão de Dipolo do Atlântico, caracterizado por anomalias térmicas opostas entre as bacias norte e sul do Atlântico tropical, também influencia o regime pluviométrico regional (Souza et al., 2000).

Esses fenômenos da variabilidade climática modulam a atuação e a intensidade dos sistemas meteorológicos que provocam precipitação na Amazônia, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a Alta da Bolívia, os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Sistemas Frontais, Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), Sistemas Convectivos de Mesoescala (Rao; Hada, 1990, Kodama, 1992, Gan; Kousky, 1986; Kousky; Kagano, 1981; Ferreira et al., 2009; Oliveira, 1986; Satyamurty et al., 2013; Cohen et al., 1995).

A partir do ano 2000, tem-se observado crescente preocupação com as mudanças climáticas e potenciais consequências adversas. Os relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) apontam modificações nos regimes pluviométricos em várias partes do mundo, com aumento na frequência e intensidade de eventos extremos na Amazônia (IPCC, 2021), de forma que diversos estudos têm identificado sinais dessas mudanças na região. Brito et al. (2014) analisaram diferentes tipos de eventos extremos de precipitação na região entre 1998 e 2013, avaliando sua frequência, intensidade e contribuição para a climatologia da precipitação acumulada, observando intensificação desses eventos nos últimos sete anos do período, com pico entre 2011 e 2012. Santos et al. (2015), por sua vez, investigaram tendências na precipitação diária para a Amazônia brasileira e identificaram um aumento significativo no número de dias com precipitação extrema na porção noroeste da região, enquanto no sul foi observada uma tendência de redução desses eventos. Essas mudanças, frequentemente associadas a fenômenos de variabilidade climática como o El Niño/La Niña, resultam em impactos socioambientais profundos, incluindo aumento das queimadas, aumento ou redução dos níveis dos rios, prejuízos ao transporte e à biodiversidade (Marengo et al., 2024).

Apesar da crescente atenção científica e política, ainda persistem lacunas na compreensão da variabilidade espacial e temporal da precipitação e de seus extremos na Amazônia. Neste contexto, este estudo teve como objetivo identificar mudanças nos padrões de precipitação e na ocorrência de eventos extremos de forma regionalizada na Amazônia, ao longo do período de 1979 a 2024. Por meio de técnicas de regressão linear simples, busca-se detectar tendências temporais e avaliar sua significância estatística, contribuindo para um diagnóstico climático regional mais preciso e para o subsídio a estratégias de adaptação e gestão de riscos climáticos na região.

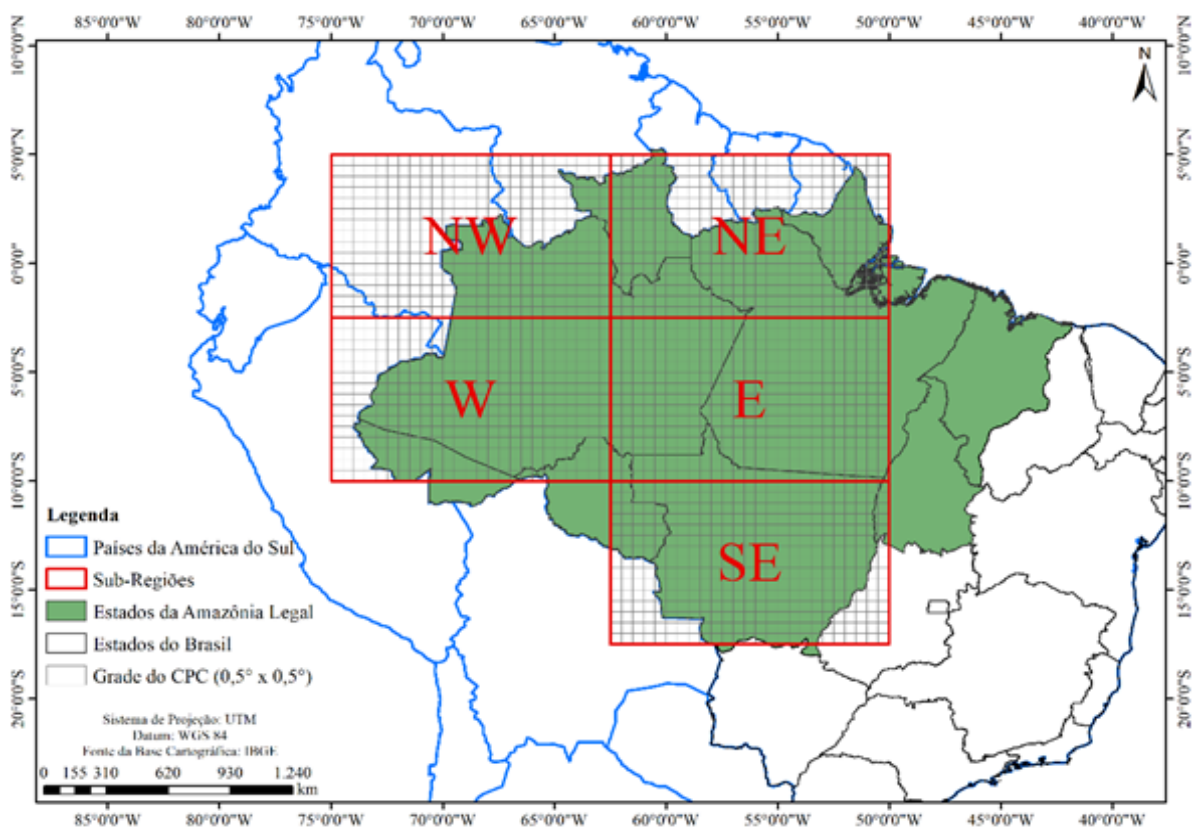
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo foi dividida com base na localização geográfica dos setores da região Amazônica, utilizando cinco sub-regiões delimitadas por faixas latitudinais e longitudinais. A metodologia segue critério semelhante ao adotado por Alves et al. (2013), que empregaram essa abordagem para classificar anos de seca na Amazônia. As sub-regiões definidas foram: Noroeste (NW): 75°W a 62,5°W e 5°N a 2,5°S; Nordeste (NE): 62,5°W a 50°W e 5°N a 2,5°S; Oeste (W): 75°W a 62,5°W e 2,5°S a 10°S; Leste (E): 62,5°W a 50°W e 2,5°S a 10°S; e Sudeste (SE): 62,5°W a 50°W e 10°S a 17,5°S (Figura 1). Na sub-região NE estão inseridas as capitais Boa Vista-RR e Macapá-AP; na sub-região W estão incluídas as capitais

Rio Branco-AC e Porto Velho-RO; e na sub-região SE está incluída a capital Cuiabá-MG. Essas subdivisões representam áreas com distintas características climáticas dentro da Amazônia, possibilitando uma análise regionalizada da variabilidade da precipitação e da ocorrência de eventos extremos.

Figura 1 – Área de estudo, destacando as cinco sub-regiões da Amazônia utilizadas na análise: Noroeste (NW), Nordeste (NE), Oeste (W), Leste (E) e Sudeste (SE).



Fonte: os autores (2025).

2.2 DADOS

Foram utilizados os dados de precipitação mensal acumulada da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), fornecidos pelo Climate Prediction Center (CPC). Esses dados consistem em uma densa rede observacional distribuída ao redor do mundo, interpolada em uma grade de 0,5° de latitude por 0,5° de longitude (Silva et al., 2007), conforme mostra a Figura 1. Esse conjunto de dados foi gerado com base em observações coletadas por plataformas orbitais de satélites, interpolado com dados de estações de superfície e ajustado com estimativas provenientes dos próprios satélites. Optou-se por utilizar esse tipo de dado, considerando a escassez de medições convencionais com séries históricas longas na Amazônia, sendo adequado para estudos climatológicos (pelo menos 30 anos). O período analisado foi de janeiro de 1979 a dezembro de 2024. As médias espaciais mensais foram calculadas para cada uma das cinco áreas delimitadas, resultando em séries temporais representativas de cada região.

Para o cálculo da climatologia e base para identificar os eventos extremos foi adotado o período de 1981 a 2010, conforme recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2017).

2.3 METODOLOGIA

Para identificar a climatologia anual e mensal das sub-regiões, foi calculada a média aritmética (Equação 1) anual e mensal da precipitação do período de 1981 a 2010.

$$\overline{Prp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Prp_i \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: $\overline{Prp}$ é a precipitação média climatológica anual ou mensal; Prp é o valor da precipitação

no ano ou mês i do período de referência; n é o número de anos do período de referência ($n = 30$, no caso de 1981 a 2010).

A identificação de eventos extremos de precipitação foi realizada com base na metodologia estatística proposta por Xavier (2002), semelhante ao que foi aplicado em Tavares et al. (2021), que utiliza a distribuição empírica dos dados para o cálculo de percentis. Essa abordagem é recomendada quando se deseja evitar suposições sobre a forma da distribuição (por exemplo, normalidade), sendo particularmente útil para dados pluviométricos que frequentemente apresentam assimetrias. Com isso, dado um conjunto de n valores mensais de precipitação $x_1, x_2, \dots, x_n$, ordenados de forma crescente, o valor do percentil p (onde $0 < p < 1$) é obtido por interpolação linear entre os elementos ordenados, de acordo com a Equação 2:

$$P_p = x_i + (n \cdot p - i) \cdot (x_{i+1} - x_i) \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: P_p é o valor do percentil p ; x_i é o valor do i -ésimo elemento da série ordenada e $i = [n \cdot p]$, sendo $[.]$ a parte inteira.

Foram utilizados os seguintes limiares para definir os eventos extremos: extremo seco: precipitação mensal inferior ao percentil de 15% ($P_{0,15}$) e extremo chuvoso: precipitação mensal superior ao percentil de 85% ($P_{0,85}$).

O cálculo dos percentis foi realizado individualmente para cada mês do ano e para cada sub-região, a fim de considerar a sazonalidade da precipitação. De forma que, todos os janeiros foram agrupados, assim como todos os fevereiros, e assim por diante, formando 12 distribuições mensais por sub-região para o período de referência climatológica (1981 a 2010). Essa abordagem permitiu identificar, para cada mês e região, desvios significativos do comportamento normal da precipitação, distinguindo-se de métodos paramétricos como o Standardized Precipitation Index (SPI), que exigem suposições sobre a distribuição estatística dos dados (McKee et al., 1993).

Para a análise das tendências temporais na série de precipitação e na frequência anual de eventos extremos (secos e chuvosos), foi aplicada a regressão linear simples, um método estatístico amplamente utilizado para descrever a relação entre uma variável dependente e uma variável independente (Montgomery; Runger, 2003). A regressão linear simples modela uma variável y (neste estudo, a precipitação mensal ou o número de meses no ano com eventos extremos) como função do tempo x (representado pelo ano ou pelo número do mês ao longo da série temporal). A equação da reta ajustada é dada pela Equação 3.

$$y = a + bx \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: y é a variável dependente (precipitação ou número de eventos por ano), x é a variável independente (tempo), a é o intercepto, que representa o valor esperado de y quando $x=0$, b é o coeficiente angular (ou inclinação da reta), que representa a taxa de variação de y ao longo do tempo.

Um valor positivo de b indica tendência de aumento, enquanto um valor negativo indica tendência de redução. O coeficiente angular (b) foi estimado pelo método dos mínimos quadrados, que minimiza a soma dos quadrados dos resíduos entre os valores observados e os valores ajustados da reta.

A regressão foi aplicada de duas formas: na série temporal mensal de precipitação (1979 a 2024) em cada sub-região, para identificar tendências sazonais e interanuais; e na série anual do número de meses com eventos extremos secos e chuvosos, para verificar mudanças na frequência desses eventos ao longo do tempo.

Dessa forma, foi possível avaliar de forma objetiva a presença de tendências de intensificação ou redução da precipitação e da frequência de eventos extremos em diferentes setores da Amazônia. Tais tendências podem estar associadas a alterações no clima regional e global, possivelmente vinculadas aos processos de mudança climática (IPCC, 2021).

Para avaliar a significância estatística das tendências identificadas nas séries temporais (1979 a 2024) de precipitação mensal e no número de meses no ano com eventos extremos (secos e chuvosos), foi aplicado o teste t de Student (t) ao coeficiente angular da reta obtida pela regressão linear simples (Equação 4). Esse teste verifica a hipótese nula de que o coeficiente angular b é igual a zero, ou seja, que não existe tendência significativa ao longo do tempo (Montgomery; Runger, 2003; Wilks, 2011).

A significância do teste é avaliada por meio do valor- p correspondente ao valor de t , considerando os graus de liberdade $n-2$, onde n é o número total de observações. Valores de p menor que 0,05 indicam que a tendência é estatisticamente significativa ao nível de 5%, rejeitando-se a hipótese nula.

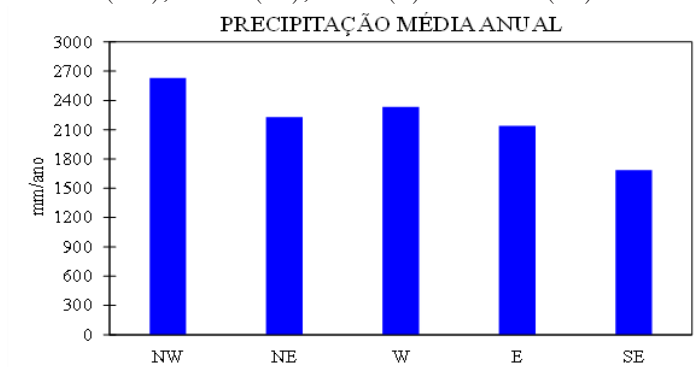
$$t = \frac{b}{SE(b)} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que: b é o coeficiente angular da reta de regressão; $SE(b)$ é o erro padrão associado ao coeficiente angular.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

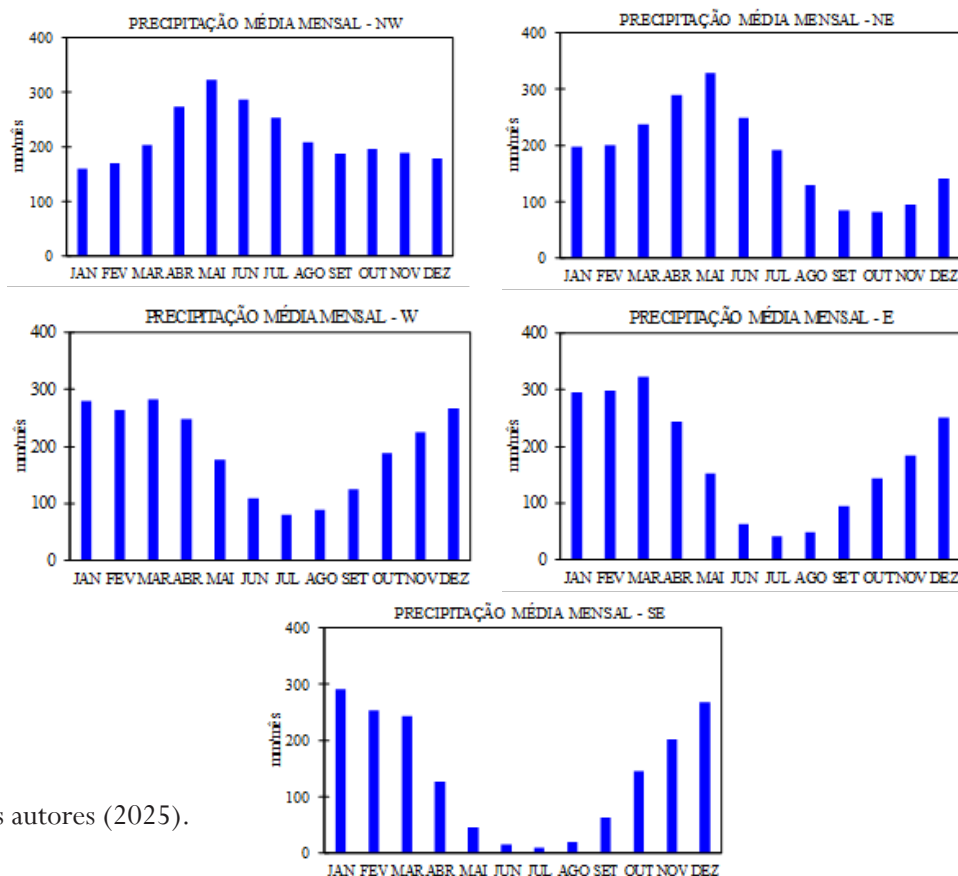
A Figura 2 ilustra a climatologia da precipitação, média de 1981 a 2010, nas cinco sub-regiões da Amazônia, evidenciando a existência de variações espaciais, com maior acumulado em NW (2.629 mm) e menor em SE (1.685 mm). A Figura 3 (a-e) mostra a climatologia mensal, destacando padrões sazonais distintos: as sub-regiões NW e NE apresentam alta pluviosidade durante todo o ano, sem estação seca bem definida, apesar da redução relativa entre agosto e novembro. Os picos em maio (323 mm em NW e 328 mm em NE) refletem a influência prolongada da ZCIT no norte amazônico (Rao; Hada, 1990; Ribeiro et al. 2023). A redução da precipitação no segundo semestre, embora menos intensa do que nas regiões meridionais, mantém elevados volumes, sugerindo a persistência da umidade atmosférica e a ocorrência de sistemas meteorológicos de escala local (Souza et al., 2021).

Figura 2 – Precipitação média anual (1981 a 2010) nas cinco sub-regiões da Amazônia: Noroeste (NW), Nordeste (NE), Oeste (W), Leste (E) e Sudeste (SE)



Fonte: os autores (2025).

Figura 3 – Precipitação média mensal (1981 a 2010) nas cinco sub-regiões da Amazônia: (a) Noroeste (NW), (b) Nordeste (NE), (c) Oeste (W), (d) Leste (E) e (e) Sudeste (SE)



Fonte: os autores (2025).

Embora a climatologia da precipitação tenha padrões sazonais bem definidos nas sub-regiões amazônicas, foi fundamental investigar se esses regimes vêm se alterando ao longo do tempo. A análise das tendências da precipitação mensal de toda a série temporal permitiu identificar sinais de mudanças na região, em resposta aos fatores climáticos e ambientais recentes, como a influência do fenômeno ENOS, por exemplo. A Figura 4 (a-e) apresenta as séries temporais da precipitação mensal para as cinco sub-regiões analisadas entre 1979 e 2024, acompanhadas das respectivas linhas de tendência linear. Os resultados indicam tendência negativa estatisticamente significativa da precipitação em todas as sub-regiões, conforme indicado pelos coeficientes angulares das equações de regressão linear simples (valores de “b”) e confirmados pelos testes t de Student, com p-valor menor que 0,05 em todos os casos (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores de p das regressões lineares aplicadas às séries temporais de precipitação mensal, extremos chuvosos e extremos secos nas sub-regiões da Amazônia (1979 a 2024).

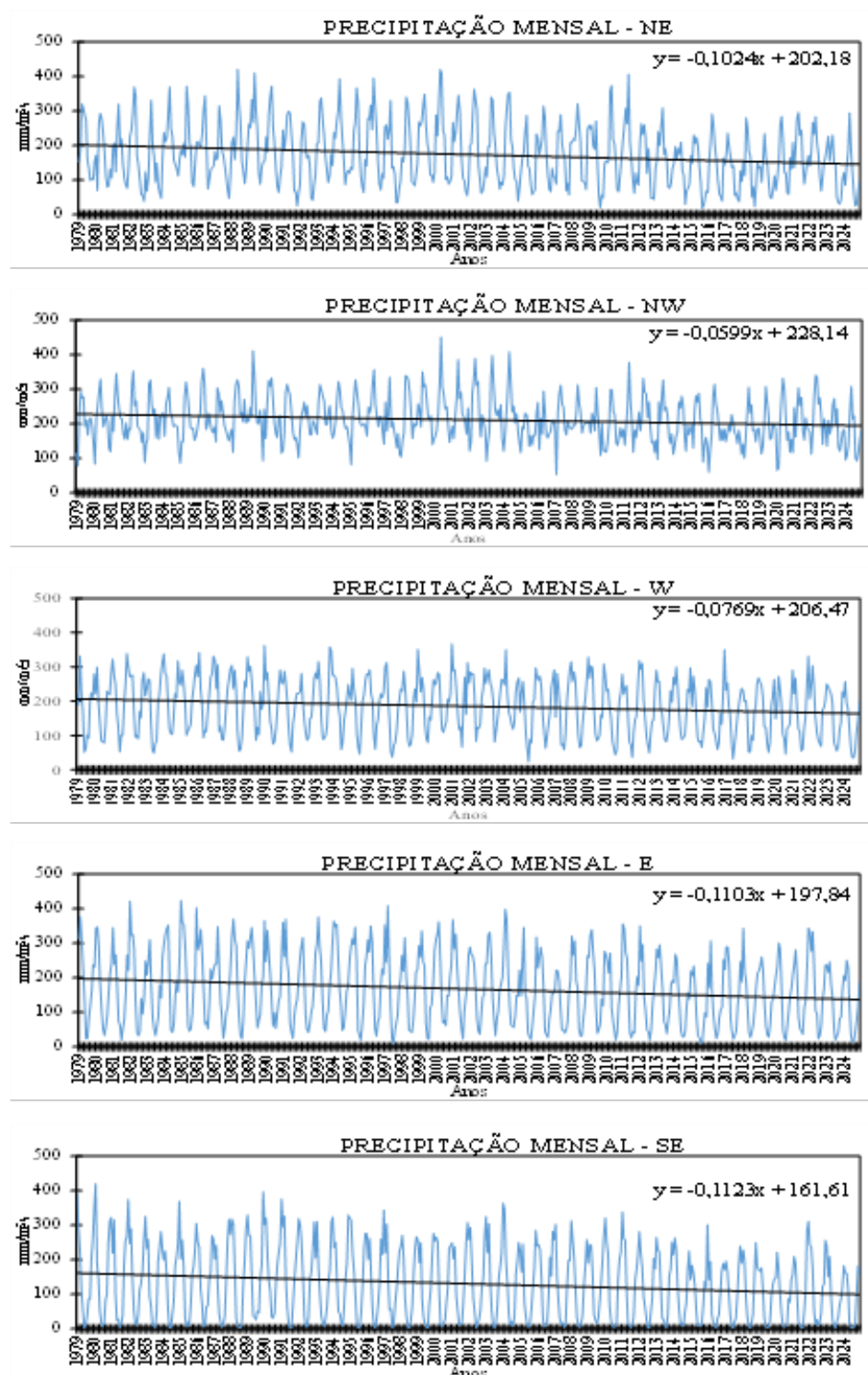
SUB-REGIÃO	PRECIPITAÇÃO	EXTREMO CHUVOSO	EXTREMO SECO
NW	0,012	0,052	5,760E-05
NE	0,000	0,088	8,556E-04
W	0,000	0,003	1,424E-03
E	0,000	0,000	1,716E-05
SE	0,000	0,000	1,186E-07

Fonte: os autores (2025). O nível de significância considerado foi de p menor que 0,05, indicando que a tendência é estatisticamente significativa. Os valores menores que 0,05 estão em cinza.

A sub-região NW apresentou declínio médio de aproximadamente -0,60 mm/mês ($y = -0,599x + 228,14$), refletindo uma redução gradual da pluviosidade ao longo do período, embora essa região ainda mantenha elevados volumes médios mensais, superiores a 300 mm nos meses da estação chuvosa. A sub-região NE apresentou tendência de redução mais acentuada, com -1,02 mm/mês ($y = -1,024x + 202,18$). A sub-região W registrou a menor taxa de redução entre as áreas analisadas (-0,077 mm/mês), por outro lado, a sub-região E apresentou redução de -0,110 mm/mês e a Sudeste (SE) apresentou declínio de -0,112 mm/mês ($y = -0,1123x + 161,61$), o que é consistente com outros estudos que apontam aumento da estação seca e intensificação de secas extremas na parte meridional da Amazônia, especialmente na transição para o bioma Cerrado (Souza et al., 2005; Marengo et al., 2018). Esses resultados corroboram estudos prévios que evidenciam uma tendência de redução das chuvas na Amazônia nas últimas décadas, especialmente nas porções leste e sul, potencialmente associada às mudanças climáticas globais, à expansão do desmatamento e à retroalimentação entre perda de cobertura vegetal e redução de umidade atmosférica (Marengo et al., 2011; Aragão, 2012).

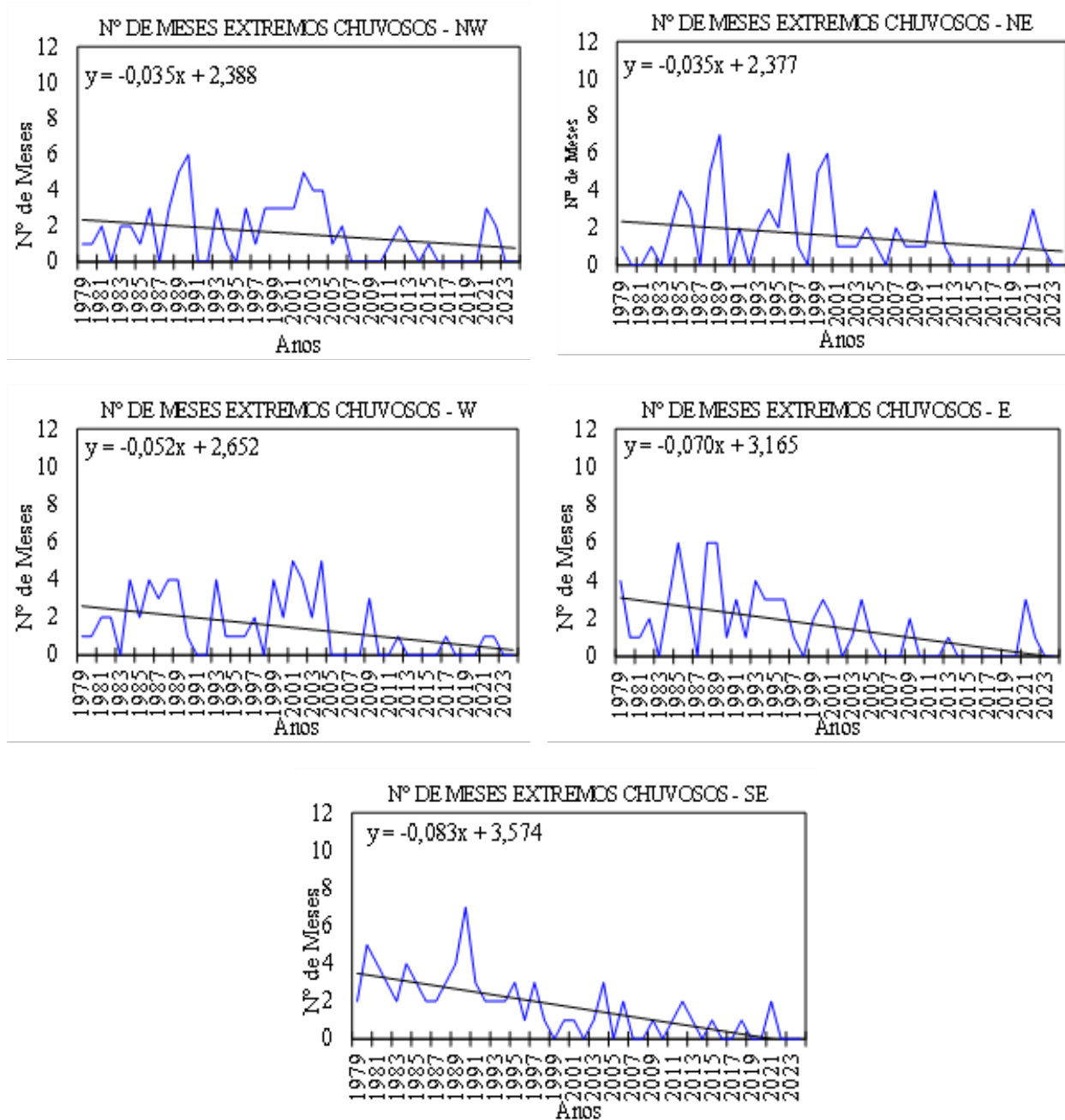
Além das tendências de redução nos totais mensais de precipitação observadas em todas as sub-regiões amazônicas, é igualmente relevante avaliar as mudanças na frequência dos eventos extremos. Essas ocorrências, muitas vezes mascaradas pelas médias climatológicas, têm implicações diretas sobre a disponibilidade hídrica, a navegabilidade fluvial e a resiliência socioambiental da região. A Figura 5 (a-e) apresenta as tendências no número anual de meses classificados como extremos chuvosos, para o período de 1979 a 2024, nas cinco sub-regiões da Amazônia. Os resultados mostraram uma predominância de tendência negativa em todas as áreas, com magnitudes variáveis entre as sub-regiões. No entanto, os testes de significância estatística (t) indicaram que apenas as regiões W, E e SE apresentaram tendências estatisticamente significativas, enquanto NW e NE não demonstraram significância, conforme pode ser visto na Tabela 1.

Figura 4 – Tendência da precipitação mensal nas sub-regiões da Amazônia (1979 a 2024). Precipitação mensal (linhas azuis) e respectivas tendências lineares (linhas pretas) para as sub-regiões: (a) Noroeste (NW), (b) Nordeste (NE), (c) Oeste (W), (d) Leste (E) e (e) Sudeste (SE).



Fonte: os autores (2025).

Figura 5 – Tendência no número anual de meses com evento extremo chuvoso (acima do percentil 85) nas sub-regiões da Amazônia: (a) Noroeste (NW), (b) Nordeste (NE), (c) Oeste (W), (d) Leste (E) e (e) Sudeste (SE), no período de 1979 a 2024. A linha preta representa a tendência linear.



Fonte: os autores (2025).

As regiões NW e NE apresentaram inclinações de -0,035 eventos/ano, com interceptos próximos a 2,4 eventos anuais. Apesar da tendência negativa visível, a ausência de significância estatística sugere que a variabilidade interanual ainda predomina o comportamento dos extremos chuvosos nessas áreas. Nas sub-regiões W, E e SE, a tendência negativa foi mais acentuada e estatisticamente significativa, com inclinações de -0,052, -0,070 e -0,083 eventos/ano, respectivamente. Isso sugere uma redução consistente na frequência de eventos chuvosos extremos nessas áreas, possivelmente vinculada à intensificação de anomalias secas sazonais, ao avanço da estação seca e à variabilidade climática de grande escala. A SE, por exemplo, localizada na transição entre a Amazônia e o Cerrado, apresentou a maior taxa de declínio, reforçando evidências de que essa área está entre as mais sensíveis às mudanças climáticas (Souza et al., 2005; Coe et al., 2013).

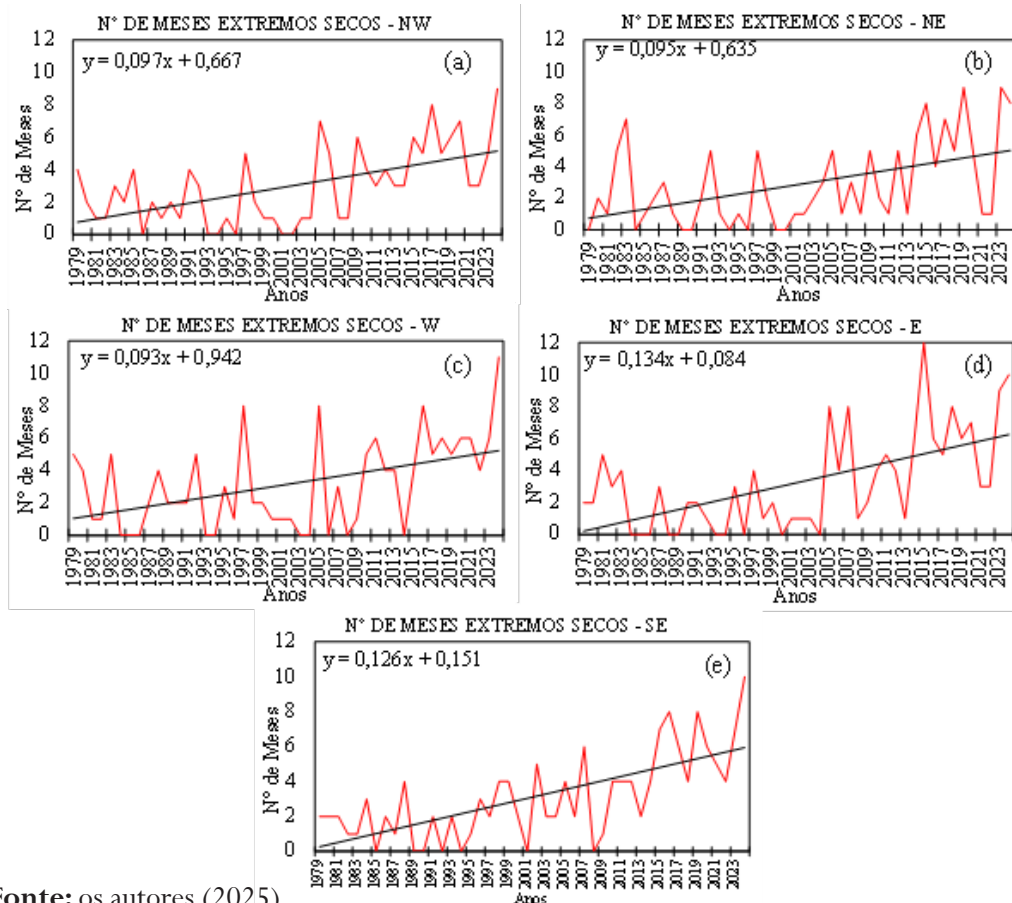
A análise dos eventos extremos chuvosos indica que os anos de 1989 e 1990 foram os mais expressivos em NE, NW, E e SE da Amazônia. Em 1989, a frequência de meses com extremos chuvosos foi

máxima em NE (até 7 meses), bem como elevada em NW e E, refletindo a forte atuação do evento de La Niña 1988–1989, que intensificou a ZCIT e aumentou o transporte de umidade para o norte da região (Ronchail et al., 2002). Em 1990, o destaque foi para SE, com até 6 meses de eventos extremos (Figura 5e), ainda sob influência residual do La Niña anterior, pois, segundo Silva e Silva (2015), há correlação entre a precipitação na região norte da América do Sul e a temperatura da superfície do mar (TSM) no Pacífico Equatorial, com uma defasagem temporal. Isso significa que os efeitos atmosféricos podem persistir mesmo após o término do evento oceânico, devido à inércia da circulação de grande escala, que demora a se ajustar às variações térmicas no oceano. Esse desacoplamento temporário entre o oceano e a atmosfera contribui para prolongar os impactos climáticos sobre áreas tropicais, como é o caso da Amazônia.

A Figura 6 (a-e) ilustra as tendências no número anual de meses classificados como extremos secos (inferior ao percentil 15), para o período de 1979 a 2024, nas cinco sub-regiões da Amazônia. Os resultados indicam uma tendência crescente no número de meses com eventos de seca extrema em todas as sub-regiões analisadas. O teste t confirmou que todas as tendências são estatisticamente significativas, refletindo um aumento consistente na frequência desses eventos (Tabela 1).

A sub-região SE apresentou a maior taxa de crescimento anual ($b = 0,126$), seguida pelas regiões E, NW, NE e W, com b de 0,134, 0,097, 0,095 e 0,093, respectivamente, sugerindo um aumento sistemático da ocorrência de secas severas, o que pode ser associado a alterações nos padrões atmosféricos tropicais e aos impactos das mudanças climáticas globais (Coe et al., 2013). A intensificação de eventos secos tem implicações relevantes para a floresta amazônica, que depende de um ciclo hidrológico equilibrado para sua manutenção ecológica. A maior frequência de meses secos pode intensificar o estresse hídrico na vegetação, reduzir o fluxo dos rios e ampliar a suscetibilidade a incêndios florestais, principalmente nas bordas do bioma e em áreas de desmatamento e degradação (Aragão et al., 2014; Souza et al., 2003). Além disso, a maior incidência de secas pode comprometer os meios de subsistência locais, a navegação fluvial e a segurança alimentar das populações tradicionais (Nobre et al., 2016).

Figura 6 – Tendência no número anual de meses com evento extremo seco (abaixo do percentil 15) nas sub-regiões da Amazônia: (a) Noroeste (NW), (b) Nordeste (NE), (c) Oeste (W), (d) Leste (E) e (e) Sudeste (SE), no período de 1979 a 2024. A linha preta representa a tendência linear.



Fonte: os autores (2025).



De forma geral, o ano de 2024 foi particularmente crítico para NW, NE, E e SE, com elevada frequência de meses com extremo seco. Embora este evento seja recente, uma pesquisa preliminar indicou que a seca de 2023-2024 na Amazônia foi caracterizada por uma combinação de fatores climáticos, incluindo o El Niño e o aquecimento anômalo dos oceanos Atlântico Norte, Índico e Pacífico Norte. Essa combinação reduziu significativamente a precipitação e elevou as temperaturas, afetando a disponibilidade hídrica, prolongando as secas e causando picos de temperatura (Marengo et al., 2024).

Além disso, o ano de 2015 destacou-se na sub-região E, onde todos os 12 meses registraram valores extremos secos. Esse período coincidiu com um dos eventos de El Niño mais intensos do século XXI, conforme tem sido observado no levantamento dos dados do Índice Oceânico de Niño (Alves, 2025). Segundo Marengo et al. (2018), o El Niño de 2015 causou uma redução expressiva na precipitação da região Amazônia, com secas severas entre agosto e outubro, afetando ecossistemas e os regimes hidrológicos. Os autores destacam que a combinação do El Niño com condições locais de baixa umidade resultou em uma das maiores secas observadas nas últimas décadas.

Esses resultados evidenciam que os eventos secos extremos têm se tornado mais frequentes e abrangentes, especialmente em anos sob forte influência do El Niño, reforçando a importância de estratégias de monitoramento e gestão adaptativa diante da crescente variabilidade climática.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises de regressão linear aplicadas às séries temporais de precipitação mensal e à frequência de meses com precipitação extrema (denominada de extremo seco e extremo chuvoso) evidenciam mudanças estatisticamente significativas no regime pluviométrico da Amazônia Legal no período de 1979 a 2024. Observou-se uma tendência generalizada de redução na precipitação total em todas as sub-regiões analisadas, com maior intensidade nas sub-regiões E e SE da Amazônia.

Particular atenção deve ser dada à intensificação dos extremos secos, cuja significância estatística foi verificada de forma robusta em todas as sub-regiões, com valores de p expressivamente baixos, sobretudo na sub-região SE. Esse padrão sugere um aumento da frequência de períodos de estiagem severa, o que impõe implicações diretas à gestão dos recursos hídricos, à segurança alimentar e à resiliência das populações amazônicas.

Embora os extremos chuvosos apresentem menor consistência estatística nas tendências, algumas sub-regiões, como o W e o E, indicaram significância em suas regressões, apontando para uma possível ampliação da variabilidade intra-anual da precipitação. Esse comportamento, aliado à intensificação dos extremos secos, reforça o cenário de instabilidade climática crescente e maior risco de desastres naturais associados tanto à escassez quanto ao excesso hídrico.

Tais resultados corroboram as evidências recentes da literatura sobre os impactos das mudanças climáticas na Amazônia e destacam a urgência de fortalecer estratégias de monitoramento climático, planejamento territorial e políticas públicas integradas, com foco na mitigação de riscos e na adaptação às novas condições hidrometeorológicas da região. A caracterização estatística das tendências pluviométricas extremas constitui, portanto, uma ferramenta essencial para a gestão sustentável e soberana da Amazônia frente aos desafios impostos pelas mudanças globais.

REFERÊNCIAS

ACEITUNO, P. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: surface climate. **Monthly Weather Review, Boston**, v. 166, n. 3, p. 505-524, mar. 1988. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/116/3/1520-0493_1988_116_0505_otfots_2_0_co_2.xml. Acesso em: 14 set. 2025.

ALVES, L. M. et al. Classificação dos anos de Seca. In: BORMA, L. S.; NOBRE, C. **Secas na Amazônia: causas e consequências**. São José dos Campos: INPE, 2013. p. 49-53.

ARAGÃO, L. E. O. C. The rainforest's water pump. **Nature**, v. 489, p. 217-218, 2012. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature11485>. Acesso em: 14 set. 2025.

ARAGÃO, L. E. O. C. et al. Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests. **Biological Reviews**, Cambridge, v. 89, n. 4, p. 913–931, 2014. DOI: 10.1111/brv.12088. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/brv.12088>. Acesso em: 14 set. 2025.

BRITO, A. L.; VEIGA, J. A. P.; YOSHIDA, M. C. Extreme rainfall events over the Amazon basin produce significant quantities of rain relative to the rainfall climatology. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 4, n. 2, p. 179–191, 2014. Disponível em: <https://www.scrip.org/journal/paperinformation?paperid=44665>. Acesso em: 14 set. 2025.

COE, Michael T. et al. Deforestation and climate feedbacks threaten the ecological integrity of south-southeastern Amazonia. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 368, n. 1619, article 20120155, 2013. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rstb.2012.0155>. Acesso em: 14 set. 2025.

COHEN, J. C. P.; SILVA DIAS, M. A. F.; NOBRE C. A.: Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: A case study. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 123, n.11, p. 3163–3174, nov. 1995. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/123/11/1520-0493_1995_123_3163_ecawas_2_0_co_2.xml. Acesso em: 14 set. 2025.

FERREIRA, N. J., RAMIREZ, M. V., GAN, M. A. Vórtices ciclônicos de altos níveis que atuam na vizinhança do nordeste do Brasil. In: CAVALVANTI, I.F.A. et al. (org), **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009, cap.15, p.235–241.

FIGUEROA, S. N.; NOBRE, C. A. Precipitation distribution over Central and Western tropical South America. **Climanálise**, São José dos Campos, v. 5, n.6, p. 36–44, jun. 1990. [Versão impressa]

GAN, M. A.; KOUSKY, V. E. Vórtices ciclônicos da alta troposfera no oceano Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.1, n.1, p.19–28, 1986. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Manoel-Gan/publication/43653491_Vortices_ciclonicos_da_alta_troposfera_no_Oceano_Atlantico_Sul/links/56054a0c08ae8e08c08b7d22/Vortices-ciclonicos-da-alta-troposfera-no-Oceano-Atlantico-Sul.pdf?_sg%5B0%5D=started_experiment_milestone&origin=journalDetail&_rt-d=e30%3. Acesso em: 14 set. 2025.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. DOI: 10.1017/9781009157896. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf. Acesso em: 14 set. 2025.

KODAMA, Y. M. Large -scale common features of sub-tropical precipitations zone (The Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ). Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, Tokyo, v. 70, n.4, p. 813–835, aug.1992. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj1965/70/4/70_4_813/_article/-char/ja/. Acesso em: 14 set. 2025.

KOUSKY, V. E.; KAGANO, M. T. A climatological study of the tropospheric circulation over the Amazon region. **Acta Amazonia**, Manaus, v. 11, n. 4, p. 743–753, set.1981. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/rpfc4jL8D9x4hXRHGnzcDdG/?lang=en>. Acesso em: 14 set. 2025.

MARENGO, J. A. et al. Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, Boston, v.14, n. 5, p.833–852, mar. 2001. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/14/5/1520-0442_2001_014_0833_oaetr_2.0.co_2.xml. Acesso em: 14 set. 2025.

MARENGO, J. A. et al. Recent developments on the South American monsoon system. **Journal of Climatology**, v. 32, p. 1–21, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.2254>. Acesso em: 14 set. 2025.

MARENGO, J. A. et al. Changes in climate and land use over the Amazon region: current and future variability and trends. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, 2018. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2018.00228/full>. Acesso em: 14 set. 2025.

MARENGO, J. A. et al. Long-term variability, extremes and changes in temperature and hydrometeorology in the Amazon region: A review. **Acta Amazonica**, v. 54, n. spe1, p. e54es22098, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/twpxgJTGHNKhjvqnmtsW8Pv/?lang=en>. Acesso em: 14 set. 2025.

MARENGO, J. A. et al. The drought of Amazonia in 2023–2024. **American Journal of Climate Change**, v. 13, n. 3, p. 567–597, 2024. DOI: 10.4236/ajcc.2024.133026. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=136388>. Acesso em: 28 maio 2025.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. **The relationship of drought frequency and duration to time scales**. In: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993, Anaheim. Boston: American Meteorological Society, 1993. p. 179–184.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**, 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION – NOAA. **Cold & Warm Episodes by Season**, 2025. Disponível em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso em: 28 maio 2025.

NOBRE, C. A. et al. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, DC, v. 113, n. 39, p. 10759–10768, 2016. DOI: 10.1073/pnas.1605516113. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1605516113>. Acesso em: 14 set. 2025.

NOBRE P.; SHUKLA, J. 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, oct.1996. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/9/10/1520-0442_1996_009_2464_voss-tw_2_0_co_2.xml. Acesso em: 14 set. 2025.

OLIVEIRA, A. S. **Interações entre sistemas na América do sul e convecção na Amazônia**. 246 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1986.

OMM – ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. **Guidelines on the Calculation of Climate Normals**: WMO-No. 1203. Genebra: Organização Meteorológica Mundial, 2017. Disponível em: https://library.wmo.int/viewer/55797/download?file=1203_en.pdf&type=pdf&navigator=1. Acesso em: 28 maio 2025.

RAO, V.B.; HADA, K. Characteristics of rainfall over Brazil: annual variations and connections with Southern oscillations. **Theoretical and Applied Climatology, Netherlands**, v. 42, n. 2, p.81–91, Jun. 1990. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00868215>. Acesso em: 14 set. 2025.

RIBEIRO, R. M. R.; VITORINO, M. I.; MOURA, M. N. Variabilidade sazonal da Zona de Convergência Intertropical e sua influência sobre o norte da América do Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 5, p. 2798–2810, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/257964>. Acesso em: 2 set. 2025.

RONCHAIL, J. et al. Interannual rainfall variability in the Amazon basin and sea-surface temperatures in the Equatorial Pacific and the Tropical Atlantic Oceans. **International Journal of Climatology**, New York, v. 22, n. 9, p. 1663–1686, 2002. Disponível em: <https://hal.science/hal-02987801/>. Acesso em: 14 set. 2025.

SANTOS, E. B.; LUCIO, P. S.; SILVA, C. M. S. Análise de tendência da precipitação diária na Amazônia Brasileira. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 08, n. 04, p. 1041–1051, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/items/a6955219-236c-4a6e-9c55-9862c8cd5202>. Acesso em: 14 set. 2025.

SATYAMURTY, P.; DA COSTA, C. P. W.; MANZI, A. O. Moisture source for the Amazon Basin: a study of contrasting years. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 111, p. 195–209, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/S00704-012-0637-7>. Acesso em: 14 set. 2025.

SILVA, V. B., KOUSKY, V. E., SHI, W., HIGGINS, R. W. An improved gridded historical daily precipitation analysis for Brazil. **Journal of Hydrometeorology** [on line], 8(4), 847–861, 2007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1175/JHM598.1>. Acesso em: 30 maio 2025.

SILVA, E. R. L. D. G.; SILVA, M. E. S. Memória de eventos ENOS na precipitação da América do Sul. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, Brasil, v. 30, p. 34–55, 2015. Disponível em: <https://revistas.usp.br/rdg/article/view/96077>. Acesso em: 30 maio 2025.

SOUZA, E. et al. 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, 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/T56f9k8VYK6ZV6hJFmNw8bT/?lang=en>. Acesso em: 14 setembro 2025.

SOUZA JR, C. et al. Mapping forest degradation in the Eastern Amazon from SPOT 4 through spectral mixture models. **Remote sensing of environment**, v. 87, n. 4, p. 494-506, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425703002086>. Acesso em: 14 setembro 2025.

SOUZA, E. B., KAYANO, M. T., AMBRIZZI T. Intraseasonal and submonthly variability over the eastern Amazon and Northeast Brazil during the autumn rainy season. **Theoretical and Applied Climatology**. Netherlands, v. 81, n. 3, p. 177–191, 2005. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-004-0081-4>. Acesso em: 14 setembro 2025.

SOUZA, E. B. et al. Padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, 2021. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/13989>. Acesso em: 2 set. 2025.

TAVARES, A. L. et al. Climate indicators for a watershed in the eastern Amazon. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 23, 2021. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/14102>. Acesso em: 3 set. 2025.

XAVIER, T. M. B. **Eventos climáticos extremos no Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2002. 166 p.

WILKS, D. S. (2011). **Métodos estatísticos nas ciências atmosféricas**. Imprensa acadêmica, 2011.