Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO E SECAS NO ESTADO DO ACRE (1980–2024): SEVERIDADE, TENDÊNCIAS E FREQUÊNCIA COM BASE NO SPEI

Spatiotemporal analysis of precipitation and droughts in the state of Acre (1980–2024): severity, trends, and frequency based on the SPEI

Análisis espaciotemporal de la precipitación y sequías en el estado de Acre (1980–2024): severidad, tendencias y frecuencia con base en el SPEI

Moisés Damasceno Souza
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA)
Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT)
Cáceres, Mato Grosso, Brasil
moises.damasceno@unemat.br

Vanessa Rakel de Moraes Dias
Centro Tecnológico de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto (CETEGEO-SR)
Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT)
Tangará da Serra, Mato Grosso, Brasil
vanessadias@unemat.br

Jefferson Vieira José
Universidade Federal do Acre (UFAC)
Cruzeiro do Sul, Acre, Brasil
jefferson.jose@ufac.br

José Genivaldo do Vale Moreira
Universidade Federal do Acre (UFAC)
Rio Branco, Acre, Brasil
jose.moreira@ufac.br

Joyce Aguiar Dias
Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola (PPGASP)
Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT)
Tangará da Serra, Mato Grosso, Brasil
joyce.aguiar@unemat.br

Emilly Christine Cacau da Silva
Universidade Federal do Acre (UFAC)
Rio Branco, Acre, Brasil
2emilly.silva@sou.ufac.br

Rivanildo Dallacort
Centro Tecnológico de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto (CETEGEO-SR),
Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT)
Tangará da Serra, Mato Grosso, Brasil
E-mail: rivanildo@unemat.br

Resumo: A intensificação dos eventos de seca no sudoeste da Amazônia demanda um monitoramento climático detalhado. Este estudo investigou a variabilidade da precipitação e a ocorrência de secas no estado do Acre (Cruzeiro do Sul, Rio Branco, Sena Madureira e Tarauacá) entre 1980 e 2024. Utilizaram-se dados da reanálise ERA5-Land, o Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (SPEI) e o teste de tendência de Mann-Kendall. Identificou-se um gradiente pluviométrico decrescente oeste-leste, com médias anuais variando entre 2.227,6 mm e 1.792,6 mm. A análise de tendência revelou uma redução significativa da precipitação em meses de transição (agosto e novembro) nas últimas décadas ($p < 0,05$), sugerindo um atraso no início e o prolongamento da estação seca. O índice SPEI evidenciou um aumento na severidade das secas a partir dos anos 2000, com eventos excepcionais (SPEI ≤ −2,00) em 2005, 2010, 2016 e 2023, modulados por fenômenos oceânicos como o ENOS e a Oscilação Multidecadal do Atlântico. Os resultados apontam para um novo regime hidroclimático na região, caracterizado pela maior persistência de déficits hídricos, com implicações críticas para a segurança hídrica e a produção agrícola.

Palavras-chave: ERA5-Land; Tendência de Mann-Kendall; Variabilidade climática; Acre; Déficit hídrico.

Abstract: The intensification of drought events in the southwestern Amazon demands detailed climate monitoring. This study investigated precipitation variability and drought occurrence in the state of Acre (Cruzeiro do Sul, Rio Branco, Sena Madureira, and Tarauacá)

between 1980 and 2024. ERA5-Land reanalysis data, the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), and the Mann-Kendall trend test were utilized. A decreasing west-to-east rainfall gradient was identified, with annual means ranging from 2,227.6 mm to 1,792.6 mm. Trend analysis revealed a significant reduction in precipitation during transition months (August and November) in recent decades ($p < 0.05$), suggesting a delayed onset and the lengthening of the dry season. The SPEI demonstrated an increase in drought severity from the 2000s onward, with exceptional events (SPEI ≤ -2.00) in 2005, 2010, 2016, and 2023, modulated by oceanic phenomena such as ENSO and the Atlantic Multidecadal Oscillation. The results point to a new hydroclimatic regime in the region, characterized by greater persistence of water deficits, with critical implications for water security and agricultural production.
Keywords: ERA5-Land; Mann-Kendall trend; Climate variability; Acre; Water deficit.

Resumen: La intensificación de los eventos de sequía en el suroeste de la Amazonía requiere un monitoreo climático detallado. Este estudio investigó la variabilidad de la precipitación y la ocurrencia de sequías en el estado de Acre (Cruzeiro do Sul, Rio Branco, Sena Madureira y Tarauacá) entre 1980 y 2024. Se utilizaron datos del reanálisis ERA5-Land, el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI) y la prueba de tendencia de Mann-Kendall. Se identificó un gradiente pluviométrico decreciente de oeste a este, con medias anuales que oscilaron entre 2.227,6 mm y 1.792,6 mm. El análisis de tendencia reveló una reducción significativa de la precipitación en los meses de transición (agosto y noviembre) en las últimas décadas ($p < 0,05$), lo que sugiere un retraso en el inicio y una prolongación de la estación seca. El índice SPEI evidenció un incremento en la severidad de las sequías a partir de la década de 2000, con eventos excepcionales (SPEI ≤ −2,00) en 2005, 2010, 2016 y 2023, modulados por fenómenos oceánicos como el ENOS y la Oscilación Multidecadal del Atlántico. Los resultados señalan un nuevo régimen hidroclimático en la región, caracterizado por una mayor persistencia de déficits hídricos, con implicaciones críticas para la seguridad hídrica y la producción agrícola.
Palabras clave: ERA5-Land; Tendencia de Mann-Kendall; Variabilidad climática; Acre; Déficit hídrico.

Submetido em: 11/12/2025
Aceito para publicação em: 07/11/2026
Publicado em: 15/11/2026

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais, impulsionadas pelo aumento das concentrações de gases de efeito estufa, têm alterado significativamente os padrões de circulação atmosférica e oceânica, manifestando-se em todos os ecossistemas do planeta. Seus efeitos, que afetam tanto zonas urbanas quanto rurais, são perceptíveis em sistemas terrestres, aquáticos e agropecuários, contribuindo para o agravamento da insegurança alimentar, o comprometimento da saúde coletiva e o aumento de deslocamentos populacionais forçados (IPCC, 2022). No Brasil, esses impactos refletem em uma intensificação da ocorrência de eventos climáticos extremos, como secas prolongadas e precipitações intensas. Essa alteração no regime hidrológico gera consequências severas para a produção agrícola, agrava a propagação de queimadas e incêndios florestais em áreas desmatadas, e aumenta a vulnerabilidade dos centros urbanos a inundações frequentes (Marengo *et al.*, 2016)

A floresta amazônica desempenha um papel fundamental na regulação climática global e manutenção das chuvas regionais. Considerando sua cobertura vegetal e intensa evapotranspiração, o bioma atua no ciclo hidrológico em diferentes escalas por meio da reciclagem e transporte de umidade, fenômeno conhecido como os rios voadores, que abastecem outras regiões do Brasil e países vizinhos (Marengo *et al.*, 2018). Entretanto, nas últimas décadas, tem-se observado uma intensificação da variabilidade climática na bacia amazônica, refletida por anomalias negativas na precipitação, elevação das temperaturas médias e aumento na frequência e severidade de eventos extremos de seca (Gloor *et al.*, 2013; Limberger; Silva, 2016). Historicamente, o avanço no monitoramento contínuo da bacia revelou que eventos de seca severa, como os ocorridos em 2005, 2010 e 2015/2016, causaram a redução significativa nos níveis dos rios, o aumento significativo nas emissões de carbono devido a incêndios e redução da cobertura florestal, evidenciando a crescente vulnerabilidade do bioma a anomalias climáticas prolongadas (Aragão *et al.*, 2018; Jimenez *et al.*, 2021).

Nesse cenário, a utilização de índices climáticos tornou-se uma ferramenta essencial para quantificar e monitorar as secas. O Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (SPEI) destaca-se por incorporar o balanço hídrico, considerando tanto a precipitação quanto a evapotranspiração potencial, o que o torna mais sensível aos efeitos do aquecimento global quando comparado ao O Índice de Precipitação Padronizada (SPI) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010; Beguería *et al.*, 2013). Na região amazônica, diversos estudos

têm aplicado o SPEI para caracterizar episódios de seca, demonstrando que o índice consegue capturar com precisão a intensidade dos eventos recentes. Pesquisas indicam que o aumento da temperatura na Amazônia tem influenciado no aumento do déficit hídrico capturado pelo SPEI, apontando para uma tendência de aumento na frequência de meses secos e uma transição para condições de maior estresse hídrico em várias partes do bioma (Cunha *et al.*, 2019; Pei *et al.*, 2020)

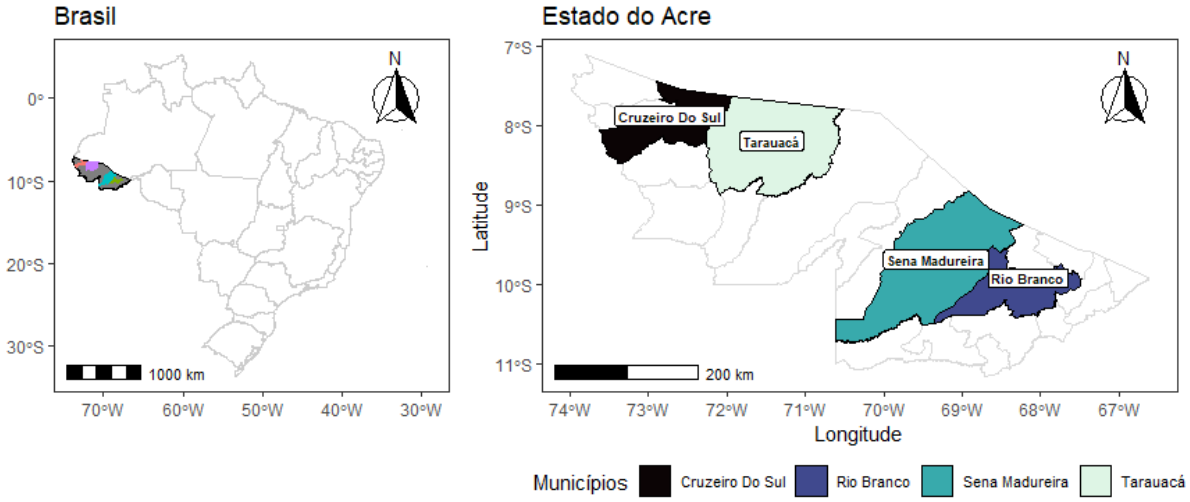
Apesar dos avanços na compreensão das dinâmicas de seca na bacia amazônica, ainda são escassos os estudos detalhados sobre a quantificação desses eventos, especificamente no estado do Acre. Essa região apresenta características hidroclimáticas com regimes sazonais bem definidos, e é fortemente modulada por fenômenos acoplados oceano-atmosfera. Eventos como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e variações nas temperaturas da superfície do mar do Atlântico (como a Oscilação Multidecadal do Atlântico - OMA) alteram os padrões de circulação atmosférica, inibindo a formação de nuvens e reduzindo a precipitação na região (Marengo; Espinoza, 2016; Silva *et al.*, 2023; Gois *et al.*, 2024). Diante dessa suscetibilidade, uma análise aprofundada da variabilidade temporal da precipitação e das secas nos municípios acreanos torna-se essencial para fornecer bases científicas sólidas que subsidiem o planejamento estratégico e mitigação dos impactos socioeconômicos e ambientais locais.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar a distribuição temporal da precipitação e a ocorrência de eventos de seca em quatro municípios do estado do Acre, compreendendo o período de 1980 a 2024. Para a caracterização climática e quantificação dos déficits hídricos, foram utilizados dados de reanálise do conjunto ERA5-Land e o índice SPEI, calculado nas escalas temporais de 3, 6 e 12 meses, permitindo avaliar a resposta da região a secas de curto, médio e longo prazo.

2. METODOLOGIA

O presente estudo foi conduzido em quatro municípios do estado do Acre: Cruzeiro do Sul, Rio Branco, Sena Madureira e Tarauacá (Figura 1). Essas localidades contemplam as duas regiões intermediárias acreanas, Rio Branco e Cruzeiro do Sul, conhecidas como Vale do Acre e Vale do Juruá respectivamente, conforme divisão do IBGE (2017). Essa escolha permitiu uma representação geográfica e climática abrangente do estado, com o intuito de calcular o regime pluviométrico anual e mensal, assim como a distribuição dos eventos de seca.

Figura 1 - Localização geográfica dos municípios Cruzeiro do Sul, Rio Branco, Sena Madureira e Tarauacá, no contexto do estado do Acre, Brasil.



Fonte: Autores, 2025.

Nessas regiões, são desenvolvidas diversas atividades agrícolas. Algumas, como Mandioca, Banana, Milho, Abacaxi e pecuária, já estão consolidadas. Outras, como café e soja, estão em ascensão, sendo culturas e setores altamente dependentes da regularidade pluviométrica (IBGE, 2024). Consequentemente, a ocorrência de secas severas afeta diretamente a segurança alimentar local, o abastecimento hídrico e a navegabilidade dos rios, que é uma via de transporte e escoamento da produção na região (Marengo *et al.*, 2024).

O estado está inserido em duas zonas climáticas conforme a classificação de Köppen: a do tipo Af, que cobre aproximadamente 70% de sua extensão territorial, caracterizada por índices pluviométricos anuais entre 2200 mm e 2500 mm e temperaturas médias variando de 22 a 24 °C; e a do tipo Am, que corresponde a cerca de 30% do território estadual, apresentando menores volumes de precipitação (entre 1900 e 2200 mm por ano) e temperaturas médias mais elevadas, entre 24 °C e 26 °C (Alvares *et al.*, 2013). Os municípios avaliados refletem essa transição: Cruzeiro do Sul e Tarauacá, situados mais a oeste, inserem-se predominantemente na zona climática Af. Já Rio Branco e Sena Madureira, localizados na porção central e leste, apresentam características do clima Am.

2.1. Dados Climáticos

Os dados climáticos utilizados foram obtidos por meio do Serviço Copernicus para as Alterações Climáticas (C3S), implementado pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas

de Médio Prazo (ECMWF), que disponibiliza os conjuntos de reanálises ERA5 e ERA5-Land. Estes dados são caracterizados pela ausência de falhas temporais, disponibilizando uma série completa global e para a região de estudo (Lavers *et al.*, 2022).

Para esta pesquisa foram utilizadas as variáveis precipitação (mm) e temperatura do ar máxima e mínima (°C), extraídas do conjunto ERA5-Land, no período de 1980 a 2024, na escala mensal. Essa reanálise possui cobertura global, com grades de latitude e longitude de 0,10° x 0,10°, com resolução horizontal de 9 km (Muñoz, 2019). Todos os dados foram adquiridos via execução de um script no Code Editor no Google Earth Engine.

Embora seja uma das reanálises atmosféricas mais avançadas, o uso científico do ERA5 possui limitações inerentes ao modelo. Destacam-se a presença de tendências não físicas no registro histórico decorrentes de mudanças nos sistemas de observação assimilados ao longo das décadas. Adicionalmente, o modelo tende a subestimar ou superestimar as incertezas reais de suas estimativas. Tais fragilidades devem ser ponderadas na interpretação dos dados, servindo como uma ressalva importante na análise de tendências climáticas locais. Apesar das limitações, em regiões onde ocorre baixa cobertura de estações meteorológicas, esses dados são caracterizados como uma alternativa para entender o regime climática regional (Hersbach *et al*., 2020).

2.1. Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (SPEI)

Para a caracterização e quantificação das secas, utilizou-se o Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (SPEI), conforme metodologia proposta por Vicente-Serrano *et al.* (2010), que se baseia no balanço hídrico climatológico, calculado a partir da diferença entre a precipitação e evapotranspiração potencial (PET). O SPEI pode ser obtido de acordo com as equações 1 e 2.

$$\mathrm{SPEI} = \mathrm{W} - \frac{\mathrm{C_0}+\mathrm{C_1W}+\mathrm{C_2W^2}}{1+\mathrm{d_1W}+\mathrm{d_2W^2}+\mathrm{d_3W^3}} \quad (1)$$

Onde: P é a probabilidade de um valor D_i obtido por P = 1 - F(x); C_0 = 2,515517; C_1 = 0,802853; C_2 = 0,010328; d_1 = 1,432788; d_2 = 0,189269; d_3 = 0,001308.

$$W = \sqrt{-2\ \ln(P)}\ \text{for}\ P \leq 0{,}5 \quad (2)$$

A PET foi estimada utilizando a metodologia de Thornthwaite (1948), que considera a temperatura média mensal como única variável de entrada, sendo aprimorado para estudos regionais com limitações de dados. Vicente-Serrano *et al.* (2010), descreve os requisitos e métodos necessários para a determinação do SPEI e PET, sendo apresentadas nas equações 3, 4 e 5.

$$PET = 16d\left(\frac{10T}{I}\right)^{m} \quad (3)$$

Onde: T (°C) é a temperatura média do ar no mês, d é o fator de correção baseado na latitude do mês na área de estudo, e $m = 6{,}75 \times 10^{-7}\ I^3 - 7{,}71 \times 10^{-5}\ I^2 + 1{,}79 \times 10^{-2}\ I + 0{,}49$.

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1{,}514} \quad (4)$$

$$I = \sum_{j=i}^{12} i \quad (5)$$

Onde: I é o índice térmico anual e i o mensal.

Embora amplamente empregada em estudos de seca em regiões com dados climáticos limitados, essa abordagem apresenta limitações intrínsecas quando comparada a métodos mais completos, como o Penman–Monteith (FAO-56), que considera variáveis adicionais (radiação, umidade e vento) que influenciam a demanda atmosférica por água (Lee *et al*., 2024).

Apesar das limitações, sua adoção para estimativa da PET no cálculo do SPEI é considerada adequada quando o objetivo é avaliar tendências e comparar padrões regionais em séries climatológicas prolongadas, especialmente em contextos de restrição de dados meteorológicos completos. Em análises multiescalares, evidências recentes indicam que as diferenças entre métodos simplificados de PET (como Thornthwaite) e métodos de referência (Penman–Monteith) tendem a diminuir para períodos de acumulação mais longos, com concordância estatisticamente semelhante em escalas superiores a 12 meses, o que reforça a robustez do SPEI para investigação de sinais climáticos persistentes e tendências de longo prazo (SPEI-12) (Lee *et al*., 2024, Keune *et al*., 2025).

O SPEI é utilizado para caracterização de secas, podendo ser calculado em diferentes escalas de tempo, como 1, 3, 6, 12 e 24 meses, classificando assim vários períodos de secas. Para seu monitoramento, escalas de 1 a 3 meses são utilizadas para identificar secas meteorológicas, e escalas de 3, 6 e 12 meses para secas agrícolas e superiores. Assim, podemos descrever possíveis secas com efeitos nos reservatórios e recursos hídricos.

No estudo, o cálculo do SPEI foi realizado nas escalas temporais de 3, 6 e 12 meses acumulados, por meio do pacote SPEI (Beguería; Vicente-Serrano, 2023), disponível no software R (R Core Team, 2023). A classificação dos eventos de seca seguiu os critérios conforme apresentados no quadro 1.

Quadro 1- Classificação de secas segundo os valores do SPEI.

Categorias de umidade climática	SPI e SPEI
Extremamente úmido	≥ 2,00
Severamente úmido	1,50 a 1,99
Moderadamente úmido	1,00 a 1,49
Próximo ao normal	0,99 a -0,99
Seca moderada	-1,00 a -1,49
Seca severa	-1,50 a -1,99
Seca extrema	≤ -2,00

Fonte: Liu *et al*. (2021), adaptada pelos autores (2025).

2.2. Análise de tendências

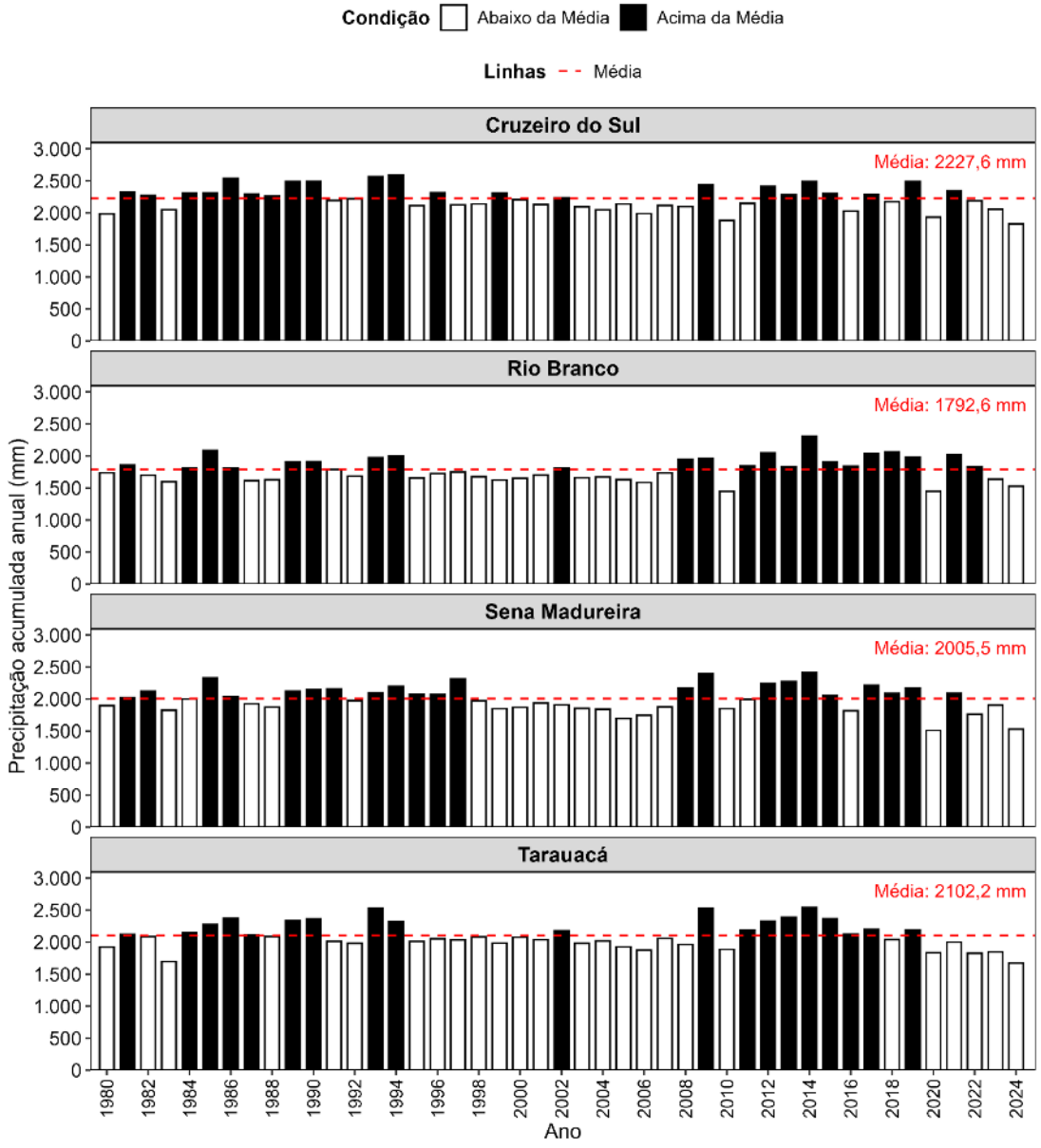
Para este estudo, as análises de tendências foram avaliadas usando o teste de Mann-Kendall (MK). Esse método estatístico não paramétrico é empregado para identificação de tendências em séries temporais, muito utilizado em estudos climáticos e ambientais (Dogiso; Muluneh; Ketema, 2025). Por exemplo, em estudos para analisar tendências em variáveis climáticas como precipitação e temperatura média, bem como em índices climáticos extremos (Mohammad *et al.*, 2022). O resultado do teste é expresso através do valor estatístico Z; se o Z for positivo, indica uma tendência de aumento, e se for negativo, indica uma tendência de diminuição (Han *et al.*, 2025).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Precipitação

A análise do regime pluviométrico anual dos municípios acreanos revelou variações expressivas ao longo do período de 1980 a 2024, com flutuações substanciais de um ano para o outro em relação à média climatológica. Entre os quatro municípios analisados, Cruzeiro do Sul apresentou a maior média anual de precipitação com 2.227,6 mm, seguido por Tarauacá com 2.102,2 mm, Sena Madureira com 2.005,5 mm e Rio Branco com 1.792,6 mm (Figura 2).

Figura 2 - Distribuição anual da precipitação para os municípios de Cruzeiro do Sul, Rio Branco, Sena Madureira e Tarauacá, estado do Acre, entre os anos de 1980 e 2024.



Fonte: Autores, 2025.

Esses resultados reforçam a influência do gradiente de umidade do oeste para o leste do estado. Ao compararmos as médias anuais obtidas com dados de estações de superfície descritos na literatura, nota-se que o ERA5-Land apresenta variações locais de acurácia. Para Cruzeiro do Sul, a reanálise estimou uma média de 2.227,6 mm, o que representa uma superestimação em relação aos 2.083,5 mm reportados por José *et al.* (2022) para a região do Alto Juruá. Em contrapartida, para Rio Branco, o ERA5-Land registrou 1.792,6 mm, configurando uma subestimação frente aos 1.947,0 mm constatados por Souza *et al.* (2021) para a capital.

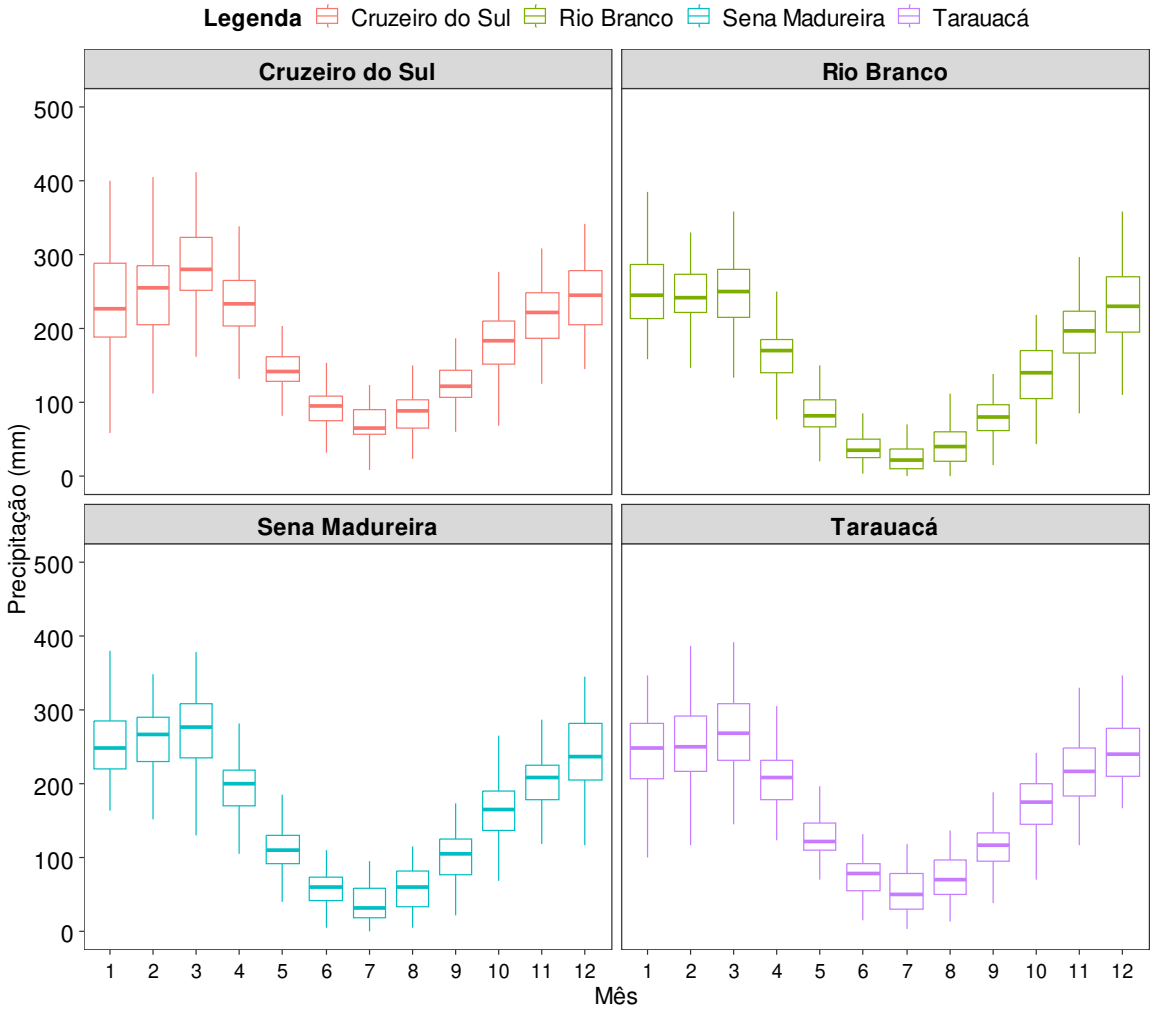
Esse comportamento técnico inerente aos dados de reanálise foi caracterizado recentemente por Silva *et al.* (2023). Ao avaliarem comparativamente diferentes fontes de dados de precipitação para a Amazônia Legal, os autores atestaram que, embora o ERA5-Land seja altamente eficiente e recomendado para representar o ciclo sazonal e a variabilidade interanual das chuvas, o produto é suscetível a vieses (predominantemente de subestimação) na região amazônica. Tais divergências locais ocorrem em virtude das parametrizações do modelo frente à complexidade convectiva da floresta e da escassez histórica de redes pluviométricas densas para assimilação de dados na região norte do Brasil.

Nessa abordagem, nota-se uma variação no regime anual de chuvas. As médias gerais indicam que a precipitação é maior nas regiões de Cruzeiro do Sul e Tarauacá em comparação com Rio Branco e Sena Madureira. Além disso, observa-se que em vários anos a precipitação anual ficou abaixo da média climatológica. Esse fato foi corroborado por Gois *et al.* (2024), que associaram essa anomalia a eventos ENOS. Ao analisar o índice de anomalia de chuva para Rio Branco entre 1980 e 2020, o estudo identificou que em 56,1% dos anos a precipitação não superou a média anual, período no qual também foram identificados eventos de secas para a região.

Avaliando a precipitação mensal acumulada, nota-se a presença de duas estações bem definidas, corroborando a classificação de José *et al.* (2022) e Macêdo *et al.* (2013). A estação chuvosa estende-se de outubro a abril, período no qual a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) atua como o principal sistema meteorológico responsável por canalizar a umidade oceânica e amazônica, gerando altos índices pluviométricos (Gois *et al.*, 2024). Nesse intervalo, o mês de março exibiu os maiores acumulados, com valores médios de 283,7 mm, 247,6 mm, 277,1 mm e 279,5 mm para Cruzeiro do Sul, Rio Branco, Sena Madureira e

Tarauacá, respectivamente. O maior desvio padrão em março ocorreu em Tarauacá, enquanto nos demais municípios a maior variabilidade pluviométrica foi registrada em janeiro (Figura 3).

Figura 3 - Distribuição mensal da precipitação para os municípios de Cruzeiro do Sul, Rio Branco, Sena Madureira e Tarauacá, estado do Acre, entre os anos de 1980 e 2024.



Fonte: Autores, 2025.

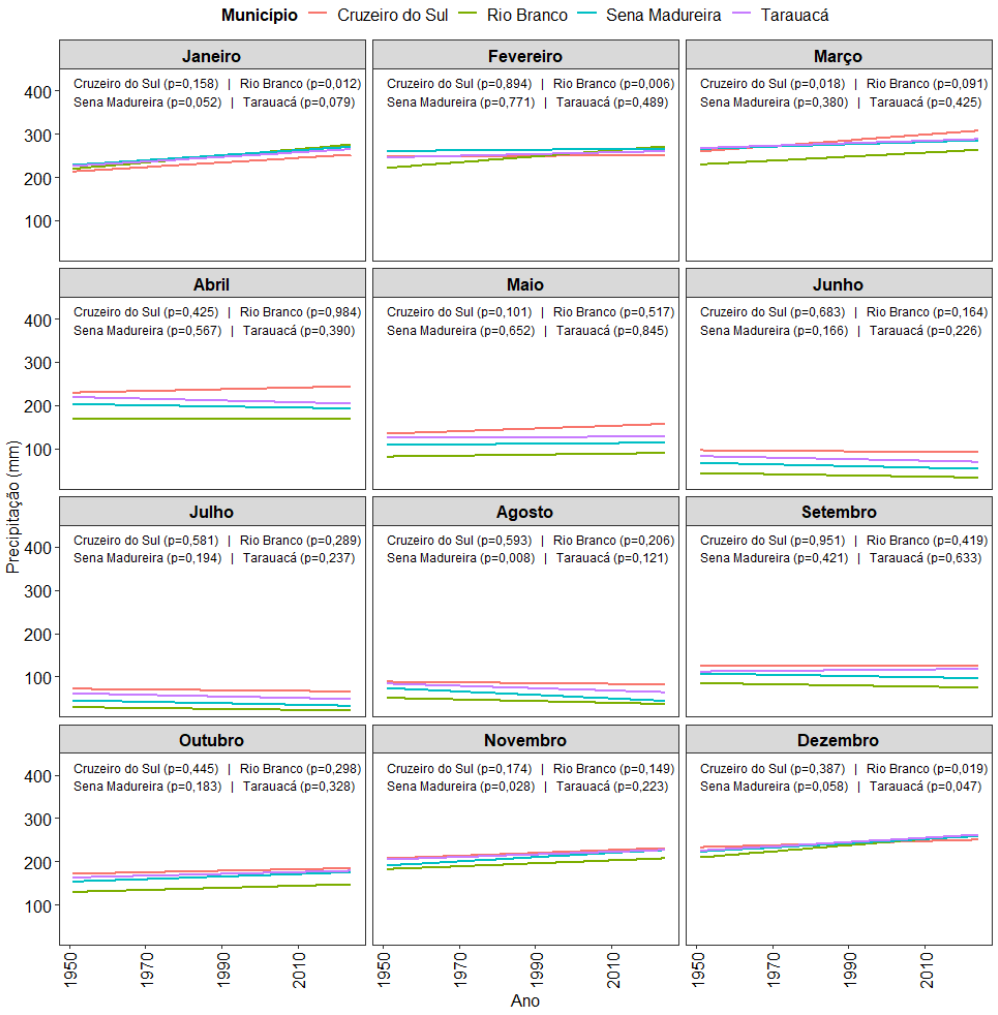
Em contraste, a estação seca, compreendida entre maio e setembro, obteve índices inferiores a 150 mm, com menor oscilação. Segundo Pinto *et al.* (2022), o mês de agosto é classicamente considerado o período mais seco na Amazônia. No presente estudo, o mês de julho configurou-se como o mais crítico, com médias de 25,1 mm, 68,4 mm, 38,4 mm e 54,1 mm para Rio Branco, Cruzeiro do Sul, Sena Madureira e Tarauacá, respectivamente.

Segundo Pinto *et al.* (2022), em estudos voltados à relação dos Índices de Anomalia de Chuva (IAC) com desastres naturais na Amazônia, o mês de março consolida o maior regime

pluviométrico mensal, seguido pelo mês de agosto, considerado o período mais seco. Esses altos índices pluviométricos no período chuvoso são justificados pela atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que Gois *et al.* (2024) descrevem como responsável por contribuir na formação das chuvas na região Amazônica, partindo da intensa evaporação nos oceanos e da produção das massas de ar carregadas de umidade.

A aplicação do teste de Mann-Kendall (MK) na análise da distribuição mensal da precipitação caracterizou tendências significativas de mudança no regime pluviométrico, indicando uma aceleração das alterações climáticas nas últimas quatro décadas (Figura 4). Embora a sazonalidade regional se mantenha, notou-se uma tendência comum a todos os municípios avaliados, com reduções na precipitação nos meses críticos da estiagem.

Figura 4 - Análise de tendência mensal da precipitação para os municípios de Cruzeiro do Sul, Rio Branco, Sena Madureira e Tarauacá, estado do Acre, entre os anos de 1980 e 2024.



Fonte: Autores, 2025.

O município de Sena Madureira destaca-se negativamente, apresentando uma tendência significativa de redução das chuvas no auge da estação seca (agosto, p = 0,004) e no mês de novembro (p = 0,027). Essa redução acentuada em novembro sugere um atraso na consolidação da estação chuvosa nesse município, prolongando o estresse hídrico. Do ponto de vista prático e socioeconômico, o prolongamento da estiagem e o atraso no retorno das chuvas geram impactos severos para as comunidades locais (Silva *et al*., 2023).

Na agricultura familiar e de subsistência, amplamente praticada na região, essas oscilações meteorológicas afetam o preparo do solo e retardando o plantio, o que pode resultar em quebra de safra e insegurança alimentar. Além disso, a extensão do período seco afeta diretamente a navegabilidade dos rios, principal via de transporte de insumos e pessoas, isolando comunidades ribeirinhas, e aumenta a vulnerabilidade dessas regiões (Silva Júnior *et al.*, 2020).

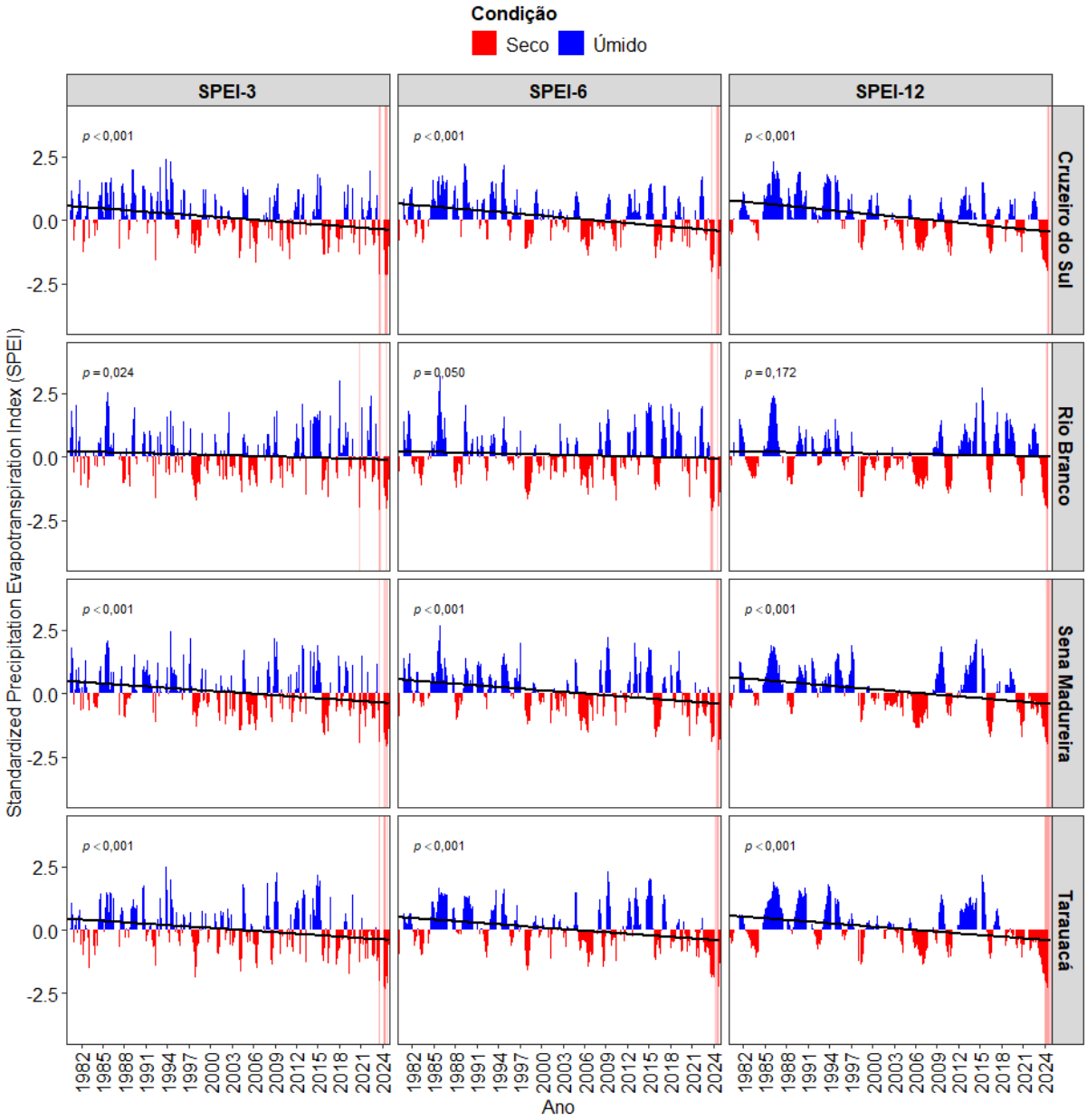
Em contrapartida, durante o período chuvoso, observam-se tendências de aumento significativo ($p < 0,05$) na precipitação em localidades específicas. A capital Rio Branco apresentou um aumento no volume de chuvas nos meses de dezembro (p = 0,040), janeiro (p = 0,020) e fevereiro (p = 0,038). Já o município de Cruzeiro do Sul registrou um aumento significativo apenas no mês de março (p = 0,012). Essa concentração de chuvas mais intensas em meses específicos do verão, contrastando com secas mais severas em outros períodos, evidencia uma polarização do clima local, exigindo adaptações nas infraestruturas urbanas para lidar com volumes concentrados de precipitação.

3.2. Eventos de secas

A análise do SPEI na escala de 3 meses (SPEI-3) evidenciou oscilações frequentes entre períodos úmidos e secos em todos os municípios durante todos os anos analisados, com escalas e intensidades diferentes para cada município. Outro fator proeminente, corroborado estatisticamente pelas linhas de tendência linear negativa apresentadas na Figura 5, foi a progressiva acentuação dos períodos secos. Essa transição para um regime de déficit hídrico começou com o início do século XXI, sofrendo um agravamento ao longo da última década (2014 a 2024). Nesse período recente, episódios classificados como excepcionalmente secos

(SPEI ≤ -2,00) ocorreram em todos os municípios, sendo mais recorrentes em Cruzeiro do Sul e Rio Branco (Figura 5).

Figura 5 - Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração na escala de 3, 6 e 12 meses acumulados (SPEI-3) para os municípios de Cruzeiro do Sul, Rio Branco, Sena Madureira e Tarauacá, estado do Acre, entre os anos de 1980 e 2024.



Fonte: Autores, 2025.

Os resultados para os municípios de Sena Madureira e Tarauacá foram semelhantes em função da caracterização dos períodos úmidos e secos pelo SPEI-3, os principais eventos de secas foram observados nos anos de 1980 a 1982 e na década de 1990. Já a partir dos anos 2000, os períodos secos tornaram-se mais incidentes, apresentando longa duração, alta

intensidade e elevada severidade, especialmente durante os períodos de 2004 a 2006, 2010 a 2011, 2015 a 2020 e, mais recentemente, atingindo picos extremos no biênio 2023-2024, com SPEI inferior a -2,00, classificado como muito Seco.

Para Cruzeiro do Sul e Rio Branco, os eventos foram semelhantes comparados às outras regiões, no entanto, os intervalos de seca apresentam maior intensidade, duração e severidade, ocorrendo em maior constância ao passar dos anos. Estes dois municípios são classificados como severamente e excepcionalmente secos em vários períodos, em especial durante 2004 a 2006, 2010 e 2023, com índices SPEI inferiores a -2,00.

A intensificação observada nos índices SPEI para os municípios acreanos corrobora outros estudos realizados na região amazônica, a qual tem presenciado uma crescente variabilidade climática nas últimas décadas, expressa por oscilações na precipitação, nos níveis dos rios, elevação das temperaturas e aumento na frequência de eventos extremos de seca (Feldpausch *et al.*, 2016). Ao investigarem a ocorrência de secas no rio Amazonas, Paredes-Trejo *et al.* (2021) identificaram eventos significativos nos anos de 1964, 1992, 2010 e 2016, além de períodos úmidos entre 1973 e 1975. Os autores também destacam uma intensificação da frequência de secas a partir de 1975, com um número crescente de meses consecutivos com déficit hídrico em diferentes escalas temporais, um padrão de agravamento que se reflete nas tendências negativas atestadas para Cruzeiro do Sul, Rio Branco, Sena Madureira e Tarauacá em nossos resultados (Figura 5).

Diversos cenários climáticos indicam um aumento significativo na ocorrência de secas extremas em várias regiões, incluindo a Amazônia. Períodos com baixos volumes pluviométricos registrados na literatura nos anos de 1980, 1983, 1995, 1997, 2005 e 2010 provocaram impactos expressivos nos níveis dos rios e intensificaram a ocorrência de secas prolongadas na bacia amazônica (Silva *et al.*, 2023). Ao analisar a Figura 5, é possível constatar que os índices inferiores a -2,00 do índice SPEI (secas excepcionais) nos municípios estudados coincidem com esses anos históricos de crise hídrica.

Para compreender a dinâmica que impulsiona esses extremos locais, é importante correlacionar esses períodos de déficit com as anomalias oceânicas globais. Grande parte desses eventos está diretamente associada aos episódios de El Niño e La Niña, os quais afetam a distribuição das chuvas na região. Especificamente, os eventos de seca mais severos identificados pelo SPEI neste estudo alinham-se com a ocorrência de episódios de El Niño

classificados como fortes ou muito fortes, a exemplo dos biênios 1982/1983, 1997/1998, 2015/2016 e, mais recentemente, o evento extremo de 2023/2024. Durante essas fases, o aquecimento anômalo do Oceano Pacífico suprime a convecção na Amazônia, inibindo a formação de chuvas. Adicionalmente, as secas acentuadas capturadas em 2005 e 2010 foram impulsionadas pelo aquecimento do Atlântico Tropical Norte. Além disso, alterações no transporte de umidade dentro da Amazônia podem desencadear mudanças no ciclo hidrológico local, agravando os déficits hídricos em determinadas áreas (Marengo; Espinoza, 2016; Panisset *et al.*, 2017).

Nas escalas de 6 e 12 meses (SPEI-6 e SPEI-12), observou-se maior persistência e elevada severidade das secas, especialmente em Cruzeiro do Sul, onde ocorreu uma inversão do padrão úmido para seco a partir de 1995, com registros classificados como anos excepcionalmente secos (-2,00) (Figura 5). Apesar da ocorrência de curtos intervalos com classificação úmida a partir do início do século XXI, após 2016 é observada uma maior predominância de períodos secos, com mudanças na intensidade.

A variabilidade interanual torna-se mais perceptível em Sena Madureira e Tarauacá, apresentando períodos alternados de secas severas e umidade excepcional, como os eventos marcantes de intenso déficit hídrico intercalados por anomalias úmidas entre 2001 a 2012 e 2016 a 2023, determinando diferentes regimes hídricos para esses municípios. Por sua vez, o município de Rio Branco apresenta uma variabilidade significativa entre períodos úmidos e secos ao longo dos anos, com regimes classificados tanto como excepcionalmente úmidos quanto secos em determinados períodos. Embora haja alternância entre esses eventos, observa-se, a partir de 2015, uma tendência de consolidação de períodos secos, com registros que ultrapassam a escala de -2,00 no índice SPEI.

Esse padrão de severidade hídrica detectado nas escalas de médio e longo prazo (SPEI-6 e SPEI-12) reflete a dinâmica de eventos extremos documentada historicamente na Amazônia. Segundo Espinoza *et al.* (2014), as secas mais severas que afetaram a região do Alto Solimões, adjacente ao oeste do Acre, ocorreram em 1995, 1998, 2005 e 2010. Dentre esses eventos, 2010 destacou-se significativamente, quando comparado a 2005, ano que mais ocasionou danos à região amazônica. A compreensão desses déficits prolongados é fundamental, visto que, de acordo com Aragão *et al.* (2007), a seca de 2005 foi atribuída exclusivamente às anomalias da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Oceano

Atlântico, principalmente à Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA). Isso demonstra que o regime hídrico dos municípios acreanos responde de forma aguda e persistente tanto às anomalias do Pacífico (ENOS) quanto às do Atlântico, configurando o cenário recente de extrema seca.

A intensificação e a maior persistência das secas observadas nas escalas SPEI-6 e SPEI-12 indicam não apenas variabilidade interanual, mas impactos estruturais sobre os sistemas produtivos regionais. Do ponto de vista agroclimático, déficits hídricos prolongados comprometem culturas sensíveis ao estresse hídrico, como mandioca, milho e banana, amplamente cultivadas no estado do Acre e predominantes em sistemas de agricultura familiar. Estudos evidenciam que reduções na precipitação durante estágios fenológicos críticos podem ocasionar perdas de produtividade superiores a 20%, sobretudo em sistemas sem irrigação (Cunha *et al*., 2019; Pei *et al*., 2020; Pereira *et al*., 2022). Além da redução direta na produção, a irregularidade das chuvas compromete o calendário agrícola, aumenta a incerteza no plantio e eleva o risco de insegurança alimentar em comunidades rurais dependentes da produção local.

Paralelamente, a consolidação de um regime mais seco a partir dos anos 2000 pode estar associada a mecanismos de retroalimentação entre mudanças no uso da terra e clima regional. A substituição da floresta por pastagens e áreas agrícolas reduz a evapotranspiração e altera os fluxos de calor sensível e latente, enfraquecendo a reciclagem de umidade e a formação de sistemas convectivos locais. Esse processo, já documentado para a Amazônia meridional, pode intensificar a duração e severidade das secas ao reduzir o aporte de vapor d'água atmosférico e prolongar a estação seca (Gloor *et al*., 2013; Spracklen *et al*., 2012; Rattis *et al*., 2021). Tal dinâmica contribui para a consolidação de um novo regime hidroclimático caracterizado por maior frequência de déficits hídricos persistentes, como evidenciado pelas tendências negativas do SPEI-3, SPEI-6 e SPEI-12 nos municípios acreanos.

Conforme evidenciado pelas análises do SPEI nas diferentes escalas temporais, as secas na Amazônia são resultantes de uma interação complexa de fatores climáticos. Elas são fortemente influenciadas pelo fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), que afeta a dinâmica atmosférica e a distribuição das chuvas na região. Esses eventos extremos provocam diversas anomalias hidrometeorológicas, tanto positivas quanto negativas, refletindo em alterações nos níveis dos rios e nos padrões de precipitação em amplas áreas da Bacia Amazônica,

incluindo as regiões Norte, Centro, Leste e Oeste (Aragão *et al.*, 2007; Marengo *et al.*, 2018). Em nossos resultados, essa influência global traduz-se na alternância abrupta de anomalias capturadas pelo índice, confirmando que os municípios estudados no Acre são altamente vulneráveis a essas forçantes macroclimáticas.

De forma geral, os resultados deste estudo evidenciam que os quatro municípios analisados apresentam distintos eventos de seca ao longo da série histórica, variando em intensidade, duração e escala temporal. Até o final do século XX, foi observada uma alternância mais equilibrada entre períodos úmidos e secos. Entretanto, a partir dos anos 2000, as secas tornaram-se mais frequentes, intensas e severas em todos os municípios. Nesse contexto, destacaram-se os eventos extremos ocorridos entre 1986 e 1998, que servem de marco de transição para o início de um novo padrão hidrológico na região.

Consolidando essa mudança, a análise específica da última década revelou uma acentuada redução nos índices pluviométricos. Essa condição elevou a ocorrência e a persistência de secas nos municípios de Cruzeiro do Sul, Rio Branco, Sena Madureira e Tarauacá, gerando impactos diretos sobre os níveis dos rios e comprometendo a disponibilidade hídrica regional, o que exige atenção iminente para a formulação de estratégias de mitigação e adaptação climática frente a esse novo cenário de extremos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização climatológica confirmou um gradiente de precipitação decrescente no sentido oeste-leste. Cruzeiro do Sul apresentou a maior média anual (2.227,6 mm), seguida por Tarauacá (2.102,2 mm), Sena Madureira (2.005,5mm) e Rio Branco (1.792,6 mm). Embora nesses municípios há indicação de redução nos volumes anuais, apenas Cruzeiro do Sul apresentou tendência estatisticamente significativa nesta escala temporal, entre 1980 a 2024.

As análises do índice SPEI caracterizaram um aumento significativo na frequência, intensidade e duração dos eventos de seca a partir dos anos 2000. Destaca-se a severidade desses eventos em todos os municípios, especialmente nos últimos cinco anos, corroborando o cenário de extremos climáticos mais recorrentes.

A detecção de tendências negativas significativas de precipitação nos meses de transição indica um possível prolongamento da estação seca. Essa alteração sazonal representa um risco para a região, demandando a revisão dos calendários agrícolas e o

fortalecimento de políticas públicas para prevenção de incêndios florestais e gestão de recursos hídricos no período de estiagem.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado. Os autores também agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) e ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola (PPGASP) da Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT) pelo suporte institucional e pelas condições oferecidas para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. http://143.107.18.37/material/mftandra2/ACA0225/Alvares_etal_Koppen_climate_classBrazil_MeteoZei_2014.pdf

ARAGÃO, L. E. O. C. *et al.* Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 1, p. 1-5, 2007. https://doi.org/10.1029/2006GL028946

ARAGÃO, L. E. et al. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 536, 2018. https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y

BEGUERÍA, S. *et al.* Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 10, p. 3001–3023, 2013. https://doi.org/10.1002/joc.3887

COOK, B. I. *et al.* Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. **Earth's Future**, v. 8, n. 6, p. e2019EF001461, 2020. https://doi.org/10.1029/2019EF001461

CUNHA, A. P. M. A.; ZERI, M.; LEAL, K. D.; COSTA, L.; CUARTAS, L. A.; MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M.; BARBOSA, A. A.; CUNNINGHAM, C.; *et al*. Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, v. 10, n. 11, p. 642, 2019. https://doi.org/10.3390/atmos10110642

DOGISO, D.; MULUNEH, A.; KETEMA, A. Soil Erosion Responses to CMIP6 Climate Scenarios and Land Cover Changes in the Gidabo Watershed, Ethiopia: Implications for Sustainable Watershed Management. **Land Degradation & Development**, v. 36, n. 9, p. 2981-3002, 2025. https://doi.org/10.1002/ldr.5546

DUFFY, P. B. *et al.* Projections of future meteorological drought and wet periods in the Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 43, p. 13172-13177, 2015. https://doi.org/10.1073/pnas.1421010112

ERFANIAN, A.; WANG, G.; FOMENKO, L. Unprecedented drought over tropical South America in 2016: significantly under-predicted by tropical SST. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1-11, 2017. https://doi.org/10.1038/s41598-017-05373-2

ESPINOZA, J. C. *et al.* The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 12, p. 124007, 2014. https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/12/124007

FELDPAUSCH, T. R. *et al.* Amazon forest response to repeated droughts. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 30, n. 7, p. 964-982, 2016. https://doi.org/10.1002/2015GB005133

GLOOR, M. *et al.* Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. **Geophysical Research Letters**, v. 40, p. 1729–1733, 2013. https://doi.org/10.1002/grl.50377

GOIS, G. *et al.* Análise da variabilidade interanual da seca via Índice de Precipitação Padronizado (SPI) associada ao El Niño-Oscilação Sul (ENOS) no estado do Acre (AC). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 35, p. 574–606, 2024. https://doi.org/10.55761/abclima.v35i20.17936

HAN, X.; CHEN, Q.; FU, D. Trends in extreme precipitation and associated natural disasters in China, 1961–2021. **Climate**, v. 13, n. 4, p. 74, 2025. https://doi.org/10.3390/cli13040074

HERSBACH, H. et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 2020. https://doi.org/10.1002/qj.3803

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Divisão do Brasil em mesorregiões e microrregiões**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Acesso em: 10 mar. 2025. https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/redes-geograficas/15778-divisoes-regionais-do-brasil.html

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA: Produção Agrícola Municipal.** Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/. Acesso em: 1 mar. 2026.

IPCC. **Climate Change 2022**: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

JIAO, W.; WANG, L.; MCCABE, M. F. Multi-sensor remote sensing for drought characterization: current status, opportunities and a roadmap for the future. **Remote Sensing of Environment**, v. 256, p. 112313, 2021. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112313

JIMENEZ, J. C. et al. The role of ENSO flavours and TNA on recent droughts over Amazon forests and the Northeast Brazil region. University of Exeter. **Journal contribution**. https://hdl.handle.net/10871/40765

JOSÉ, J. V. *et al.* Probabilidade de ocorrência da precipitação pluvial em três cidades da Bacia Hidrográfica do Alto Juruá. **Irriga**, v. 27, n. 1, p. 124-140, 2022. http://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4528

KEUNE, J.; DI GIUSEPPE, F.; BARNARD, C. *et al*. ERA5–Drought: Global drought indices based on ECMWF reanalysis. **Scientific Data**, v. 12, n. 616, 2025. https://doi.org/10.1038/s41597-025-04896-y

LAVERS, D. A. *et al.* An evaluation of ERA5 precipitation for climate monitoring. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 148, n. 748, p. 3152-3165, 2022. https://doi.org/10.1002/qj.4351

LEE, S.; MORIASI, D. N.; MEHR, A. D.; MIRCHI, A. Sensitivity of Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI) to the choice of SPEI probability distribution and evapotranspiration method. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 53, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101761

LI, L. *et al.* Elucidating diverse drought characteristics from two meteorological drought indices (SPI and SPEI) in China. **Journal of Hydrometeorology**, v. 21, n. 7, p. 1513-1530, 2020. https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0290.1

LIMBERGER, L.; SILVA, M. E. S. Precipitação na bacia amazônica e sua associação à variabilidade da temperatura da superfície dos oceanos Pacífico e Atlântico: uma revisão. **GEOUSP Espaço e Tempo**, São Paulo, v. 20, n. 3, p. 657–675, 2016. https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2016.105393

LIU, C.; YANG, C.; YANG, Q.; WANG, J. Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China. **Scientific Reports**, p. 11, n. 1280, 2021. https://doi.org/10.1038/s41598-020-80527-3

LIU, Q. *et al.* The optimal applications of scPDSI and SPEI in characterizing meteorological drought, agricultural drought and terrestrial water availability on a global scale. **Science of The Total Environment**, p. 175933, 2024. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175933

MACÊDO, M. N. C. de *et al.* Precipitação pluviométrica e vazão da bacia hidrográfica do Riozinho do Rôla, Amazônia Ocidental. **Revista Ambiente e Água**, v. 8, p. 206-221, 2013. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.809

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, n. 228, 2018. https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228

MARENGO, J. A. *et al.* Impacts of Climate Extremes in Brazil: The Development of a Web Platform for Understanding Long-Term Sustainability of Ecosystems and Human Health in Amazonia (PULSE-Brazil). **Boletim da Sociedade Americana de Meteorologia**, v. 97, n. 8, p. 1341-1346, 2016. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00177.1

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033-1050, 2016. https://doi.org/10.1002/joc.4420

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, e54es22098, 2024. https://doi.org/10.1590/1809-4392202200980

MUÑOZ, S. J. **Dados médios mensais do ERA5-Land de 1981 até o presente**. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2019. https://doi.org/10.24381/cds.68d2bb30

MOHAMMAD, L. et al. Assessment of spatio-temporal trends of satellite-based aerosol optical depth using Mann–Kendall test and Sen's slope estimator model. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 13, n. 1, p. 1270-1298, 2022. https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2070552

PANISSET, J. S.; LIBONATI, R.; GOUVEIA, C. M. P. Contrasting patterns of the extreme drought episodes of 2005. **International Journal of Climatology**, v. 38, p. 1096-1104, 2018. https://doi.org/10.1002/joc.5224

PAREDES-TREJO, F. *et al.* Long-term spatiotemporal variation of droughts in the Amazon River basin. **Water**, v. 13, n. 3, p. 351, 2021. https://doi.org/10.3390/w13030351

PEI, Z. *et al.* Comparative analysis of drought indicated by the SPI and SPEI at various timescales in inner Mongolia, China. **Water**, v. 12, n. 7, e1925, 2020. https://doi.org/10.3390/w12071925

PEREIRA, L. F. M. *et al*. Morphology, biochemistry, and yield of cassava as functions of growth stage and water regime. **South African Journal of Botany**, v. 149, p. 222-239, 2022. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.06.003

PINTO, C. A. D. *et al.* Índice de anomalia de chuva (IAC) e sua relação com os desastres naturais no leste da Amazônia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 15, n. 5, p. 2544-2572, 2022. https://repositorio.museu-goeldi.br/server/api/core/bitstreams/7595f28c-91e3-4e7e-9a9c-f5b6dddfbfba/content

RATTIS, L.; BRANDO, P. M.; MACEDO, M. N. *et al*. Climatic limit for agriculture in Brazil. **Nature Climate Change**, v. 11, p. 1098–1104, 2021. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01214-3

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023.

SILVA, S. S. *et al.* Amazon climate extremes: Increasing droughts and floods in Brazil's state of Acre. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 21, p. 311-317, 2023. https://doi.org/10.1016/j.pecon.2023.10.006

SOUZA, *et al.* Análise da precipitação e identificação de eventos de seca em municípios do Oeste de Mato Grosso por meio dos índices SPEI-3 e SPEI-6. **Nativa**, Sinop, v. 12, n. 4, p. 706-715, 2024. https://doi.org/10.31413/nat.v12i4.18169

SOUZA, A. G. S. S.; NETO, A. R.; DE SOUZA, L. L. Soil moisture-based index for agricultural drought assessment: SMADI application in Pernambuco State-Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 252, p. 112124, 2021. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112124

SPRACKLEN, D. V.; ARNOLD, S. R.; TAYLOR, C. M. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. **Nature**, v. 489, p. 282–285, 2012. https://doi.org/10.1038/nature11390

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. **Journal of Climate**, v. 23, p. 1696-1718, 2010. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

ZIPPER, S. C.; QIU, J.; KUCHARIK, C. J. Drought effects on US maize and soybean production: spatiotemporal patterns and historical changes. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 9, p. 094021, 2016. http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/094021