

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS – *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Miguel Elias de Souza Santos

**ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS CRUZADAS DO NDVI E PRECIPITAÇÃO NA
AVALIAÇÃO DA MEMÓRIA HÍDRICA E PRODUTIVIDADE EM ÁREAS
TERRACEADAS**

São João Evangelista

2026

MIGUEL ELIAS DE SOUZA SANTOS

**ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS CRUZADAS DO NDVI E PRECIPITAÇÃO NA
AVALIAÇÃO DA MEMÓRIA HÍDRICA E PRODUTIVIDADE EM ÁREAS
TERRACEADAS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Florestal do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Florestal.
Orientador: Dr. Jonathan da Rocha Miranda

São João Evangelista

2026

S237a Santos, Miguel Elias de Souza.
Análise de séries temporais cruzadas (NDVI e CHIRPS) na
avaliação da memória hídrica e produtividade em áreas terraceadas/
Miguel Elias de Souza Santos – 2026.
33f.: il.

Orientador: Dr. Jonathan da Rocha Miranda.
Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Engenharia
Florestal) – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* São João
Evangelista, 2026.

1. Conservação do solo e água. 2. Sensoriamento remoto. 3.
Dinâmica temporal. 4. Memória hídrica. 5. Resiliência ecossistêmica.
I. Santos, Miguel Elias de Souza. II. Instituto Federal de Minas Gerais
Campus SJE. III. Título.

CDD 631.4

Catálogo: Esther Soares Cunha - CRB-6/4333


Miguel Elias de Souza Santos

**ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS CRUZADAS DO NDVI E PRECIPITAÇÃO NA
AVALIAÇÃO DA MEMÓRIA HÍDRICA E PRODUTIVIDADE EM ÁREAS
TERRACEADAS**


Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Florestal, do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Florestal.

Aprovado em 10/02/2026


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **JONATHAN DA ROCHA MIRANDA**
Data: 04/03/2026 09:25:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Jonathan da Rocha Miranda (Orientador)
IFMG–*Campus* São João Evangelista

Documento assinado digitalmente
 **MADERSON DIEGO ROCHA DE MOURA**
Data: 28/02/2026 13:42:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Esp. Máderson Diego Rocha de Moura
IFMG–*Campus* São João Evangelista

Documento assinado digitalmente
 **LUCAS BARROS SOUZA**
Data: 28/02/2026 13:35:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Esp. Lucas Barros Souza
IFMG –*Campus* São João Evangelista

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho, primeiramente, à minha família, base fundamental de toda a minha trajetória. Agradeço imensamente ao meu pai, Cicero Pereira dos Santos, e à minha mãe, Gessi Souza da Silva Santos, pelo amor incondicional e por serem o alicerce que me permitiu sonhar e realizar. À minha companheira, Thais de Meneses Viana, agradeço por todo o apoio, pela paciência e pela força constante que me deu em cada desafio para que eu pudesse chegar até aqui.

Expresso minha profunda gratidão ao meu orientador, Jonathan da Rocha Miranda, pela confiança depositada em mim, pelo apoio técnico e pelos ensinamentos valiosos que guiaram o desenvolvimento deste estudo. Estendo esse agradecimento a todos os professores que fizeram parte da minha formação, compartilhando conhecimentos essenciais para o meu crescimento profissional e pessoal. Por fim, agradeço à equipe profissional do SAAE Guanhães (Serviço Autônomo de Água e Esgoto), cuja colaboração e suporte técnico foram fundamentais para a viabilização e o sucesso deste projeto.

RESUMO

A crescente instabilidade climática e o déficit hídrico prolongado têm comprometido o ciclo hidrológico e a resiliência de bacias de captação, culminando em crises severas de abastecimento urbano. O presente estudo objetivou avaliar o impacto eco-hidrológico da implementação de sistemas de terraceamento em uma área estratégica de recarga na microbacia do Alto Graipu, localizada entre os municípios de Guanhães e Sabinópolis (MG). Para isso, empregou-se a análise de séries temporais de precipitação (produto CHIRPS) e do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI, sensor MODIS) correspondentes ao período de 2001 a 2025. O processamento foi conduzido via *Google Earth Engine*, aplicando-se o algoritmo de Savitzky-Golay para a mitigação de ruídos atmosféricos. A produtividade primária líquida da pastagem (*Brachiaria*) foi quantificada por meio da Área Abaixo da Curva (AUC), e as tendências eco-hidrológicas foram avaliadas pelo teste não paramétrico de Mann-Kendall e pela análise de defasagem temporal (*time-lag*). Os resultados evidenciaram que as práticas conservacionistas instaladas a partir de 2013 reduziram sistematicamente os episódios de baixo vigor vegetativo ($NDVI < 0,6$) durante os períodos de estiagem. Observou-se um incremento significativo na AUC e a ampliação da "memória hídrica" do ecossistema para até 60 dias (*Lags 1 e 2*), indicando que os terraços atuaram como reservatórios subsuperficiais de liberação lenta. Conclui-se que a modificação microtopográfica otimizou a taxa de infiltração, elevou a pastagem a um novo estado de equilíbrio produtivo e mitigou a vulnerabilidade do sistema às flutuações climáticas, alicerçando a segurança hídrica necessária para o abastecimento público municipal.

Palavras-chave: Conservação do solo e água. Sensoriamento remoto. Dinâmica temporal. Memória hídrica. Resiliência ecossistêmica.

ABSTRACT

Increasing climate instability and prolonged water deficits have compromised the hydrological cycle and the resilience of catchment basins, leading to severe urban supply crises. This study aimed to evaluate the eco-hydrological impact of implementing terracing systems in a strategic recharge area within the Alto Graipu micro-basin, located between the municipalities of Guanhães and Sabinópolis (MG). To achieve this, time-series analyses of precipitation (CHIRPS product) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI, MODIS sensor) corresponding to the period from 2001 to 2025 were employed. Processing was conducted via Google Earth Engine, applying the Savitzky-Golay algorithm for the mitigation of atmospheric noise. The net primary productivity of the pasture (*Brachiaria*) was quantified using the Area Under the Curve (AUC), and eco-hydrological trends were evaluated through the non-parametric Mann-Kendall test and time-lag analysis. The results showed that conservationist practices installed from 2013 onwards systematically reduced episodes of low vegetative vigor ($NDVI < 0.6$) during drought periods. A significant increase in AUC and an expansion of the ecosystem's "hydrological memory" for up to 60 days (Lags 1 and 2) were observed, indicating that the terraces acted as slow-release subsurface reservoirs. It is concluded that the micro-topographical modification optimized the infiltration rate, raised the pasture to a new state of productive equilibrium, and mitigated the system's vulnerability to climate fluctuations, strengthening the water security necessary for the municipal public supply.

Keywords: Soil and water conservation. Remote sensing. Temporal dynamics. Hydrological memory. Ecosystem resilience.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Localização da área no qual foi implementado o terraço em 2023	12
Figura 2- Precipitação total anual e media climática para o período de 2001 a 2025 para o município de Guanhães MG	19
Figura 3- Heatmap da serie temporal do NDVI MOD13Q1 no período de 2001 a 2025	20
Figura 4- Frequência de registro do NDVI inferiores a 0,6 para o período de 2001 a 2025	21
Figura 5- Boxplot da variação do NDVI antes e após o terraceamento comparando o período seco e chuvoso	23
Figura 6- Boxplot da AUC antes e após o terraceamento comparando o período seco e chuvoso	24
Figura 7- Serie temporal do NDVI e Precipitação em análise de tendência de Tau Kendall para o período de 2001 a 2025.....	25
Figura 8- Dispersão do NDVI em função da precipitação em diferentes Lags antes e após a instalação dos terraços	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resultados descritivos da correlação de Tau Kendall para precipitação e NDVI ao longo dos anos de 2001 a 2025.....	26
Tabela 2- Correlação de Tau Kendall entre o NDVI e a precipitação defasada em diferentes meses no período de 2001 a 2025 antes a após os terraços	28

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. MATERIAL E MÉTODOS	12
2.1 Área de estudo.....	12
2.2 Base de dados	12
2.3 Pré-processamento dos dados de NDVI.....	13
2.4 Análise da frequência de registros de NDVI em limite crítico	14
2.5 Taxa de variação temporal do NDVI.....	15
2.6 Aporte de biomassa e produtividade primária	15
2.7 Análise de Tendência de Mann-Kendall.....	16
2.8 Análise de Correlação entre Precipitação e NDVI	17
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
4. CONCLUSÃO.....	29
REFERÊNCIAS	30

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda antrópica por recursos hídricos, associada à instabilidade climática global, tem exacerbado a vulnerabilidade de diversas bacias hidrográficas, resultando em severas crises de abastecimento. Na literatura, é amplamente documentado que o prolongamento de condições de seca afeta de maneira drástica o ciclo hidrológico, comprometendo a recarga dos sistemas hídricos subterrâneos e superficiais, além de induzir a degradação da cobertura vegetal (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2020; TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2011). Um exemplo emblemático dessa dinâmica ocorre no município de Guanhães, no estado de Minas Gerais. A região, e especificamente a microbacia do Alto Graipu — área de captação estratégica para o sistema de abastecimento local —, enfrentou um déficit hídrico persistente na última década, o qual culminou na declaração de estado de calamidade pública devido ao colapso do fornecimento de água no ano de 2019 (RODRIGUES; MESQUITA; QUEIROZ, 2022; MOURA *et al.*, 2024).

Para mitigar tais impactos e assegurar a segurança hídrica em áreas de cabeceira, a implementação de práticas de conservação de solo e água torna-se imperativa. Dentre as intervenções físicas disponíveis, o terraceamento destaca-se como uma estratégia de engenharia ecológica de alta eficiência. Segundo Arnáez *et al.* (2015), a construção de terraços modifica a microtopografia da encosta, fornecendo superfícies aplanadas que reduzem a velocidade do escoamento superficial e potencializam as taxas de infiltração. Essa modificação estrutural favorece o armazenamento profundo de umidade, promovendo a recarga de aquíferos, o controle de processos erosivos e o aumento da inércia hídrica do agroecossistema frente aos prolongados períodos de estiagem sazonal (WEI *et al.*, 2016; DENG *et al.*, 2021).

Apesar do amplo reconhecimento dos benefícios ecossistêmicos do terraceamento, o monitoramento contínuo e em larga escala de sua eficácia eco-hidrológica constitui um desafio metodológico. Nesse contexto, o sensoriamento remoto, consorciado à análise de séries temporais do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), consolida-se como uma abordagem científica robusta. O NDVI atua como um indicador confiável da produtividade ecológica e da biomassa ativa, refletindo diretamente as condições biofísicas do dossel e sua resposta à disponibilidade hídrica (SELLERS, 1985; BALATA *et al.*, 2022). Adicionalmente, a aplicação de modelos estatísticos de defasagem temporal (*time-lag*) permite quantificar a "memória hídrica" do sistema solo-planta, identificando o tempo necessário para que o aporte pluviométrico seja processado fisiologicamente e convertido em

ganho de fitomassa, um fator essencial para atestar a resiliência de pastagens e coberturas naturais (WU *et al.*, 2015; KONG *et al.*, 2020).

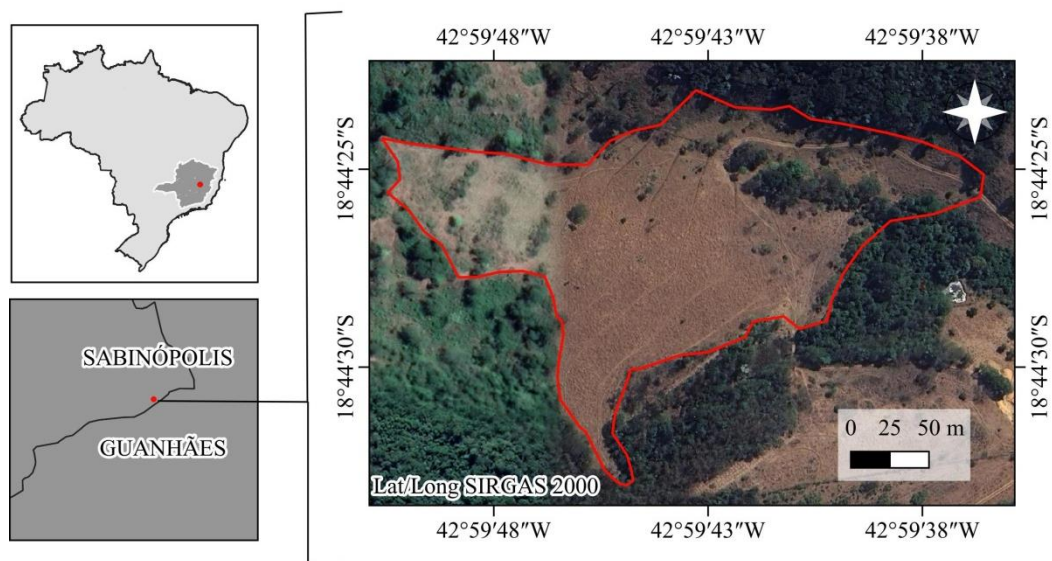
Diante deste cenário, e integrando as ações estruturais de revitalização propostas pelo programa "Água e Vida" do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de Guanhães, este estudo tem como objetivo central avaliar o impacto da implementação de sistemas de terraceamento na dinâmica eco-hidrológica e na resiliência vegetativa de uma propriedade rural localizada na microbacia do Alto Graipu. Por meio da análise de séries temporais de precipitação e NDVI no período de 2001 a 2025, e da aplicação de testes de tendência de Mann-Kendall e correlação de postos sob cenários de defasagem, busca-se diagnosticar se a conservação de umidade promovida pelos terraços resultou na estabilização da oferta de biomassa e na otimização do balanço hídrico local, mitigando a vulnerabilidade da área face aos estresses climáticos documentados na série histórica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo compreende uma propriedade rural situada na região limítrofe entre os municípios de Guanhães e Sabinópolis, no estado de Minas Gerais (Figura 1). A seleção desta localidade fundamentou-se em critérios de prioridade hidrológica para a implementação de sistemas de terraceamento, os quais integram as ações estruturais do programa "Água e Vida", instituído pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de Guanhães. A intervenção técnica desenvolvida na área visa, primordialmente, potencializar a taxa de infiltração de águas pluviais em zonas de contribuição situadas a montante da barragem de captação destinada ao abastecimento público municipal.

Figura 1- Localização da área no qual foi implementado o terraço em 2023



Fonte: elaborado pelo autor, 2026

2.2 Base de dados

Para a estruturação da base de dados, empregaram-se séries temporais de precipitação e de índices de vegetação referentes ao período compreendido entre os anos de 2001 e 2025. Os dados pluviométricos foram extraídos do produto CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*), uma base climática de alta resolução espacial (0,05°, aproximadamente 5 km) que combina estimativas de precipitação derivadas

de imagens de satélite no infravermelho com medições provenientes de estações meteorológicas *in situ* (FUNK *et al.*, 2015).

De maneira complementar, o monitoramento do vigor vegetativo foi conduzido por meio do produto MOD13Q1, obtido pelo sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo do satélite Terra. Este produto fornece valores do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) em uma resolução espacial de 250 metros, agrupados em composições temporais de 16 dias. A fim de mitigar a interferência de nuvens, sombras e os efeitos de aerossóis atmosféricos, as imagens são processadas mediante a técnica de Valor Máximo de Composição (*Maximum Value Composite* - MVC), garantindo a retenção da melhor resposta espectral observada no período de agrupamento (HOLBEN, 1986).

O NDVI consiste em um indicador radiométrico adimensional amplamente empregado na literatura para estimar a produtividade ecológica e quantificar as propriedades biofísicas de coberturas vegetais ativas. Teoricamente, esse índice fundamenta-se no comportamento espectral contrastante dos dosséis: a elevada absorção de radiação na faixa do vermelho (RED), desencadeada pela atividade de pigmentos fotossintéticos, e a acentuada refletância na região do infravermelho próximo (NIR), decorrente do espalhamento da luz pelas estruturas celulares foliares (SELLERS, 1985; TUCKER, 1979). Matematicamente, a métrica é normalizada para flutuar em um intervalo padronizado de -1 a +1, conforme explicitado na Equação 1:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Por fim, a aquisição e o processamento preliminar dessas extensas séries temporais foram sistematizados no ambiente do *Google Earth Engine* (GEE). Trata-se de uma plataforma de computação em nuvem que integra catálogos massivos de dados observacionais da Terra, otimizando o processamento paralelo para a análise geoespacial de larga escala (GORELICK *et al.*, 2017). Tendo em vista a escala localizada da área de estudo, a extração das variáveis foi delimitada por meio de amostragem pontual (análise de pixel a ponto), centrada diretamente sobre a coordenada geográfica de referência da propriedade rural.

2.3 Pré-processamento dos dados de NDVI

A etapa de pré-processamento das séries temporais de NDVI, derivadas do produto MOD13Q1, fundamentou-se na aplicação do algoritmo de suavização de Savitzky-

Golay (SAVITZKY; GOLAY, 1964). Esta técnica é amplamente validada na literatura científica para a mitigação de ruídos espúrios causados por contaminação de nuvens, efeitos de aerossóis atmosféricos e variações de visada, com a vantagem de preservar a integridade das trajetórias fenológicas e as variações dinâmicas da série temporal (CHEN *et al.*, 2004; GONG *et al.*, 2015).

Matematicamente, o filtro opera por meio de um processo de convolução linear ponderada, que baseia-se no ajuste de mínimos quadrados de um polinômio aos dados originais dentro de uma janela de filtragem móvel (SAVITZKY; GOLAY, 1964; CHEN *et al.*, 2004). A dimensão dessa janela é representada por N , onde $N = 2m + 1$ e m equivale à meia-largura da referida janela de suavização (CHEN *et al.*, 2004). Desse modo, o valor suavizado resultante (Y_j) é determinado pela combinação linear dos dados observados originais (Y) e um conjunto de coeficientes de convolução (C_i), projetados para preservar os momentos mais altos dos dados e reduzir o viés, conforme demonstrado na Equação 2 (GONG *et al.*, 2015):

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^m C_i Y_{j+i}}{N} \quad (2)$$

Nesta aplicação, a configuração do filtro contemplou uma janela móvel de cinco pontos ($n=5$), o que implica que, para cada instante de tempo j , o cálculo considerou os dois registros anteriores e os dois registros posteriores ($m=2$).

2.4 Análise da frequência de registros de NDVI em limite crítico

A avaliação do vigor vegetativo sob condições de adversidade ambiental foi conduzida por meio da análise de frequência de episódios de estresse, adotando-se o ano de 2013 como o divisor temporal estratégico relativo à implantação das estruturas de terraceamento na unidade de produção. Para a operacionalização desta análise, estabeleceu-se o limiar crítico de NDVI inferior a 0,60 como indicador *proxy* de estresse fisiológico da cobertura vegetal, fundamentado na premissa de que níveis de refletância abaixo deste patamar denotam redução da atividade fotossintética, perda de turgor celular e comprometimento da biomassa aérea em pastagens tropicais (Equação 3).

$$f(\text{NDVI}_t) = \begin{cases} 1, & \text{se } \text{NDVI}_t < 0,6 \\ 0 & \text{se } \text{NDVI}_t \geq 0,6 \end{cases} \quad (3)$$

A incidência de episódios de estresse em um intervalo de tempo T foi computada pelo somatório das ocorrências discretas na série temporal (Equação 4):

$$E_T = \sum_{t \in T} f(\text{NDVI}_t) \quad (4)$$

2.5 Taxa de variação temporal do NDVI

Para a investigação da dinâmica fenológica e da resiliência da pastagem frente à sazonalidade hídrica, procedeu-se ao cálculo das taxas de variação temporal do vigor vegetativo. Esta métrica consistiu na determinação da diferença algébrica entre intervalos mensais consecutivos da série de NDVI, permitindo quantificar os gradientes de ganho e perda de biomassa ao longo do ciclo fenológico. A análise foi estratificada entre os períodos seco e chuvoso, comparando-se o comportamento do sistema nos intervalos cronológicos pré e pós-implantação dos terraços (2001-2013 e 2014-2025) (Equação 5).

$$\Delta \text{NDVI}_t = \text{NDVI}_t - \text{NDVI}_{t-1} \quad (5)$$

2.6 Aporte de biomassa e produtividade primária

Para a quantificação do aporte total de biomassa e a avaliação da produtividade primária líquida (PPL) acumulada, empregou-se o cálculo da Área Abaixo da Curva (AUC - *Area Under the Curve*) da série temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Esta métrica fundamenta-se na integração dos valores do índice ao longo do tempo, partindo da premissa científica de que a magnitude da área (ou a integral da curva) é diretamente proporcional à produção de matéria seca, à absorção de radiação fotossinteticamente ativa e à produtividade total do ecossistema em um determinado intervalo (JÖNSSON; EKLUNDH, 2004; DAVIS; HOFFMAN; ROBERTS, 2017). De fato, a literatura atesta que o NDVI atua como um substituto amplamente validado para quantificar a produtividade ecológica e o acúmulo de carbono pelas coberturas vegetais (MYNENI *et al.*, 1995; SELLERS, 1985).

O procedimento consistiu na aplicação da regra trapezoidal para a integração numérica, conforme expresso na Equação 6. Esta técnica permitiu mensurar a biomassa acumulada de forma estratificada entre as estações seca e chuvosa, uma segmentação fundamental, visto que a fenologia e o vigor da vegetação respondem fortemente à

sazonalidade climática e à disponibilidade hídrica (FERREIRA; HUETE, 2004; IVITS *et al.*, 2016).

$$AUC = \int_{t_0}^{t_n} NDVI(t)dt \approx \sum_{i=1}^n \left(\frac{NDVI_{i-1} + NDVI_i}{2} \right) \Delta t \quad (6)$$

Em que $NDVI_{i-1} + NDVI_i$, representam os valores do índice de vegetação em intervalos temporais consecutivos, enquanto Δt corresponde ao passo de tempo entre as observações.

Essa estratificação sazonal foi aplicada para comparar a eficiência produtiva do sistema nos períodos pré e pós-implementação dos terraços. O intuito foi diagnosticar se a conservação de umidade no solo promovida pelo terraceamento — prática documentada por sua eficácia na interceptação do escoamento superficial, no aumento das taxas de infiltração e na mitigação do estresse hídrico (WEI *et al.*, 2016; DENG *et al.*, 2021).

2.7 Análise de Tendência de Mann-Kendall

A avaliação das tendências temporais nas séries de precipitação e no vigor vegetativo (NDVI) foi conduzida por meio do teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall (KENDALL, 1975; MANN, 1945). Amplamente recomendado e aplicado em estudos hidrometeorológicos e de monitoramento ecológico, este método destaca-se por sua robustez ao lidar com distribuições de dados não normais e por sua resiliência à presença de valores atípicos (*outliers*) e lacunas nas séries temporais, sendo altamente eficaz na detecção de tendências monotônicas significativas ao longo do tempo (NEETI; EASTMAN, 2011; YUE; WANG, 2004).

A estatística S de Mann-Kendall baseia-se no somatório dos sinais das diferenças entre todos os pares possíveis de dados da série temporal, calculada conforme a Equação 7:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (7),$$

Em que $\text{sgn}(x_j - x_k)$ é a função do sinal (Equação 8):

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1, & \text{se } \theta > 0 \\ 0 & \text{se } \theta = 0 \\ -1 & \text{se } \theta < 0 \end{cases} \quad (8)$$

A partir da estatística S , deriva-se o coeficiente Tau de Kendall (tau), que representa a correlação baseada em postos. Esse coeficiente é normalizado em um intervalo de -1 a +1 e é definido pela razão entre o valor obtido para S e o número total de combinações de pares possíveis na amostra, de acordo com a Equação 9:

$$\tau = \frac{2 * S}{n * (n - 1)} \quad (9)$$

Neste estudo, o teste de Mann-Kendall foi aplicado de forma estratificada, segmentando a análise entre o período pré-implementação (2001–2013) e o período pós-implementação dos terraços (2014–2025). O objetivo central dessa abordagem foi diagnosticar se a estabilidade ou o eventual incremento do NDVI decorre primariamente de uma tendência climática natural (como variações nos volumes de precipitação) ou se reflete uma resposta direta da vegetação à reorganização hidrológica da vertente promovida pelas estruturas conservacionistas. Sob esta métrica, um valor de tau positivo e estatisticamente significativo ($p < 0,05$) indica uma tendência consistente de ganho de biomassa ou de aumento pluviométrico, enquanto valores que se aproximam de zero sugerem a estabilidade temporal do sistema ecossistêmico avaliado.

2.8 Análise de Correlação entre Precipitação e NDVI

Para investigar a dependência estocástica e a dinâmica de resposta da vegetação ao forçante pluviométrico, aplicou-se a análise de correlação de postos de Kendall (tau) sob diferentes cenários de defasagem temporal (*time-lags*). Esta abordagem analítica cruzada é fundamental e amplamente recomendada na literatura para quantificar a "memória hídrica" do sistema solo-planta — isto é, a dependência das anomalias da vegetação em relação à precipitação antecedente. A premissa central desta análise é que o crescimento vegetativo frequentemente não é impulsionado de forma exclusiva pelas chuvas correntes, exibindo um intervalo de tempo necessário para que o aporte de precipitação seja armazenado no perfil do solo, processado fisiologicamente e convertido em incremento de biomassa verde (PAPAGIANNIPOULOU *et al.*, 2017; WU *et al.*, 2015; KONG *et al.*, 2020).

Matematicamente, a correlação foi mensurada entre a série de precipitação defasada (P_{t-L}) e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada contemporâneo ($NDVI_t$), em que L representa o deslocamento temporal expresso em meses, conforme estabelecido na Equação 10:

$$\tau_L = corr(P_{t-L}, NDVI_t) \quad (10)$$

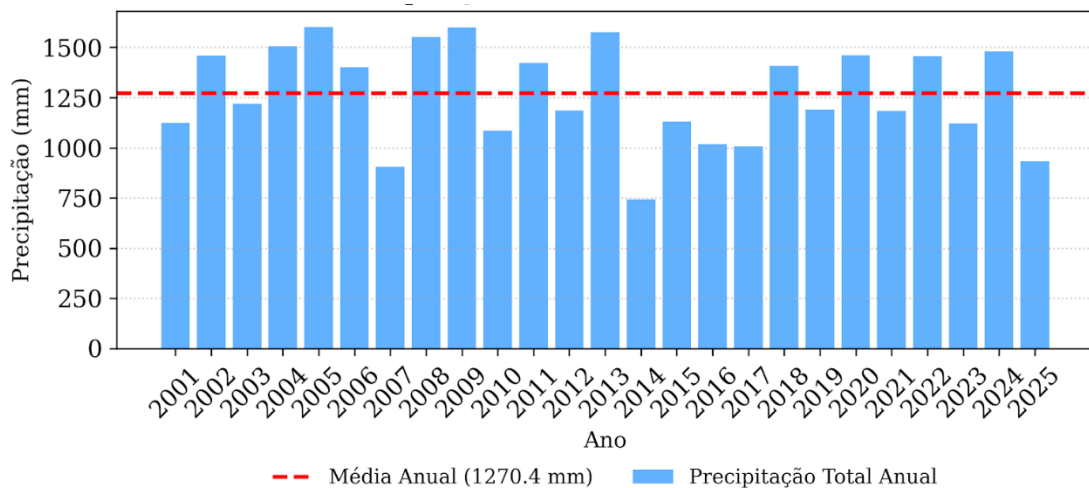
Nesta configuração de modelagem, o *Lag* 0 mensura a resposta imediata da pastagem à chuva do mês corrente. Em contrapartida, os *Lags* 1, 2 e 3 avaliam a influência do regime pluviométrico ocorrido há 30, 60 e 90 dias, respectivamente, sobre o vigor vegetativo atual. Estudos demonstram que intervalos de até três meses são os mais representativos para capturar a resposta defasada máxima da vegetação à disponibilidade hídrica em ecossistemas sazonais (DING *et al.*, 2020; ZHAO *et al.*, 2020; WEN *et al.*, 2019).

Por fim, a análise estatística foi estratificada entre os períodos pré-intervenção (2001–2013) e pós-intervenção (2014–2025). O intuito desta estratificação temporal foi diagnosticar se a implementação dos sistemas de terraceamento — técnica comprovadamente eficaz para otimizar o tempo de retenção do escoamento superficial e maximizar a umidade edáfica (WEI *et al.*, 2016) — alterou a sensibilidade e aumentou a resiliência da pastagem de *Brachiaria* face a eventuais episódios de déficit hídrico.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise do regime pluviométrico no recorte temporal de 2013 a 2017 revela um cenário de déficit hídrico persistente, caracterizado por índices de precipitação sistematicamente abaixo da média climatológica, fator que compromete de forma severa a recarga dos sistemas hídricos locais (Figura 2). O prolongamento de condições de seca agrava a vulnerabilidade dos ecossistemas e reduz de maneira drástica a disponibilidade de água para o atendimento das demandas antrópicas (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2011; VICENTE-SERRANO *et al.*, 2020).

Figura 2- Precipitação total anual e média climática para o período de 2001 a 2025 para o município de Guanhães MG



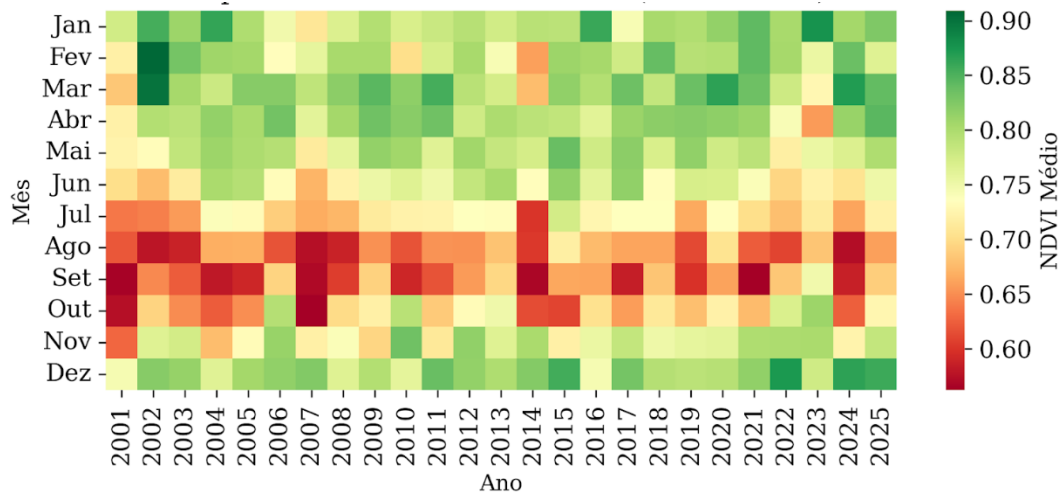
Fonte: elaborado pelo autor, 2026

No contexto da área de estudo, este período de escassez prolongada culminou no colapso do sistema de abastecimento da cidade de Guanhães em 2019 (RODRIGUES; MESQUITA; QUEIROZ, 2022). A gravidade da crise hídrica foi institucionalizada por meio da emissão dos decretos municipais nº 4.526, 4.528, 4.531 e 4.533, promulgados entre os meses de agosto e setembro daquele ano, os quais declararam situação de emergência e calamidade pública no município em decorrência do exaurimento sazonal e temporário dos recursos hídricos (GUANHÃES, 2019a; GUANHÃES, 2019b; GUANHÃES, 2019c). A criticidade da situação demandou medidas urgentes de mitigação e foi ratificada pelo Governo do Estado de Minas Gerais por meio do Decreto NE nº 491, de outubro de 2019, sendo posteriormente reconhecida pela União por meio da Portaria nº 2.544 (MINAS GERAIS, 2019; RODRIGUES; MESQUITA; QUEIROZ, 2022). Esse encadeamento de ações legais

evidencia a complexidade do fenômeno e a imperiosa necessidade de uma gestão articulada entre as diferentes esferas governamentais para o enfrentamento da escassez.

A análise da dinâmica temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), observada por meio do mapa de calor, indica uma alteração expressiva nos padrões de vigor vegetativo da área de estudo após o ano de 2013 (Figura 3). Nota-se uma tendência de elevação nos valores do índice, com maior evidência nos meses que sucedem o período chuvoso. Historicamente, essa fase de transição climática demarca o início do déficit hídrico e o conseqüente declínio do vigor e da biomassa das pastagens (PEREIRA *et al.*, 2018).

Figura 3-.Heatmap da serie temporal do NDVI MOD13Q1 no período de 2001 a 2025



Fonte: elaborado pelo autor, 2026

Do ponto de vista agrônomo e eco-hidrológico, esse comportamento sugere que a implementação dos sistemas de terraceamento favoreceu a interceptação do escoamento superficial e potencializou a taxa de infiltração da água pluvial. Estudos consolidados atestam que a modificação microtopográfica promovida pelos terraços é altamente eficaz em diminuir a velocidade de escoamento e maximizar a retenção hídrica, elevando a recarga e a reserva de água no perfil do solo (WEI *et al.*, 2016; DENG *et al.*, 2021; ROCKSTRÖM; FALKENMARK, 2015).

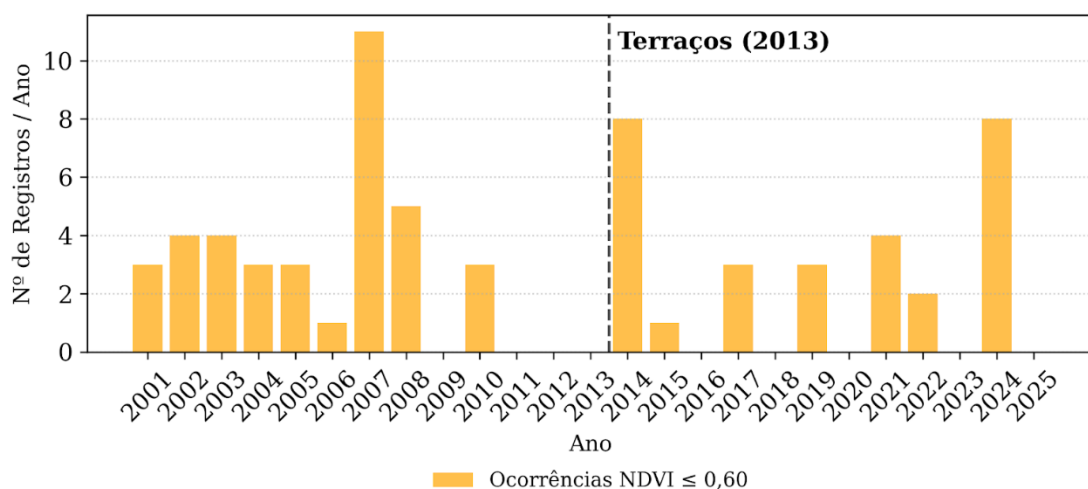
Essa maior disponibilidade de umidade residual atuou, possivelmente, como um mitigador do estresse hídrico, contribuindo para o prolongamento da fenologia ativa da vegetação e o expressivo retardamento da senescência foliar (GONG *et al.*, 2015). A manutenção da umidade edáfica permite que a planta preserve sua atividade metabólica e a

absorção de radiação fotossinteticamente ativa por períodos mais longos, o que se reflete na sustentação da coloração verde da forragem captada pelos valores radiométricos do NDVI (SELLERS, 1985; LI *et al.*, 2013).

Dessa forma, a sustentação de níveis mais altos de NDVI nos meses de transição para a estação seca aponta para uma provável melhoria na estabilidade da oferta de biomassa e na qualidade nutricional da pastagem ao longo do ciclo anual. Esse ganho fenológico reflete uma maior resiliência do ecossistema e uma otimização do sistema de produção frente às variações sazonais de precipitação, beneficiando-se diretamente do aumento da disponibilidade hídrica promovida pelas estruturas de conservação (ZHAO *et al.*, 2020).

A análise temporal da frequência de registros do NDVI inferiores ao limiar de 0,6 corrobora a hipótese de incremento da resiliência hídrica da área de estudo após a implementação dos sistemas de terraceamento, no ano de 2013 (Figura 4). Constatou-se uma redução sistemática na recorrência de episódios caracterizados por baixo vigor vegetativo no período subsequente à intervenção, mesmo em anos nos quais a precipitação acumulada apresentou-se aquém da média climatológica histórica. A literatura científica fundamenta que a resiliência dos ecossistemas — compreendida como a capacidade de manter o estado funcional e absorver os impactos de estresses climáticos — é substancialmente favorecida por práticas conservacionistas que elevam a disponibilidade hídrica e a umidade do solo (YAO *et al.*, 2022; IVITS *et al.*, 2016).

Figura 4- Frequência de registro do NDVI inferiores a 0,6 para o período de 2001 a 2025



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

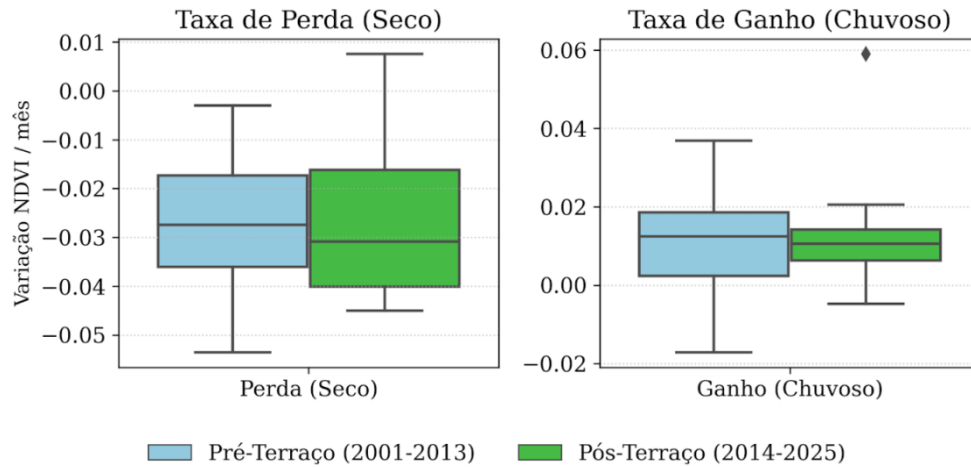
Sob o prisma ecofisiológico, a manutenção do NDVI acima desse patamar crítico durante intervalos de escassez pluvial indica que as referidas estruturas de conservação do

solo atuaram de forma eficaz na mitigação do déficit hídrico. Conforme atestado por Wei *et al.* (2016) e Deng *et al.* (2021), a modificação microtopográfica induzida pelos terraços intercepta o escoamento superficial e potencializa a taxa de infiltração, o que prolonga o armazenamento de umidade no perfil subsuperficial e garante maior reserva hídrica para o sistema radicular. É imperativo ressaltar, contudo, que o vigor vegetativo consiste em uma variável de resposta complexa, uma vez que a dinâmica do NDVI em ecossistemas pastoris também é fortemente modulada pelo manejo forrageiro e pela intensidade da taxa de lotação animal. Esses fatores antrópicos podem induzir a redução severa dos valores radiométricos devido à remoção de biomassa e ao sobre pastejo, independentemente de as condições hídricas estarem adequadas (LI *et al.*, 2013; BALATA *et al.*, 2022).

Não obstante essas variáveis interferentes, a tendência de menor recorrência de anomalias negativas de vigor no período pós-2013 ratifica que, conquanto o manejo da lotação permaneça como um vetor influente, a introdução do terraceamento alicerçou uma base estrutural de estabilidade para o sistema edafoclimático. Tal infraestrutura otimizada permitiu à pastagem reter níveis superiores de biomassa ativa frente às oscilações e adversidades climáticas documentadas na série histórica, atestando uma expressiva adaptação eco-hidrológica e mitigação da vulnerabilidade à seca (ROCKSTRÖM; FALKENMARK, 2015; ZHAO *et al.*, 2022).

A análise das taxas de variação sazonal do vigor vegetativo evidencia transformações estruturais expressivas na dinâmica da pastagem após a implementação das práticas conservacionistas (Figura 5). Durante o período seco, a constatação de uma taxa de declínio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) menos acentuada no cenário pós-intervenção sugere um aumento substancial da inércia hídrica do ecossistema.

Figura 5- Boxplot da variação do NDVI antes e após o terraceamento comparando o período seco e chuvoso



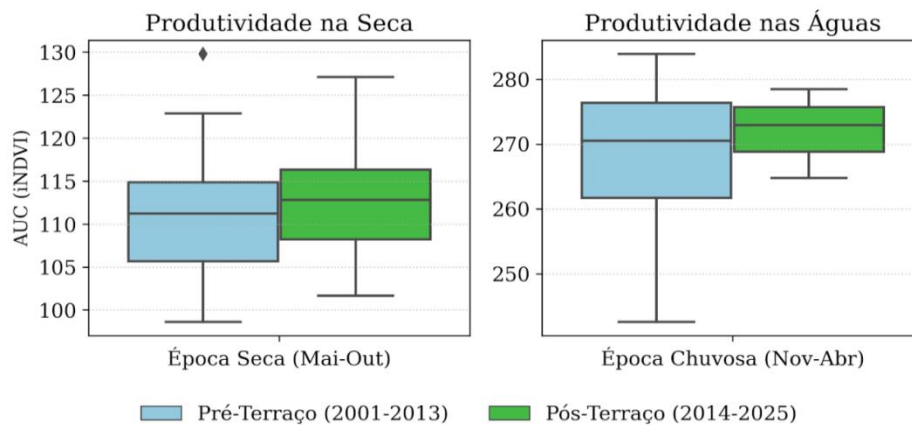
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Esse fenômeno é impulsionado pela modificação microtopográfica promovida pelos terraços, a qual reduz a velocidade do escoamento superficial e maximiza as taxas de infiltração, prolongando o armazenamento de umidade nas camadas subsuperficiais do solo (WEI *et al.*, 2016; DENG *et al.*, 2021). Contudo, o aumento da variabilidade estatística nessas taxas de declínio aponta para a provável interferência de fatores antropogênicos associados ao manejo forrageiro. A literatura consolida que a disponibilidade de uma base forrageira mais vigorosa pode induzir os produtores a incrementarem a taxa de lotação ou a intensidade de pastejo. Tais dinâmicas introduzem oscilações radiométricas na série temporal que refletem diretamente a pressão de consumo animal sobre a biomassa remanescente, sobrepondo-se ao sinal estritamente climático (LI *et al.*, 2013; BALATA *et al.*, 2022).

Inversamente, durante o período chuvoso, registrou-se um ganho de vigor mais expressivo e com menor dispersão estatística na fase posterior a 2013, o que denota uma padronização na resposta ecofisiológica da gramínea à precipitação. Esse incremento na velocidade de recuperação, aliado à maior estabilidade das séries de dados, indica uma otimização na eficiência do uso da água pelo sistema solo-planta (ROCKSTRÖM; FALKENMARK, 2015). A mitigação das perdas hídricas ocasionada pela interceptação do escoamento garante que o aporte pluviométrico seja prontamente retido no perfil edáfico. Consequentemente, a umidade armazenada permite que a planta converta os recursos hídricos disponíveis em tecido vegetal e produtividade primária de forma mais célere e uniforme (ARNÁEZ *et al.*, 2015; WEI *et al.*, 2016).

A integração temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), quantificada por meio do cálculo da Área Abaixo da Curva (AUC), atua como um indicador da produtividade primária líquida (PPL) e da dinâmica de acúmulo de biomassa vegetal (MYNENI *et al.*, 1995; BALATA *et al.*, 2022). No contexto da área de estudo, os resultados evidenciam um incremento substancial nos valores de AUC para a pastagem de *Brachiaria* após a implementação dos terraços, fenômeno constatado de maneira consistente tanto na estação seca quanto na chuvosa (Figura 6).

Figura 6- Boxplot da AUC antes e após o terraceamento comparando o período seco e chuvoso



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

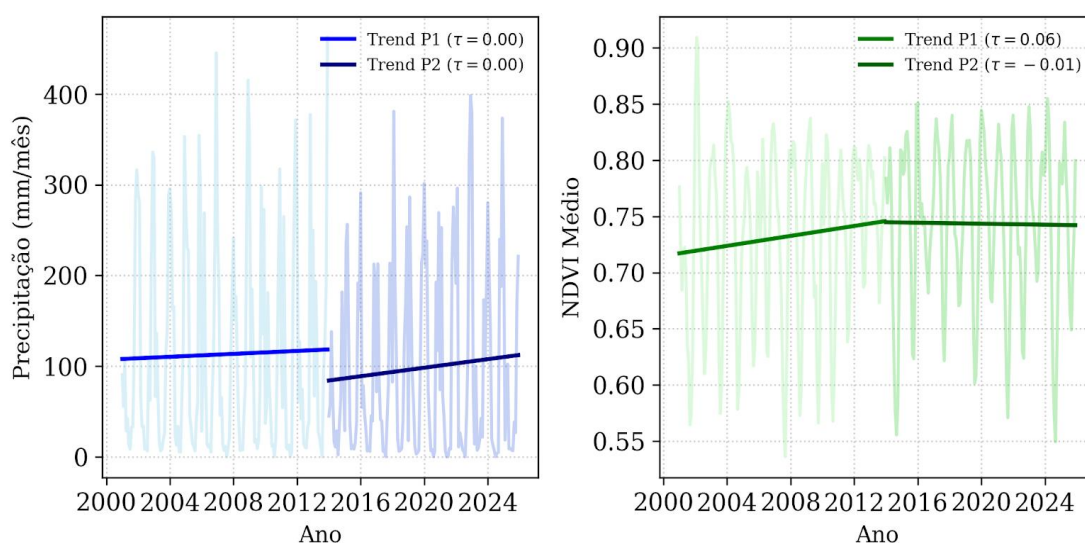
Sob o prisma ecofisiológico, a magnitude ampliada da AUC sugere que a modificação microtopográfica induzida pelo terraceamento otimizou a infiltração e a retenção de umidade no perfil edáfico (WEI *et al.*, 2016; DENG *et al.*, 2021). Essa maior disponibilidade hídrica residual potencializou a eficiência com que a gramínea converte os recursos hídricos disponíveis em tecido vegetal, mitigando as restrições sazonais ao crescimento e favorecendo um maior volume de fitomassa verde disponível (ROCKSTRÖM; FALKENMARK, 2015).

Adicionalmente, a redução observada na variabilidade estatística dos dados de AUC no período pós-intervenção indica uma estabilização expressiva na oferta de forragem ao longo do ciclo anual. Tal comportamento atesta que o sistema agroecossistêmico adquiriu maior resiliência, tornando-se menos dependente das flutuações pluviométricas imediatas e assegurando um patamar de biomassa constante e previsível (IVITS *et al.*, 2016). Essa homeostase produtiva confere implicações estratégicas diretas ao manejo da propriedade: a

manutenção de um vigor vegetativo estável durante a maior parte do ano permite um ajuste mais preciso e seguro da taxa de lotação animal (LI *et al.*, 2013). Consequentemente, otimiza-se o aproveitamento da capacidade de suporte da área e reduz-se drasticamente a necessidade de suplementação alimentar externa decorrente de quebras sazonais na produção forrageira (YANG; GUO; FITZSIMMONS, 2012).

A interpretação conjunta dos coeficientes de correlação de postos de Kendall (tau) e do contexto histórico de precipitação viabiliza uma compreensão aprofundada acerca da resiliência do ecossistema pastoril após a implementação física dos terraços. Embora a análise estatística aponte para uma estabilidade temporal em ambas as variáveis isoladamente, a literatura ecofisiológica corrobora que a elevação da correlação cruzada entre precipitação e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no período pós-intervenção indica que o sistema se tornou mais eficiente e responsivo ao forçante hídrico (Figura 7) (ZHAO *et al.*, 2020; WU *et al.*, 2015).

Figura 7- Serie temporal do NDVI e Precipitação em análise de tendência de Tau Kendall para o período de 2001 a 2025



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Durante o ciclo crítico de déficit hídrico documentado entre 2014 e 2017, a capacidade de retenção hídrica proporcionada pela modificação microtopográfica dos terraços permitiu que a vegetação aproveitasse de forma otimizada e imediata os escassos eventos pluviométricos. Tal dinâmica evitou que o estresse hídrico se traduzisse em degradação

proporcional da biomassa, alicerçando a resistência do sistema (WEI *et al.*, 2016; YAO *et al.*, 2022).

No que tange à série temporal do NDVI, a constatação de patamares radiométricos mais elevados no período pós-intervenção, associada à estabilidade estatística das tendências monotônicas (baixo Tau de Kendall e p-valor superior a 0,05), sugere que a pastagem transitou para um novo estado de equilíbrio ecológico e produtivo (Tabela 1). Do ponto de vista fisiológico e agrônomico, a ausência de uma tendência linear contínua de crescimento (ou declínio) denota que a cultura de *Brachiaria* possivelmente atingiu sua capacidade de suporte máxima ou o "teto" de produção de biomassa sob as condições de manejo local. A literatura de sensoriamento remoto descreve esse fenômeno de estabilização do sinal como a saturação do índice em dosséis foliares densos, indicando o ápice do vigor vegetativo suportado pelo ambiente (HUETE *et al.*, 2002; MYNENI *et al.*, 1995).

Tabela 1- Resultados descritivos da correlação de Tau Kendall para precipitação e NDVI ao longo dos anos de 2001 a 2025

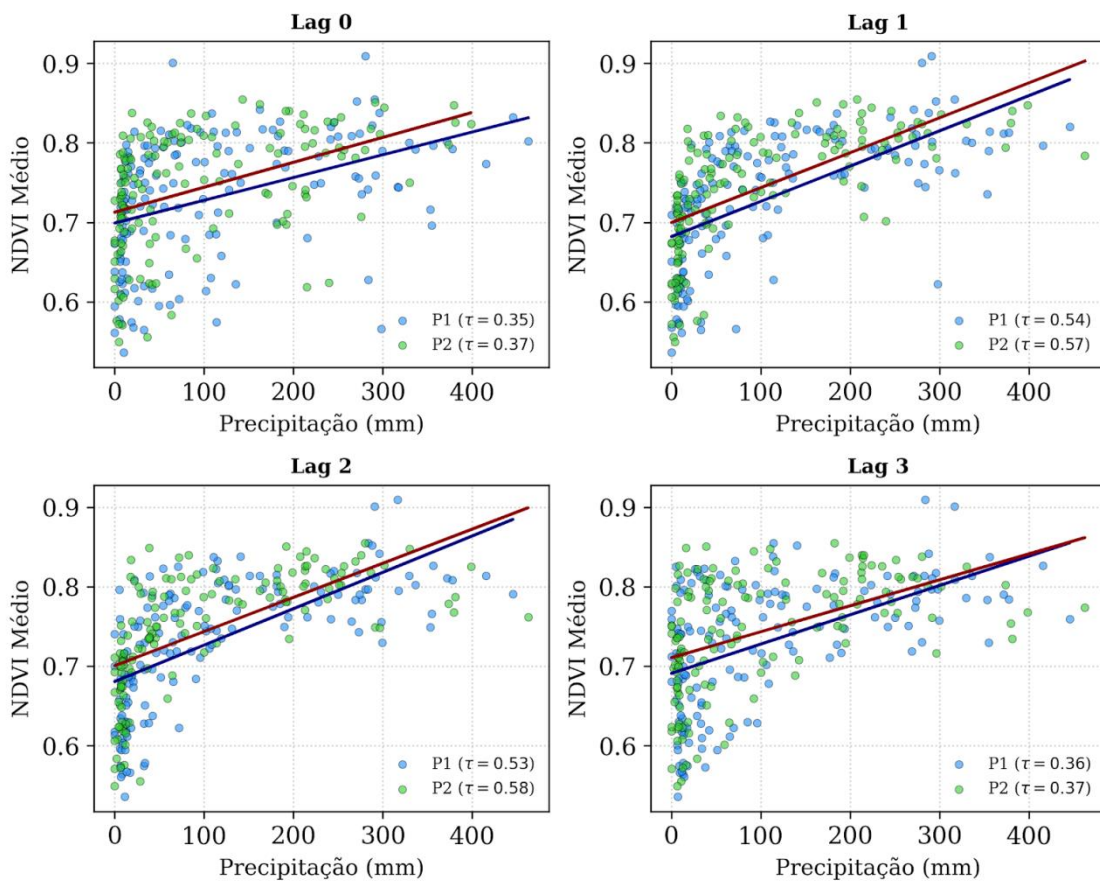
Variável	Período	Coefficiente Tau (τ)	Valor-p
Precipitação	Pré-Terraço (2001-2013)	0,003	0,95
	Pós-Terraço (2014-2025)	0,005	0,93
NDVI	Pré-Terraço (2001-2013)	0,056	0,30
	Pós-Terraço (2014-2025)	-0,012	0,83

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Nesse estágio de "plenitude de NDVI", a cobertura vegetal ocupa o espaço de forma maximizada, de modo que a disponibilidade hídrica básica deixa de configurar como o principal fator restritivo — visto que o déficit de umidade foi mitigado pelas estruturas de conservação do solo (DENG *et al.*, 2021). A partir desse limiar, variáveis intrínsecas ao manejo agrônomico, a exemplo da fertilidade mineral do solo e dos limites fisiológicos e genéticos da espécie, assumem o papel de fatores determinantes da produtividade (LI *et al.*, 2013). Portanto, a estabilidade observada após o ano de 2013 não deve ser equivocadamente interpretada como estagnação produtiva, mas sim como a evidência do êxito da intervenção estrutural. O projeto foi capaz de elevar o agroecossistema a um patamar superior de biomassa e mantê-lo altamente resiliente frente às intensas flutuações climáticas adversas observadas na última década (IVITS *et al.*, 2016; ROCKSTRÖM; FALKENMARK, 2015).

A constatação de que a implementação dos terraços resultou em um incremento nos índices de vigor vegetativo (NDVI) após os eventos pluviométricos ratifica a eficácia dessas estruturas na otimização do balanço hídrico local. A evidência desse ganho, particularmente expressiva nas defasagens temporais de um e dois meses (*Lag 1* e *Lag 2*), sugere que a intervenção microtopográfica alterou a dinâmica de infiltração e armazenamento de água no perfil edáfico, operando como um reservatório subsuperficial de liberação lenta (WEI *et al.*, 2016; DENG *et al.*, 2021). Sob a ótica ecofisiológica, esse comportamento indica que a umidade retida pelas estruturas de conservação permanece biodisponível na zona radicular por períodos prolongados. Conseqüentemente, a pastagem consegue sustentar taxas fotossintéticas elevadas e preservar a integridade de sua biomassa verde mesmo após a cessação imediata das chuvas (SELLERS, 1985; WU *et al.*, 2015).

Figura 8- Dispersão do NDVI em função da precipitação em diferentes Lags antes e após a instalação dos terraços



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A robustez estatística verificada nas análises de correlação cruzada é um fator determinante para validar essa relação de causa e efeito, comprovando que a anomalia positiva do vigor vegetativo não consiste em uma resposta estocástica, mas em uma variável intrinsecamente dependente do histórico de precipitação antecedente acumulada (Tabela 2). A literatura científica define esse fenômeno como a "memória hídrica" do ecossistema, cujo armazenamento no solo atua como um tampão (*buffer*) contra o déficit hídrico (IVITS *et al.*, 2016; PAPAGIANNOPOULOU *et al.*, 2017).

Tabela 2- Correlação de Tau Kendall entre o NDVI e a precipitação defasada em diferentes meses no período de 2001 a 2025 antes a após os terraços

Defasagem (Lag)	(2001-2013)	(2014-2025)	Variação	(p-valor)
Lag 0 (Mês atual)	0,3507	0,3664	4,48%	< 0,0001
Lag 1 (1 mês atrás)	0,5389	0,5722	6,18%	< 0,0001
Lag 2 (2 meses atrás)	0,5349	0,5752	7,53%	< 0,0001
Lag 3 (3 meses atrás)	0,3557	0,3654	2,73%	< 0,0001

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Em sistemas agropecuários de sequeiro, nos quais a irregularidade climática atua como o principal fator limitante, a capacidade de estender essa inércia hídrica por até 60 dias traduz-se em um expressivo ganho estratégico de produção forrageira (BRIEVA *et al.*, 2023). Portanto, os resultados evidenciam que o terraceamento não apenas mitigou as perdas por escoamento superficial, mas converteu o aporte pluviométrico retido em um ativo biológico, elevando o patamar de produtividade primária do sistema e garantindo uma oferta de forragem substancialmente mais resiliente às flutuações sazonais de precipitação (ZHAO *et al.*, 2022; YAO *et al.*, 2022).

4. CONCLUSÃO

A implementação dos sistemas de terraceamento na microbacia do Alto Graipu demonstrou ser uma intervenção estrutural de alta eficácia para a otimização eco-hidrológica e o expressivo incremento da resiliência vegetativa. A análise integrada das séries temporais de precipitação e do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) evidenciou que a referida modificação micro topográfica promoveu a retenção de umidade no perfil edáfico e estendeu a "memória hídrica" do ecossistema por até 60 dias após os eventos pluviométricos. Consequentemente, a pastagem mitigou os impactos adversos do déficit hídrico severo registrado na última década, sustentando maiores taxas de biomassa ativa e uma produtividade primária líquida substancialmente mais elevada e estável ao longo do ciclo anual.

REFERÊNCIAS

- ARNÁEZ, J. et al. Effects of farming terraces on hydrological and geomorphological processes: A review. **Catena**, v. 128, p. 122-134, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.021>. Acesso em: 10 nov. 2025.
- BALATA, D. et al. Using satellite NDVI time-series to monitor grazing effects on vegetation productivity and phenology in heterogeneous Mediterranean forests. **Remote Sensing**, v. 14, n. 10, p. 2322, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14102322>. Acesso em: 12 nov. 2025.
- BRIEVA, C. et al. NDVI response to satellite-estimated antecedent precipitation in dryland pastures. **Remote Sensing**, v. 15, n. 14, p. 3615, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15143615>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- CHEN, J. et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky–Golay filter. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, n. 3-4, p. 332-344, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.03.014>. Acesso em: 18 nov. 2025.
- DAVIS, C. L.; HOFFMAN, M. T.; ROBERTS, W. Long-term trends in vegetation phenology and productivity over Namaqualand using the GIMMS AVHRR NDVI3g data from 1982 to 2011. **South African Journal of Botany**, v. 111, p. 76-85, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.12.015>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- DENG, C. et al. Advantages and disadvantages of terracing: A comprehensive review. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 9, n. 3, p. 344-359, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.03.002>. Acesso em: 22 nov. 2025.
- DING, Y.; LI, Z.; PENG, S. Global analysis of time-lag and-accumulation effects of climate on vegetation growth. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 92, p. 102179, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102179>. Acesso em: 25 nov. 2025.
- FERREIRA, L. G.; HUETE, A. R. Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spectral vegetation indices. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 9, p. 1837-1860, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431160310001595011>. Acesso em: 28 nov. 2025.
- FUNK, C. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations — a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, p. 150066, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>. Acesso em: 30 nov. 2025.
- GONG, Z. et al. MODIS NDVI and vegetation phenology dynamics in the Inner Mongolia grassland. **Solid Earth**, v. 6, p. 1185-1194, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/se-6-1185-2015>. Acesso em: 1 dez. 2025.

- GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>. Acesso em: 3 dez. 2025.
- GUANHÃES. **Decreto nº 4.526, de 09 de agosto de 2019**. Guanhães: Prefeitura Municipal, 2019a. Disponível em: <https://www.guanhaes.mg.gov.br/>. Acesso em: 5 dez. 2025.
- GUANHÃES. **Decreto nº 4.531, de 11 de setembro de 2019**. Guanhães: Prefeitura Municipal, 2019b. Disponível em: <https://www.guanhaes.mg.gov.br/>. Acesso em: 7 dez. 2025.
- GUANHÃES. **Decreto nº 4.533, de 20 de setembro de 2019**. Guanhães: Prefeitura Municipal, 2019c. Disponível em: <https://www.guanhaes.mg.gov.br/>. Acesso em: 9 dez. 2025.
- HOLBEN, B. N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 1417-1434, 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431168608948945>. Acesso em: 11 dez. 2025.
- HUETE, A. et al. 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. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2). Acesso em: 14 dez. 2025.
- IVITS, E. et al. Assessing European ecosystem stability to drought in the vegetation growing season. **Global Ecology and Biogeography**, v. 25, n. 9, p. 1131-1143, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/geb.12466>. Acesso em: 16 dez. 2025.
- JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. TIMESAT—A program for analyzing time-series of satellite sensor data. **Computers & Geosciences**, v. 30, n. 8, p. 833-845, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.05.006>. Acesso em: 18 dez. 2025.
- KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. London: Charles Griffin, 1975. Disponível em: <https://archive.org/details/rankcorrelationm0000kend>. Acesso em: 20 dez. 2025.
- KONG, D. et al. Time lag of vegetation growth on the Loess Plateau in response to climate factors: estimation, distribution, and influence. **Science of The Total Environment**, v. 744, p. 140726, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140726>. Acesso em: 22 dez. 2025.
- LI, Z. et al. Evaluating the potential productivity of community pastures in southern Saskatchewan, Canada using MODIS NDVI time-series data. **Remote Sensing of Environment**, v. 138, p. 232-244, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.06.014>. Acesso em: 26 dez. 2025.
- MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, p. 245-259, 1945. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/1907387>. Acesso em: 28 dez. 2025.
- MINAS GERAIS. **Decreto NE nº 491, de 16 de outubro de 2019**. Belo Horizonte: Diário Executivo, 2019. Disponível em: <http://www.jornalminasgerais.mg.gov.br/>. Acesso em: 30 dez. 2025.

MOURA, M. D. R. et al. Análise das zonas hidrogenéticas na microbacia do Alto Graipu em Minas Gerais. In: **XXVIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica**. São José dos Campos: Univap, 2024. p. 1-4. Disponível em: http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2024/anais/arquivos/RE_0513_0381_01.pdf. Acesso em: 2 jan. 2026.

MYNENI, R. B. et al. The meaning of spectral vegetation indices. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 3, p. 481-486, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/36.387524>. Acesso em: 3 jan. 2026.

NEETI, N.; EASTMAN, J. R. A contextual Mann–Kendall approach for the assessment of trend significance in image time series. **Transactions in GIS**, v. 15, n. 5, p. 599-611, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2011.01280.x>. Acesso em: 4 jan. 2026.

PAPAGIANNOPOULOU, C. et al. Vegetation anomalies caused by antecedent precipitation in most of the world. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 7, p. 074016, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa78ef>. Acesso em: 5 jan. 2026.

PEREIRA, O. J. R. et al. Assessing pasture degradation in the Brazilian Cerrado based on the analysis of MODIS NDVI time-series. **Remote Sensing**, v. 10, n. 11, p. 1761, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs10111761>. Acesso em: 6 jan. 2026.

ROCKSTRÖM, J.; FALKENMARK, M. Agriculture: increase water harvesting in Africa. **Nature**, v. 519, n. 7543, p. 283-285, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/519283a>. Acesso em: 7 jan. 2026.

RODRIGUES, A. L.; MESQUITA, E. P. B.; QUEIROZ, T. M. Balanço hídrico climatológico e estudo da disponibilidade hídrica do reservatório da barragem Santa Cruz para o município de Guanhões/MG-Brasil. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 6, p. e48911629238, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i6.29238>. Acesso em: 8 jan. 2026.

SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical Chemistry**, v. 36, n. 8, p. 1627-1639, 1964. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>. Acesso em: 9 jan. 2026.

SELLERS, P. J. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. **International Journal of Remote Sensing**, v. 6, n. 8, p. 1335-1372, 1985. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431168508948283>. Acesso em: 10 jan. 2026.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0). Acesso em: 12 jan. 2026.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Recursos hídricos no século XXI**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. Disponível em: <https://www.lojaofitexto.com.br/>. Acesso em: 13 jan. 2026.

VICENTE-SERRANO, S. M. et al. A review of environmental droughts: Increased risk under global warming? **Earth-Science Reviews**, v. 201, p. 102953, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102953>. Acesso em: 14 jan. 2026.

WEI, W. et al. Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing. **Earth-Science Reviews**, v. 159, p. 388-403, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.06.007>. Acesso em: 15 jan. 2026.

WEN, Y. et al. Cumulative effects of climatic factors on terrestrial vegetation growth. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 124, n. 4, p. 789-806, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2018JG004754>. Acesso em: 16 jan. 2026.

WU, D. et al. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change. **Global Change Biology**, v. 21, n. 9, p. 3520-3531, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.12995>. Acesso em: 17 jan. 2026.

YANG, X. et al. Assessing light to moderate grazing effects on grassland production using satellite imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 16, p. 5087-5104, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.644594>. Acesso em: 18 jan. 2026.

YAO, Y. et al. Evaluation of ecosystem resilience to drought based on drought intensity and recovery time. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 314, p. 108809, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108809>. Acesso em: 19 jan. 2026.

YUE, S.; WANG, C. The Mann–Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. **Water Resources Management**, v. 18, p. 201-218, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/B:WARM.0000043140.61082.60>. Acesso em: 20 jan. 2026.

ZHAO, J. et al. Time-lagged response of vegetation dynamics to climatic and teleconnection factors. **Catena**, v. 189, p. 104474, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104474>. Acesso em: 20 jan. 2026.

ZHAO, W. et al. Dynamic traceability effects of soil moisture on the precipitation–vegetation association in drylands. **Journal of Hydrology**, v. 615, p. 128645, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128645>. Acesso em: 20 jan. 2026.