

# Eventos de seca, variabilidade espacial e temporal da chuva no Pantanal Brasileiro

## Drought events, spatial and temporal variability of rainfall in the Brazilian Pantanal

Moisés Damasceno Souza\*, Rivanildo Dallacort\*\*, Dionei José da Silva\*\*\*, Vanessa Raket de Moraes Dias\*\*\*\*, Sandra Mara Alves da Silva Neves\*\*\*\*\*, Gabriela Custodio Oliveira\*\*\*\*\*

\* Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Estado de Mato Grosso, moises.damasceno@unemat.br

\*\* Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola, Universidade do Estado de Mato Grosso, rivanildo@unemat.br

\*\*\* Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Estado de Mato Grosso, dioneijs@unemat.br

\*\*\*\* Centro Tecnológico de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, Universidade do Estado de Mato Grosso, vanessadias@unemat.br

\*\*\*\*\* Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Estado de Mato Grosso, ssneves@unemat.br

\*\*\*\*\* Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola, Universidade do Estado de Mato Grosso, gabriela.custodio@unemat.br

[Xhttps://doi.org/10.5380/raega.v63i2.99704](https://doi.org/10.5380/raega.v63i2.99704)

### Resumo

O Pantanal Brasileiro abriga rica biodiversidade, atuando na regulação do ciclo hidrológico e fornecendo insumos para a economia local. A variação espacial e temporal da precipitação influencia a dinâmica ecológica do bioma, e a seca, agravada pela diminuição das chuvas, impacta os recursos hídricos e a biodiversidade. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar a distribuição espacial e temporal da precipitação pluviométrica e da seca no Pantanal Brasileiro, no período de 1994 a 2023. A variabilidade da precipitação e a incidência de secas hidrológicas no Pantanal foram estimadas usando dados do ERA5-Land de 1994 a 2023, com cobertura global e resolução de 9 km. Os dados são contínuos e livres de lacunas, fornecendo uma série completa global para análise. O índice padronizado de precipitação (SPI) foi empregado para monitorar secas, com valores negativos indicando insuficiência hídrica e positivos, excedente hídrico. Neste estudo foi quantificado o SPI-3 e SPI-12, utilizados para monitorar as secas considerando 3 meses e 12 meses acumulados, proporcionando uma análise sem lacunas espaço-temporais, com observações em curto e longo período. A precipitação anual no Pantanal variou entre menos de 1000 mm e mais de 2500 mm, com maiores acumulados antes dos anos 2000 e uma redução após, especialmente nos últimos cinco anos (2019-2023). O período de 1994 a 2001 teve chuvas uniformes de 1500 a 2500 mm, enquanto anos subsequentes, como 2002 e 2004, tiveram variações maiores. O SPI identificou diferentes períodos de anomalias de precipitação, para o SPI-3, os anos com maiores secas, em quesitos de severidade, intensidade e duração foram 2019, 2020, 2021 e 2023. O SPI-12 revelou períodos alternados de seca e umidade nos últimos 30 anos, com um aumento na frequência de eventos secos nos últimos anos, indicando uma tendência de redução.

### Palavras-chave:

SPI, Eventos extremos, Geotecnologias, Bioma.

## Abstract

The Brazilian Pantanal is home to a rich biodiversity, regulating the hydrological cycle and providing inputs for the local economy. Spatial and temporal variation in precipitation influences the ecological dynamics of the biome, and drought, aggravated by decreased rainfall, impacts water resources and biodiversity. In this context, the objective of this work is to analyze the spatial and temporal distribution of rainfall and drought in the Brazilian Pantanal, between 1994 and 2023. Precipitation variability and the incidence of hydrological droughts in the Pantanal were estimated using ERA5-Land data from 1994 to 2023, with global coverage and 9 km resolution. These data are continuous and without gaps, providing a complete global series for analysis. The standardized precipitation index (SPI) was used to monitor droughts, with negative values indicating water insufficiency and positive values indicating water surplus. In this study, SPI-3 and SPI-12 were quantified, used to monitor droughts considering 3 and 12 accumulated months, providing an analysis without space-time gaps, with observations in short and long periods. Annual precipitation in the Pantanal varied between less than 1000 mm and more than 2500 mm, with higher accumulations before the year 2000 and a reduction after, especially in the last five years (2019-2023). The period from 1994 to 2001 had uniform rainfall of 1500 to 2500 mm, while subsequent years, such as 2002 and 2004, had greater variations. The SPI identified different periods of precipitation anomalies, for SPI-3, the years with the greatest droughts, in terms of severity, intensity and duration, were 2019, 2020, 2021 and 2023. SPI-12 revealed alternating periods of drought and humidity in the last 30 years, with an increase in the frequency of dry events in recent years, indicating a downward trend.

### Keywords:

SPI, Extreme events, Geotechnologies, Biome.

---

## I. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas já são consideradas um grande desafio para a humanidade devido aos seus impactos multissetoriais e globais (Abbass et al., 2022). Com o avanço da frequência e intensidade dos eventos, especialmente as anomalias pluviométricas, são esperadas mudanças significativas no regime hídrico em diversas regiões do planeta. Entre esses eventos, as secas vêm se destacando não apenas pela intensificação de sua severidade e duração, mas também pela ampliação de sua recorrência anual, afetando diretamente a disponibilidade hídrica (Mehta et al., 2023).

Tais alterações decorrem da crescente instabilidade dos fatores meteorológicos e têm implicações relevantes para a segurança hídrica, energética, agrícola e ecológica. Nesse contexto de mudanças climáticas e pressões hidrológicas, o Pantanal Brasileiro — reconhecido como uma das maiores áreas úmidas contínuas do planeta — adquire centralidade na discussão ambiental. O bioma desempenha funções ecossistêmicas fundamentais, como a regulação do ciclo hidrológico regional, o sequestro de carbono, a manutenção do ciclo

---

de nutrientes e a conservação da biodiversidade. Além disso, fornece água doce e sustenta múltiplas atividades econômicas locais e regionais, consolidando-se como um ecossistema estratégico sob múltiplas dimensões ecológicas e socioeconômicas (Ivory et al., 2019).

A precipitação pluviométrica constitui um dos principais determinantes da dinâmica ecológica pantaneira, exercendo influência direta sobre o pulso de inundação, a produtividade primária e a distribuição de habitats. No entanto, esse padrão apresenta elevada variabilidade espacial e temporal, o que demanda sua compreensão como elemento central para a formulação de estratégias de gestão ambiental. As secas, por sua vez, figuram como o principal desastre natural associado à variabilidade climática em escala global, com impactos profundos sobre a agricultura, a geração de energia, o abastecimento de água e a incidência de incêndios florestais (Forootan et al., 2019; Wu et al., 2021).

Esses eventos são comumente caracterizados por períodos de precipitação abaixo da média climatológica, o que compromete o equilíbrio hidrológico regional. Pesquisas têm destacado a importância da precipitação na manutenção dos ecossistemas pantaneiros, como a de Dias et al. (2017) que investigaram a distribuição espaço-temporal das chuvas no estado de Mato Grosso, incluindo o Pantanal Norte, enquanto Ivory et al. (2019) analisaram a influência da variabilidade anual da precipitação na distribuição espacial da vegetação nas áreas alagadas, Marengo et al. (2021) verificaram que eventos de seca prolongada tem resultado em incêndios que devastaram centenas de milhares de hectares do Pantanal. No entanto, ainda há necessidade de pesquisas que se concentrem na relação entre precipitação e índices de seca, como o Índice Padronizado de Precipitação (SPI).

Os índices meteorológicos são as principais ferramentas para identificação de secas em diferentes escalas de tempo. O SPI (Mckee et al., 1995) foi desenvolvido com intuito de quantificar, por meio de valores, a severidade e magnitude das secas, viabilizando a determinação e interpretação de um evento ou característica de seca (Gonçalves et al., 2021).

Dentro dessa perspectiva, estudar as condições climáticas se torna um primeiro passo para entender o potencial efeito de possíveis mudanças nas variáveis meteorológicas (Song et al., 2022). A compreensão detalhada da distribuição espacial das chuvas e da seca no Pantanal no Brasil é fundamental para a gestão sustentável dos cursos hídricos e para a conservação da biodiversidade. Adicionalmente, este estudo pode fornecer subsídios para a formulação de políticas públicas e estratégias de adaptação às mudanças climáticas.

Diante desse cenário, neste estudo analisamos a variabilidade espacial e temporal da precipitação pluviométrica no Pantanal Brasileiro, entre os anos de 1994 a 2023, bem como a distribuição do índice de seca

estimado pelo SPI, para identificação de padrões de precipitação e seca, contribuindo para o entendimento das dinâmicas climáticas.

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

A distribuição espaço-temporal da precipitação pluviométrica e incidência de secas meteorológicas e hidrológicas foram estimadas para o bioma Pantanal, no território brasileiro (Figura 1). O bioma Pantanal é caracterizado como uma das maiores áreas úmidas do mundo, apresentando uma extensa planície de inundação abrangendo 179.300 km<sup>2</sup>, divididos entre o Brasil (78%), Bolívia (18%) e Paraguai (4%). No Brasil, o bioma se estende por áreas dos estados de Mato Grosso (35%) e Mato Grosso do Sul (65%) (Tomas et al., 2020; Marengo et al., 2021).

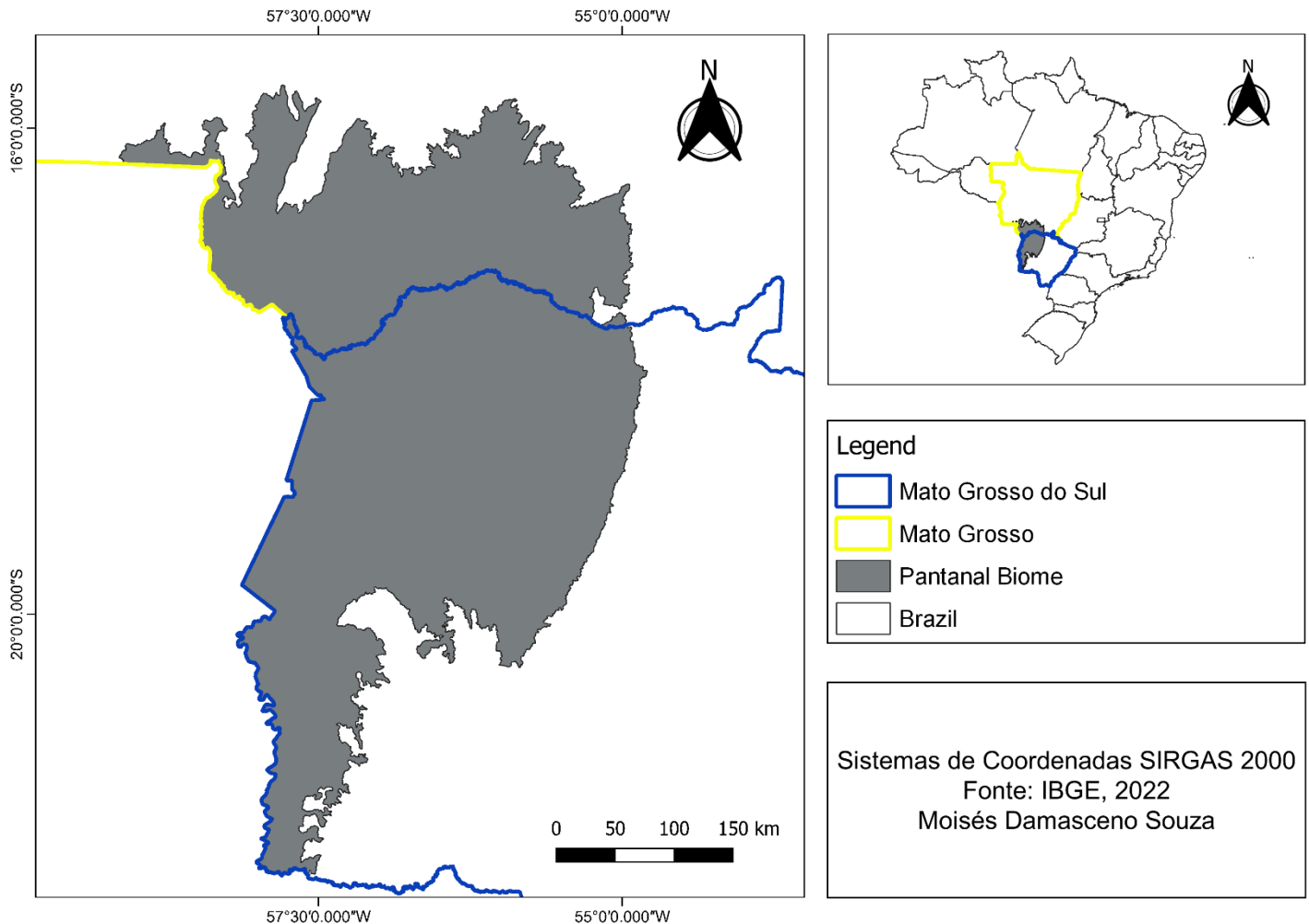


Figura 1 – Pantanal, no contexto brasileiro. Fonte: IBGE (2022), elaborado pelos autores (2024).

## Dados e processamento

O banco de dados utilizado neste estudo foi adquirido do Serviço Copernicus para as Alterações Climáticas (C3S), responsável pela reanálise ERA5-Land (COPERNICUS, 2024). O Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF) lançou em 2019 o conjunto de dados ERA5-Land, que fornece melhoria de qualidade para diferentes parâmetros terrestres quando comparados à reanálise anterior, ERA5, sua resolução aprimorada com grades de  $0,10^{\circ} \times 0,10^{\circ}$ , com disponibilidade de dados de 1950 até o presente (Muñoz-Sabater et al., 2021; Lavers et al., 2022).

Para esta pesquisa foram utilizados dados de precipitação, oriundos do ERA5-Land, distribuídos em dados diários para o intervalo de 1994 a 2023. Para a avaliação da distribuição temporal, os dados foram agrupados em índices mensais e anuais, utilizando o software R (R Core Team, 2023). Na sequência foi aplicado o SPI aos dados de precipitação, processo esse que foi realizado utilizando o pacote SPEI (Beguería; Vicente-Serrano, 2023) disponível no software R (<https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/index.html>). Nesta avaliação adotou-se o SPI-3, esta distribuição avalia os eventos considerando 3 meses acumulados, ideal para caracterização de secas meteorológicas (precipitação abaixo da média climatológica).

A análise espacial foi realizada dentro do Google Earth Engine (GEE), via execução de um script no Code Editor, para a distribuição da precipitação e SPI, aplicadas para a geometria do Pantanal. Inicialmente, dentro do script foi realizado a soma da precipitação de janeiro a dezembro de todos os anos separadamente (1994-2023), para obtenção dos acumulados anuais, com a execução foram gerados Rasters da distribuição da precipitação para o Pantanal ano a ano, separadamente. Esses produtos foram transformados em imagens utilizando o software R. Para a distribuição mensal, foram analisados separadamente todos os meses para toda a série histórica, na sequência foi feito uma média para cada período, finalizando em 12 imagens (Jan-Dez).

A avaliação espacial dos eventos de secas foi realizada e processada dentro do GEE, utilizando os dados de precipitação do ERA5-Land. Com objetivo de gerar uma imagem para cada ano, nessa distribuição foi utilizado o SPI-12, característica em estudos de secas hidrológicas. Em sua metodologia, o índice avalia os eventos considerando 12 meses acumulados, todos os anos foram avaliados tomando como base o período de janeiro a dezembro, para aplicação do SPI-12. Todos os scripts utilizados no presente estudo estão disponíveis (<https://github.com/DamascenoSouza/Google-Earth-Engine/tree/main>).

### **ERA5-land**

A reanálise ERA5-land do ECMWF é caracterizada por combinar dados de modelo com observações terrestres de todo o mundo. Esta metodologia realiza a combinação de previsões anteriores com observações recentes, produzindo assim, uma estimativa mais precisa das condições atmosféricas (Hu et al., 2019). Esses

conjuntos de dados podem fornecer registros de múltiplas variáveis, espaciais e temporais constantes e sem falhas, incluindo dados de precipitação (Hersbach et al., 2020).

Nos últimos anos, ocorreu um avanço significativo no desenvolvimento de diferentes reanálises em quesitos globais. Dentro dessa perspectiva, vários pesquisadores buscaram avaliar a qualidade dessas estimativas em várias regiões do mundo. Como a pesquisa de Gomis-Cebolla et al. (2023), em um estudo avaliando o conjunto de dados de precipitação de reanálise ERA5 e ERA5-Land na Espanha, em que os autores concluíram haver uma boa concordância entre os dados observados e de reanálise, com correlação de Spearman (0,5-0,9) e RMSE (2 a 8 mm/d).

Considerando o bioma Pantanal, alguns autores já utilizaram esse conjunto de dados para identificar anomalias relacionadas a precipitação, como Fernandes et al. (2024), em um estudo relacionado a quantificação de secas no Mato Grosso, utilizando o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI), com abordagem para Amazônia, Cerrado e Pantanal, dentro do estado. Além desse estudo, Costa et al. (2023) também utilizaram o conjunto de dados ERA5-Land para realizar uma análise multiescalar de secas e ondas de calor no Pantanal brasileiro.

### **Índice Padronizado de Precipitação (SPI)**

O SPI foi utilizado neste estudo para caracterizar os principais eventos de seca (Mckee et al., 1993). Este método avalia as condições de secas utilizando apenas dados de precipitação. O SPI é recomendado pela Organização Meteorológica Mundial para avaliação de eventos de seca, pois a necessidade apenas de dados de precipitação para sua estimativa promove a sua utilização em diversos estudos voltados à gestão dos recursos hídricos (Pei et al., 2023).

O SPI é utilizado para monitoramento das secas em várias escalas, e é calculado com base na normalização da precipitação mensal em uma função de distribuição de probabilidade, em que os valores negativos expressam insuficiência hídrica na região, e valores positivos representam excedente hídrico (Fernandes et al., 2021; Liu et al., 2021; Lorenzo et al., 2024). As escalas temporais utilizadas no cálculo do SPI correspondem ao acúmulo da precipitação em 1, 3, 6, 9, 12, 18 e 24 meses consecutivos (SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-18 e SPI-24, respectivamente).

Para este estudo foram utilizados o SPI-3 para análise temporal, considerando três meses acumulados. Como já mencionado, esta avaliação foi realizada com a extração dos dados do GEE e processamento e aplicação do SPI no R, utilizando o pacote SPEI (Beguería; Vicente-Serrano, 2023). Já para a distribuição espacial foi

estimado o SPI-12 dentro do próprio GEE, desde a seleção dos dados, processamento, aplicação do SPI e filtragem. Na sequência, as figuras foram produzidas utilizando o software R.

A determinação do SPI pode ser realizada seguindo as equações 1 a 5.

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, x > 0 \quad (1)$$

Em que  $\alpha$  é o parâmetro sobre a forma,  $\beta$  é parâmetro sobre a escala,  $x$  é o volume de precipitação e a função gama é caracterizada como:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (2)$$

Os índices de  $\alpha$  e  $\beta$  são calculados pela máxima verossimilhança.

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (3)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (4)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (5)$$

Em que  $n$  é a quantidade de séries de precipitação.

A probabilidade é determinada pela equação 6.

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad (6)$$

Com isso, o SPI é calculado seguindo as equações 7 e 8.

$$SPI = S \frac{t - (c2t + c1) + c0}{[(d3t + d2)t + d1]t + 1.0} \quad (7)$$

$$t = \sqrt{\ln \frac{1}{G(x)^2}} \quad (8)$$

Deste modo,  $x$  é a quantidade de precipitação e  $G(x)$  é a distribuição de probabilidade,  $S$  é o coeficiente negativo e positivo da distribuição, quando  $G(x) > 0,5$ ,  $S = 1$  e quando  $G(x) \leq 0,5$ ,  $S = -1$ ,  $c_0 = 2,5155$ ,  $c_1 = 0,8028$ ,  $c_2 = 0,0103$ ,  $d_1 = 1,4327$ ,  $d_2 = 0,1892$ ,  $d_3 = 0,0013$ .

A caracterização de secas, assim como a classificação dos limites para cada índice, é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação das secas segundo o Índice Padronizado de Precipitação (SPI).

<b>Categorias de umidade climática</b>	<b>SPI</b>
Excepcionalmente úmido	$\geq 2,0$
Severamente úmido	1,60 a 1,99
Muito úmido	1,30 a 1,59
Moderadamente úmido	0,80 a 1,29
Próximo à normal	0,79 a - 0,79
Moderadamente seco	- 0,80 a - 1,29
Muito seco	- 1,0 a - 1,49
Severamente seco	- 1,60 a - 1,99
Excepcionalmente seco	$\leq - 2,0$

Fonte: INPE, (2014).

### III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### Análise Temporal

A distribuição anual da precipitação para o Pantanal é caracterizada pela flutuação de índices acumulados inferiores e superiores à média climatológica. Dentro do período avaliado, a média anual para a região é de 1.536,66 mm. Considerando este valor, dezoito anos ultrapassaram o volume médio de chuva anual, representando 60% dos anos avaliados. Treze anos não atingiram ou não superaram o volume médio anual, incluindo intervalos marcantes, como os anos de 2002 a 2005 e 2019 a 2023, com chuva anual inferior à média geral (Figura 2).

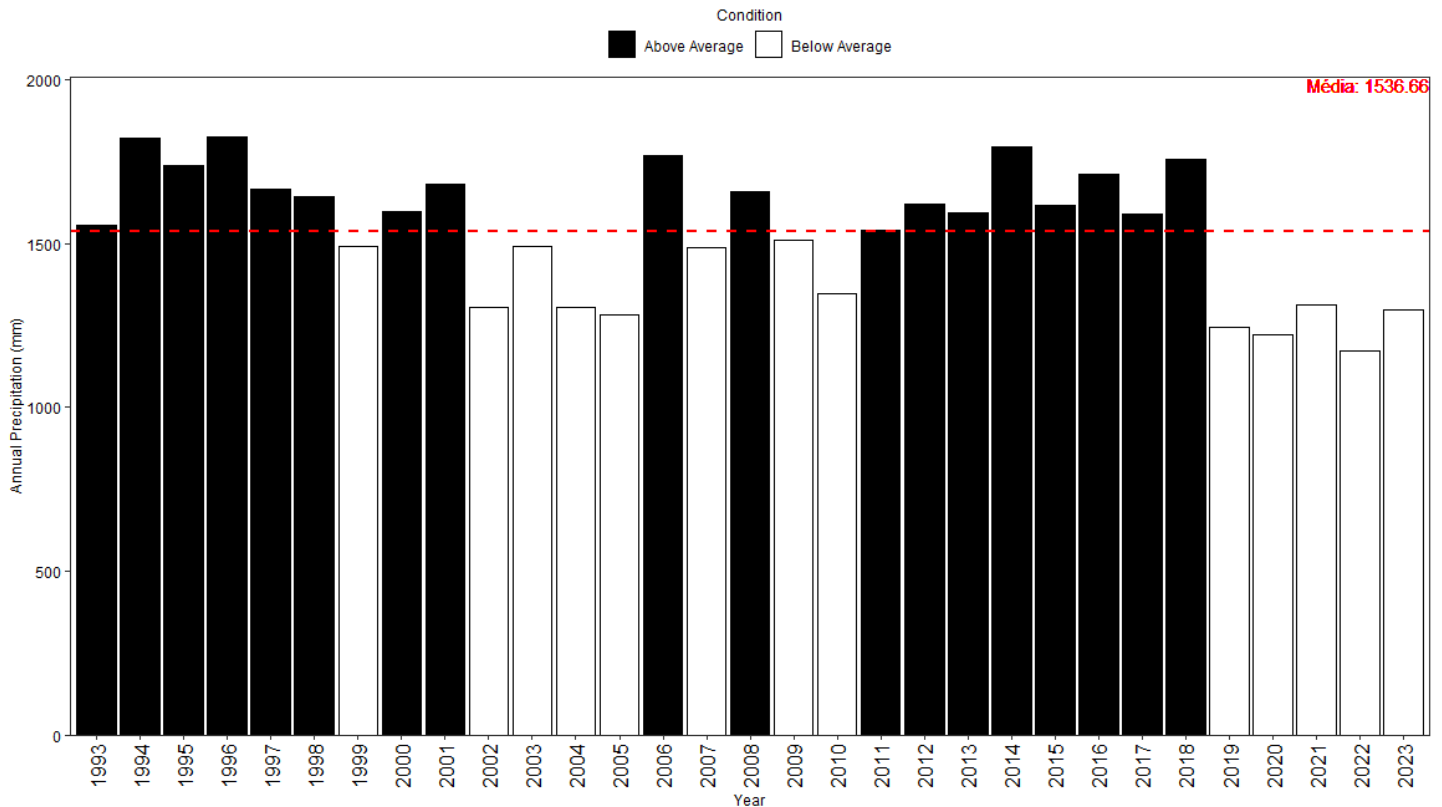


Figura 2 – Distribuição anual da precipitação pluviométrica de 1993 a 2023 para o Pantanal.

Resultados semelhantes foram observados por Marengo et al. (2016), que identificaram uma média climatológica anual de 1400 mm, com variação de 800 a 1600 mm. No mesmo estudo, os autores salientam que a região pode alcançar um volume anual de 2000 mm. Neste estudo, os maiores valores observados foram em 1996 e 1994 com 1824,9 mm e 1820,2 mm, respectivamente, considerando o período antes do ano 2000.

Já a partir do ano 2000, o último ano com volume anual superior à média climatológica foi registrado em 2018, com 1757,5 mm. Considerando os anos subsequentes, ocorreu uma redução nos índices pluviométricos, que não ultrapassam os 1350 mm anuais. Estudando sobre a origem, dinâmica e previsão de eventos de secas no Pantanal, Thielen et al. (2021) observaram que o bioma foi afetado por uma seca extrema dentro do período de 2019 a 2020, os autores apontam que o evento evoluiu de forma diferente no espaço e no tempo, atingindo cerca de 80% do território do bioma, com um prolongamento maior que qualquer seca já registrada anteriormente.

Na perspectiva anual, como mencionado, ocorreu uma redução acentuada no regime pluviométrico anual, com volume oscilando de 223 a 364 mm negativos anuais, dentro do intervalo de 2019 a 2023. Tais alterações também foram apontadas por Lázaro et al. (2020), que identificaram o aumento de dias sem precipitação, assim como a redução da massa de água. Os autores caracterizam uma redução de 2 a 6% de dias

sem precipitação por década. Considerando o ano de 1981, eles identificaram 146 dias sem chuva, chegando a 248 e 287 em 2001 e 2011, respectivamente.

As chuvas mensais são distribuídas em duas estações bem definidas, seca e chuvosa. A estação seca é caracterizada pelo decréscimo do volume mensal de precipitação a partir de maio, com média de 84 mm, comportamento que é observado até setembro. Nesse período, o volume de chuva não ultrapassa os 100 mm mensais. Para a estação chuvosa os acréscimos iniciais são acentuados no mês de outubro se estendendo até março, com médias mensais superiores a 100 mm (Figura 3).

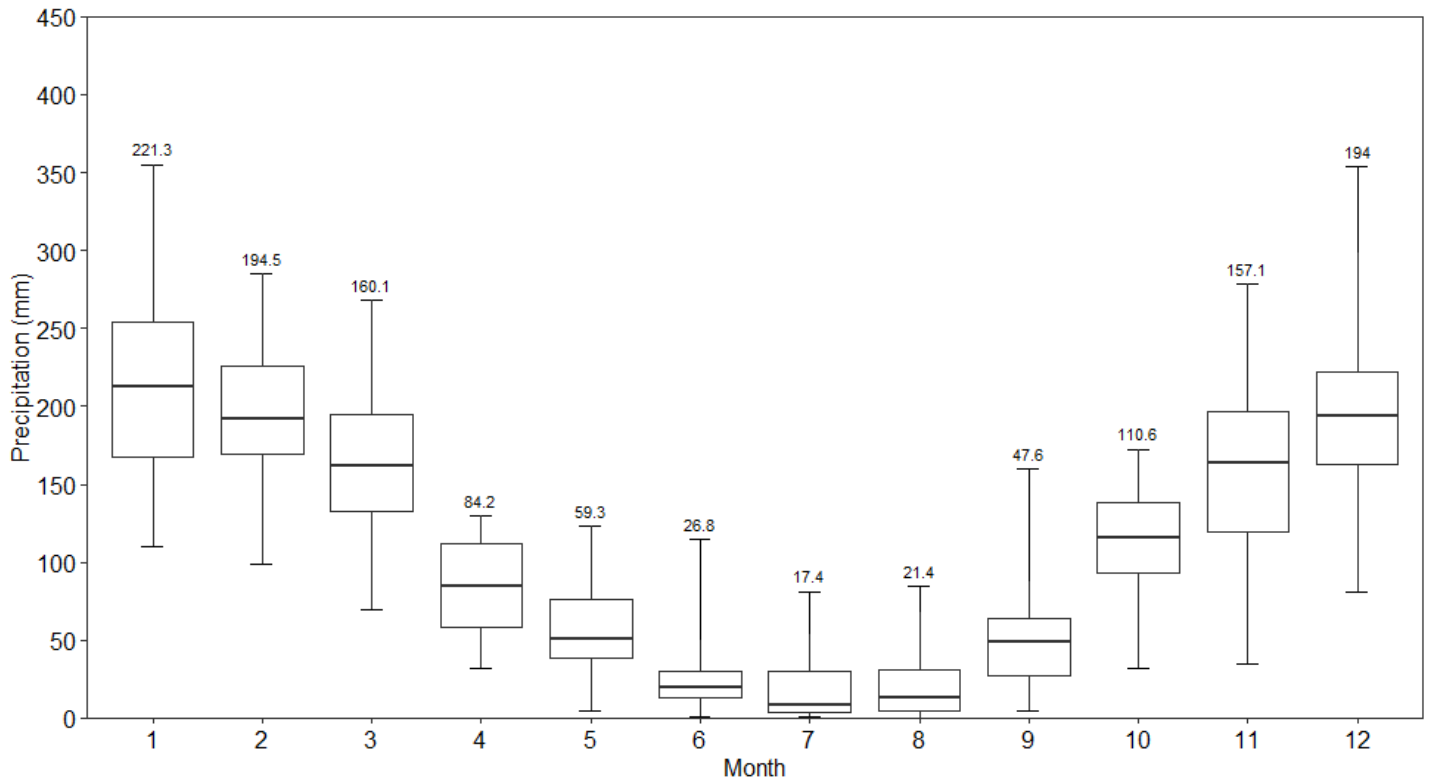


Figura 3 – Distribuição mensal da precipitação pluviométrica de 1994 a 2023 para o Pantanal. Valor acima do boxplot representa a média.

Esses resultados corroboram o estudo de Marengo et al. (2021), que identificaram alta sazonalidade na precipitação mensal, com período chuvoso entre dezembro e fevereiro, e seco entre junho e agosto. Assim como neste estudo, os autores caracterizam o período seco com variações de 0 a 100 mm, além disso, existe uma variação na distribuição das chuvas entre as regiões norte e sul do Pantanal.

Em relação à variação das chuvas no Pantanal, Costa et al. (2023), aplicando a análise wavelet para avaliar as variações na estação seca, atestaram mudanças no padrão de distribuição das estações seca e chuvosa, identificando atrasos e alongamento nas estações, fator que pode interferir diretamente no pulso de inundação e na dinâmica do bioma.

Considerando um possível alongamento ou redução das estações, Souza et al. (2024), em um estudo realizado ao Norte do Pantanal e Oeste de Mato Grosso, observou um alongamento da estação seca para a região, com volume de precipitação inferior às décadas anteriores. Esse resultado foi reafirmado com aplicação do Teste de Man-Kendall, em que os autores caracterizam redução significativa da precipitação em maio, julho, agosto, setembro e outubro, considerando a série temporal de 1970 a 2023.

A região do Pantanal apresenta diferentes regimes de precipitação identificados pelo SPI-3, com oscilações entre períodos úmidos e secos, especialmente após o ano 2000. Considerando toda a série histórica, os principais eventos de seca são observados entre os anos de 2003 a 2006 e de 2019 a 2023. Nestes intervalos, ocorre pouca flutuação para períodos úmidos, com o SPI-3 ultrapassando a escala de -2,00, classificado como excepcionalmente seco, com maior incidência de déficit de precipitação para o bioma (Figura 4).

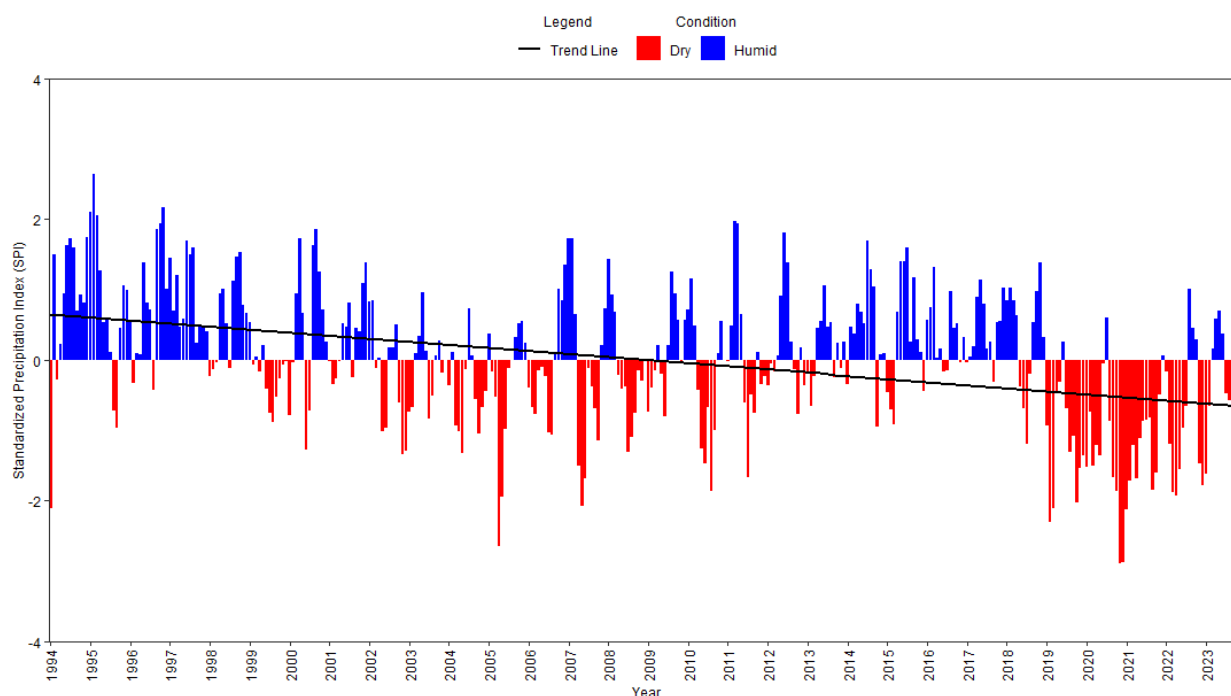


Figura 4 – Índice Padronizado de Precipitação SPI-3 de 1994 a 2023.

A maior propensão para eventos de seca também é identificada pela linha de tendência, apontando para uma mudança de comportamento com o passar dos anos, de úmidos para secos. Avaliando separadamente os eventos de secas, sete anos ultrapassaram a escala de -2,00 do SPI-3. Com exceção de 2005 e 1994, todos os eventos foram caracterizados, a partir de 2019, com maior ocorrência entre os meses de outubro e dezembro. Esses resultados coincidem com a distribuição anual da precipitação para a região, onde foi identificada uma redução do volume pluviométrico nos últimos anos de estudo.

Esses resultados corroboram o estudo de Fernandes et al. (2024), em que os autores, em sua pesquisa voltada à quantificação de secas, com abordagem para os biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal, identificaram tendências negativas para dois índices, o SPI utilizando apenas dados de precipitação, e SPEI que leva em consideração a demanda atmosférica (ETP). Os autores ainda observaram que os eventos mais intensos e severos ocorreram no Pantanal a partir de 2019, com o SPEI caracterizando seca extrema por dois anos consecutivos.

Estudando a seca extrema no Pantanal brasileiro de 2019 a 2020, Marengo et al. (2021) caracterizaram o ano de 2020 como o mais seco desde 1900. Além disso, os autores identificaram mudanças significativas na circulação e fluxo de umidade na América do Sul durante o período de 2019 e 2020, acarretando em um bloqueio na formação de tempestades convectivas. No mesmo estudo, é caracterizada uma redução da precipitação mensal, comparada com a média climatológica, fato que pode ter contribuído para o aumento da intensidade da seca no período.

### **Análise Espacial**

A distribuição espacial anual de precipitação para o Pantanal (Figura 5) é caracterizada pela flutuação dos acumulados anuais, com volume de chuva inferiores a 1000 mm e superiores a 2500 mm, em diferentes porções do bioma. Considerando toda a série histórica de 1994 a 2023, assim como na análise temporal, é observado um maior acumulado de chuva nos anos antecedentes a 2000. Após esse período, algumas regiões do bioma começam a apresentar redução do volume pluviométrico anual, especialmente na parte central e sul do Pantanal.

Nessa distribuição, o maior índice acumulado foi registrado em 1996, ultrapassando 2400 mm, enquanto o menor acumulado anual foi em 2020, com valores inferiores a 1000 mm anuais em várias porções do bioma. Vale salientar que houve um regime pluviométrico uniforme entre 1994 a 2001, com índices oscilando de 1500 mm a 2500 mm, fato não observado em alguns anos subsequentes, como 2002, 2004 e, com maior incidência de secas, a partir de 2019, com precipitação média anual inferior a 1000 mm. Além disso, considerando apenas o intervalo de 2019 a 2023, a região norte do bioma é a mais afetada pela redução do regime pluviométrico, notadamente nos anos de 2020 e 2022, períodos que apresentam menores acumulados em várias zonas da região.

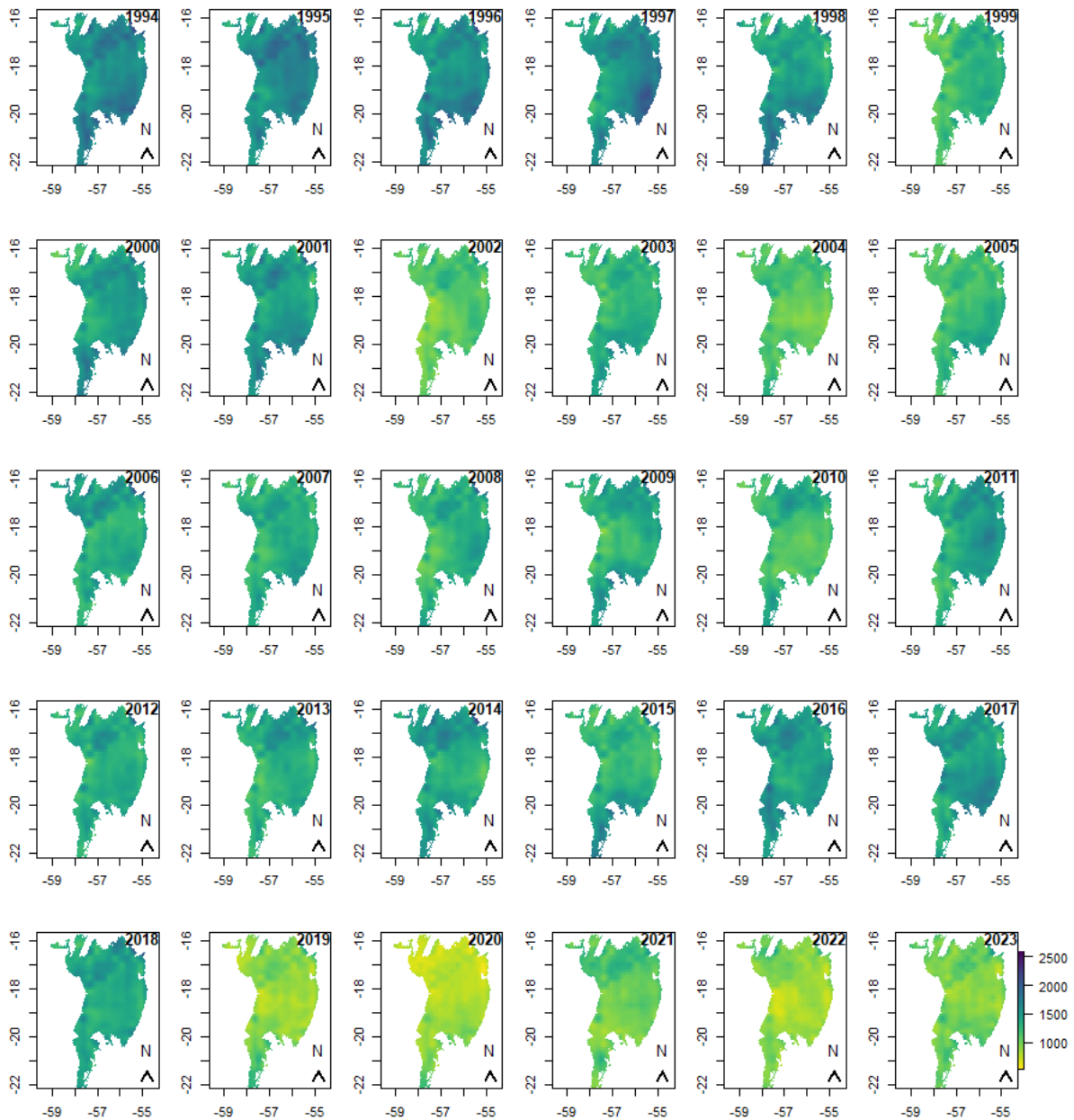


Figura 5 – Distribuição espacial média anual da precipitação pluviométrica no Pantanal Brasileiro, entre os anos de 1994 e 2023.

Estes resultados estão de acordo com os observados por Tomasella et al. (2023), que avaliaram tendências e impactos das secas no Brasil, identificando tendências significativas para condições mais secas em toda a região central do Brasil, especialmente o Pantanal. Em consonância com o presente estudo, relacionando a redução dos índices de precipitação para o Pantanal, Costa et al. (2023) observaram que a região Centro-oeste do Brasil, incluindo o Pantanal, experimentou a pior seca dos últimos 50 anos, com estações chuvosas com índices abaixo da média climatológica, considerando apenas o período de 2019 a 2021.

As chuvas mensais no Pantanal são divididas em duas estações, seca e chuvosa, sendo que os meses de abril e setembro representam a transição entre as estações, com decréscimos e acréscimos de precipitação, respectivamente (Figura 6). A estação chuvosa compreende os meses de outubro a março, com índices oscilando de 150 a 350 mm mensais, e para a estação seca o acumulado de precipitação é inferior a 100 mm, período que ocorre de junho a agosto.

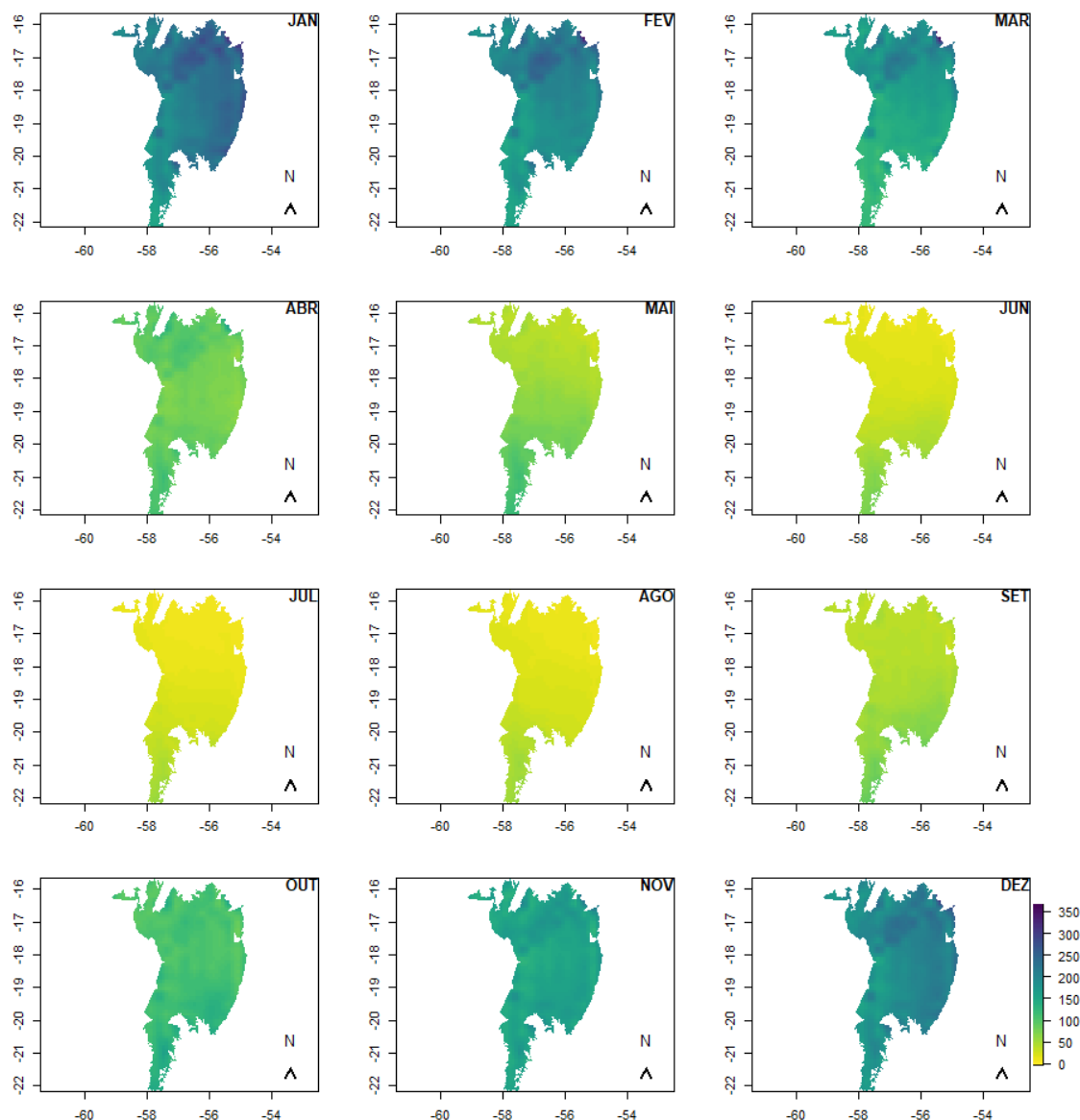


Figura 6 – Distribuição espacial média mensal da precipitação pluviométrica no Pantanal Brasileiro, entre os anos de 1994 e 2023.

O SPI-12 indicou diferentes eventos dentro da série histórica (Figura 7) com caracterização de períodos excepcionalmente úmidos em alguns locais no Pantanal, com índices positivos fluando em torno de 2,00 (SPI).

Esse comportamento foi observado em vários anos, no entanto, períodos secos, classificados como severamente e excepcionalmente secos, também estão distribuídos em regiões diferentes no bioma.

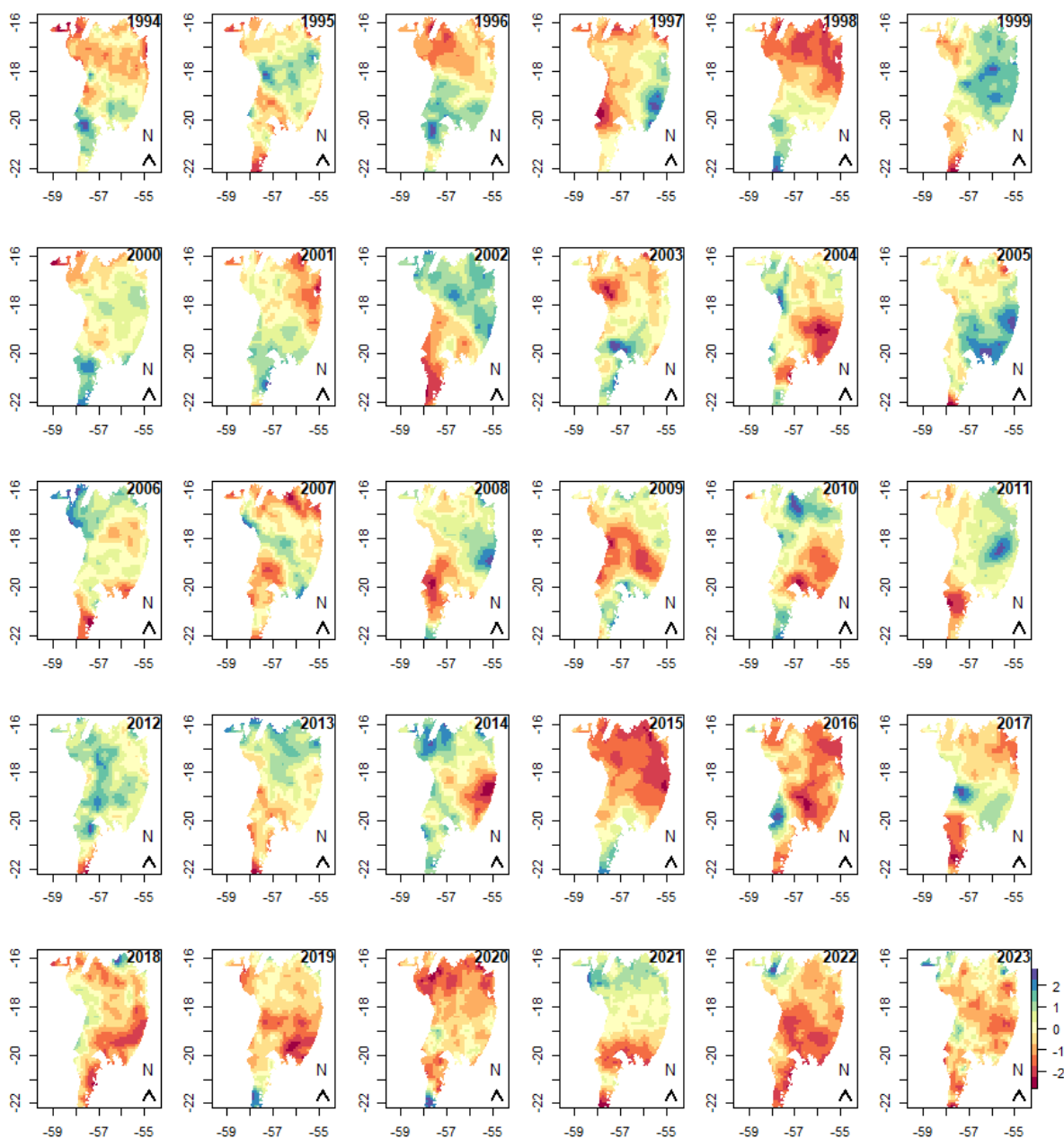


Figura 7 – Distribuição do SPI-12 para o Pantanal Brasileiro, entre os anos de 1994 e 2023.

Avaliando períodos separadamente, de 1994 a 2014 ocorreu uma oscilação de períodos secos e úmidos, concentrados em regiões específicas dentro do Pantanal, como a seca de 1998 no Norte, 2002 no Sul e 2004 e 2009 no centro da região. Além disso, em algumas regiões, em vários anos, apresentaram índices próximos à neutralidade. No intervalo de 2015 a 2023, ocorreu uma maior concentração de períodos secos, corroborando a distribuição anual de precipitação, na qual foi diagnosticado um déficit de precipitação nos últimos anos.

Estes resultados indicam uma maior predominância de eventos secos nos últimos 10 anos, fato que pode estar associado ao regime pluviométrico regional, causando uma instabilidade e maior ocorrência desses episódios. O SPI identificou eventos de secas marcantes para a região, especialmente nos anos de 2015, 2019, 2020 e 2022, períodos que são caracterizados pela variabilidade em diferentes porções do bioma, abrangendo Pantanal Norte, Sul e Central, com algumas regiões ultrapassando a escala -2,00, classificadas como excepcionalmente seco.

Eventos semelhantes foram observados por Marengo et al. (2021), que analisaram a seca extrema no Pantanal de 2019 a 2020 e caracterizaram eventos semelhantes aos observados no presente estudo. Estes autores, considerando o período de 1900 a 2020, determinaram uma flutuação entre períodos úmidos e secos com base nos valores do SPI-12, no entanto, observaram eventos concentrados de secas principalmente entre 1962 a 1973 e de 2016 a 2020, eventos esses que, segundo os autores, coincidem com as mudanças nos padrões da precipitação, responsáveis pela alteração do regime hídrico.

Estudando eventos compostos de secas e ondas de calor no Pantanal brasileiro, Costa et al. (2023) observaram resultados semelhantes ao presente estudo, identificando que as regiões Norte e Central do Pantanal passaram por condições de elevadas temperaturas e secas durante 2019. Além disso, nos anos subsequentes ocorreu o aumento da intensidade e severidade em outras regiões do bioma, atingindo nível extremo no Norte em 2020. Na mesma pesquisa, os autores também confirmam o estresse hídrico na região, especialmente a partir de 2018, com eventos climáticos extremos mais recorrentes.

Resultados semelhantes também foram observados por Barbosa et al. (2022), que identificaram anomalias negativas de precipitação durante dois anos consecutivos (2019-2020). Essas condições elucidaram os eventos recorrentes de secas na região. Na mesma pesquisa, os autores definem que toda a bacia do alto Paraguai (Planalto e Pantanal), está mais quente e seca em 2020, além disso, o regime hídrico da região está passando por decréscimos anualmente.

De acordo com os resultados da presente pesquisa, a distribuição da precipitação no Pantanal apresenta oscilações positivas e negativas ao longo de todo o período de estudo, destacando-se que a partir do ano 2000, alguns anos não ultrapassaram a média climatológica. Este comportamento pode estar associado a uma possível mudança no regime pluviométrico da região. Esses decréscimos são sinalizados com maior clareza pelo SPI, no qual o índice determinou diferentes períodos para a região, com secas marcantes, especialmente a partir de 2019.

Com a distribuição espacial, foi possível analisar o comportamento da precipitação e eventos de seca em diferentes porções do bioma, identificando a região norte e central do Pantanal com os eventos mais intensos, severos e frequentes. Além disso, essas regiões apresentam oscilações positivas e negativas de precipitação anual, fator que pode intensificar a ocorrência de eventos climáticos extremos.

#### IV. CONCLUSÕES

A média anual de precipitação para o Pantanal é de 1.536,66 mm, com destaque para os últimos anos, com índices pluviométricos inferiores à média climatológica. A distribuição espacial de precipitação, entre 1994 e 2023, variou de menos de 1000 mm a mais de 2500 mm, com uma redução a partir do ano 2000, especialmente nos últimos cinco anos, quando diversas regiões do bioma registraram índices inferiores a 1.000 mm.

A análise temporal do SPI revelou diferentes eventos ao longo do tempo, com episódios marcantes nos anos de 2005, 2015 e de 2019 a 2023, com índices que ultrapassaram a marca de -2,00, e uma linha de tendência que indica uma maior probabilidade de eventos de seca.

O SPI-12 indicou a alternância de períodos secos e úmidos ao longo dos 30 anos, com alguns períodos extremamente úmidos e outros excepcionalmente secos. No entanto, entre 2015 e 2023, observou-se uma frequência maior de períodos secos, refletindo a redução na precipitação anual e indicando uma maior predominância de eventos secos.

#### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) com a concessão da bolsa de mestrado.

#### V. REFERÊNCIAS

- ABBASS, K. et al. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, n. 28, p. 42539-42559, 2022.
- BARBOSA, M. L. F. et al. Compound impact of land use and extreme climate on the 2020 fire record of the Brazilian Pantanal. *Global Ecology and Biogeography*, v. 31, n. 10, p. 1960-1975, 2022.
- BEGUERÍA, S.; VICENTE-SERRANO, S. M. SPEI - Calculation of the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index. R package version 1.8.1, 2023. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=SPEI>. Acesso em: 20 jul. 2024.
- COSTA, M. C. et al. Multiscale analysis of drought, heatwaves, and compound events in the Brazilian Pantanal in 2019–2021. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 155, n. 1, p. 661-677, 2024.

COPERNICUS. Copernicus Climate Change Service (C3S). ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present, 2024. Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.68d2bb30?tab=overview>. Acesso em: 20 jul. 2024.

DIAS, V. R. M. et al. Geostatistical modeling of the ten-day rainfall in Mato Grosso State. *Geografia*, v. 42, n. 3, p. 99-112, 2017.

FERNANDES, F. A. C. et al. Quantifying droughts in Mato Grosso with SPI and SPEI: exploring connections to tropical sea surface temperatures. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 155, n. 11, p. 9751-9766, 2024.

FERNANDES, V. R. et al. Secas e os impactos na região sul do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 28, p. 561-584, 2021.

FOROOTAN, E. et al. Understanding the global hydrological droughts of 2003–2016 and their relationships with teleconnections. *Science of the Total Environment*, v. 650, p. 2587-2604, 2019.

GOMIS-CEBOLLA, J. et al. Evaluation of ERA5 and ERA5-Land reanalysis precipitation datasets over Spain (1951–2020). *Atmospheric Research*, v. 284, p. 106606, 2023.

GONÇALVES, S. T. N. et al. Índices e metodologias de monitoramento de secas: uma revisão. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 36, p. 495-511, 2021.

GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, v. 202, p. 18-27, 2017.

HERSBACH, H. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020.

HU, Q. et al. Rainfall spatial estimations: A review from spatial interpolation to multi-source data merging. *Water*, v. 11, n. 3, p. 579, 2019.

IVORY, S. J. et al. Vegetation, rainfall, and pulsing hydrology in the Pantanal, the world's largest tropical wetland. *Environmental Research Letters*, v. 14, n. 12, p. 124017, 2019.

LÁZARO, W. L. et al. Climate change reflected in one of the largest wetlands in the world: an overview of the Northern Pantanal water regime. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 32, p. e104, 2020.

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.

LIU, C. et al. Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China. *Scientific Reports*, v. 11, n. 1, p. 1280, 2021.

LORENZO, M. N. et al. Standardized Precipitation Index (SPI) evolution over the Iberian Peninsula during the 21st century. *Atmospheric Research*, v. 297, p. 107132, 2023.

MARENGO, J. A. et al. Extreme drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: characterization, causes, and impacts. *Frontiers in Water*, v. 3, p. 639204, 2021.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; TORRES, R. R. Regional climate change scenarios in the Brazilian Pantanal watershed. *Climate Research*, v. 68, n. 2-3, p. 201-213, 2016.

MCKEE, T. B. et al. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the 8th*

Conference on Applied Climatology, 1993. p. 179-183.

MEHTA, D. et al. Drought projection using GCM & statistical downscaling technique: a case study of Sirohi District. *Results in Engineering*, v. 20, p. 101605, 2023.

MUÑOZ, S. J. Dados médios mensais do ERA5-Land de 1981 até o presente. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2019. Acesso em: 20 jul. 2024.

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, p. 1925, 2020.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 20 jul. 2024.

SONG, Y. et al. The impact of climate change on China's agricultural green total factor productivity. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 185, p. 122054, 2022.

SOUZA, M. D. 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*, v. 12, n. 4, p. 706-715, 2024.

THIELEN, D. et al. The Pantanal under siege—On the origin, dynamics and forecast of the megadrought severely affecting the largest wetland in the world. *Water*, v. 13, n. 21, p. 3034, 2021.

TOMASELLA, J. et al. Assessment of trends, variability and impacts of droughts across Brazil over the period 1980–2019. *Natural Hazards*, v. 116, n. 2, p. 2173-2190, 2023.

TOMAS, W. M. et al. Sustainability agenda for the Pantanal Wetland: perspectives on a collaborative interface for science, policy, and decision-making. *Tropical Conservation Science*, v. 12, p. 1940082919872634, 2019.

WILSON, D. D.; TEFERA, G. W.; RAY, R. L. Application of Google Earth Engine to Monitor Greenhouse Gases: A Review. *Data*, v. 10, n. 1, p. 8, 2025.

WU, J. et al. The interactions between hydrological drought evolution and precipitation-streamflow relationship. *Journal of Hydrology*, v. 597, p. 126210, 2021.

---