

Avaliação da relação entre índices climáticos para o monitoramento da seca na Bacia do Rio Paracatu

Pâmella Ferreira da Silva⁽¹⁾⁽⁴⁾, Ricardo Guimarães Andrade⁽²⁾, Celso Bandeira de Melo Ribeiro⁽³⁾ e Marcos Cicarini Hott⁽²⁾

⁽¹⁾Bolsista (Pibic/CNPq), Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG. ⁽²⁾Pesquisador, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG. ⁽³⁾Professor, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG. ⁽⁴⁾E-mail: pamellaferreira34@gmail.com.

Resumo — Este estudo avaliou a relação entre índices climáticos e a resposta da vegetação na Bacia do Rio Paracatu, com foco na identificação de padrões de seca e seus impactos sobre agricultura e pecuária. Foram utilizados dados de precipitação (CHIRPS) e evapotranspiração potencial (TerraClimate) para o cálculo dos índices SPI e SPEI em escalas de 3, 6, 9 e 12 meses, e o NDVI (MODIS e GIMMS) para monitoramento da cobertura vegetal entre 2003 e 2023. As análises, realizadas no Google Earth Engine e RStudio, incluíram o teste de Lag para determinar o tempo de resposta da vegetação a eventos de seca. Os resultados indicaram que o SPI na escala de seis meses apresentou a melhor correlação com o NDVI ($r = 0,89$; Lag = 2), sendo o mais indicado para o monitoramento. Esses achados permitem aprimorar o planejamento agrícola e o manejo pecuário, contribuindo para reduzir perdas produtivas e fortalecer a resiliência ante a variabilidade climática.

Termos para indexação: SPI, SPEI, NDVI, cerrado.

Assessment of the relationship between climate indices for drought monitoring in the Paracatu River Basin

Abstract — This study evaluated the relationship between climate indices and vegetation response in the Paracatu River Basin, focusing on identifying drought patterns and their impacts on agriculture and livestock. Precipitation (CHIRPS) and potential evapotranspiration (TerraClimate) data were used to calculate the SPI and SPEI indices on 3-, 6-, 9-, and 12-month scales, and NDVI (MODIS and GIMMS) was used to monitor vegetation cover between 2003 and 2023. The analyses, performed in Google Earth Engine and RStudio, included a Lag test to determine the response time of vegetation to drought events. The results indicated that the 6-month SPI had the best correlation with NDVI ($r = 0.89$; Lag = 2), making it the most suitable for monitoring. These findings allow for improved agricultural planning and livestock management, contributing to reduced production losses and strengthened resilience to climate variability.

Index terms: SPI, SPEI, NDVI, cerrado.

Introdução

Estudos realizados em regiões agrícolas da Europa e dos Estados Unidos mostram que índices climáticos, como o SPI e o SPEI, são eficazes para monitorar a intensidade e a duração de eventos de seca, permitindo compreender melhor os impactos sobre a vegetação e a produção agropecuária (McKey et al., 2012). Ferreira et al. (2019) destacam que pastagens e áreas agrícolas não irrigadas são particularmente sensíveis a essas variações, apresentando correlações significativas entre o vigor da vegetação, medido pelo NDVI, e os índices de déficit hídrico. A Bacia do Rio Paracatu, localizada no Cerrado, é de grande importância para a produção de grãos, café, leite e carne no Brasil. Contudo, enfrenta crescentes conflitos pelo uso da água, os quais se intensificam durante estiagens

prolongadas, quando índices climáticos apontam déficits hídricos persistentes. Pesquisas indicam que o SPEI, por considerar a evapotranspiração potencial, apresenta maior sensibilidade a condições de estresse hídrico do que o SPI, que leva em conta apenas a precipitação (Stagge et al., 2017). Estudos também mostram que há divergências entre SPI e SPEI na detecção de secas, reforçando a importância de análises em múltiplas escalas temporais para avaliar a resposta da vegetação (Baronetti et al., 2024). Nesse contexto, objetivou-se avaliar a relação entre índices climáticos (SPI e SPEI) e o vigor da vegetação (NDVI) na Bacia do Rio Paracatu, com foco na identificação de padrões de seca e seus impactos sobre agricultura e pecuária, subsidiando estratégias de gestão hídrica e mitigação de perdas produtivas.

As informações geradas no presente estudo vão ao encontro dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) contidos na Agenda 2030, proposta pela Organização das Nações Unidas, da qual o Brasil é signatário, sobretudo nos seguintes objetivos específicos: ODS 6 - Água limpa e saneamento: Garantir disponibilidade e manejo sustentável da água e saneamento para todos; 12 - Consumo Responsável: Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis; 13 - Combate às Mudanças Climáticas: Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos (Nações Unidas, 2025).

Material e métodos

A área de estudo foi delimitada a partir de dados geoespaciais da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2025) e utilizada como máscara para as análises. Dados de precipitação (CHIRPS) e evapotranspiração potencial (TerraClimate) permitiram calcular os índices SPI e SPEI em escalas de 3 a 12 meses, associadas a períodos críticos dos ciclos produtivos. A cobertura vegetal foi analisada por meio do NDVI (MODIS e GIMMS) entre 2003 e 2023. Os índices climáticos foram calculados a partir de dados de precipitação e evapotranspiração potencial (ETp). A precipitação mensal foi obtida do conjunto CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), com resolução espacial de $0,05^\circ$ (~5 km). A ETp foi extraída do conjunto TerraClimate, com resolução de $0,0417^\circ$ (~4 km). A cobertura vegetal foi monitorada pelo NDVI, obtido das séries MODIS (1 km, 2003-2023) e GIMMS NDVI3g (~8 km). Os índices SPI (Standardized Precipitation Index), SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) e NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) foram calculados em escalas de 3, 6, 9 e 12 meses, de forma a capturar diferentes respostas hidrológicas e fenológicas aos déficits hídricos. Os cálculos seguiram as metodologias originais de McKee et al. (1993) e Vicente-Serrano et al. (2010), com padronização estatística para permitir comparabilidade temporal e espacial. A relação entre variáveis climáticas e resposta da vegetação foi avaliada por meio de correlação cruzada com teste de Lag, permitindo determinar o deslocamento temporal ótimo entre eventos de seca e alterações no NDVI. A significância estatística foi testada ao nível de 5% ($p < 0,05$). Os dados foram processados no Google Earth Engine (GEE) e RStudio, gerando séries temporais. Os índices obtidos foram espacialmente analisados e correlacionados, considerando padrões de seca e estresse hídrico sobre agricultura e pecuária.

Resultados e discussão

A análise das séries temporais revelou variações significativas entre os índices SPI, SPEI e o NDVI para a bacia do rio Paracatu, considerando as escalas de 3, 6, 9 e 12 meses (Figura 1). Em escala de três meses, o SPI apresentou forte correlação negativa com o NDVI ($r = -0,88$; Lag = -4) (Tabela 1), indicando que períodos de déficit hídrico tendem a impactar rapidamente a vegetação, com resposta negativa em até quatro meses. O SPEI, na mesma

escala, mostrou correlação positiva moderada ($r = 0,44$; $\text{Lag} = -1$), sugerindo que, apesar da inclusão da evapotranspiração potencial, sua sensibilidade ao estresse hídrico de curto prazo foi menor que a do SPI. Na escala de 6 meses, observou-se a maior correlação positiva entre os índices, com o SPI registrando $r = 0,89$ ($\text{Lag} = 2$) (Tabela 1). Esse resultado indica que, para períodos médios, o aumento da disponibilidade hídrica se reflete diretamente no vigor da vegetação, corroborando achados de Vicente-Serrano et al. (2013), que destacam a relevância do SPI em escalas intermediárias para monitorar impactos sobre a cobertura vegetal. O SPEI, por sua vez, apresentou correlação positiva fraca ($r = 0,33$; $\text{Lag} = -5$) (Tabela 1), refletindo maior influência de variáveis climáticas adicionais, como temperatura e evapotranspiração. Na escala de nove meses, tanto o SPI ($r = 0,69$; $\text{Lag} = 2$) quanto o SPEI ($r = -0,22$; $\text{Lag} = -2$), como se vê na Tabela 1, evidenciaram que os efeitos das condições hídricas prolongadas sobre a vegetação são mais persistentes quando capturados pelo SPI. Esse comportamento é consistente com estudos que mostram que, em áreas agrícolas do Cerrado, o SPI tende a apresentar maior estabilidade na relação com índices de vegetação, enquanto o SPEI pode sofrer maior variabilidade devido à inclusão da evapotranspiração (Beguería et al., 2014). Por fim, na escala de 12 meses, as correlações foram baixas para ambos os índices na Tabela 1 (SPI: $r = 0,15$; $\text{Lag} = 3$; SPEI: $r = -0,20$; $\text{Lag} = 7$), sugerindo que, em períodos anuais, a resposta do NDVI pode ser influenciada por outros fatores além da disponibilidade hídrica acumulada, como manejo agrícola, uso do solo e condições fenológicas específicas (Huete et al., 2002). De forma geral, os resultados indicam que a escala de seis meses para o SPI apresentou a melhor associação com o NDVI na bacia do rio Paracatu, sendo a mais indicada para o monitoramento de impactos da seca sobre áreas agrícolas e de pastagens. Além disso, a aplicação do teste de Lag permitiu identificar defasagens temporais relevantes, fundamentais para compreender o tempo de resposta da vegetação às condições de estresse hídrico.

Tabela 1. Relação entre índices climáticos e resposta da vegetação com base no teste de Lag na Bacia do Rio Paracatu.

NDVI Escala	Índice	Escala (meses)	Lag ótimo (meses)	Correlação
NDVI13	SPI	3	- 4	- 0.884
NDVI13	SPEI	3	- 1	0.442
NDVI16	SPI	6	2	0.894
NDVI16	SPEI	6	- 5	0.329
NDVI19	SPI	9	2	0.696
NDVI19	SPEI	9	- 2	- 0.226
NDVI12	SPI	12	3	0.15
NDVI12	SPEI	12	7	- 0.206

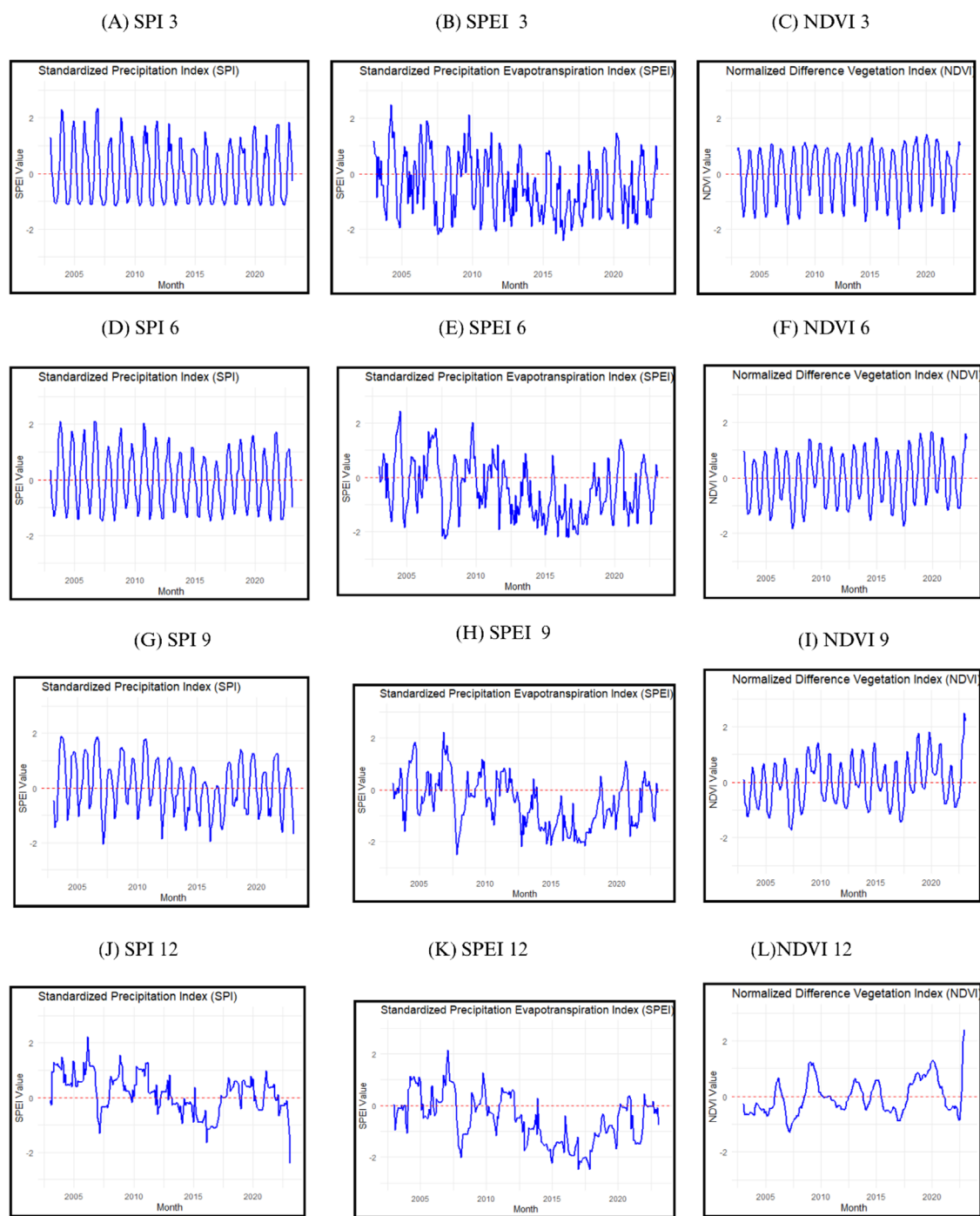


Figura 1. Relação entre índices climáticos e resposta da vegetação com base no teste de Lag na Bacia do Rio Paracatu.

Conclusões

O SPI em escala de seis meses foi o de melhor correlação com o NDVI, sendo o mais indicado para monitorar a seca na bacia do rio Paracatu. A análise de Lag permitiu estimar o tempo de resposta da vegetação ao déficit hídrico, subsidiando ajustes no calendário agrícola, otimização da irrigação e manejo preventivo de pastagens. A integração de índices climáticos e de vegetação mostrou-se eficaz para reduzir perdas produtivas e aumentar a resiliência agropecuária frente a variabilidade climática.

Agradecimentos

Ao apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Brasil, pela concessão de bolsa no programa Pibic e à Embrapa Gado de Leite pela oportunidade de treinamento.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Base hidrográfica Ottocodificada**: versão 2025. Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://metadados.ana.gov.br>. Acesso em: 31 jul. 2025.

BARONETTI, A.; MENICHINI, M.; PROVENZALE, A. Vegetation response to droughts: the case of northern Italy. **International Journal of Climatology**, v. 44, n. 2, p. 501-520, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.8340>.

BEGUERÍA, S.; VICENTE-SERRANO, S. M.; REIG, F.; LATORRE, B. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 10, p. 3001-3023, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.3887>.

FERREIRA, J.; PEREZ, R.; SANCHEZ, N.; HERRERA, A.; TORRES, J. A high-resolution spatial assessment of drought variability impacts on vegetation activity in Spain. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 19, n. 6, p. 1189-1209, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1189-2019>.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1/2, p. 195-213, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2).

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8., 1993, Anaheim. **Proceedings [...]**. Washington: American Meteorological Society, 1993. p. 179-184.

MCKEE, T. B.; PIAO, S.; FRANK, D.; DAI, A.; SNYDER, P. K. Response of vegetation to drought time scales across global land biomes. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 31, p. 11964-11969, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1207068110>.

NAÇÕES UNIDAS. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 13 maio 2025.

STAGGE, J. H.; KINGSTON, D. G.; TALLAKSEN, L. M.; HANNAH, D. M. Observed drought indices show increasing divergence across Europe. **Scientific Reports**, v. 7, article 14045, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14283-2>.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. **Journal of Climate**, v. 23, n. 7, p. 1696-1718, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>.

VICENTE-SERRANO, S. M.; GOUVEIA, C.; CAMARERO, J. J.; SANCHEZ-LOURENZO, A. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 1, p. 52-57, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1207068110>.