



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

Moisés Damasceno SOUZA ^{*1,2}, Rivanildo DALLACORT ^{1,2}, Vanessa Rakel de Moraes DIAS ²,
William FENNER ², Rafael Cesar TIEPPO ^{1,2}, Gabriela Custodio OLIVEIRA ²

¹ Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola, Universidade do Estado de Mato Grosso, Tangará da Serra, MT, Brasil.

² Centro Tecnológico de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, Universidade do Estado de Mato Grosso, Tangará da Serra, MT, Brasil.

*E-mail: moises.damasceno@unemat.br

Submetido em: 05/08/2024; Aceito em 07/11/2024; Publicado em: 18/11/2024.

RESUMO: A seca é o principal evento causado pela variabilidade climática, esses episódios aumentam em frequência, intensidade e duração no Brasil. O objetivo desse estudo é avaliar a distribuição anual e mensal da precipitação e tendências de acréscimos ou decréscimos e identificar eventos de secas meteorológicas e agrícolas para os municípios da região Oeste de Mato Grosso: Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Comodoro e Sapezal. Os dados foram adquiridos via Google Earth Engine (GEE), e correspondem a reanálises ERA5-Land. Para avaliação das secas foi utilizado o Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (SPEI). Para análise de tendência foi aplicado o teste não paramétrico de Man-Kendall. Nos quatro municípios há duas estações bem definidas, seca e chuvosa, com regime anual de precipitação semelhantes. A maior média anual de precipitação foi em Comodoro, bioma Amazônico, sendo os outros três do bioma Cerrado. É observada uma redução da precipitação anual nas últimas décadas em toda a região. No início do século XXI, houve maior acentuação de períodos secos, conforme a estatística Z do teste de Man-Kendall ocorreu redução significativa da precipitação em maio, julho, agosto setembro e outubro. Os principais eventos de secas foram em 2015 a 2016 e 2019 a 2020 para as regiões.

Palavras-chave: tendências; variabilidade climática; Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração.

Analysis of precipitation and identification of drought events in municipalities in western Mato Grosso using SPEI-3 and SPEI-6 indices

ABSTRACT: Drought is the primary event driven by climate variability, and these episodes are increasing in frequency, intensity, and duration in Brazil. This study aims to assess the annual and monthly distribution, as well as trends of increases or decreases in precipitation, and to identify meteorological and agricultural drought events for municipalities in the western region of Mato Grosso: Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Comodoro, and Sapezal. Data were acquired via Google Earth Engine (GEE), utilizing ERA5-Land reanalysis. To assess droughts, the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) was applied, and the Man-Kendall non-parametric test was used for trend analysis. All four municipalities experience two well-defined seasons, wet and dry, with similar annual precipitation patterns. Comodoro, located in the Amazon biome, recorded the highest annual precipitation averages, while the other three municipalities lie within the Cerrado biome. A decrease in annual precipitation has been observed across the region over recent decades. In the early 21st century, dry periods became more pronounced, with the Man-Kendall Z statistic indicating a significant reduction in precipitation in May, July, August, September, and October. The main drought events occurred in 2015-2016 and 2019-2020 across these regions.

Keywords: trends; climate variability; Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index.

1. INTRODUÇÃO

Definida como o principal desastre natural causada por variações meteorológicas em todo o mundo, as secas causam impactos diretos na agricultura, geração e abastecimento de energia, e na ocorrência de incêndios florestais (FOROOTAN et al., 2019; WU et al., 2021). Esses eventos são condicionados pela redução dos índices pluviométricos em uma região. A alteração na incidência da precipitação pluviométrica, assim como a elevação de temperatura do ar, influencia diretamente o balanço hídrico climatológico e

podem desencadear diversos problemas, essencialmente na disponibilidade de água, causando efeitos diretos na agricultura (HOOGENBOOM, 2019). As mudanças climáticas intensificam as variações no regime da chuva e temperatura do ar, condicionando a escassez de recursos hídricos em todo o mundo, afetando diversos ecossistemas, agricultura e aumentando a vulnerabilidade à eventos climáticos extremos (ZAQOUT; ANDRADÓTTIR, 2024).

O estado de Mato Grosso é caracterizado pela variabilidade climática e de vegetação nas suas diferentes

mesorregiões, essa variação corresponde a presença dos biomas Pantanal, Cerrado e Amazônia, reconhecidos mundialmente pela biodiversidade (CARAUTA et al., 2021). No cenário agrícola o estado representa 29% da produção nacional de soja, com 45,6 milhões de toneladas na safra 2022/23, no entanto, para o período atual, é esperado uma redução de 13,72% na produção da região, essas perdas foram atribuídas pelo baixo volume de chuvas e elevadas temperaturas do ar nas primeiras datas de semeadura, causadas pelo alongamento da estação seca no estado (CONAB, 2024).

De acordo com suas características as secas são classificadas em: meteorológicas, agrícolas, hidrológicas e socioeconômicas. As meteorológicas são atribuídas à eventos extremos de precipitação pluviométrica, com redução nos índices mensais e anuais; a agrícola é caracterizada pelo volume pluviométrico que afeta diretamente a umidade do solo e causa efeitos na agricultura; as hidrológicas quando ocorre a diminuição da vazão dos rios e reservatórios superficiais e subterrâneos; e, por último, as secas socioeconômicas estão voltadas à aspectos humanos e sociais (PEI et al., 2020).

A compreensão da frequência, intensidade, duração e extensão desses episódios são primordiais para entender as condições meteorológicas e hidrológicas de uma região, essencialmente quanto à adaptação a escassez hídrica (PONTES FILHO et al., 2019). Nessa perspectiva, foram desenvolvidos diversos índices para monitoramento e previsão de secas, como o Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (SPEI, sigla em inglês para Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index), utilizados em uma gama de estudos na caracterização de secas. Esses produtos são ferramentas úteis para entender os fenômenos meteorológicos, hidrológicos e agrícolas de uma região (GONÇALVES et al., 2021).

O SPEI é um indicador de seca que tem em sua metodologia a utilização das variáveis climáticas de precipitação e temperatura do ar, além de identificar secas em diferentes escalas (SPEI-1, SPEI-3, SPEI-6, SPEI-12...). O índice considera a variação da evapotranspiração potencial, fator relevante, considerando esse processo como a principal forma de perda de água em um ambiente, essencialmente em regiões com elevadas taxas de temperatura do ar (TIRIVAROMBO; OSUPILE; ELIASSON, 2018).

Os eventos de secas no Brasil ocorreram com maior frequência nos últimos anos, na região Centro-Oeste, os anos de 1997-98, 2015-16 e 2016-17 foram classificados como as secas mais severas dos últimos 30 anos. Dentro dessa perspectiva, a frequência e duração de secas tem ganhado destaque em várias pesquisas no país, como nos estudos na Amazônia (DA SILVA et al., 2023; SHE et al., 2024) e Pantanal (MARENGO et al., 2021; DE SOUZA SANTOS et al., 2024).

Nesse contexto, considerando a importância agrícola do estado de Mato Grosso, assim como a incidência de secas recorrentes nos últimos anos, esta pesquisa busca: (i) avaliar a distribuição da precipitação pluviométrica anual e mensal para os municípios de Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Comodoro e Sapezal; (ii) identificar eventos de secas meteorológicas e agrícolas utilizando o SPEI-3 e SPEI-6.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A pesquisa foi realizada na Universidade do Estado de Mato Grosso, no Campus de Tangará da Serra, nas

instalações do Centro Tecnológico de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto (CETEGEO-SR). A distribuição do regime de chuva e incidência de secas meteorológicas e agrícolas foram estimadas para os municípios de Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Comodoro e Sapezal (Figura 1).

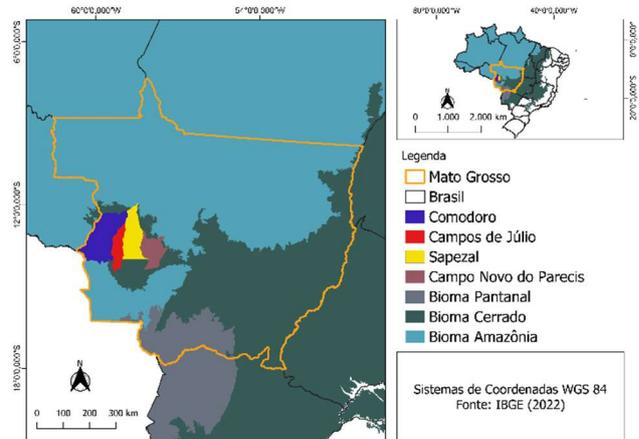


Figura 1. Municípios de Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Comodoro e Sapezal, estado de Mato Grosso, Brasil.

Figure 1. Municipalities of Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Comodoro and Sapezal, state of Mato Grosso, Brazil.

Os municípios foram selecionados em virtude de pertencerem a uma região agrícola com expressiva produção de grãos no estado de Mato Grosso. Foi considerada a presença de regiões de Cerrado e transição entre os biomas Amazônia e Cerrado a que pertencem estes municípios. O clima da região é caracterizado como Aw com clima tropical com estação seca de Inverno (Campo Novo do Parecis) e Am com clima tropical úmido ou subúmido (Campos de Júlio, Comodoro e Sapezal), segundo a classificação de Köppen (KÖPPEN, 1931).

A economia da região é baseada, principalmente, na agricultura, com destaque para o cultivo de soja, milho e algodão (CONAB, 2024).

Os dados climáticos de 1970 a 2023 foram adquiridos via Serviço Copernicus para as Alterações Climáticas (C3S), implementado pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF), que conta com as reanálises ERA5 e ERA5-Land. Esses bancos de dados são característicos por não apresentarem lacunas espaço-temporais nos registros, disponibilizando assim uma série completa global para cada região (LAVERS et al., 2022). Neste estudo foram utilizadas as variáveis climáticas de precipitação (mm) e temperatura do ar (°C) presentes no conjunto de dados do ERA5-Land. Esta reanálise fornece uma visão consistente dos ciclos da água e energia no nível da superfície terrestre em várias décadas, com registros detalhados de 1950 até o presente, com cobertura global e com grades regulares de 0,10° x 0,10° e resolução horizontal de 9 km, para o intervalo de 1970 a 2023 (MUÑOZ, 2019), obtidos via execução de um script no Code Editor no Google Earth Engine (GEE) (<https://github.com/DamascenoSouza/Google-Earth-Engine/blob/main/README.md?plain=1>).

2.2. Google Earth Engine

O GEE é uma plataforma com processamento em nuvem de diferentes dados geoespaciais, fornecendo

alternativas eficazes para estudos sobre as mudanças ambientais e climáticas, agricultura e solo, aumentando assim, sua funcionalidade para descoberta científica (ZHAO et al., 2021). Em apenas um ambiente é possível acessar diferentes conjuntos de dados, com possibilidade para visualização e análise, deste modo, sendo empregada em uma ampla variedade de estudos das ciências da Terra (AMANI et al., 2020).

Como mencionado, o GEE contém um imenso conjunto de dados, em extensões globais, nacionais e regionais, disponíveis gratuitamente aos usuários. Estão presentes dentro da ferramenta, a coleção Landsat, dados adquiridos por satélite Sentinel e imagem MODIS, com mapeamento quase em tempo real. Além dos já descritos, conta com a presença de diferentes conjuntos de clima, como ERA5-land, CHIRPS, TerraClimate e SPEIbase (Produto pronto) (AMANI et al., 2020; ZHAO et al., 2021)

2.3. Índice de seca

O Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (SPEI) foi desenvolvido por Vicente-Serrano et al. (2010), e a sua metodologia é baseada em dados de precipitação e de temperatura do ar. O diferencial deste método é considerar a variabilidade da temperatura na avaliação das secas. A formulação do índice envolve o balanço hídrico climatológico, déficit/excedente em diferentes escalas temporais e ajustado a uma distribuição log-logística (Equação 1) (SOUSA et al., 2024).

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (01)$$

O SPEI é obtido pela normalização do balanço hídrico na distribuição de probabilidade Log-logística. A diferença (Di) entre a precipitação (P) e o PET para o mês (i) é dada na equação 2.

$$D_i = P_i - PET_i \quad (02)$$

Os valores D calculados são agregados pela equação 3.

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} P_{n-1} - (PET)_{N-1} \quad (03)$$

em que: k é o período de meses da agregação e no mês do cálculo.

Com F(x) o SPEI pode ser obtido de acordo com o método de Abramowitz et al. (1965), segundo as equações 4 e 5.

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (04)$$

$$W = \sqrt{-2 \ln(P)} \text{ for } P \leq 0,5 \quad (05)$$

em que: P é a probabilidade de um valor Di e é obtido por $P = 1 - F(x)$. As constantes são: $C_0 = 2,515517$, $C_1 = 0,802853$, $C_2 = 0,010328$, $d_1 = 1,432788$, $d_2 = 0,189269$, $d_3 = 0,001308$.

A evapotranspiração potencial (ETP) foi estimada a partir da equação de Thornthwaite (THORNTHWAITE, 1948), com dados de temperatura do ar média mensal. A descrição completa dos cálculos necessários para determinação da ETP e SPEI estão apresentados nas equações 6, 7 e 8.

$$PET = 16d \left(\frac{10T}{I} \right)^m \quad (06)$$

em que: T(°C) é a temperatura média do ar no mês, d é o fator de correção baseado na latitude e do mês na área de estudo.

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514} \quad (07)$$

$$I = \sum_{j=i}^{12} i \quad (08)$$

em que: I é o índice térmico anual e i o mensal.

A caracterização das secas, classificação e parâmetros de avaliação dos limites do SPEI estão apresentados na Tabela 1. Para avaliação das secas meteorológicas e agrícolas foram calculados o SPEI-3 e SPEI-6, respectivamente.

Tabela 1. Classificação das secas conforme o Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (SPEI).

Table 1. Classification of droughts according to the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI).

Categorias de umidade climática	SPEI
Extremamente úmido	$\geq 2,0$
Muito úmido	1,5 a 1,99
Moderadamente úmido	1,0 a 1,49
Normal	0,99 a -0,99
Seca moderada	-1,0 a -1,49
Seca severa	-1,5 a -1,99
Seca extrema	$\leq -2,0$

Fonte: Adaptado de Liu et al. (2021).

2.4. Análise de tendências

Para a análise de tendências utilizou-se o método estatístico Mann-Kendall, que é um teste não-paramétrico para avaliar tendência em uma série temporal. Este método tem sido utilizado, entre outras áreas, para estudar tendências caracterizadas por elevação ou diminuição suave e monótona nos valores de uma série temporal de diferentes fatores climáticos, especialmente para dados que não seguem uma distribuição normal (Sam et al., 2022). A estatística S, para Mann-Kendall, é calculada pela equação 9.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i}^n \text{sig}(x_j - x_i) \quad (09)$$

em que: x_j e x_i são os dados da série temporal, n é o tamanho da série, e o $\text{sig}(s_j - x_i)$ é calculado pela equação 10:

$$\text{sig}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{se } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{se } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{se } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

É preciso calcular a variância (Var) que, posteriormente, é utilizada para calcular a estatística padronizada do teste Mann-Kendall (Z), conforme equação 11.

$$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (11)$$

Então, a estatística Mann-Kendall padronizada (Z) é calculada pela equação 12:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (12)$$

Se Z é positivo, a série tem uma tendência de aumento; caso contrário, tem uma tendência de diminuição. A hipótese nula é rejeitada no nível de significância α se $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, indicando que a série possui uma tendência significativa de mudança.

3. RESULTADOS

3.1. Precipitação pluvial

A distribuição da precipitação anual para os municípios de Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Comodoro e Sapezal é caracterizada pela variabilidade dos índices em função de acréscimos e decréscimos, sobretudo no período de 2019 a 2023, com padrão abaixo da média climatológica para Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio e Sapezal. Comodoro apresenta o maior acumulado anual da região, com 2.007,02 mm, seguida por Sapezal, Campos de Júlio e Campo Novo do Parecis, com 1.566,80 mm, 1.500,57 mm e 1.487,00 mm, respectivamente (Figura 2).

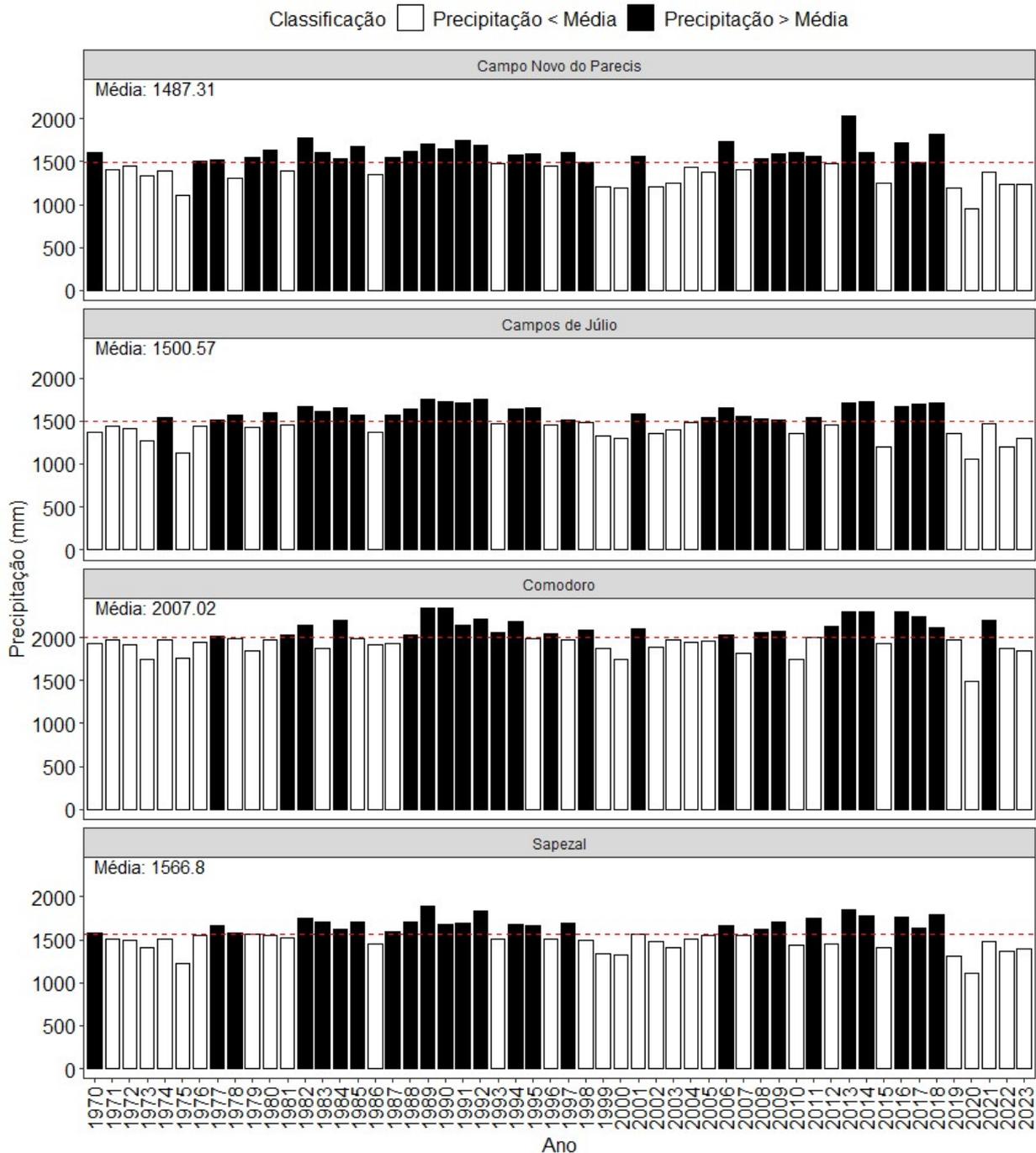


Figura 2. Distribuição anual da precipitação pluvial de 1970 a 2023 para os municípios de Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Comodoro e Sapezal, estado de Mato Grosso, Brasil.

Figure 2. Annual rainfall distribution from 1970 to 2023 for the municipalities of Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Comodoro and Sapezal, state of Mato Grosso, Brazil.

Avaliando os 53 anos, Comodoro pode ser definido como o município mais chuvoso com máximas e mínimas anuais de 2.344 mm e 1.495 mm, com amplitude de 849 mm. Em Comodoro e Campo Novo do Parecis, 56% dos anos, ou seja, 30 anos ultrapassaram a média climatológica anual, já 43% (23 anos) não superaram a média. Para Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio e Sapezal, os anos com maior acúmulo de chuva foram 2.024,2 mm, 1.750 mm e 1.897 mm e menor acúmulo de 953 mm, 1.050 mm e 1.110 mm, respectivamente. Campos de Júlio e Sapezal são definidas com o maior número de anos com precipitação abaixo da média, com 45% (24 anos) e 52% (28 anos) para os municípios, respectivamente.

Considerando os últimos seis anos de 2018 a 2023, em todos os municípios houve redução nas médias anuais, exceto o município de Comodoro, com precipitação acima da média em 2021, nos outros locais, esse intervalo é marcado pelo baixo volume pluviométrico anual.

Analisando a variabilidade mensal das chuvas, os municípios são evidenciados por uma estação seca entre os meses de junho a agosto, com precipitação acumulada inferiores a 100 mm, e estação chuvosa de outubro a abril, com volumes superiores a 200 mm mensais. Os meses de

maio e setembro são atribuídos como meses de transição, nesses períodos ocorre a redução e acréscimos das chuvas para a região, respectivamente (Figura 3). Dentro da série histórica é possível observar alterações nos regimes das chuvas para todos os municípios, principalmente nos meses de junho a agosto, com a extensão da estação seca até setembro ou com o início antecipado em abril, com volume de chuva inferior a 100 mm. Esse comportamento de flutuação pode ocasionar alongamento de períodos secos, além de influenciar na duração da estação chuvosa, considerando decréscimos das chuvas antes de maio.

O município de Comodoro é definido com a maior instabilidade dentro das estações seca e chuvosa. Para as outras regiões houve uma redução acentuada das chuvas antes do mês de maio e um alongamento da estação seca após o mês de agosto, essencialmente nos últimos anos.

Nos quatro municípios, o ano de 2023 demonstra redução das chuvas, principalmente nos meses subsequentes à estação seca, Campo Novo do Parecis e Campos de Júlio apresentam um volume pluviométrico fluando de 100 a 150 mm no mês de outubro, porém, considerando em especial anos anteriores, o comportamento para o período era de 200 a 300 mm.

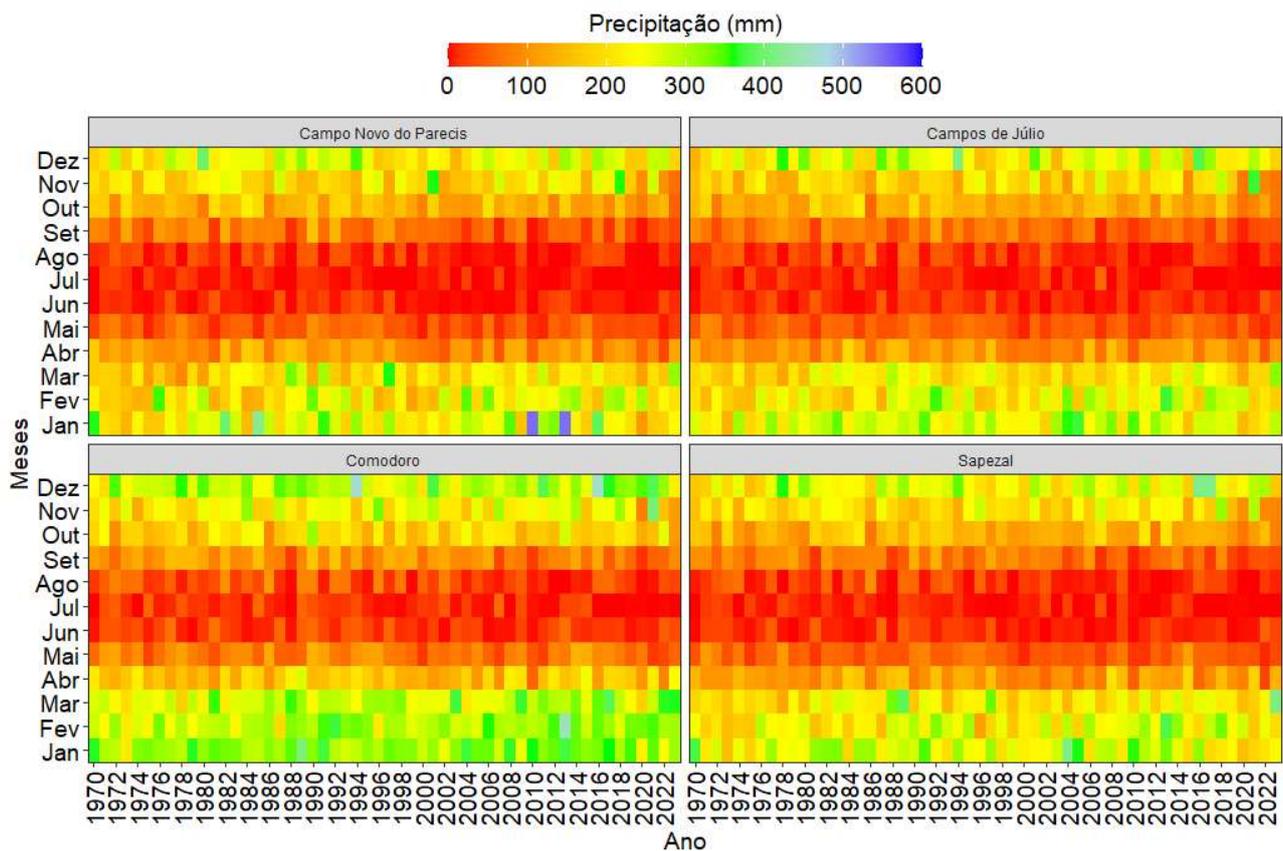


Figura 3. Distribuição mensal da precipitação pluvial de 1970 a 2023 para os municípios de Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Comodoro e Sapezal, estado de Mato Grosso, Brasil.

Figure 3. Monthly rainfall distribution from 1970 to 2023 for the municipalities of Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Comodoro and Sapezal, state of Mato Grosso, Brazil.

Em consequência da variabilidade mensal, com enfoque nas estações seca e chuvosa, é possível dimensionar uma redução acentuada na precipitação mensal. A estatística Z do teste de Man-Kendall indica meses com tendência ascendente e decrescente durante o ano. Nos meses de fevereiro e março

observa-se uma tendência crescente de precipitação sugerida por Z positivo. O município de Comodoro apresenta maior tendência de aumento, esse comportamento é significativo ($p < 0,05$) (Figura 4). Novembro e dezembro são meses condicionados por Z positivo, no entanto, com baixa

tendência e não significativa para os quatro municípios. Janeiro, abril e junho, são condicionados a redução da precipitação mensal, porém essa anomalia negativa não é significativa ($p > 0,05$).

Os meses de maio, julho, agosto, setembro e outubro, são caracterizados pela redução das chuvas mensal em função dos anos avaliados, esses períodos apresentam Z negativo e $p < 0,05$, caracterizando diferença significativa no volume de

chuva nesses meses, com uma redução significativa em todas as regiões. Nesses episódios a região de comodoro apresenta os menores índices Z, deste modo, com tendências de redução baixas, diferente das outras regiões que sempre se destacam com Z superiores, todo esse comportamento pode estar associado a presença do bioma Amazônico em Comodoro, as outras regiões estão nos limites geográficos do bioma Cerrado.

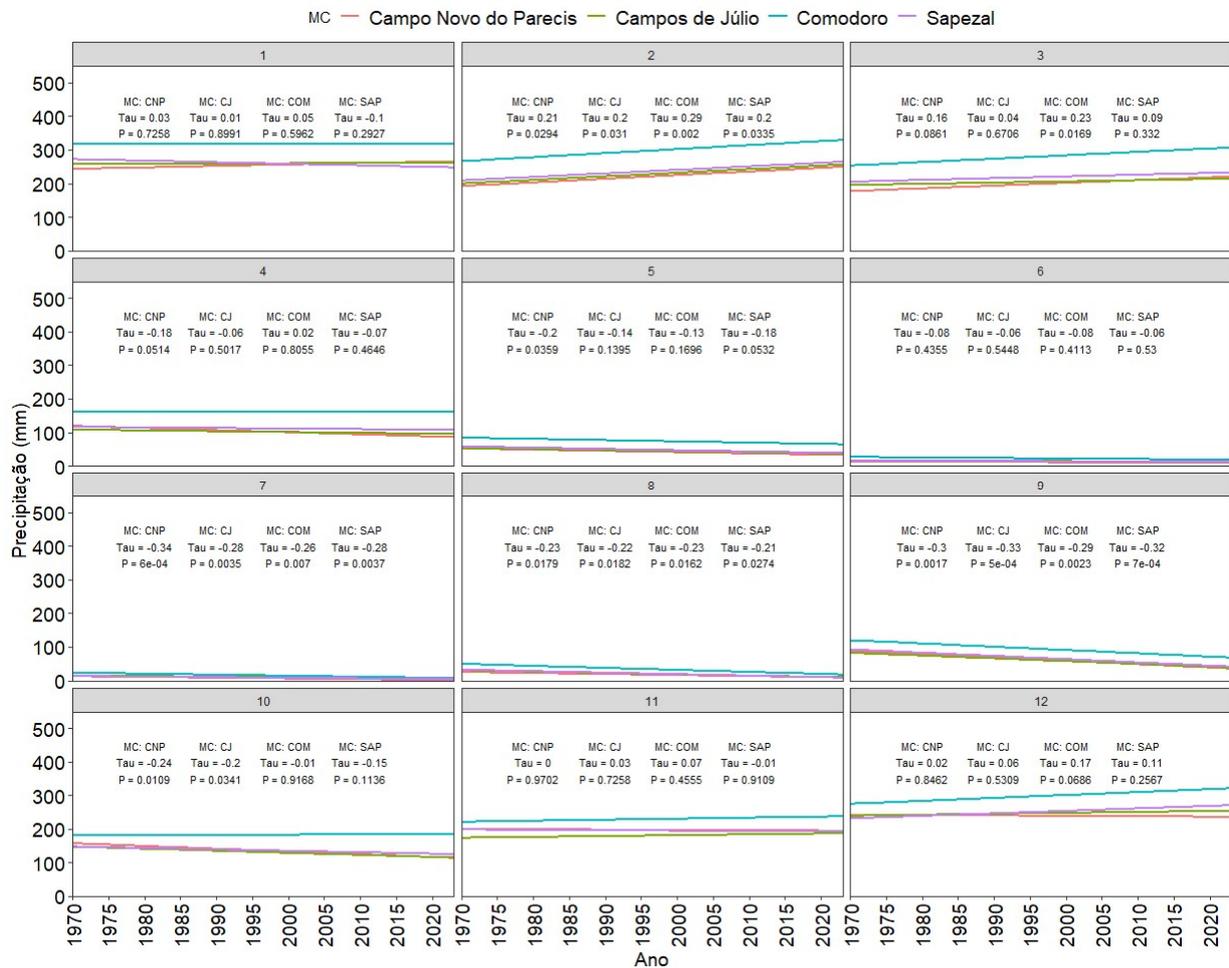


Figura 4. Comportamento da tendência da precipitação de 1970 a 2023 e estatística Z do teste Mann-Kendall para os municípios (MC) de Campo Novo do Parecis (CNP), Campos de Júlio (CJ), Comodoro (COM) e Sapezal (SAP), estado de Mato Grosso, Brasil.

Figure 4. Rainfall trend from 1970 to 2023 and Z statistics of the Mann-Kendall Test for the municipalities (MC) of Campo Novo do Parecis (CNP), Campos de Júlio (CJ), Comodoro (COM) and Sapezal (SAP), State of Mato Grosso, Brazil.

3.2. Secas meteorológicas

A incidência de secas meteorológicas foi analisada em vários períodos com classificação de secas moderadas, severas e extremas para os quatro municípios. O SPEI-3, caracterizou um primeiro intervalo, de 1970 a 1997, com grande oscilação entre períodos úmidos e secos, no entanto, houve uma maior predominância de anos com classificação de moderadamente úmido a muito úmido, exceto para o ano de 1973, caracterizado como seca severa para os quatro municípios, com índice ultrapassando a escala de -2,00. O mesmo comportamento foi observado no ano de 1987, definidos assim, os dois principais eventos do século passado (Figura 5).

Com o início do século XXI, ocorre uma inversão entre os períodos, com maior ocorrência de períodos secos. Diferente dos anos anteriores, esses eventos se tornaram mais longos e frequentes, com destaque para os

anos de 1994 a 2004, 2010, 2016 e 2019 a 2021, caracterizados como secas severas e extremas para todos os municípios. Combinando com a ordenação das chuvas anuais, os últimos anos são classificados com secas extremas, com índices de -2,00 em 2021 e 2023 nos quatro municípios. O SPEI-3 caracterizou os municípios de Campo Novo do Parecis e Campos de Júlio com os maiores períodos secos do estudo, com 50,62% dos meses caracterizados com secas meteorológicas.

3.3. Secas agrícolas

As secas agrícolas são subsequentes às meteorológicas, no entanto, seus efeitos são mais diretos na disponibilidade de água no solo para agricultura, além de causar implicações no nível dos reservatórios subterrâneos. O SPEI-6, indica eventos de seca em cenários similares ao SPEI-3, no entanto, nessa distribuição é perceptível maior alongamento das secas

em todos os municípios, especialmente a partir de 1999, com secas moderadas, severas e extremas.

Nessa composição, houve uma maior incidência de secas em um curto período, considerando de 2000 a 2016, apesar de todos os eventos mencionados, o índice flutuou para classificações úmidas, como nos anos de 2002, 2008

e 2014. Todos esses eventos causaram efeitos adversos para a disponibilidade de água, e com foco nas secas agrícolas, as estações secas influenciam no cultivo de algumas culturas, causando maior exposição a estresse hídrico, e possíveis mudanças de épocas de semeadura.

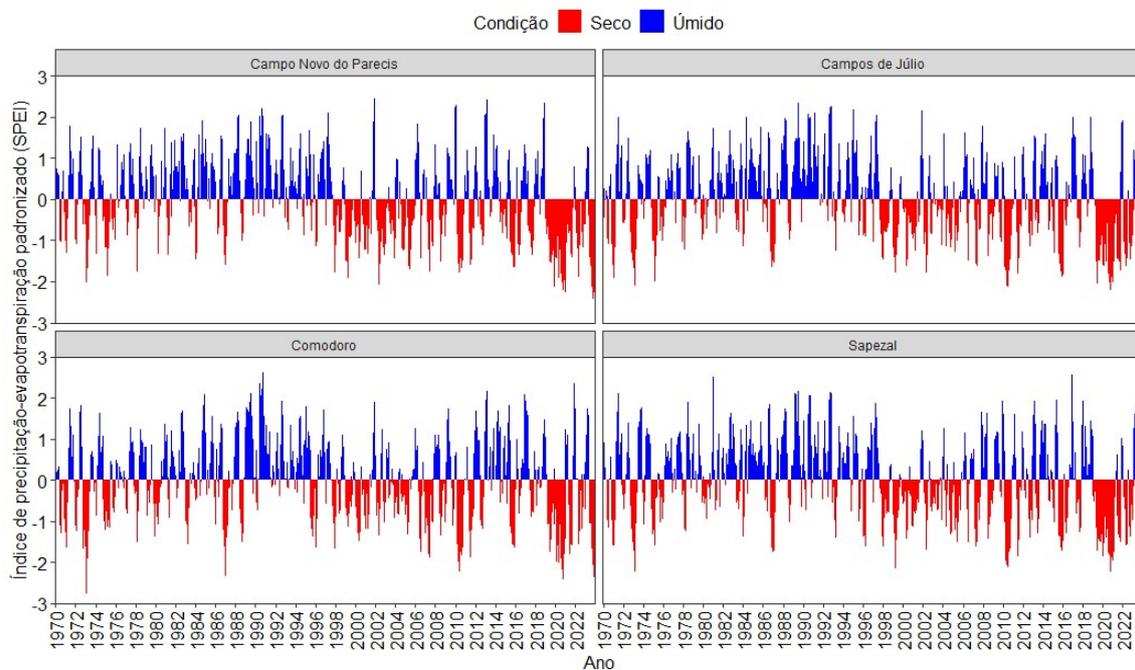


Figura 5. Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração SPEI-3 de 1970 a 2023 para os municípios de Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Comodoro e Sapezal, estado de Mato Grosso, Brasil.

Figure 5. Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index SPEI-3 from 1970 to 2023 for the municipalities of Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Comodoro and Sapezal, state of Mato Grosso, Brazil.

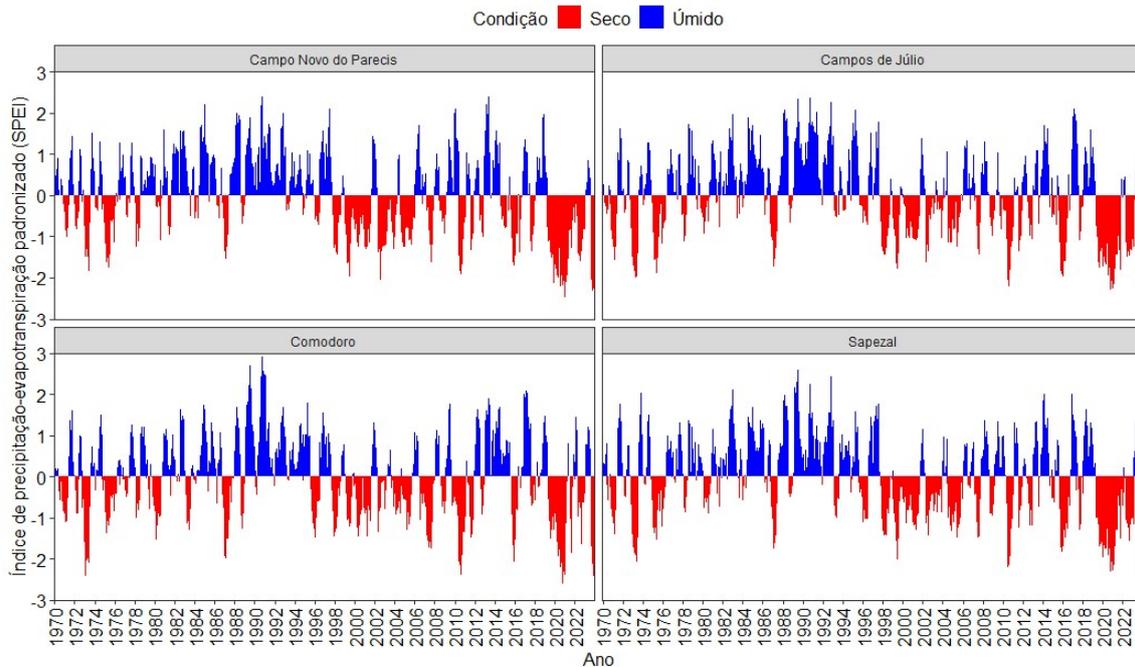


Figura 3. Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração SPEI-6 de 1970 a 2023 para os municípios de Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Comodoro e Sapezal, estado de Mato Grosso, Brasil.

Figure 3. Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index SPEI-6 from 1970 to 2023 for the municipalities of Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Comodoro and Sapezal, state of Mato Grosso, Brazil.

Nessa composição, o SPEI-6 evidencia o maior evento de seca dentro deste estudo para os municípios de Sapezal e Campo Novo do Parecis referente ao intervalo de 2019 a 2022. Para os outros municípios, o índice caracterizou o mesmo evento com a mesma intensidade, no entanto, de 2020 a 2021 alguns meses foram definidos como úmidos. Apesar dessa flutuação, os meses subsequentes para os municípios estudados apontam eventos de secas severas, especialmente para 2023, com 50% dos meses com eventos de secas para Comodoro, Sapezal, Campo Novo do Parecis e 66,6% para Campos de Júlio.

4. DISCUSSÃO

Comodoro foi o município com maior acumulado de chuva e menos eventos de seca. O que pode ser compreendido pela variação da vegetação arbórea característica do bioma Amazônico, que é responsável por regular o fluxo da água entre a atmosfera e a biosfera, já os outros municípios pertencem ao bioma Cerrado. Essa variação condiciona regimes diferentes de precipitação e evapotranspiração dentro de uma região (BAKER; SPRACKLEN, 2019). As mudanças climáticas podem ser caracterizadas pela variação da chuva em várias regiões, como o estudo de Rocha, Correia e Gomes (2019), que constataram uma redução acentuada das chuvas para a região Centro-Oeste do Brasil. Tais variações são atribuídas com maior evidência na estação chuvosa, com períodos mais curtos e eventos mais concentrados, além disso, houve um alongamento da estação seca.

A variabilidade das médias anuais da precipitação nos municípios de Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Comodoro e Sapezal, é condicionada principalmente pela localização geográfica desses municípios. No bioma Cerrado, acumulados anuais de chuva variam de 1.486 mm com acréscimos ou decréscimos de 146 mm, aproximadamente. Para Comodoro, bioma Amazônico, resulta em volumes pluviométricos superiores, esse comportamento é familiar em alguns ecótonos (CAMPOS; CHAVES, 2020).

Ainda segundo Campos e Chaves (2020), houve uma redução acentuada da precipitação no Cerrado, considerando as 125 estações do estudo, 89 demonstram tendências negativas, com decréscimos estatisticamente significativos, tais eventos ocorrem na região central e oeste do bioma. Esses resultados são semelhantes aos observados neste estudo, segundo o índice Z, todas as regiões localizadas geograficamente no Cerrado apresentaram Z negativos, representado pela tendência de redução da precipitação mensal, além disso, nos meses de seca, essas anomalias são significativas.

Esses resultados corroboram o presente estudo, considerando a visível redução dos índices anuais em todos os municípios. Também é observado uma mudança no comportamento mensal das chuvas, com aumento da estação seca, fato com maior ocorrência nos últimos anos.

Segundo Espinosa et al. (2022) e Martel et al. (2021), um dos efeitos das mudanças climáticas mais importantes do clima futuro, são as alterações nas variáveis meteorológicas, eventos extremos de precipitação se tornarão mais recorrentes a cada ano, essas alterações podem gerar aspectos negativos na segurança alimentar e hídrica, resultando em tensões globais. O aquecimento e anomalias positivas e

negativas de precipitação é considerada um grande risco para os setores econômicos, principalmente a agricultura.

A ocorrência de estações definidas no estado de Mato Grosso já foi observada em pesquisas em diferentes municípios. Barbieri et al. (2019), estudando a distribuição das chuvas em função do El Niño Oscilação Sul (ENOS), também caracterizou estação chuvosa e seca bem definidas para o município de Tangará da Serra, Sinop e Rondonópolis. Os autores mencionam que essas épocas são atribuídas às movimentações das massas de ar quente e úmido do oceano pacífico.

Resultados semelhantes também foram observados por Silva et al. (2024), na pesquisa voltada a distribuição da precipitação e eventos de secas na região noroeste de Mato Grosso. O estudo caracteriza junho, julho e agosto com os menores índices anuais de precipitação, como contraponto, dezembro, janeiro, fevereiro e março possuem média mensal superior a 288 mm, distribuindo o regime pluviométrico em duas estações uma seca e chuvosa para a região.

As mudanças climáticas já são perceptíveis em todos os ecossistemas terrestres, na agricultura, na vida humana e na disponibilidade hídrica. No Brasil, eventos de seca tem aumentado em frequência, intensidade e severidade, mudanças na precipitação e temperatura relacionados essencialmente pelos fenômenos El Niño e La Niña (DA SILVA et al., 2023).

Alterações no clima, essencialmente na distribuição das chuvas e elevadas temperaturas do ar, estão mudando irreversivelmente o ciclo da água, sendo que o aumento da taxa evaporativa e menor umidade do solo resultará em redução da disponibilidade hídrica em todo mundo (JUDD et al. 2023). Além disso, a escassez da água causa uma restrição crítica à agricultura, o setor é responsável por 70% de todas as captações superficiais e subterrâneas de água, deixando a disposição deste recurso cada vez mais incerta, mediante a incidência de eventos extremos, assim como aumento da demanda global (PARRA-LÓPEZ, 2024).

Os eventos de secas caracterizados no presente estudo, melhoram a compreensão desses fenômenos para a região. Episódios mais frequentes a partir do século XXI foram diagnosticados em outros estudos, como o de Cunha et al. (2019) que, avaliando eventos de secas extremas no Brasil, identificaram uma maior ocorrência de secas de 2011 a 2019, caracterizando 2011 como o ano mais severo para todo o território brasileiro. Além disso, períodos como 2014-2015 e 2015-2016 ocasionaram uma grave crise hídrica, sendo classificada como a mais severa dos últimos 100 anos.

Junqueira et al. (2020) salientam que esse episódio ocorreu em toda a região central do Brasil, os autores identificaram secas severas para os anos 1997-98, 2015-16 e 2016-17. Dada a importância da caracterização das secas, os resultados obtidos apontam um prolongamento dos eventos a partir de 2019, além disso o SPEI-3 e SPEI-6 classificam 2023 com eventos de secas moderadas e severas, sendo esses resultados atribuídos ao baixo volume pluviométrico após a estação seca como observado, causando efeitos na disponibilidade hídrica e agricultura.

5. CONCLUSÕES

Os municípios analisados na Região Oeste apresentaram grande variabilidade no volume de chuva anual, sendo que

Comodoro é caracterizado com a maior média da região. Considerando os últimos anos, todos os municípios apontam uma redução do acumulado de chuva anual, com índices inferiores à média climatológica.

Na distribuição mensal de precipitação fica evidente duas estações bem definidas, uma chuvosa e outra seca, no entanto, com o início do século XXI, houve alongamento da estação seca, com tendência de decréscimo nos municípios da região Oeste, principalmente em 2023, com baixos índices pluviométricos até novembro.

O SPEI classificou diversos períodos de secas meteorológicas e agrícolas, com maiores frequências e intensidades após a virada do século, em que se destacaram as secas de 2015-16 e 2019-21, classificadas como secas extremas para os municípios.

6. REFERÊNCIAS

- AMANI, M.; GHORBANIAN, A.; AHMADI, S. A.; KAKOOEI, M.; MOGHIMI, A.; MIRMAZLOUMI, S. M.; BRISCO, B. Google earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: A comprehensive review. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 13, p. 5326-5350, 2020. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3021052>
- BAKER, J. C. A.; SPRACKLEN, D. V. Climate benefits of intact Amazon forests and the biophysical consequences of disturbance. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 2, e47, 2019. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00047>
- BARBIERI, J. D.; DALLACORT, R.; FREITAS, P. S. L. D.; ARAÚJO, D. V. D.; TIEPPO, R. C.; FENNER, W. Effects of the ENSO on the variability of precipitation and air temperature in agricultural regions of Mato Grosso State. **Journal of agricultural Science**, v. 11, n. 9, e91, 2019. <https://doi.org/10.5539/jas.v11n9p91>
- CAMPOS, J. O.; CHAVES, H. M. Tendências e variabilidades nas séries históricas de colheitas mensais e anuais no Bioma Cerrado no período 1977-2010. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 157-169, 2020. <https://doi.org/10.1590/0102-7786351019>
- CARUTA, M.; PARUSSIS, J.; HAMPF, A.; LIBERA, A.; BERGER, T. No more double cropping in Mato Grosso, Brazil? Evaluating the potential impact of climate change on the profitability of farm systems. **Agricultural Systems**, v. 190, e103104, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103104>
- CONAB_Companhia Nacional de Abastecimento. **Boletim da safra de grãos: 9º Levantamento de grãos – Safra 2024**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 18 jun. 2024.
- CUNHA, A. P. M. A.; ZERI, M.; DEUSDARÁ LEAL, K.; COSTA, L.; CUARTAS, L. A.; MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M.; BARBOSA, A. A.; CUNNINGHAM, C.; GARCIA, J. V. C. G.; BROEDEL, E.; ALVALÁ, R.; NETO, G. R. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, v. 10, n. 11, e642, 2019. <https://doi.org/10.3390/atmos10110642>
- ESPINOSA, L. A.; PORTELA, M. M.; MATOS, J. P.; GHARBIA, S. Climate change trends in a European coastal metropolitan area: Rainfall, temperature, and extreme events (1864-2021). **Atmosphere**, v. 13, n. 12, p. 1995, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos13121995>
- FOROOTAN, E.; KHAKI, M.; SCHUMACHER, M.; WULFMEYER, V.; MEHRNEGAR, N.; DIJK, A. I. J. M. V.; BROCCA, L.; FARZANEH, S.; AKINLUYI, F.; RAMILLIEN, G.; SHUM, C. K.; AWANGE, J.; MOSTAFAIE, A. Understanding the global hydrological droughts of 2003–2016 and their relationships with teleconnections. **Science of the Total Environment**, v. 650, p. 2587-2604, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.231>
- GONÇALVES, S. T. N.; JUNIOR, F. D. C. V.; SAKAMOTO, M. S.; SILVEIRA, C. D. S.; MARTINS, E. S. P. R. Índices e metodologias de monitoramento de Secas: Uma revisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, p. 495-511, 2021. <https://doi.org/10.1590/0102-77863630007>
- HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; SHELIA, V.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; WHITE, J. W.; ASSENG, S.; LIZASO, J. I.; MORENO, P.; PAVAN, W.; OGOSHI, R.; HUNT, L. A.; TSUJI, G. Y.; JONES, J. W. The DSSAT crop modeling ecosystem. In: **Advances in crop modeling for sustainable agriculture**. 1ª Ed. London: Burleigh Dodds Science Publishing, 2019. p. 173-216. <https://doi.org/10.1201/9780429266591>
- JUDD, M.; BOESE, M.; HORNE, A. C.; BOND, N. R. Perceptions of climate change adaptation barriers in environmental water management. **Ecology and Society**, v. 28, n. 1, e280121, 2023. <https://doi.org/10.5751/ES-13883-280121>
- JUNQUEIRA, R.; VIOLA, M. R.; DE MELLO, C. R.; VIEIRA-FILHO, M.; ALVES, M. V.; AMORIM, J. D. S. Drought severity indexes for the Tocantins River Basin, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 141, n. 1, p. 465-481, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03229-w>
- KÖPPEN, W. **Grundriss der Klimakunde**: Outline of climate science. Berlin: Walter de Gruyter, 1931. 388p.
- LAVERS, D. A.; SIMMONS, A.; VAMBORG, F.; RODWELL, M. J. 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>
- MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; CUARTAS, L. A.; LEAL, K. R. D.; BROEDEL, E.; SELUCHI, M. E.; MICHELIN, C. M.; DE PRAGA BAIÃO, C. F.; ÂNGULO, E. C.; ALMEIDA, E. K.; KAZMIERCZAK, M. L.; MATEUS, N. P. A.; SILVA, R. C.; BENDER, F. Extreme drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: characterization, causes, and impacts. **Frontiers in Water**, v. 3, e639204, 2021. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.639204>
- MARTEL, J.; BRISSETTE, F. P.; LUCAS-PICHER, P.; TROIN, M.; ARSENAULT, R. Climate change and rainfall intensity–duration–frequency curves: Overview of science and guidelines for adaptation. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 26, n. 10, e03121001, 2021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.000212](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.000212)
- MUÑOZ, S. J. Dados médios mensais do ERA5-Land de 1981 até o presente. **Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)**, 2019.

- Disponível em: <https://doi.org/10.24381/cds.68d2bb30>. Acessado em: 20 Jul. 2024.
- PARRA-LÓPEZ, C.; ABDALLAH, S. B.; GARCIA-GARCIA, G.; HASSOUN, A.; SÁNCHEZ-ZAMORA, P.; TROLLMAN, H.; JAGTAP, S.; CARMONA-TORRES, C. Integrating digital technologies in agriculture for climate change adaptation and mitigation: State of the art and future perspectives. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 226, e109412, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109412>
- PEI, Z.; FANG, S.; WANG, L.; YANG, W. 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>
- PONTES FILHO, J. D.; PORTELA, M. M.; STUDART, T. M. C.; SOUZA FILHO, F. D. A. A continuous drought probability monitoring system, CDPMS, based on copulas. **Water**, v. 11, n. 9, p. 1925, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11091925>
- ROCHA, V. M.; CORREIA, F. W. S.; GOMES, W. B. Avaliação dos impactos da mudança do clima na precipitação da Amazônia utilizando o modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 06, p. 2051-2065, 2019. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.6.p2051-2065>
- SAM, M. G.; NWAOGAZIE, I. L.; IKEBUDE, C. Climate change and trend analysis of 24-hourly annual maximum series using Mann-Kendall and Sen slope methods for rainfall IDF modeling. **International Journal of Environment and Climate Change**, v. 12, n. 3, p. 44-60, 2022. <https://doi.org/10.9734/IJECC/2022/v12i230628>
- SHE, X.; LI, Y.; JIAO, W.; SUN, Y.; NI, X.; ZUO, Z.; MYNENI, R. B. Varied responses of Amazon forests to the 2005, 2010, and 2015/2016 droughts inferred from multi-source satellite data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 353, e110051, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110051>
- SILVA, R. S.; DALLACORT, R.; MACIEL JR., I. C.; CARVALHO, M. A. C.; YAMASHITA, O. M.; SANTANA, D. C.; TEODORO, L. P. R.; TEODORO, P. E.; SILVA JR., C. A. Rainfall and extreme drought detection: an analysis for a potential agricultural region in the Southern Brazilian Amazon. **Sustainability**, v. 16, n. 14, e5959, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16145959>
- DA SILVA, S. S.; BROWN, F.; SAMPAIO, A. O.; SILVA, A. L. C.; SANTOS, N. C. R. S.; LIMA, A. C.; AQUINO, A. AM. S.; SILVA, P. H. C.; MOREIRA, J. G. V.; OLIVEIRA, I.; COSTA, A. A.; FEARNESIDE, P. M. Amazon climate extremes: Increasing droughts and floods in Brazil's state of Acre. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 21, n. 4, p. 311-317, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2023.10.006>
- DE SOUSA, W. G.; SILVA, M. T.; SIQUEIRA, M. S.; GPOMES, H. B.; OLIVEIRA, G.; SILVA, T. G. F. S.; CAVALCANTI, E. P. Variabilidade espaço temporal da seca meteorológica nas microrregiões do MATOPIBA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 1, p. 1-21, 2024. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.1.p01-21>
- DE SOUZA SANTOS, J. A.; WANDERLEY, H. S.; DE AMORIM, R. F. C.; DELGADO, R. C.; FERNADES, R. C. The longest multiannual drought in Northeastern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 143, e104976, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104976>
- TIRIVAROMBO, S. O. D. E.; OSUPILE, D.; ELIASSON, P. Drought monitoring and analysis: standardised precipitation evapotranspiration index (SPEI) and standardised precipitation index (SPI). **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 106, p. 1-10, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.07.001>
- 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, n. 7, p. 1696-1718, 2010. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- WU, J.; CHEN, X.; YUAN, X.; YAO, H.; ZHAO, Y.; AGHAKOUCHAK, A. The interactions between hydrological drought evolution and precipitation-streamflow relationship. **Journal of Hydrology**, v. 597, e126210, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126210>
- YANG, L.; DRISCOL, J.; SARIGAI, S.; WU, Q.; CHEN, H.; LIPPITT, C.D. Google Earth Engine and artificial intelligence (AI): a comprehensive review. **Remote Sensing**, v. 14, n. 14, e3253, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14143253>
- ZHAO, Q.; YU, L.; LI, X.; PENG, D.; ZHANG, Y.; GONG, P. Progress and trends in the application of Google Earth and Google Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 13, n. 18, e3778, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13183778>
- ZAQOUT, T.; ANDRADÓTTIR, H. Ó. Impacts of climate change on winter flood mechanisms: Spatial variability, trends, and bivariate frequency of rain-on-snow and soil frost. **Journal of Hydrology**, v. 638, e131439, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131439>

Agradecimentos: À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado. Ao Programa de Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola - PPGASP/ Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT.

Contribuição dos autores: M.D.S.: Conceitualização, metodologia, investigação ou coleta de dados, análise estatística, redação (original); R.D.: Concepção, administração ou supervisão e redação (revisão e edição); V.R.M.D.: Metodologia, análise estatística, redação (revisão e edição); W.F.: Redação (revisão e edição); R.C.T.: Redação (revisão e edição); G.C.O.: Investigação ou coleta de dados.

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), através da bolsa de mestrado para o primeiro autor.

Disponibilidade de dados: Os dados desta pesquisa poderão ser obtidos mediante solicitação ao autor correspondente via e-mail.

Conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflito de interesses.