



Variabilidade temporal das secas (SPI) e o risco climático para o algodão em Campo Verde, Mato Grosso

Joyce Aguiar DIAS ^{*1,2} , Lucas Tavares da SILVA ^{1,2} , Moisés Damasceno SOUZA ^{1,2} ,
João Danilo BARBIERI ^{1,2} , Rafael Cesar TIEPPO ^{1,2} , Rivanildo DALLACORT ^{1,2} 

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: joyce.aguiar@unemat.br

Submetido em: 21/12/2025; Aceito em: 28/08/2026; Publicado em: 07/09/2026.

RESUMO: A variabilidade climática impõe riscos severos aos sistemas de segunda safra no Cerrado. Este estudo avaliou a variabilidade temporal das secas e os riscos climáticos associados à produção de algodão em Campo Verde, Mato Grosso, no período de 1970 a 2024. Foram utilizados dados da reanálise ERA5-Land para o cálculo do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) nas escalas de 1, 3 e 6 meses. As tendências foram avaliadas pelos testes de Mann-Kendall e de Sen, evidenciando elevada variabilidade interanual da precipitação, com média de 1684,0 mm, além de aumento na ocorrência de eventos de seca moderada a severa a partir de 2020. Observou-se tendência negativa significativa da disponibilidade hídrica entre maio e outubro, indicando maior persistência do período seco e irregularidade no estabelecimento das chuvas. O SPI-6 também revelou anomalias persistentes, com implicações potenciais para a recarga hídrica do solo. Para o algodão, esse cenário amplia os riscos durante o estabelecimento, a floração e o enchimento das maçãs, podendo comprometer produtividade e qualidade da fibra. Conclui-se que o SPI constitui uma ferramenta relevante para subsidiar o planejamento agrícola, o ZARC, o ajuste das épocas de semeadura e as práticas conservacionistas.

Palavras-chave: variabilidade climática; índice padronizado de precipitação; déficit hídrico; cerrado brasileiro; sistemas agrícolas.

Temporal variability of droughts (SPI) and climate risk for cotton in Campo Verde, Mato Grosso

ABSTRACT: Climate variability imposes severe risks on second-crop systems in the Cerrado. This study evaluated the temporal variability of droughts and the climate risks associated with cotton production in Campo Verde, Mato Grosso, from 1970 to 2024. ERA5-Land reanalysis data were used to calculate the Standardized Precipitation Index (SPI) at 1-, 3-, and 6-month time scales. Trends were evaluated using the Mann-Kendall test and Sen's slope estimator, revealing high interannual precipitation variability, with a mean of 1,684.0 mm, as well as an increase in the occurrence of moderate to severe drought events from 2020 onward. A significant negative trend in water availability was observed between May and October, indicating greater persistence of the dry season and irregularity in the onset of rainfall. The SPI-6 also revealed persistent anomalies, with potential implications for soil water recharge. For cotton, this scenario amplifies the risks during crop establishment, flowering, and boll filling, potentially compromising yield and fiber quality. In conclusion, the SPI constitutes a relevant tool to support agricultural planning, Agricultural Climate Risk Zoning (ZARC), the adjustment of sowing dates, and conservation practices.

Keywords: climate variability; standardized precipitation index; water deficit; Brazilian Cerrado; agricultural systems.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura é a principal atividade econômica de Mato Grosso, responsável por sustentar cadeias produtivas intensivas em tecnologia, capital e infraestrutura logística (NEVES et al., 2024). O município de Campo Verde consolidou-se como um importante polo agrícola de grãos e fibras, combinando escala produtiva, mecanização e inovação no manejo (PEREIRA, 2011). Esse protagonismo local reflete a expansão territorial e os ganhos de produtividade,

que ampliam os elos com o setor da agroindústria e reforçam sua centralidade no agronegócio do Cerrado (SILVA et al., 2024; VIEIRA et al., 2024).

O cultivo do algodão possui relevância econômica e social no Cerrado de Mato Grosso, pela geração de empregos e renda, pela integração a mercados internacionais e pelo estímulo a investimentos em beneficiamento e rastreabilidade (KLEIN; VIDAL-LUNA, 2023; LIMA; ALVES, 2023). No estado, a cultura é conduzida como segunda safra, logo após

a soja, com semeadura entre dezembro e fevereiro e colheita de junho a agosto (DANIEL et al., 2021). Esse ciclo coincide diretamente com a transição hidrológica regional, no qual o estabelecimento da cultura ocorre durante a estação chuvosa, que em Campo Verde apresenta precipitação média de 173,7 mm, 151,94 mm e 144,53 mm nos meses de janeiro, fevereiro e março respectivamente, enquanto a maturação e a colheita ocorrem na estação seca, período em que os acumulados médios podem chegar a 9,15 mm no mês de julho (VIEIRA et al., 2024). Essa variabilidade hídrica torna o sistema produtivo dependente das condições climáticas, sendo as decisões sobre a época de semeadura, o manejo nutricional e a irrigação suplementar fundamentais para garantir a qualidade da fibra e a estabilidade do rendimento (VIANA et al., 2025; SOUZA et al., 2024).

Estudos realizados em alguns municípios de Mato Grosso indicam variabilidade pluviométrica significativa e recorrência de secas meteorológicas e agrícolas, com impactos diretos sobre culturas anuais de ciclo curto (3 a 6 meses), como o algodão de sequeiro (VIANA et al., 2025; SOUZA et al., 2024). As secas podem ser classificadas em meteorológicas, agrícolas, hidrológicas e socioeconômicas, de acordo com seus diferentes impactos e manifestações. As secas meteorológicas decorrem de reduções anormais na precipitação mensal ou anual e ocorrem em escalas curtas, de 1 a 3 meses. As agrícolas estão relacionadas à diminuição da umidade do solo, afetando diretamente a produção, associadas a escalas intermediárias (3 a 6 meses). As hidrológicas referem-se à redução da vazão de rios e de reservatórios superficiais ou subterrâneos, expressa por escalas mais longas (12 a 24 meses), enquanto as socioeconômicas envolvem efeitos sobre atividades humanas e sistemas produtivos (MISHRA; SINGH, 2010; PEI et al., 2020; SOUZA et al., 2024).

Para caracterizar e comparar a variabilidade pluviométrica em diferentes escalas temporais, o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) tornou-se referência por sua formulação estatística simples, baseada apenas na precipitação acumulada e na transformação em uma distribuição normal padrão (McKee et al., 1993). Pesquisas recentes no Brasil confirmam a utilidade operacional do SPI no mapeamento de secas em regiões produtoras, especialmente quando associado a dados de sensoriamento remoto e reanálises climáticas, desde que suas estimativas sejam submetidas a avaliações de viés para garantir maior confiabilidade diagnóstica (CARVALHO et al., 2020; LAVERS et al., 2022; FELIPE et al., 2023).

Apesar dos avanços na caracterização de secas no Brasil, ainda são escassos os estudos em escala municipal ou microrregional no estado de Mato Grosso que associem as secas identificadas pelo SPI aos riscos climáticos associados a cultura do algodão. A maioria dos trabalhos concentra-se na climatologia geral ou na regionalização das secas, sem aprofundar a análise de como a frequência, a severidade e a variabilidade temporal desses eventos hídricos potencializam as ameaças climáticas ao desenvolvimento do algodoeiro (FELIPE et al., 2023; SOUZA et al., 2024; VIANA et al., 2025).

Diante desse cenário, a aplicação do SPI na região de Campo Verde (MT) constitui uma ferramenta essencial para a identificação, caracterização e compreensão da variabilidade temporal das secas. Neste contexto, o presente estudo objetiva analisar a variabilidade temporal das secas, por meio do SPI, na região de Campo Verde, Mato Grosso, avaliando os riscos climáticos à cultura do algodão e

forneendo informações estratégicas para as atividades agrícolas locais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O estudo foi conduzido no município de Campo Verde, localizado na região sudeste de Mato Grosso, Brasil, na latitude 15°32'44" sul e longitude 55°09'59" oeste, a uma altitude média de 749 metros (Figura 1). O clima local é classificado como Aw, segundo Köppen, tropical quente e subúmido, caracterizado por uma estação seca de maio a setembro e uma estação chuvosa de outubro a abril, com precipitação média mensal destacando-se em janeiro (173,7 mm), fevereiro (151,94 mm) e março (144,53 mm), e temperatura média anual do ar de 26,7 °C (ALVARES et al., 2013; VIEIRA et al., 2024).

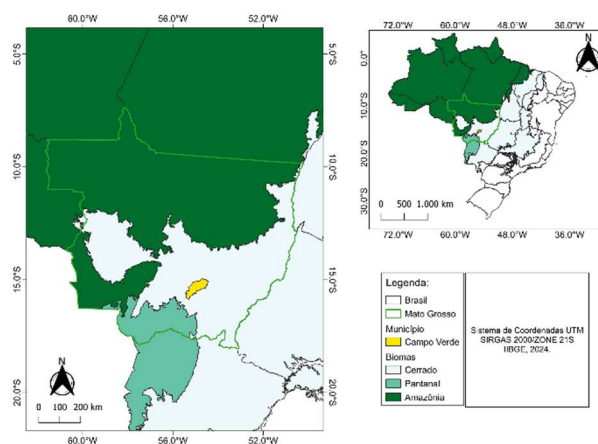


Figura 1. Localização geográfica do município de Campo Verde, Mato Grosso, Brasil.

Figure 1. Geographical location of the municipality of Campo Verde, Mato Grosso, Brazil.

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024), o município registrou 84.000 hectares plantados e colhidos, o que resultou em uma produção total de 365.400 toneladas de algodão em caroço. O rendimento médio de 4.350 kg por hectare evidencia não apenas a relevância econômica da cultura, mas também o alto nível tecnológico adotado no manejo, característico da região.

2.2. Dados utilizados

Os dados pluviométricos utilizados neste estudo foram obtidos por meio do Serviço Copernicus de Mudanças Climáticas (C3S), operado pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Os dados derivam da reanálise ERA5-Land, que se destaca por oferecer séries espaço-temporais contínuas e completas, garantindo uma cobertura global consistente de dados meteorológicos (LAVERS et al., 2022).

A variável climática analisada corresponde à precipitação (mm), extraída do conjunto de dados ERA5-Land, no período de 1970 a 2024, para a área de Campo Verde. Essa reanálise fornece uma representação consistente dos processos hidrológicos superficiais ao longo de várias décadas, abrangendo o período de 1950 até os dias atuais. Os dados apresentam cobertura global contínua, estruturada em grades regulares de 0,10° x 0,10° e resolução horizontal aproximada de 9 km (MUÑOZ, 2019). Os dados foram

acessados e processados por meio da execução de um script no Code Editor da plataforma Google Earth Engine (<https://github.com/DamascenoSouza/Google-Earth-Engine>).

2.3. Google Earth Engine

O processamento de dados geoespaciais em nuvem, exemplificado pela plataforma Google Earth Engine (GEE), representa um avanço tecnológico na análise de dados ambientais, climáticos, agrícolas e de solo, ao integrar um conjunto de dados de múltiplos repositórios globais, nacionais e regionais, o que é eficaz para ampliar a capacidade de descobertas científicas (ZHAO et al., 2021; AL NADABI et al., 2024).

Esta arquitetura supera as limitações computacionais tradicionais associadas ao armazenamento local e ao processamento de grandes volumes de dados (Big Data), permitindo o acesso direto e a manipulação eficiente de vastos arquivos históricos de observação da Terra, como os produtos dos satélites Landsat, Sentinel e MODIS (AMANI et al., 2020; ZHAO et al., 2021).

No contexto específico do cálculo de índices de seca, como o SPI, a funcionalidade do sistema permite a ingestão e o processamento de séries temporais longas de precipitação, essenciais para a modelagem de anomalias climáticas em escalas decadais (LAKSHMI et al., 2025).

A aplicação destas ferramentas de processamento em nuvem para o município de Campo Verde é fundamental para mitigar a escassez de dados de estações meteorológicas locais, fornecendo uma cobertura contínua e homogênea, necessária à avaliação robusta dos riscos de seca agrícola e meteorológica.

2.4. Índice Padronizado de Precipitação (SPI)

A análise de eventos de seca pode ser realizada por meio de diversos índices, entre os quais o Índice de Precipitação Padronizado (SPI). Recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), o SPI apresenta grande versatilidade para avaliar deficiências ou excessos de precipitação em diferentes regiões e escalas temporais. Esse índice baseia-se na distribuição probabilística da precipitação e no desvio padrão dos registros históricos, permitindo quantificar a intensidade, a duração e a frequência das anomalias pluviométricas, sejam elas associadas à escassez ou ao excesso hídrico (McKee et al., 1993; FELIPE et al. 2023; ONYEUWAOMA et al., 2024).

O SPI-1 reflete variações de curto prazo, sensíveis a episódios semanais de chuva ou de seca, sendo particularmente útil para avaliar condições que afetam a emergência, o estabelecimento do estande e as operações iniciais de campo. O SPI-3, por sua vez, integra a variabilidade hidrológica ao longo de toda a fase inicial e intermediária do ciclo das culturas anuais, sendo utilizado como indicador de estresse hídrico, dada sua capacidade de captar déficits que se estendem por duas ou mais fases fenológicas (GHOLINIA; ABBASZADEH, 2024; ÖZ et al., 2024). Já o SPI-6 representa tendências hidrológicas de um meio período agrícola, permitindo identificar secas persistentes que influenciam a disponibilidade hídrica do solo e afetam o planejamento operacional, o desempenho produtivo e os riscos na fase reprodutiva (WU et al., 2007; ROLBIECKI et al., 2022).

Os dados de precipitação anual foram inicialmente organizados e submetidos a análises estatísticas de média e

desvio-padrão. Posteriormente, as informações foram agrupadas em escala mensal, permitindo a identificação e quantificação dos períodos de seca pelo SPI. O cálculo do SPI foi realizado com o auxílio do pacote SPEI, disponível gratuitamente no ambiente estatístico R (<https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/SPEI.pdf>), no qual também foram conduzidas todas as etapas de processamento e análise dos dados.

O SPI foi calculado conforme metodologia proposta por McKee et al. (1993), utilizando a precipitação acumulada em janelas móveis de 1, 3 e 6 meses. O processo inicia-se com o ajuste de uma função de densidade de probabilidade gama incompleta a distribuição de frequência das séries históricas de precipitação (equação 1). A função foi configurada para ajustar a distribuição de forma independente para cada mês do ano. Meses com precipitação nula foram tratados automaticamente pelo próprio algoritmo do pacote utilizando o parâmetro de probabilidade de zeros.

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (01)$$

em que: α é um parâmetro sobre a forma ($\alpha > 0$), β é um parâmetro sobre a escala ($\beta > 0$) e x é a quantidade de precipitação ($x > 0$). A função gama mostrada na equação acima é definida pela Equação 2:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (02)$$

Segundo Assis et al. (1996) e Thom (1966), o método da máxima verossimilhança é o mais indicado para a estimativa dos parâmetros α (forma) e β (escala), Equações 3 e 4:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (03)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (04)$$

em que: A é definido pela Equação 5:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (05)$$

em que: n é o número de medições de precipitação e $\bar{x}$ é o valor médio dos dados de precipitação. Como a função gama não é definida para $x = 0$ e as séries de precipitação podem apresentar ocorrências de valores nulos, torna-se necessário incorporar a probabilidade de precipitação igual a zero à distribuição acumulada (Equação 6)

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (06)$$

O parâmetro q representa a probabilidade de ocorrência de precipitação nula, enquanto $G(x)$ corresponde à função de distribuição acumulada da distribuição gama incompleta. A partir desses componentes, determina-se a probabilidade acumulada $H(x)$, que posteriormente é transformada em uma variável padronizada segundo a distribuição normal, com média 0 e variância 1. Para valores de $H(x) \leq 0,5$, o SPI é calculado conforme as Equações 7 e 8:

$$SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad (07)$$

$$t = \sqrt{\ln \frac{1}{H(x)^2}} \quad (08)$$

Para valores de $H(x)$ superiores a 0,5, o SPI é calculado de acordo com as Equações 9 e 10:

$$SPI = t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \quad (09)$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} \quad (10)$$

Os coeficientes utilizados na equação são $c_0 = 2,515517$, $c_1 = 0,802853$, $c_2 = 0,010328$, $d_1 = 1,432788$, $d_2 = 0,189269$ e $d_3 = 0,001308$.

Para cada escala temporal (1, 3 e 6 meses), os valores do SPI foram classificados segundo as categorias propostas por McKee et al. (1993) e Liu et al. (2021), apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação dos períodos secos e úmidos conforme o Índice de Precipitação Padronizada (SPI).

Table 1. Classification of dry and wet periods according to the Standardized Precipitation Index (SPI).

SPI	Classificação
$\geq 2,00$	Extremamente úmido
1,50 a 1,99	Severamente úmido
1,00 a 1,49	Moderadamente úmido
0,99 a -0,99	Próximo ao normal
-1,00 a -1,49	Seca moderada
-1,50 a -1,99	Seca severa
$\leq -2,00$	Seca extrema

Fonte: Adaptado de McKee et al. (1993) e Liu et al. (2021).

2.5. Análise de tendências

Para analisar a tendência da série temporal, foi empregado o teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), um teste não paramétrico que além de identificar a tendência em uma série temporal também verifica se a tendência é significativa.

O teste é amplamente empregado em estudos climáticos para detectar tendências monotônicas, seja de aumento ou de redução, em séries temporais de diferentes variáveis meteorológicas. Trata-se de um método não paramétrico, o que o torna adequado para analisar dados sem distribuição normal, sendo útil na avaliação de mudanças graduais e persistentes nos padrões de precipitação e de outros fatores climáticos (SAM et al., 2022). A estatística S do teste é dada pela Equação 11:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (11)$$

em que: x_j e x_i são os dados da série temporal, n é o tamanho da série, e o $\text{sgn}(x_j - x_i)$ é calculado pela Equação 12:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{se } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{se } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{se } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (12)$$

Para a aplicação do teste de Mann-Kendall, torna-se necessário calcular a variância (Var) a estatística S , a qual é posteriormente utilizada para determinar o valor padronizado Z . Essa padronização permite avaliar a significância estatística da tendência identificada, conforme demonstrado nas Equações 13 e 14:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (13)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (14)$$

O sinal da estatística padronizada Z indica a direção da tendência identificada: valores positivos correspondem a uma tendência de aumento na série temporal, enquanto valores negativos representam uma tendência de redução (BARBOSA et al., 2023). A hipótese nula (H_0), que presume ausência de tendência, é rejeitada quando o valor absoluto de Z ultrapassa o limite crítico $Z_{1-\alpha/2}$, para um nível de significância $\alpha = 0,05$. Nesses casos, considera-se que há uma tendência significativa de mudança na série analisada (MANN, 1945; KENDALL, 1975).

3. RESULTADOS

3.1. Variabilidade pluviométrica

A análise da precipitação anual no município de Campo Verde, ao longo dos 55 anos avaliados (1970 a 2024), revela uma expressiva variabilidade temporal, com amplitude histórica de 855,0 mm. Os volumes anuais variaram entre 1223,0 mm e 2078,0 mm, estabelecendo uma média climatológica de 1684,0 mm e um desvio padrão de 183,8 mm (Figura 2-A). Observa-se um equilíbrio na distribuição histórica, em que 49% dos anos (27 anos) apresentaram totais pluviométricos acima da média, enquanto 51% (28 anos) ficaram abaixo desse limiar. Contudo, a dinâmica pluvial regional caracteriza-se por agrupamentos de anomalias interanuais. Foram observados intervalos prolongados de precipitação abaixo da média nos períodos de 1970 a 1975, 2002 a 2005 e 2019 a 2024, alternando com períodos de precipitação acima da média nos anos de 1981 a 1984 e 1988 a 1995. Essa oscilação evidencia a variabilidade temporal do regime pluvial regional.

A análise intra-anual (Figura 2-B) confirmou a sazonalidade pluvial característica da região, marcada pela alternância entre uma estação chuvosa, de outubro a abril, e uma estação seca, de maio a setembro. Durante o período chuvoso, os maiores acumulados concentram-se entre dezembro e fevereiro, com médias mensais superiores a 200,0 mm. Por outro lado, durante a estação seca, ocorre a redução dos volumes acumulados, com médias inferiores a 20,0 mm em junho, julho e agosto, chegando a 6,4 mm.

Ao analisar o regime pluvial durante a janela de cultivo do algodão na região, verifica-se que a estação chuvosa, compreendida entre dezembro e abril, apresenta precipitação acumulada média de 1154,1 mm (Figura 2-C). Esse período é essencial para a recarga hídrica do solo e para o suprimento das demandas associadas as fases de crescimento vegetativo e florescimento. Entretanto, os registros mais recentes da série histórica (2019 a 2022) indicam maior frequência de anos com precipitação abaixo da média, o que pode reduzir a reposição hídrica do perfil do solo na fase inicial da cultura.

A estação seca, de maio a setembro, apresenta o menor volume pluvial do ciclo anual, com precipitação acumulada média de 140,4 mm (Figura 2-D), caracterizando um período de maior restrição hídrica. Embora a redução das chuvas favoreça condições mais secas durante a maturação e abertura dos capulhos, a intensificação dos déficits hídricos observada nas últimas duas décadas aumenta o risco de esgotamento da água armazenada no solo. Anos como 2010, 2021 e 2024, caracterizados por baixos volumes acumulados durante a

estação seca, evidenciam a importância das reservas hídricas para a manutenção do suprimento de água ao final do ciclo. A limitação desse suprimento pode resultar em estresse hídrico terminal e comprometer o enchimento e a maturação das fibras.

A análise probabilística da precipitação, baseada no modelo de distribuição Gama (Tabela 2), permite quantificar o risco associado à disponibilidade hídrica local e estabelecer limiares de risco para a agricultura em diferentes cenários climáticos. Na escala anual, há 50% de probabilidade de os acumulados pluviométricos atingirem ou superar 1677,3 mm. Para um nível de segurança hídrica de 75%, o volume mínimo esperado é de 1556,6 mm. Diante dos extremos climáticos da região, observa-se que, em anos de alto volume pluviométrico (probabilidade de excedência de 10%), o acumulado anual esperado é de 1923,5 mm. Em contrapartida, em períodos de restrição hídrica, há uma probabilidade de 90% de que o volume máximo seja de 1453,1 mm.

Quanto ao regime sazonal, o período chuvoso apresenta maior estabilidade pluviométrica nos meses centrais da estação. há 75% de probabilidade de que as precipitações alcancem, no mínimo, 234,2 mm, 222,9 mm e 206,1 mm, respectivamente. Do ponto de vista da segurança hídrica agrícola, mesmo em cenários de estresse (90% de probabilidade), esses meses apresentam volumes mínimos de 208,8 mm, 187,1 mm e 175,5 mm, o que reduz o risco de déficit durante o pico de demanda hídrica do algodão. Por outro lado, em um cenário de maior pluviosidade (10% de probabilidade), o mês de janeiro pode registrar volumes superiores a 369,0 mm, o que sinaliza o potencial de atrasos operacionais devido ao excesso hídrico.

Durante a estação seca, a análise probabilística confirma a elevada restrição hídrica característica da região. Nos meses de junho e julho, os cenários com 75% de probabilidade de ocorrência indicam acumulados de apenas 1,1 e 0,7 mm, respectivamente. Em cenários de escassez extrema (90% de probabilidade), a precipitação é quase nula, limitando-se a 0,2 mm e 0,1 mm, respectivamente. Além disso, nesses períodos, os acumulados de precipitação não ultrapassam 26,4 mm em

junho e 17,4 mm em julho, com probabilidade de 10%, o que reforça a severidade e a persistência do déficit hídrico.

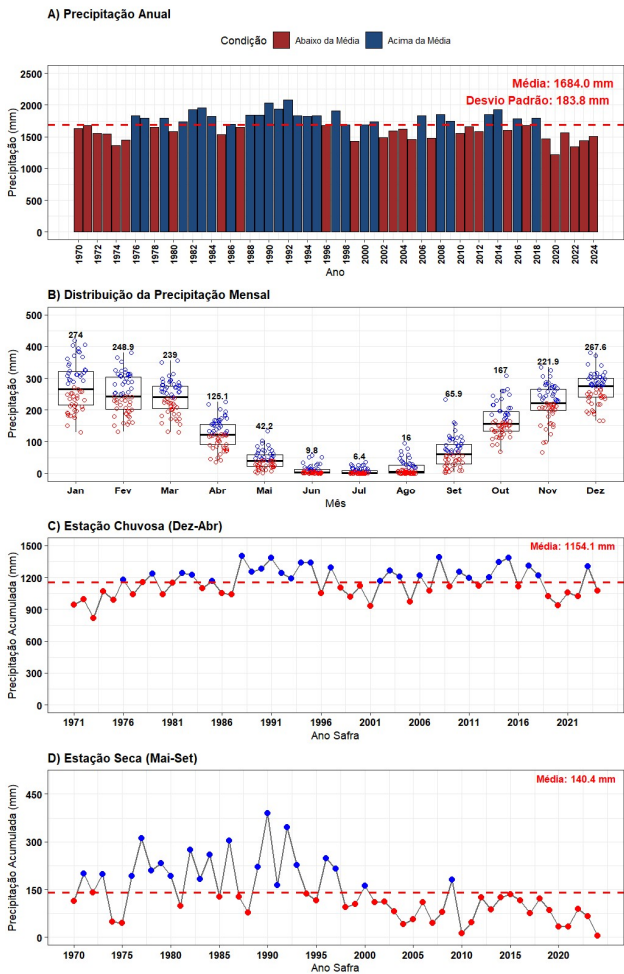


Figura 2. Variabilidade interanual, mensal e sazonal da precipitação pluviométrica no município de Campo Verde, Mato Grosso, no período de 1970 a 2024.

Figure 2. Interannual, monthly, and seasonal variability of rainfall in the municipality of Campo Verde, Mato Grosso, from 1970 to 2024.

Tabela 2. Distribuição mensal e anual da probabilidade de precipitação, baseada na distribuição Gama, para o município de Campo Verde, Mato Grosso.

Table 2. Monthly and annual distribution of precipitation probability based on the Gamma distribution for the municipality of Campo Verde, Mato Grosso.

Meses	X	S	A	β	Níveis de probabilidade						
					10%	25%	40%	50%	60%	75%	90%
Jan	274	71,7	14,6	18,8	369	318,4	286,1	267,8	250,3	222,9	187,1
Fev	248,9	60,3	17,1	14,6	328,6	286,5	259,5	244,1	229,3	206,1	175,5
Mar	239	51,3	21,7	11	306,7	271,4	248,5	235,4	222,7	202,7	176,1
Abr	125,1	45	7,7	16,2	185,2	151,9	131,2	119,8	109	92,5	72
Mai	42,2	28,1	2,3	18,7	79,9	56,4	43,1	36,2	30,1	21,6	12,5
Jun	9,8	13,6	0,5	18,8	26,4	13,1	7,1	4,6	2,9	1,1	0,2
Jul	6,4	9,1	0,5	12,7	17,4	8,5	4,6	3	1,8	0,7	0,1
Ago	16	22,6	0,5	31,9	43,2	21,1	11,3	7,3	4,4	1,6	0,3
Set	65,9	45,9	2,1	32	127,2	88,5	66,8	55,6	45,7	32,2	18
Out	167	49,3	11,5	14,6	232,5	197,1	174,8	162,2	150,2	131,7	107,8
Nov	221,9	57,3	15	14,8	297,8	257,4	231,6	217	202,9	181	152,3
Dez	267,6	47,5	31,7	8,4	330	297,9	276,9	264,8	253	234,2	208,8
Anual	1684	183,8	83,9	20,1	1923,5	1804,1	1724,2	1677,3	1631,3	1556,6	1453,1

X: precipitação média histórica (mm); S: desvio padrão da precipitação (mm); A: parâmetro de forma (adimensional) da distribuição Gama; β : parâmetro de escala (mm) da distribuição Gama.

X: historical mean precipitation (mm); S: standard deviation of precipitation (mm); A: shape parameter (dimensionless) of the Gamma distribution; β : scale parameter (mm) of the Gamma distribution.

A distribuição mensal da precipitação (Figura 3) confirma o regime climático do tipo Aw, característico do Cerrado de Mato Grosso, com um período chuvoso que se estende de outubro a abril, quando as médias mensais variam de 125 a 274 mm, e uma estação seca bem definida entre maio e setembro, com precipitação média mensal variando de 6,45 a 65,9 mm.

Com base na análise da série histórica de 1970 a 2024 e na aplicação do teste de Mann-Kendall, observam-se tendências significativas de baixa magnitude em determinados períodos do ano. Os meses de maio, julho, agosto, setembro e outubro apresentaram tendência negativa significativa ($p < 0,05$), indicando redução da precipitação durante o período seco, sobretudo nos meses de transição para a estação chuvosa.

Nos meses centrais da estação chuvosa (de dezembro a março), as tendências não foram significativas ($p > 0,05$), o que indica estabilidade relativa do volume de chuvas, embora se observe elevada variabilidade interanual, fator de risco para o manejo hídrico e para a definição das janelas de plantio. Os meses de transição (setembro e outubro) mostraram redução das chuvas, reforçando as tendências de atraso no início da estação úmida, e aumento do período da estação seca, enquanto em fevereiro e março não foi estatisticamente significativa, indicando estabilidade das chuvas no final do verão.

3.2. Séries temporais do Índice de Precipitação Padronizada (SPI-1, SPI-3 e SPI-6)

O Índice Padronizado de Precipitação (SPI), calculado nas escalas temporais de 1, 3 e 6 meses (Figura 4), evidencia padrões cronológicos distintos de variabilidade da umidade e

da seca no município. A escala mensal (SPI-1) apresenta maior frequência de valores negativos (SPI < 0) a partir de 2020, indicando condições mais secas e sugerindo ocorrência recorrente de déficits pluviométricos de curto prazo, caracterizados como secas meteorológicas.

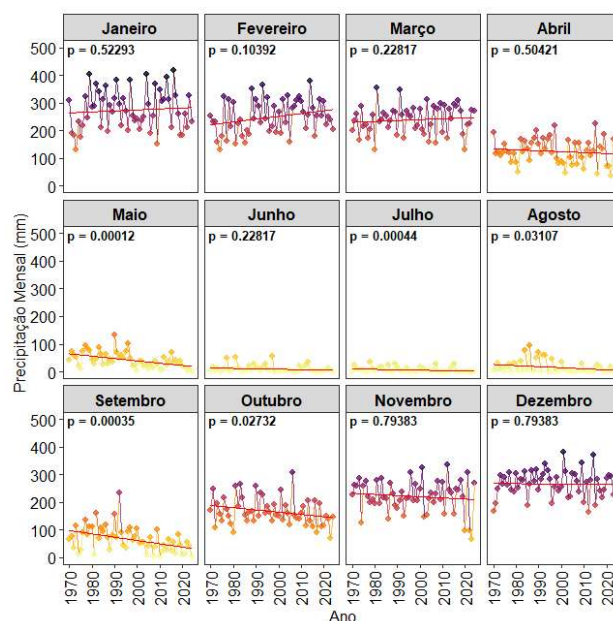


Figura 3. Distribuição média mensal da precipitação de 1970 a 2024 e linha de tendencia do teste de Mann-Kendall (p -valor < 0,05) para o município de Campo Verde, estado de Mato Grosso, Brasil.

Figure 3. Average monthly precipitation distribution from 1970 to 2024 and Mann-Kendall test trend line (p -value < 0.05) for the municipality of Campo Verde, state of Mato Grosso, Brazil.

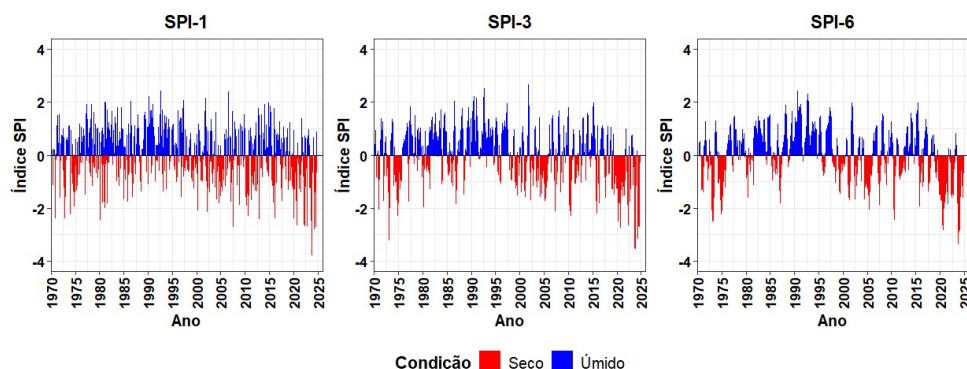


Figura 4. Índices de Precipitação Padronizados (SPI) de 1, 3 e 6 para o município de Campo Verde, Mato Grosso, Brasil, de 1970 a 2024.

Figure 4. Standardized Precipitation Index (SPI) at 1-, 3-, and 6-month time scales for the municipality of Campo Verde, Mato Grosso, Brazil, from 1970 to 2024.

O SPI-1 atua como um indicador de curto prazo, sensível as variações hídricas que ocorrem em janelas críticas do ciclo agrícola, especialmente durante a emergência e o pegamento floral. Valores negativos nessa escala podem justificar decisões operacionais, como o adiamento da semeadura ou o replanejamento de tratos culturais dependentes de umidade. Por outro lado, valores positivos expressivos podem indicar condições favoráveis à realização de operações de campo.

Na escala de 3 meses (SPI-3), as flutuações negativas persistem, mas caracterizam-se com maior frequência por eventos de seca moderada a severa, sinalizando que os déficits de precipitação ocorrem por períodos mais longos. A escala semestral (SPI-6) ressalta tendências de longo prazo,

com blocos contínuos de valores negativos que indicam secas agrícolas persistentes, o que pode comprometer o estoque de água no solo e, consequentemente, a produção agrícola. Ao analisar o SPI-3 e o SPI-6, nota-se maior persistência de secas moderadas e severas, com valores de -1,00 a -1,49 e de -1,50 a -1,99, respectivamente, principalmente no período de 2020 a 2024. A relevância dessa análise é particularmente significativa no contexto da cultura do algodão, pois a persistência de condições secas em escalas de 1, 3 e 6 meses pode comprometer o suprimento hídrico do solo durante estágios críticos do ciclo da planta e a sua produtividade final.

A análise estatística aplicada ao SPI confirma a intensificação dos quadros de seca na região. Os resultados

do teste de Mann-Kendall, associados ao estimador de Sen, evidenciam tendências negativas significativas na disponibilidade hídrica, concentradas sobretudo no período de transição climática e no início da estação chuvosa (Tabela 3). Essa maior ocorrência de secas corrobora as observações

sobre o aumento da irregularidade pluviométrica, o que sinaliza alterações no regime de chuvas. Além disso, tais condições tornam-se mais acentuadas com o prolongamento da estação seca, o que acarreta atraso na estabilização das precipitações regionais.

Tabela 3. Análise de tendência mensal do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) nas escalas de 1, 3 e 6 meses para o município de Campo Verde, Mato Grosso.

Table 3. Monthly trend analysis of the Standardized Precipitation Index (SPI) at 1-, 3-, and 6-month scales for the municipality of Campo Verde, Mato Grosso.

Mês	SPI-1		SPI-3		SPI-6	
	Sen	p-valor	Sen	p-valor	Sen	p-valor
Jan	0,0052	0,5229	-0,006	0,6119	-0,0195	0,044
Feb	0,0155	0,1039	0,0141	0,1994	-0,0096	0,3868
Mar	0,0102	0,2282	0,0152	0,0765	0,0038	0,7654
Apr	-0,008	0,5042	0,0113	0,2636	0,008	0,3321
May	-0,0338	0,0001	-0,0079	0,2892	0,0047	0,6981
Jun	-0,0097	0,2282	-0,0215	0,0159	0,0031	0,7827
Jul	-0,027	0,0004	-0,0355	0,0002	-0,0017	0,8731
Aug	-0,0186	0,0311	-0,0281	0,0029	-0,0146	0,0631
Sep	-0,03	0,0004	-0,03	0,0009	-0,0285	0,0001
Oct	-0,0182	0,0273	-0,0321	0,0003	-0,0363	0
Nov	-0,0028	0,7938	-0,0226	0,0094	-0,0258	0,0015
Dec	-0,002	0,7938	-0,0104	0,2226	-0,0229	0,0044

Sob a perspectiva mensal do SPI-1, as avaliações estatísticas indicam declínios na disponibilidade hídrica de curto prazo, com níveis de significância de $p < 0,05$ observados entre maio e outubro. O mês de maio, caracterizado pela transição para a estação seca, destaca-se pela maior taxa de declinação, com um estimador de Sen de -0,0338. Esse cenário impõe limitações ao encerramento das atividades agrícolas e compromete a reserva hídrica superficial do solo. Paralelamente, o índice SPI3 demonstra um agravamento dos déficits acumulados, que se mostram mais persistentes e intensos durante o estio, avançando até o limiar do período chuvoso. Tendências negativas robustas foram identificadas entre junho e novembro, com picos de declínio em julho e em outubro. Considerando que essa escala abrange a resposta do sistema solo-planta, o recrudescimento das condições de seca de médio prazo impacta o cronograma de semeadura do algodão, elevando os riscos fitotécnicos e ameaçando o estabelecimento inicial das lavouras no campo.

No âmbito da dinâmica climática sazonal, as análises no índice SPI-6 caracterizam a persistência de anomalias que comprometem a recarga hídrica do perfil edáfico ao longo do verão. Verificou-se uma tendência consistente de declínio pluviométrico entre setembro e dezembro, estendendo-se a janeiro, com maior severidade em outubro. Este período registrou a inclinação negativa mais acentuada em toda a matriz analítica, com um estimador de Sen de -0,0363. A reiteração desses déficits em escala semestral, que coincide com a fase de maior demanda evaporativa, impõe uma restrição hídrica na região. Dado que o algodoeiro é vulnerável ao estresse hídrico nos estádios de floração e de enchimento das maçãs, a limitação hídrica prolongada compromete a translocação de fotoassimilados, culminando em prejuízos à produtividade e à qualidade tecnológica da fibra. Tais evidências reiteram a necessidade imperativa de monitoramento agrometeorológico contínuo e da implementação de manejos adaptativos para assegurar a resiliência do sistema produtivo regional.

4. DISCUSSÃO

A tendência de redução das taxas anuais de precipitação, mais evidente a partir de 2018, pode estar relacionada aos efeitos das mudanças climáticas globais, que têm modificado significativamente a distribuição espacial e temporal da precipitação em diferentes ecossistemas (PÖRTNER et al., 2021). Nesse contexto, Hofmann et al. (2023) observaram uma redução anual de 64,8 mm na precipitação e 5,2 dias no número de dias chuvosos no período de 1960 a 2021 na região do Cerrado brasileiro, reforçando assim, que os impactos das alterações climáticas vêm intensificando a irregularidade das chuvas e ampliando o risco de ocorrência de períodos secos prolongados.

Esse padrão também é evidenciado pela análise de tendências apresentada na Tabela 3 para Campo Verde. A tendência negativa e estatisticamente significativa ($p < 0,05$) observada pelo estimador de Sen entre maio e outubro na escala SPI-1, associada à redução dos valores do SPI-6 no final da estação seca, indica a persistência de condições de déficit hídrico e sugere prolongamento do período seco, com maior variabilidade no estabelecimento das chuvas no início da primavera. Esse comportamento sazonal dos períodos de seca é típico das regiões tropicais do Brasil Central, nas quais a precipitação apresenta acentuada variabilidade intra- e interanual, condicionada principalmente pela movimentação de massas de ar quente e úmidas formadas no Oceano Pacífico e trazidas pelos ventos (BARBIERI et al. 2019).

A tendência de diminuição das precipitações ao longo do ano indica dois riscos complementares para o cultivo do algodão: o déficit no início da estação chuvosa, que compromete o estande e a primeira frutificação, e o excesso de chuvas no encerramento do ciclo, que dificulta as operações de campo e pode depreciar a qualidade da pluma (KHAN et al., 2025). Embora a presença de uma estação seca bem definida favoreça o planejamento agrícola, a variabilidade na transição entre os períodos seco e úmido pode atrasar o início efetivo das chuvas, exigindo monitoramento climático de curto prazo e a adoção de

critérios técnicos para a implantação das lavouras (SOUZA et al., 2024; VIANA et al., 2025).

O SPI, na escala de 3 meses, em particular, destaca-se por ser mais sensível à detecção de déficits que afetam a fase vegetativa das culturas (ROLBIECKI et al. 2022). Estudos como o de Worku et al. (2024) demonstram que a frequência e a magnitude de secas moderadas a extremas aumentam claramente quando se examinam escalas de 3 a 12 meses, o que corrobora a observação de blocos mais concentrados nas faixas de seca no SPI-6 para Campo Verde. Segundo Sakellariou et al. (2024), este padrão de alta frequência de classes de seca e de SPI negativos coincide com períodos de redução da produção agrícola.

Essa progressão de curto para médio prazo confere suporte à compreensão de que escalas maiores de SPI capturam melhor o desenvolvimento e o acúmulo de condições secas que podem afetar os sistemas agrícolas, como discutido por Guenang; Kamga (2014), que ressaltaram a utilidade do SPI calculado em múltiplas escalas para monitorar secas meteorológicas.

A escala de 3 meses reflete a resposta integrada do sistema solo-planta às oscilações hídricas intrasazonais e é a mais adequada para o monitoramento de culturas anuais com ciclo de 3 a 6 meses (ROLBIECKI et al., 2022). Períodos prolongados de valores negativos nessa janela geralmente abrangem duas ou mais fases fenológicas, favorecendo o acúmulo de estresse e a consequente redução da resiliência do dossel vegetal (WANG et al., 2024b). Estudos brasileiros indicam que valores de $SPI-3 \leq -1,0$ configuram um limiar operacional para o replanejamento de atividades agrícolas em anos de maior risco hídrico, embora seja necessária calibração local para sua aplicação efetiva (CARVALHO et al., 2020; FELIPE et al., 2023). Em cenários de aquecimento, mesmo déficits classificados como moderados podem evoluir para situações de estresse agrônômico severo, o que amplia a importância de limiares preventivos de manejo e de tomada de decisão (CARVALHO et al., 2020; LIU et al., 2021).

Destacamos a importância desta pesquisa no contexto do algodão, uma cultura de extrema relevância econômica global, cuja produtividade é severamente ameaçada pela escassez hídrica, que impacta desde os processos celulares até o rendimento final (KHAN et al., 2025). Entre os estresses abióticos, a seca é o fator limitante de maior impacto no desempenho em campo, restringindo processos que vão desde a germinação e o estabelecimento inicial do estande até o transporte de nutrientes (ZAFAR et al., 2023; ZHANGJIN et al., 2025).

Fisiologicamente, o estresse por seca induz o fechamento estomático para conservar água, o que limita a condutância estomática e a fotossíntese, resultando na redução do crescimento (GOWTHAM et al., 2022). Esse processo desencadeia a superprodução de Espécies Reativas de Oxigênio (EROS), causando danos oxidativos a lipídios e proteínas, embora a planta tente mitigar esses danos por meio de sistemas antioxidantes e ajustes osmóticos (SAJID et al., 2023; ZAFAR et al., 2023).

A seca altera a morfologia do algodoeiro. Estudos indicam uma redução significativa na altura da planta e na área foliar sob estresse hídrico (ZAFAR et al., 2023; ZHANGJIN et al., 2025). Mais especificamente, a seca afeta a distribuição de capulhos nos ramos frutíferos. Plantas sob estresse produzem menos capulhos e de menor peso,

especialmente nos ramos frutíferos superiores e em posições mais distais, o que altera o padrão de distribuição do rendimento da planta (WANG et al., 2016).

A qualidade da fibra também é comprometida, com redução do comprimento e da resistência à medida que o potencial hídrico da folha diminui, sendo essas alterações mais pronunciadas nos capulhos localizados nas partes mais altas da planta (WANG et al., 2016). A distribuição de biomassa também é afetada, com menor proporção de assimilados direcionada às fibras em condições de estresse severo (WANG et al., 2016).

A sensibilidade do algodão à seca varia conforme o estágio fenológico. Embora a cultura apresente certa resistência na fase vegetativa, os estágios reprodutivos, especificamente a floração e o desenvolvimento da maçã, são extremamente críticos. A seca nessas fases pode causar abortamento de flores e botões, reduzindo severamente o número de capulhos (DANIEL et al., 2021; ZAFAR et al., 2023).

No contexto brasileiro, especialmente em Mato Grosso, o planejamento adequado da época de semeadura constitui uma estratégia fundamental para reduzir os riscos associados a variabilidade climática, evitando que os estágios de maior demanda hídrica coincidam com períodos de déficit de precipitação e que a colheita ocorra sob condições excessivamente chuvosas, capazes de comprometer a qualidade da fibra. Nesse sentido, o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) constitui uma importante ferramenta de planejamento, ao estabelecer janelas de semeadura de menor risco para o algodoeiro a partir da integração entre as exigências hídricas da cultura, a probabilidade de ocorrência de condições climáticas adversas e a capacidade de retenção de água dos diferentes tipos de solo (DANIEL et al., 2021).

Estratégias de manejo, como a irrigação deficitária, têm sido avaliadas para otimizar o uso da água sem comprometer drasticamente a produção. O uso de modelos de simulação, como o CROPGRO-DSSAT, tem se mostrado eficaz para prever a produtividade e auxiliar na tomada de decisões sobre o manejo da irrigação em diferentes cenários de solo e clima (WANG et al., 2024a; ZHANGJIN et al., 2025). Nesse contexto, o manejo conservacionista do solo, baseado na adoção do Sistema Plantio Direto (SPD) e na manutenção de resíduos vegetais na superfície, desempenha papel relevante na conservação da água, favorecendo a infiltração, reduzindo as perdas hídricas superficiais e estimulando o aprofundamento radicular (TOPA et al., 2025). De forma complementar, estratégias de melhoramento genético podem ampliar a adaptação da cultura à restrição hídrica por meio da seleção de genótipos mais eficientes no uso da água, com maior desenvolvimento radicular e mecanismos de tolerância à seca, contribuindo para maior estabilidade do rendimento (KHAN et al., 2025).

Esses resultados reforçam a ideia de que o algodoeiro é sensível ao estresse hídrico, sobretudo em determinados estágios fenológicos, o que resulta em baixas produtividades. Tal cenário reflete o cuidado diante das incertezas climáticas e dos riscos associados à irregularidade das chuvas no período de semeadura, reafirmando a importância do monitoramento climático contínuo e da adoção de estratégias de manejo adaptativo para garantir a estabilidade produtiva no setor.

5. CONCLUSÕES

A avaliação climática em Campo Verde (MT), com base em dados de reanálise (ERA5-Land, 1970-2024), revela a intensificação da irregularidade pluviométrica na região.

A aplicação do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) detectou o aumento recente na frequência e na severidade das secas, além do prolongamento significativo do déficit hídrico na transição para a estação chuvosa.

Para o algodoeiro de segunda safra, esse cenário representa um alto risco agrônomo. O atraso das chuvas compromete o estabelecimento inicial da lavoura, enquanto o avanço da seca submete as fases fenológicas críticas (floração e enchimento das maçãs) ao estresse hídrico terminal.

Apesar das limitações ao uso exclusivo de reanálise espacial sem calibração com estações locais de superfície, essas bases são indispensáveis em regiões com baixa cobertura de estações meteorológicas. O SPI confirma-se, portanto, como uma ferramenta estratégica para o planejamento agrícola, o cumprimento das janelas do ZARC e a adoção de manejo focado na conservação da água e resiliência da cultura.

6. REFERÊNCIAS

- AL NADABI, M. S.; D'ANTONIO, P.; FIORENTINO, C.; SCOPA, A.; SHAMS, E. M.; FADL, M. E. Utilizing the Google Earth Engine for agricultural drought conditions and hazard assessment using drought indices in the Najd Region, Sultanate of Oman. **Remote Sensing**, v. 16, n. 16, e2960, 2024. <https://doi.org/10.3390/rs16162960>
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- 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>
- ASSIS, F. N. D.; ARRUDA, H. V. D.; PEREIRA, A. R. **Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática**. Pelotas: Ed. Universitária/UFPel, 1996. 161p.
- BARBIERI, J. D.; DALLACORT, R.; FREITAS, P. S. L. de; ARAÚJO, D. V. de; 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>
- BARBOSA, W. G.; CARVALHO, J. de M.; SILVA, D. H. L. da; JÚNIOR, A. N. da S.; ARAÚJO, L. da S.; SILVA, A. S. A. da; FERREIRA, T. A. E.; CRISTINO, C. T.; STOSIC, T. Seasonality of the rainfall regime in the mesoregions of the Pernambuco state, Brazil. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 12, p. e29121243835, 2023. <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i12.43835>
- CARVALHO, M. Â. C. C. de; ULIANA, E. M.; SILVA, D. D. da; AIRES, U. R. V.; MARTINS, C. A. da S.; SOUSA JÚNIOR, M. F. de; CRUZ, I. F. da; MENDES, M. A. dos S. A. Drought monitoring based on remote sensing in a Grain-Producing Region in the Cerrado-Amazon Transition, Brazil. **Water**, v. 12, n. 12, e3366, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12123366>
- DANIEL, D. F.; QUEIROZ, T. M. de; DALLACORT, R.; BARBIERI, J. D. Aptidão agroclimática para o cultivo do algodão em três municípios do estado de Mato Grosso, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 2, p. 257-270, 2021. <https://doi.org/10.1590/0102-77863620148>
- FELIPE, V. F.; SANTOS, J. V. dos; BARBOSA, N. F. M.; XAVIER, E. F. M.; XAVIER JÚNIOR, S. F. A.; JALE, J. da S. An application of SPI (Standardized Precipitation Index) to monthly rainfall data in Pernambuco between 1991-2019. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 9, p. e8912943217, 2023. <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i9.43217>
- GHOLINIA, A.; ABBASZADEH, P. Agricultural drought monitoring: a comparative review of conventional and satellite-based indices. **Atmosphere**, v. 15, n. 9, e1129, 2024. <https://doi.org/10.3390/atmos15091129>
- GOWTHAM, H. G.; SINGH, S. B.; SHILPA, N.; AIYAZ, M.; NATARAJ, K.; UDAYASHANKAR, A. C.; AMRUTHESH, K. N.; MURALI, M.; POCZAI, P.; GAFUR, A.; ALMALKI, W. H.; SAYYED, R. Z. Insight into recent progress and perspectives in improvement of antioxidant machinery upon PGPR augmentation in plants under drought stress: a review. **Antioxidants**, v. 11, n. 9, e1763, 2022. <https://doi.org/10.3390/antiox11091763>
- GUENANG, G. M.; KAMGA, F. M. Computation of the Standardized Precipitation Index (SPI) and its use to assess drought occurrences in Cameroon over recent decades. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 53, p. 2310-2324, 2014. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0032.1>
- HOFMANN, G. S.; SILVA, R. C.; WEBER, E. J.; BARBOSA, A. A.; OLIVEIRA, F. B.; ALVES, R. J. V.; HASENACK, H.; SCHOSSLER, V.; AQUINO, F. E.; CARDOSO, M. F. Changes in atmospheric circulation and evapotranspiration are reducing rainfall in the Brazilian Cerrado. **Scientific Reports**, v. 13, e11236, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38174-x>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados do Brasil, 2024**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mt/campo-verde/pesquisa/14/10193>>.
- KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. Griffin, 1975. 272p.
- KHAN, M. A.; ANWAR, S.; ABBAS, M.; ANEEQ, M.; JONG, F. D.; AYAZ, M.; WEI, Y.; ZHANG, R. Impacts of climate change on cotton production and advancements in genomic approaches for stress resilience enhancement. **Journal of Cotton Research**, v. 8, e17, 2025. <https://doi.org/10.1186/s42397-025-00223-3>
- KLEIN, H. S.; VIDAL-LUNA, F. The complex evolution of Brazilian cotton production. **América Latina en La Historia Económica**, v. 30, n. 2, p. 1-35, 2023. <https://doi.org/10.18232/20073496.1374>
- LAKSHMI, V.; KIR, E. G.; KIR, A.; FANG, B. Remote sensing-based monitoring of agricultural drought and irrigation adaptation strategies in the Antalya Basin, Türkiye. **Hydrology**, v. 12, n. 11, e288, 2025. <https://doi.org/10.3390/hydrology12110288>

- 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>
- LIMA, F. F. de; ALVES, L. R. A. Portfolio theory approach to plan areas for growing cotton, soybean, and corn in Mato Grosso, Brazil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 61, n. 3, 2023. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9479.2022.258224>
- 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**, v. 11, e1280, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80527-3>
- MANN, H. B. Nonparametric Tests Against Trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245-59, 1945. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to the time scales. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8, 1993, Anaheim. **Proceedings...** Boston: American Meteorological Society, p. 179-184, 1993.
- MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal of Hydrology**, v. 391, p. 202-216, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- MUÑOZ, S. J. **ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present**. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.24381/cds.68d2bb30>
- NEVES, A. G. F.; CARNEIRO JÚNIOR, J. B. A.; REZENDE, L. M. de. Previsão do produto interno bruto do estado de Mato Grosso em função da produção de soja, milho, caroço de algodão, e arroba do boi com o uso de redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Administração Científica**, v. 15, n. 1, p. 26-40, 2024. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-684X.2024.001.0003>
- ONYEUWAOMA, N.; SIVAKUMAR, V.; BADE, M. Modelling drought in South Africa: meteorological insights and predictive parameters. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 196, e965, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13009-y>
- ÖZ, F. Y.; ÖZELKAN, E.; TATLI, H. Comparative analysis of SPI, SPEI, and RDI indices for assessing spatio-temporal variation of drought in Türkiye. **Earth Science Informatics**, v. 17, p. 4473-4505, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01401-8>
- 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>
- PEREIRA, L. da C. P. A produção e comercialização de algodão no município de Campo Verde-MT/Brasil. **Revista Geográfica de América Central**, v. 2, p. 1-14, 2011.
- PÖRTNER, H. O.; SCHOLES, R. J.; AGARD, J.; ARCHER, E.; ARNETH, A.; BAIX, X.; BARNES, D.; BURROWS, M. et al. **IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change**. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services and IPCC, v. 10, e242343254, 2021. 28p. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5101125>
- ROLBIECKI, R.; YÜCEL, A.; KOCIEŃKA, J.; ATILGAN, A.; MARKOVIĆ, M.; LIBERACKI, D. Analysis of SPI as a drought indicator during the maize growing period in the Çukurova Region (Turkey). **Sustainability**, v. 14, n. 6, e3697, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14063697>
- SAJID, M.; AMJID, M.; MUNIR, H.; AHMAD, M.; ZULFIQAR, U.; ALI, M. F.; ABUL FARAH, M.; AHMED, M. A. A.; ARTYSZAK, A. Comparative analysis of growth and physiological responses of sugarcane elite genotypes to water stress and sandy loam soils. **Plants**, v. 12, n. 15, e2759, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12152759>
- SAKELLARIOU, S.; SPILIOTOPOULOS, M.; ALPANAKIS, N.; FARASLIS, I.; SIDIROPOULOS, P.; TZIATZIOS, G. A.; KAROUTSOS, G.; DALEZIOS, N. R.; DERCAS, N. Spatiotemporal drought assessment based on gridded Standardized Precipitation Index (SPI) in vulnerable agroecosystems. **Sustainability**, v. 16, n. 3, e1240, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16031240>
- 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>
- SILVA, R. de S.; DALLACORT, R.; MACIEL JUNIOR, I. C.; CARVALHO, M. A. C. de; YAMASHITA, O. M.; SANTANA, D. C.; TEODORO, L. P. R.; TEODORO, P. E.; SILVA JUNIOR, C. A. da. 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>
- SOUZA, M. D.; DALLACORT, R.; DIAS, V. R. de M.; FENNER, W.; TIEPPO, R. C.; OLIVEIRA, G. C. 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. <https://doi.org/10.31413/nat.v12i4.18169>
- THOM, H. C. S. **Some methods of climatological analysis**. Geneva: World Meteorological Organization, 1966. 53p. (WMO - Technical note, 81).
- ȚOPA, D.-C.; CĂPȘUNĂ, S.; CALISTRU, A.-E.; AILINĂI, C. Sustainable practices for enhancing soil health and crop quality in modern agriculture: a review. **Agriculture**, v. 15, n. 9, e998, 2025. <https://doi.org/10.3390/agriculture15090998>
- VIANA, E. N.; DALLACORT, R.; DIAS, V. R. de M.; SOUZA, M. D.; BARBIERI, J. D.; TIEPPO, R. C.; FENNER, W. Rainfall variability in the region of Tangará da Serra, Mato Grosso, using the standardized precipitation index. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 29, n. 9, e291712, 2025. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v29n9e291712>
- VIEIRA, R. N.; NOVAIS, J. W. Z.; PEREIRA, O. A.; DALMAGRO, H. J. Análise da variabilidade climática na cidade de Campo Verde, Mato Grosso. **UNICIÊNCIAS**, v. 28, n. 1, p. 2-5, 2024. <https://doi.org/10.17921/1415-5141.2024v28n1p02-05>

- WANG, L.; LIN, M.; HAN, Z.; HAN, L.; HE, L.; SUN, W. Simulating the effects of drought stress timing and the amount of irrigation on cotton yield using the CSM-CROPGRO-Cotton model. **Agronomy**, v. 14, n. 1, e14, 2024a. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010014>
- WANG, R.; JI, S.; ZHANG, P.; MENG, Y.; WANG, Y.; CHEN, B. L.; ZHOU, Z. Drought effects on cotton yield and fiber quality on different fruiting branches. **Crop Science**, v. 56, n. 3, p. 1265-1276, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.crosc.2015.08.047>
- WANG, Y.; TIAN, D.; XIAO, J.; LI, X.; NIU, S. Increasing drought sensitivity of plant photosynthetic phenology and Physiology. **Ecological Indicators**, v. 166, e112469, 2024b. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112469>
- WORKU, M. A. Spatiotemporal analysis of drought severity using SPI and SPEI: case study of semi-arid Borana area, southern Ethiopia. **Frontiers in Environmental Science**, v. 12, e1337190, 2024. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1337190>
- WU, H.; SVOBODA, M. D.; HAYES, M. J.; WILHITE, D. A.; WEN, F. Appropriate application of the Standardized Precipitation Index in arid locations and dry seasons. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 1, p. 65-79, 2007. <https://doi.org/10.1002/joc.1371>
- ZAFAR, S.; AFZAL, H.; IJAZ, A.; MAHMOOD, A.; AYUB, A.; NAYAB, A.; HUSSAIN, S.; UL-HUSSAN, M.; SABIR, M. A.; ZULFIQAR, U.; ZULFIQAR, F.; MOOSA, A. Cotton and drought stress: An updated overview for improving stress tolerance. **South African Journal of Botany**, v. 161, p. 258-268, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.08.029>
- ZHANGJIN; SOOTHAR, R. K.; SHAR, S. U.; ALHARTHI, B.; SHAIKH, I. A.; LAGHARI, M.; SUTHAR, J. D.; SAMOON, A.; JAMALI, N. A.; FIAZ, S.; SOOMRO, A. S.; SHAH, T. A.; RAM, B. K. Responses of cotton yield and water productivity to irrigation management: assessment of economic costs, interactive effects of deficit irrigation water and soil types. **Discover Life**, v. 55, e01, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11084-024-09677-y>
- 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>

Agradecimentos: Ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola (PPGASP) - Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT) Campus de Tangará da Serra. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado. Agradecemos também a equipe do Centro Tecnológico de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto (CETEGEO) por todo auxílio e incentivo.

Contribuições dos autores: J.A.D.; L.T.S.: Conceitualização, metodologia, investigação ou coleta de dados, análise estatística, redação (original); R.D.; R.C.T.: Concepção, administração ou supervisão e redação (revisão e edição); M.D.S.; J.D.B.: Metodologia, análise estatística, redação (revisão e edição); M.D.S.: Investigação ou coleta de dados.

Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por meio da bolsa de mestrado para os primeiros e terceiros autores.

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

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



Copyright: © 2026 by the authors. This article is an Open Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons **Attribution-NonCommercial (CC BY-NC)** license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).