

# Vetores de degradação das pastagens no Cerrado norte mineiro – Minas Gerais - BR

## Drivers of degradation of pastures in the Cerrado north of Minas Gerais - BR

Lucas Augusto Pereira da Silva<sup>\*</sup>, João Paulo Sena-Souza<sup>\*\*</sup>, Cristiano Marcelo Pereira de Souza<sup>\*\*\*</sup>, Claudionor Ribeiro da Silva<sup>\*\*\*\*</sup>, Edson Luis Bolfe<sup>\*\*\*\*\*</sup>, Carolina Cabral Chagas-Reis<sup>\*\*\*\*\*</sup>, Marcos Esdras Leite<sup>\*\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO), Universidade Federal de Uberlândia, lucaskaio1605@gmail.com

<sup>\*\*</sup> Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO), Universidade Estadual de Montes Claros, jpsenasouza@gmail.com

<sup>\*\*\*</sup> Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO), Universidade Estadual de Montes Claros, cmppsgeografia@gmail.com

<sup>\*\*\*\*</sup> Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO), Universidade Federal de Uberlândia, crs.educ@gmail.com

<sup>\*\*\*\*\*</sup> Embrapa Agricultura Digital, edson.bolfe@embrapa.br

<sup>\*\*\*\*\*</sup> Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO), Universidade Estadual de Montes Claros, CarolinaCabral36@gmail.com

<sup>\*\*\*\*\*</sup> Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO), Universidade Estadual de Montes Claros, marcosesdrasleite@gmail.com

<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v57i0.89342>

### Resumo

O Cerrado é o bioma brasileiro é uma região estratégica para a pecuária, com alta concentração de pastagens e rebanho bovino. Aproximadamente 30% das pastagens do Cerrado possuem algum grau de degradação, essencialmente em regiões semiáridas. O norte do estado de Minas Gerais retrata bem este contexto. Portanto, a identificação dos vetores de degradação é vital para o planejamento agroambiental. O objetivo desse trabalho foi elaborar um modelo para avaliação os vetores da degradação das pastagens no Cerrado norte mineiro. A estrutura metodológica foi baseada em: I) mapeamento do índice de degradação de pastagens (IDP) por meio de técnicas de sensoriamento remoto, II) montagem de um banco de dados com variáveis preditoras representando os aspectos socioeconômicos, de relevo e climáticos, e III) elaboração de um modelo para avaliação dos vetores da degradação das pastagens com regressão linear múltipla. O mapeamento de IDP mostrou que todos os municípios do Cerrado norte mineiro apresentam algum grau de degradação. 18 municípios (21%) possui pasto moderadamente degradados e 66 (79%) com níveis leves. O modelo elaborado mostrou que a degradação das pastagens no norte de Minas Gerais pode ser explicada por vetores climáticos, especificamente por temperatura do ar, sazonalidade da precipitação e precipitação anual ( $R^2 = 0.50$ , valor-p < 0.001). O manejo das pastagens na região deve considerar esses aspectos ambientais, objetivando uma pecuária mais sustentável no Cerrado norte mineiro.

### Palavras-chave:

Sensoriamento remoto, índice de degradação de pastagens, Savana.

### Abstract

The Brazilian Cerrado Biome is a strategic region for livestock, with a high concentration of pastures and cattle. Approximately ~30% of these pastures have some degree of degradation, especially in semi-arid regions. The northern region of the state of Minas Gerais portrays this context well. Therefore, identifying the degradation vectors is a fundamental step in agro-environmental planning. This study aims to develop a model to evaluate the vectors of degradation of pastures in Cerrado north of Minas Gerais. The methodological structure was based on i) mapping of the pasture degradation index (PDI) using remote sensing techniques, ii) setting up a database with predictive variables representing socioeconomic, relief and climatic aspects, and iii) elaboration of a model to evaluate the vectors of pasture degradation with multiple linear regression. The PDI mapping showed that the pastures in all municipalities present some degree of degradation. Eighteen municipalities (21%) have moderately degraded pastures and 66 municipalities (79%) predominantly have pastures with mild degradation levels. According to the statistical model, the degradation of pastures is explained by climatic vectors, specifically by air temperature, seasonality of precipitation and annual precipitation ( $R^2 = 0.50$ ,  $p$ -value  $< 0.001$ ). The management of pastures in the region must consider these environmental factors, aiming at a more sustainable livestock in the Cerrado of northern Minas Gerais.

**Keywords:**

Remote sensing, degradation index of pastures, Savannah.

## I. INTRODUÇÃO

O Brasil é o segundo maior produtor de rebanho bovino e exportador de carne do mundo (SANTOS et al., 2022), com o bioma Cerrado sendo a principal área de produção, abrangendo aproximadamente 44% (~75% de animais) da produção pecuária do país (SANTOS et al., 2022). O Cerrado é importante estrategicamente para a pecuária brasileira, principalmente em função de suas condições edafoclimáticas favoráveis (PEREIRA et al., 2018). No entanto, a produtividade da pecuária no Cerrado é baixa, principalmente porque é necessário o uso extensivo de terras para manter o rebanho bovino (PARENTE et al., 2019; ZALLES et al., 2021). A expansão das pastagens ocorre de forma desordenada e sem manejo adequado, conduzindo à degradação das pastagens, e o decréscimo de fornecimento de suprimento para o rebanho bovino (SANTOS et al., 2022). Estudos têm indicado que 30% das pastagens desse bioma apresentam algum grau de degradação (AGUIAR et al., 2017; PEREIRA et al., 2018; PARENTE et al., 2019; VELOSO et al., 2020; SILVA et al., 2022).

A degradação dos pastos pode ser ocasionada por fatores naturais, bem como aspectos socioeconômicos e forma de manejo (SANTANA SANTOS; GUIMARÃES, 2017; PEREIRA et al., 2018). A topografia influencia na distribuição das pastagens, em que áreas planas possuem uso mais intenso e maior ocorrência de pastagens degradadas. Áreas com declives acentuados são mais suscetíveis à erosão, fragilizando a

sustentabilidade das pastagens (SANTANA SANTOS; GUIMARÃES FERREIRA, 2017). Adicionalmente, a orientação do relevo impacta a qualidade dos pastos, pois vertentes orientadas para o norte, recebem maiores porções de radiação solar, diminuindo a umidade do solo (SOUZA et al., 2019). Variáveis climáticas, como a precipitação e temperatura, também desempenham papel importante na qualidade das pastagens (SLOAT et al., 2018; VELOSO et al., 2020). Em condições extremas, de altos valores de temperatura e escassez hídrica, isto é, aridez, é esperado que a atividade fotossintética das pastagens decresça, diminuindo de forma abrupta seus níveis de biomassa (PFEIFFER et al., 2019). Além disso, o aspecto socioeconômico, principalmente a pobreza no campo, o que afeta diretamente na capacidade do produtor intensificar os investimentos para o melhoramento das condições das pastagens (PEREIRA et al., 2018).

Embora os principais influenciadores da degradação das pastagens sejam conhecidos, os estudos têm focado em análises isoladas desses vetores (PEREIRA et al., 2018; STANIMIROVA et al., 2019). No entanto, para avaliação da degradação das pastagens é necessário a integração de variáveis, principalmente em contextos ambientais com elevada heterogeneidade físicas e sociais, como o Cerrado brasileiro. A região norte de Minas Gerais é uma das áreas mais heterogêneas do Cerrado, caracterizada por sazonalidade climática distinta, relevo diversificado e transições entre diferentes tipos de vegetação (SILVA, 2016; COSTA, 2021).

Nessas condições de heterogeneidade socioambiental o uso de regressões lineares múltiplas tem sido sugerido (ESPINDOLA et al., 2021; RIGHI et al., 2023). No entanto, poucos estudos utilizaram métodos estatísticos para o compreender os padrões de degradação das pastagens em áreas de Cerrado (PEREIRA et al., 2018). A aplicação de modelagens por meio de regressões lineares múltiplas pode ser essencial para uma agropecuária mais sustentável. Uma vez que fornece um modelo de fácil compreensão para os tomadores de decisões, sobre os efeitos de variáveis preditoras em uma variável dependente. Esse estudo propôs elaborar um modelo de regressão linear múltipla para avaliar quais são os vetores que influenciam a degradação das pastagens no Cerrado norte mineiro.

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de Estudo

As pastagens analisadas estão inseridas no norte do estado de Minas Gerais, entre as coordenadas 14° 32' a 17° 38' de latitude e longitude 45° 37' a 41° 29' (Figura 1c, d). A região possui 89 municípios, dos quais, 84 estão inseridos no limite do Cerrado, bioma predominante na região. As pastagens (sobretudo a *brachiaria*) é o uso da terra com maior expressão territorial do norte de Minas (~23%) (SILVA et al., 2022).

Predomina na região o clima Aw, com transição para o Bsh (SÁ JÚNIOR et al., 2012). As estações são bem definidas, uma úmida (abril – setembro) e outra seca (outubro – março). A precipitação é distribuída irregularmente na região, com amplitude de ~1000 mm/ano. As áreas com baixa precipitação (< 925 mm/ano) predominam extremo norte (Figura 1a, b) enquanto a temperatura do ar apresenta maiores valores nessa porção (24 – 25°C) (Figura 1a, b, FICK; HIJMANS, 2017). Além disso, a área de estudo é uma zona de transição com o bioma Caatinga, sob clima semiárido.

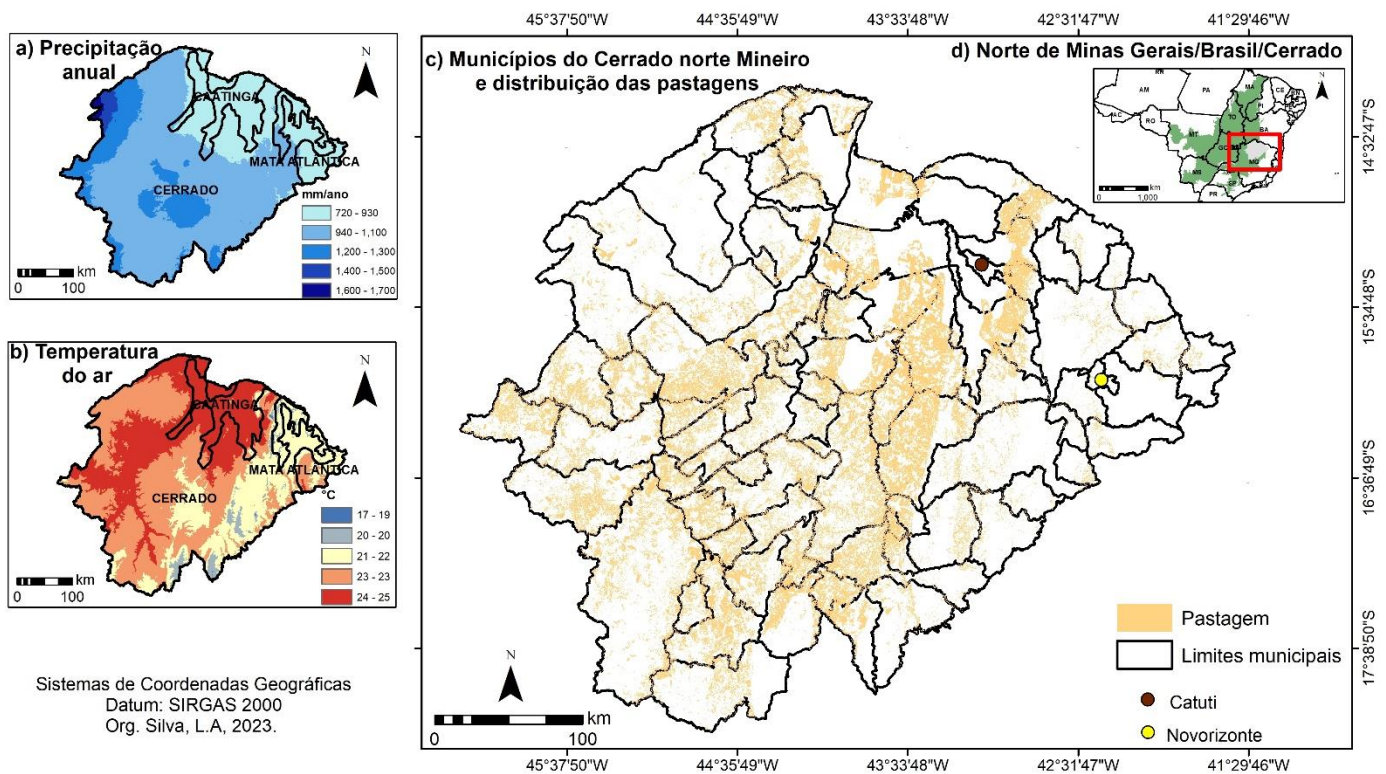


Figura 1 - Localização da área de estudo. A) Precipitação anual (1970 – 2000); B) Temperatura média do ar (1970 – 2000); C) Municípios do Cerrado Norte Mineiro e distribuição das pastagens; D) Localização do norte de Minas Gerais na porção sudeste do Brasil e leste do Cerrado. O ponto vermelho indica o município de Catuti com o maior valor de IDP, enquanto o ponto amarelo mostra Novorizonte, com o menor IDP para o período analisado.

### Base de Dados

A base de dados foi estruturada considerando o limite das pastagens para o Cerrado norte mineiro; dados de NDVI para mapear a degradação dos pastos e conjunto de variáveis preditoras sobre aspectos climáticos, de relevo e socioeconômicos. O limite das pastagens foi desenvolvido pelo Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG) da Universidade Federal de Goiás (UFG) (LAPIG, 2019). O mapeamento define o limite das pastagens brasileiras, a partir de algoritmos de *Machine Learning* na plataforma *Google Earth Engine*. Este produto é o mais detalhado para as pastagens no Brasil e são livremente disponíveis com resolução espacial de 30 metros. O limite usado nesse estudo é referente ao ano de 2019.

O mapeamento da degradação das pastagens foi feito utilizando o produto MOD13Q1, do sensor *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), com passagem a cada 16 dias e resolução espacial de 250 metros (DIDAN, 2015). O MOD13Q1 compreende à capacidade fotossintética da vegetação por meio do Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada (NDVI). Para esta análise, foram utilizadas 23 imagens referente ao ano de 2019, contemplando todos os meses.

Dados de relevo foram elaborados por meio do Modelo Digital de Elevação (MDE) oriundo do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução de 90 metros. A partir do MDE, foram derivados os vetores altitude, declividade e desvio padrão da declividade. Para os vetores climáticos, foram obtidas as variáveis temperatura do ar, precipitação anual e sazonalidade da precipitação, correspondentes a uma normal climatológica de 30 anos (1970 – 2000), com resolução espacial de 1km (FICK; HIJMANS, 2017).

Para os vetores socioeconômicos, utilizou-se o Produto Interno Bruto (PIB) e Índice de Desenvolvimento Humano Municipal Renda (IDHMR). O PIB foi obtido para o ano de 2018 sendo oriundo da pesquisa municipal (SIDRA, 2018), enquanto o IDHMR obteve-se no censo demográfico de 2010 (IBGE, 2010). Todas as preditoras foram extraídas e organizadas para os limites dos municípios do Cerrado norte mineiro.

### **Mapeamento da Degradação das Pastagens**

O mapeamento da degradação das pastagens foi feito considerando 23 imagens de NDVI para o ano de 2019. As imagens foram pré-processadas com remoção dos pixels com valores negativos. Esses pixels indicam presença de sombra e água, portanto não representam a realidade dos pastos.

Subsequentemente, calculou-se as médias mensais, de janeiro a dezembro usando duas imagens por mês. Todas as imagens médias foram compiladas em uma imagem de mediana anual (SANTOS et al., 2022). A Cobertura Vegetal das Pastagens (CVP) foi obtida de acordo com a Equação 1 (OLIVEIRA et al., 2020; SANTOS et al., 2022).

$$CVP = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (1)$$

Onde,  $NDVI_{min}$  é o menor valor de NDVI nas áreas de pastagens, que são destinados às áreas com matriz de solo exposto,  $NDVI_{max}$ , é o maior valor de NDVI, obtidos para áreas com maior teor de biomassa e elevada atividade fotossintética. Em seguida, foram estratificadas quatro classes de degradação das pastagens: Degradação Ausente [CVP >0.6], Degradação Leve [CVP 0.5 a 0.6], Degradação Moderada [CVP 0.5 a 0.4] e Degradação Severa [CVP <0.4].

O intuito do trabalho é analisar a degradação dos pastos a nível municipal. Portanto, calculou-se o Índice de Degradação das Pastagens (IDP) para os municípios do Cerrado norte mineiro, ponderando a área (km<sup>2</sup>) de pastagem das classes obtidas a partir do CVP, pela área total de pastagem no município (Equação 2).

$$IDP = \frac{(A1*P1)+(A2*P2)+(A3*P3)+(A4*P4)}{\text{ÁREA DE PASTAGEM AVALIADA}} \quad (2)$$

Onde A1 é a área da classe com Degradação Ausente, A2, da Degradação Leve, A3, Degradação Moderada e A4 área da classe de Degradação Severa. P1, P2, P3 e P4 são os pesos para cada classe, variando de 1 a 4 (ANDRADE et al., 2013). A obtenção do IDP por município permitiu a submissão dos valores na regressão linear múltipla.

### **Análise Estatística – Seleção dos Vetores de Degradação das Pastagens**

O IDP (variável dependente) juntamente com as variáveis preditoras foram inseridos em uma matriz de regressão, para realização das análises estatísticas. Com intuito de obter um modelo parcimonioso e simples, uma matriz de correlação com o método de Pearson foi aplicada com limiar de 0.75 para remover pares de variáveis com correlação entre si. Após a retirada de variáveis com r acima de 0.75, montou-se um modelo de regressão linear múltipla a partir das preditoras remanescentes. Para avaliar o grau de multicolinearidade do modelo, aplicou-se o fator inflação da variância (FIV). Os valores <5 indicam baixa multicolinearidade (ALIN, 2010), não afetando a interpretabilidade do modelo.

Por fim, um procedimento denominado *stepwise* foi aplicado. A premissa desse processo é que o modelo de regressão seja ajustado considerando todas variáveis preditoras e a partir do teste F com valor-p < 0.05, as variáveis menos importantes (valor-p > 0.05) são removidas do modelo (pacote MASS) (RIPLEY et al., 2013). O ajuste final da modelagem foi realizado com todas as variáveis significantes (valor-p < 0.05) da primeira etapa e escolhido a partir do critério de informação de Akaike (AIC) (AKAIKE, 1974). Com as variáveis mais importantes no modelo final, foi aplicada uma regressão simples em relação ao IDP para identificar o comportamento linear alvo a alvo. Todos os procedimentos estatísticos foram realizados no software R (R core Team, 2022).

### III. RESULTADOS

#### Índice de Degradação de Pastagens – Norte de Minas Gerais

Todos os municípios do Cerrado norte mineiro apresentaram algum grau de degradação das pastagens (Figura 2a). Aproximadamente 21% dos municípios mostraram degradação moderada, enquanto ~79% tiveram pastagens levemente degradadas. O extremo norte da região possui os municípios com maiores IDP, com Catuti tendo os maiores valores (2,97) (Figura 2). Essa região é marcada pela a zona de transição Cerrado/Caatinga, área sob influência de clima semiárido (SILVA et al., 2021). Essa faixa possui altas temperaturas (acima de 23 °C), baixa incidência pluviométrica (menor que 908 mm/ano) e maiores variações sazonais na precipitação (Figura 2).

O município com pastos menos degradados foi Novorizonte (1,07), na porção leste da região (Figuras 1 e 2). Essa faixa da região é caracterizada pelos menores valores de temperatura (20 °C) e maior disponibilidade hídrica, com precipitação maior que 1000 mm/ano, isto é, ~200 mm/ano a mais que a zona de transição Cerrado/Caatinga.

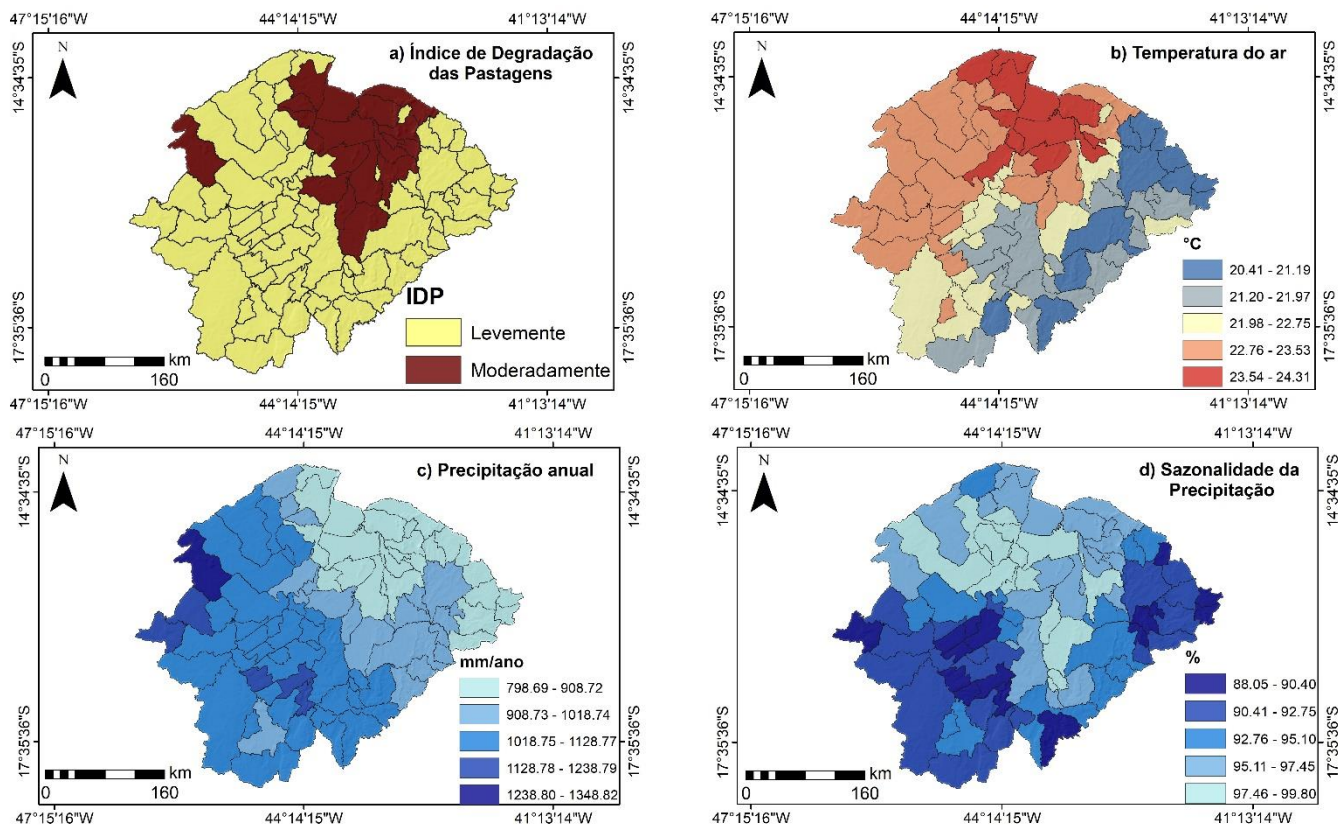


Figura 2 – Distribuição espacial do a) Índice de Degradação das Pastagens (IDP) para o Cerrado Norte Mineiro em 2019; b) temperatura do ar (1970 – 2000); c) precipitação anual (1970 – 2000); d) sazonalidade da precipitação (1970 – 2000).

**Vetores da degradação de pastagens selecionados por regressão linear múltipla**

O modelo de regressão linear múltipla selecionado pelo AIC, mostrou que 50% da degradação das pastagens no Cerrado norte mineiro ( $R^2 = 0.50$ , valor-p = < 0.001) foi explicada significativamente (valor-p = ≤ 0.01) por variáveis climáticas. As variáveis foram temperatura do ar, precipitação anual e sazonalidade da precipitação (Figura 3 e Tabela 1). A temperatura do ar e sazonalidade da precipitação mostraram comportamento linear (Figura 4) com a degradação das pastagens. Portanto altas temperaturas e sazonalidade da distribuição das chuvas, mais acentuado o grau de degradação dos pastos norte mineiros. Por outro lado, a precipitação apresentou padrão inverso, pois zonas com maior precipitação, mantém maior qualidade das pastagens.

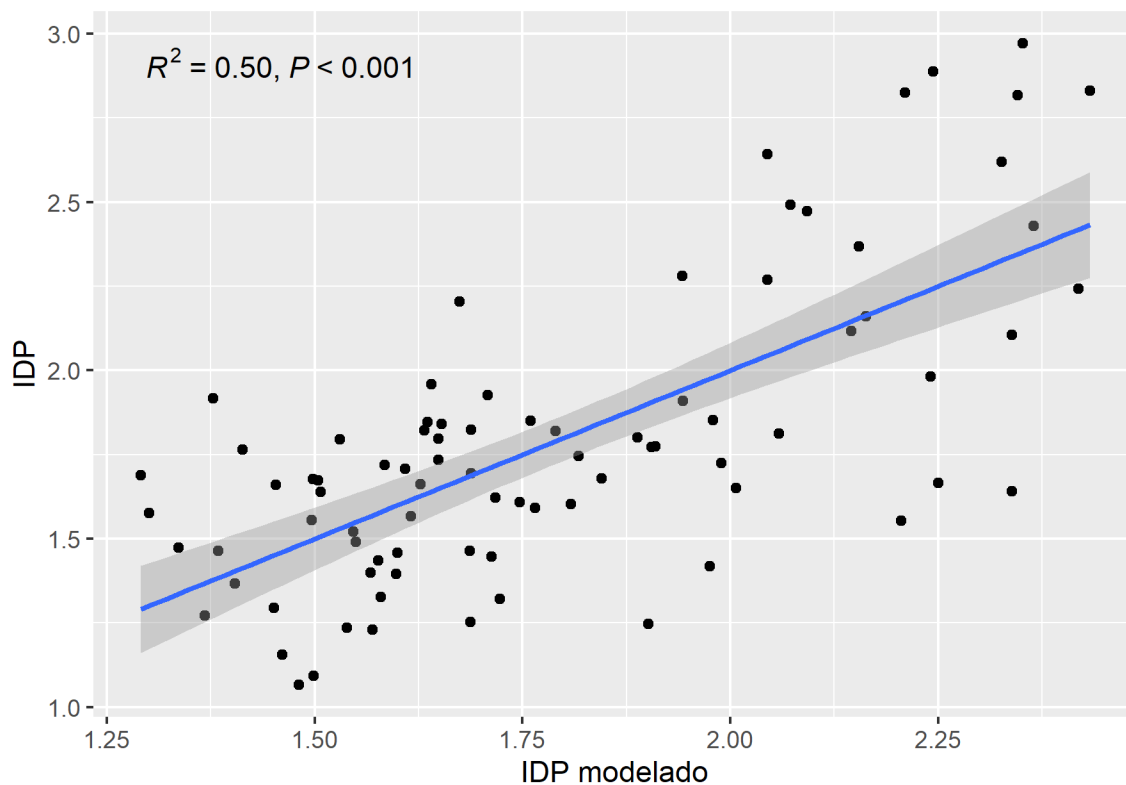


Figura 3 – Gráfico de dispersão mostrando os valores de Índice de degradação das pastagens (IDP) modelado e observado ( $R^2 = 0.50$ ; valor-p < 0,001, Shapiro-Wilk: W: 0.99 e valor-p: 0.63).



Tabela 1 – Parâmetros do modelo de regressão linear múltipla com as variáveis predictoras selecionadas pelo AIC. AIC: Critério de Informação de AKAIKE; F = teste F; t = estatística do teste; *valor-p* = probabilidade de significância. F = 26.32.

	Estimado	Erro padrão	AIC	F	t	valor-p
(Intercept)	-4.954	1.261			-3.930	<0.001
Temperatura do ar	0.193	0.038	-168.180	26.219	5.120	<0.001
Precipitação anual	-0.001	0.000	-185.370	6.560	-2.561	0.01
Sazonalidade da precipitação	0.034	0.013	-185.170	6.766	2.601	0.01

Org. Os autores, 2023.

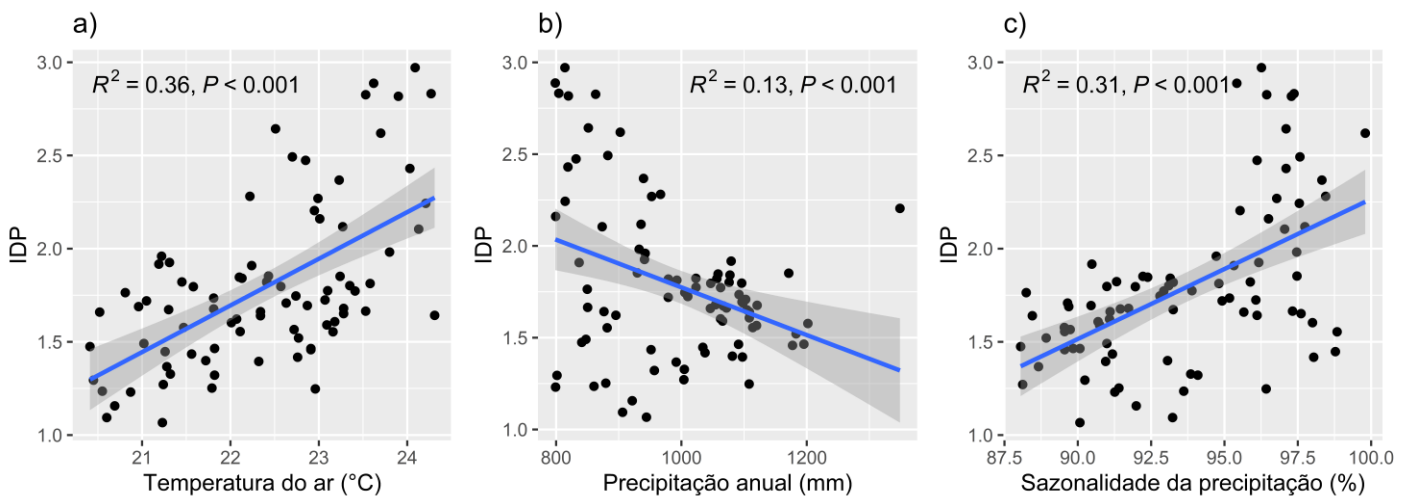


Figura 4 – Relação linear simples entre as variáveis predictoras mais importantes no modelo de regressão linear múltipla com o índice de degradação de pastagens (IDP) (temperatura do ar, precipitação anual e sazonalidade da precipitação).

## IV. DISCUSSÃO

### Vetores da Degradação das Pastagens no Cerrado norte mineiro

As pastagens no norte de Minas Gerais mostram algum grau de degradação, variando de degradação leve a moderada. Os resultados desse estudo estão em linha pesquisas desenvolvidas no Cerrado brasileiro, as quais apontaram a porção norte do estado de Minas Gerais como um dos *hotspots* de degradação das pastagens (AGUIAR et al., 2017; PEREIRA et al., 2018; SANTOS et al., 2022). As características naturais da região norte de Minas podem levar a uma predisposição à degradação das pastagens. A condição climática caracterizada por menor disponibilidade de água e maior temperatura são vetores que afetam as condições de pastagem (FERNANDES et al., 2018). Isso explica a seleção de preditores climáticos pelo modelo de regressão linear múltipla (Tabela 1 e Figura 4).

As variáveis selecionadas pelo modelo de regressão representam as condições edafoclimáticas para o desenvolvimento fenológico das pastagens (SLOAT et al., 2018; VELOSO et al., 2020; SILVA et al., 2022). Em

regiões com baixa incidência pluviométrica e maior variabilidade sazonal, os níveis de biomassa das pastagens decrescem em função de restrição hídrica (CLEMENTINI et al., 2020). Nessas condições, a taxa de assimilação de carbono pela fotossíntese decresce gradualmente. Paralelamente a isso, a temperatura também afeta o comportamento fenológico e estrutural dos pastos, pois quando submetidos a elevadas temperaturas ocorre aumento da evapotranspiração potencial e condições de aridez (HABERMANN et al., 2019).

Embora o modelo elaborado nesse estudo não tenha selecionado os aspectos socioeconômicos (Figuras 3 e 4), alguns trabalhos para o Cerrado mostraram evidências de correlação estatística entre pastos degradados e índice de desenvolvimento humano. A falta de acesso à tecnologia, linha de crédito e baixa capacidade de investimentos no melhoramento das pastagens são vetores que contribuem para manutenção da degradação dos pastos (PEREIRA et al., 2018; SANTOS et al., 2022). A manutenção dessa situação contribui para agravar a situação social da região, sendo uma das mais pobres do estado de Minas Gerais (IBGE, 2010).

### **Implicações Ambientais da Degradação das Pastagens**

A degradação das pastagens no Cerrado tem sérias implicações ambientais que afetam diversos fatores. Estudos têm apontado para um aumento significativo da perda de solo por erosão, bem como uma mudança na dinâmica das emissões de CO<sub>2</sub> e intensificação da temperatura da superfície.

Considerando os solos, cenários preditivos mostraram que pastagens degradadas impulsionam as perdas de solos (GALDINO et al., 2016). Estudos realizados no Cerrado norte mineiro confirmaram essa situação, indicando perdas anuais acima de 45 toneladas de solos em pastos degradados (OLIVEIRA; LEITE, 2018). Essas intensas perdas de solos promovem o assoreamento de cursos hídricos, prejudicando a qualidade da água (SPERANDIO et al., 2012). Essa situação gera conflitos socioambientais pelo uso desse recurso na região (SALIS et al., 2017). Nas últimas duas décadas, a região Norte de Minas foi palco de 33% dos conflitos fundiários registrados no estado de Minas Gerais (FERREIRA et al., 2020), o que reflete a gravidade da situação.

O aumento de CO<sub>2</sub> também é esperado diante da degradação das pastagens (ROSA; SANO; ROSENDO, 2014; SANTOS et al., 2023). Essa situação é mais sensível nas condições climáticas do norte de Minas Gerais. As condições de clima semiárido com baixa precipitação e alta temperatura (Figura 2) são aspectos capazes de induzir aridez e afetar a qualidade das pastagens. Estudos mostram que as pastagens do Norte de Minas Gerais têm menor fixação de carbono justamente na região de transição Cerrado/Caatinga (SILVA et al., 2022), a qual possui características semiáridas. Portanto, os resultados sugerem que os municípios do Cerrado norte mineiro podem ser considerados fonte de emissão de CO<sub>2</sub> em escala regional.

A expansão das pastagens no Cerrado norte mineiro, geralmente, ocorre em função da substituição de vegetação nativa (florestas e savanas) (LEITE; SOUZA; SILVA, 2022). Essa conversão de uso é apontada em estudos como um dos principais vetores de degradação no Cerrado. Uso da terra com pastagens aumenta a temperatura da superfície, principalmente quando esta se encontra em algum estágio de degradação (SAMPAIO et al., 2007; FERREIRA et al., 2013). Essa situação é potencializada no Norte de Minas Gerais devido às condições climáticas regionais, principalmente áreas de menor precipitação (Figura 2).

Para minimizar os efeitos da degradação das pastagens nas perdas de solos, emissões de CO<sub>2</sub> e temperatura de superfície no Cerrado norte mineiro, são necessários investimentos públicos e privados em planos de manejo para o melhoramento dos níveis de biomassa dessas pastagens. Vários estudos têm comprovado os benefícios de pastagens bem manejadas, com altos níveis de biomassa, na mitigação desses problemas.

Segundo pesquisas, pastos bem manejados, podem decrescer significativamente o fluxo de sedimentos (GALDINO et al., 2016), manter estoques de carbono no solo similares a vegetação nativa (BRAZ et al., 2013; ROSA; SANO; ROSENDO, 2014). Além disso, contribuem para fornecer adequadas taxas de umidade para atmosfera induzindo umedecimento da superfície (ANDRADE et al., 2016). Portanto, a implementação de práticas de manejo eficientes que levem ao aumento da biomassa das pastagens não só beneficia a conservação do solo, reduzindo as emissões de CO<sub>2</sub> e a temperatura superficial, como também contribui para a preservação da biodiversidade e dos recursos hídricos da região.

## V. CONCLUSÕES

Os resultados desse estudo mostraram que todos os municípios apresentam algum grau de degradação das pastagens. 21% (18 municípios) possuem níveis moderados e 79% (66 municípios) apresentaram pastos levemente degradados. Em termos de implicações, caso as pastagens não sejam melhoradas, perdas econômicas e ecossistêmicas podem ser intensificadas na região.

O modelo de regressão linear múltipla aplicado para avaliar os principais vetores de degradação das pastagens mostrou que a qualidade das pastagens é influenciada por fatores naturais. Os vetores que levam à predisposição à degradação das pastagens foram preditores climáticos, como temperatura do ar, sazonalidade da precipitação e precipitação anual. Esses preditores foram mais significativos para explicar os níveis de degradação, resultando em um R<sup>2</sup> de 0,50 (p-valor <0,001).

A integração de técnicas de sensoriamento remoto e estatística como estrutura metodológica desse trabalho foi essencial, pois permitiu observar as variações espaciais dos níveis de degradação das pastagens e explicar os principais vetores. Portanto, a replicação dessa metodologia para outras regiões é possível, principalmente devido a facilidade de obtenção dos dados secundários e o uso de ferramentas disponíveis em *softwares* de linguagem aberta.

### Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela bolsa de doutorado. O terceiro autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pela bolsa de pós-doutorado. O último autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pela bolsa de produtividade.

### VI. REFERÊNCIAS

- AGUIAR, D. A.; MELLO, M. P.; NOGUEIRA, S. F.; GONÇALVES, F. G.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T. MODIS time series to detect anthropogenic interventions and degradation processes in tropical pasture. *Remote Sensing*, v. 9, n. 1, p. 73, 2017. <https://doi.org/10.3390/rs9010073>.
- AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v.19, n. 6, p. 716–723, 1974. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>.
- ALIN, A. Multicollinearity. *Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics*, v. 2, n. 3, p. 370–374, 2010. <https://doi.org/10.1002/wics.84>.
- ANDRADE, R. G.; RODRIGUES, C. A. G.; SANCHES, I. D. A.; TORRESAN, F. E.; QUARTAROLI, C. F. Uso de técnicas de sensoriamento remoto na detecção de processos de degradação de pastagens. *Revista Engenharia na Agricultura-Reveng*, v. 21, n. 3, p. 234–243, 2013. <https://doi.org/10.13083/1414-3984.v21n03a02>.
- ANDRADE, R. G.; TEIXEIRA, A. H. D. C.; LEIVAS, J. F.; NOGUEIRA, S. F. Analysis of evapotranspiration and biomass in pastures with degradation indicatives in the Upper Tocantins River Basin, in Brazilian Savanna. *Revista Ceres*, v. 63, n.6, p. 754–760, 2016. <https://doi.org/10.1590/0034-737x201663060002>.
- BRAZ, S. P.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J.; JANTALIA, C. P.; GUIMARÃES, A. P.; SANTOS, C. A.; BODDEY, R. M. Soil carbon stocks under productive and degraded *Brachiaria* pastures in the Brazilian Cerrado. *Soil Science Society of America Journal*, v. 77, n. 3, p. 914–928, 2013. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0269>.
- CLEMENTINI, C.; PONENTE, A.; LATINI, D.; KANAMARU, H.; VUOLO, M. R.; HEUREUX, A.; DEL FRATE, F. Long-term grass biomass estimation of pastures from satellite data. *Remote Sensing*, v. 12, n. 13, p. 2160, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12132160>.
- COSTA, L. R. F. Considerations about the geomorphological macrounities of the state of Minas Gerais–Brazil. *William Morris Davis–Revista de Geomorfologia*, v. 2, n. 1, p. 1–9, 2021. <https://doi.org/10.48025/ISSN2675-6900.v2n1.2021.109>.

DIDAN, K. MOD13Q1: MODIS/Terra vegetation indices 16-day L3 global 250m grid SIN V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, v. 10, n. 1, 2015.

ESPINDOLA, G. M.; SILVA FIGUEREDO, E.; PICANÇO JÚNIOR, P.; REIS FILHO, A. A. Cropland expansion as a driver of land-use change: the case of Cerrado-Caatinga transition zone in Brazil. *Environment, Development and Sustainability*, v.23, p. 1-15, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01387-z>.

FERNANDES, F. H. S.; SANO, E. E.; FERREIRA, L. G.; MELLO BAPTISTA, G. M.; CASTRO VICTORIA, D.; FASSONI-ANDRADE, A. C. Degradation trends based on MODIS-derived estimates of productivity and water use efficiency: A case study for the cultivated pastures in the Brazilian Cerrado. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 11, p. 30–40, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.04.014>.

FERREIRA, G.H. C. Atlas da questão agrária Norte Mineira. 1.ed.São Paulo: Entremares, 2020.

FERREIRA, L. G.; SANO, E. E.; FERNANDEZ, L. E.; ARAÚJO, F. M. Biophysical characteristics and fire occurrence of cultivated pastures in the Brazilian savanna observed by moderate resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 34, n. 1, p. 154-167, 2013. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.712223>.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.

GALDINO, S.; SANO, E. E.; ANDRADE, R. G.; GREGO, C. R.; NOGUEIRA, S. F.; BRAGANTINI, C.; FLOSI, A. H. Large-scale Modeling of Soil Erosion with RUSLE for Conservationist Planning of Degraded Cultivated Brazilian Pastures. *Land Degradation & Development*, v. 27, n. 3, p. 773–784, 2016. <https://doi.org/10.1002/ldr.2414>.

HABERMANN, E.; DIAS DE OLIVEIRA, E. A.; CONTIN, D. R.; DELVECCHIO, G.; VICIEDO, D. O.; DE MORAES, M. A.; MARTINEZ, C. A. Warming and water deficit impact leaf photosynthesis and decrease forage quality and digestibility of a C4 tropical grass. *Physiologia Plantarum*, v. 165, n. 2, p. 383–402, 2019. <https://doi.org/10.1111/ppl.12891>.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico, 2010. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>. Acesso em: 15 de jan. 2020.

LAPIG. Laboratório de Processamento Digital de Imagens. Atlas das Pastagens, 2019. Disponível em: <https://atlasdaspastagens.ufg.br/map>. Acesso em: 05 de jan. 2020.

LEITE, M. E.; SOUZA, C. M. P.; SILVA, L. A. P. Dinâmica de uso da terra no Norte de Minas – Sudeste do Brasil. In: Ferreira, G. H. C.; COSTA, L. R. F. (orgs.). *A Geografia do Norte de Minas Gerais: reflexões e proposições*. 1. ed. São Paulo: Entremares, 2022. p. 165-177.

OLIVEIRA, E. R. D.; SILVA, J. R.; BAUMANN, L. R. F.; MIZIARA, F.; FERREIRA, L. G.; MERELLES, L. R. D. O. Tecnologia e degradação de pastagens na pecuária no Cerrado brasileiro. *Sociedade & Natureza*, v. 32, p. 626–638, 2020. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-55795>.

OLIVEIRA, W. F.; LEITE, M. E. Perda de Solo por Erosão Hídrica em Bacia Hidrográfica: o caso da área de drenagem da barragem do Rio Juramento, no Norte do estado de Minas Gerais. *Caminhos de Geografia*. V. 19, n. 67, p.16-37, 2018. <http://dx.doi.org/10.14393/RCG196702>.

PARENTE, L.; MESQUITA, V.; MIZIARA, F.; BAUMANN, L.; FERREIRA, L. Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: A novel approach based on high spatial resolution imagery and Google Earth Engine cloud computing. *Remote Sensing of Environment*, v. 232, p. 111301, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111301>.

PEREIRA, O. J. R.; FERREIRA, L. G.; PINTO, F.; BAUMGARTEN, L. 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. <https://doi.org/10.3390/rs10111761>.

PFEIFFER, M.; LANGAN, L.; LINSTÄDTER, A.; MARTENS, C.; GAILLARD, C.; RUPPERT, J. C.; SCHEITER, S. Grazing and aridity reduce perennial grass abundance in semi-arid rangelands—Insights from a trait-based dynamic vegetation model. *Ecological Modelling*, v. 395, p. 11–22, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.12.013>.

R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RIGHI, C. A.; OLIVEIRA RISANTE, A. P.; PACKER, A. P.; DO COUTO, H. T. Z. Biodiversity and biomass relationships in a cerrado stricto sensu in Southeastern Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 195, n. 4, p. 492, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11051-w>.

RIPLEY, B.; VENABLES, B.; BATES, D. M.; HORNIK, K.; GEBHARDT, A.; FIRTH, D.; RIPLEY, M. B. Package 'mass'. *Cran r*, v. 538, p. 113–120, 2013.

ROSA, R; SANO, E. E; ROSENDO, J. S. Estoque de carbono em solos sob pastagens cultivadas na bacia hidrográfica do rio Paranaíba. *Sociedade & Natureza*, v. 26, n.2, p. 333-351, 2014. <https://doi.org/10.1590/1982-451320140210>.

SÁ JÚNIOR, A.; CARVALHO, L. G.; SILVA, F. F.; CARVALHO ALVES, M. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 108, n. 1, p. 1–7, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0507-8>.

SALIS, H. H. C.; EVANGELISTA, L. P.; DA COSTA, A. M.; HORTA, I. D. M. F. Diagnóstico da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Manso-MG. *Caminhos de Geografia, Uberlândia*, v. 18, n. 64, p. 91–102, 2017.

SAMPAIO, G.; NOBRE, C.; COSTA, M. H.; SATYAMURTY, P.; SOARES-FILHO, B. S.; CARDOSO, M. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters*, v. 34, n. 17, 2007. <https://doi.org/10.1029/2007gl030612>.

SANTANA SANTOS, P.; GUIMARÃES FERREIRA, L. Análise descritiva dos aspectos biofísicos associados aos padrões de cobertura e uso da terra na bacia hidrográfica do Rio Vermelho, bioma Cerrado. *GeoFocus Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, v. 20, p. 3–28, 2017. <https://doi.org/10.21138/GF.395>.

SANTOS, C. O. D.; MESQUITA, V. V.; PARENTE, L. L.; PINTO, A. D. S.; FERREIRA JR, L. G. Assessing the Wall-to-Wall Spatial and Qualitative Dynamics of the Brazilian Pasturelands 2010–2018, Based on the Analysis of the Landsat Data Archive. *Remote Sensing*, v. 14, n. 4, p. 1024, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14041024>.

SIDRA. Sistema IBGE de recuperação automática. Produto Interno Bruto dos municípios, 2018. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/munic/tabelas>. Acesso em: 20 de jan. 2020.

SILVA, M. L. Mapeamento de superfícies aplainadas no norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 9, n. 02, p. 526-545, 2016. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.2.p526-545>.

SILVA, L. A. P.; BOLFE, E.; FERREIRA, M. E.; VELOSO, G. A.; LAURENTINO, C. M. M. Modelling the Pastureland productivity in areas of Savanna in Northern Minas Gerais. *Caminhos de Geografia*, v. 23, n. 87, p. 124–134, 2022. <https://doi.org/10.14393/RCG238759046>.

SOUZA, C. M. P. D.; FRANCELINO, M. R.; COSTA, L. M. D.; FERNANDES, E. I. Pastures Degradation and the Relation with Pedo-Geomorphological Attributes in Watershed. *Floresta e Ambiente*, v. 26, n. 4, p. e20170616, 2019. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.061617>.

SPERANDIO, H. V.; CECÍLIO, R. A.; CAMPANHARO, W. A.; DEL CARO, C. F.; HOLLANDA, M. P. Semina: Ciências Agrárias, v. 33, n. 4, p. 1411-1418, 2012. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n4p1411>.

STANIMIROVA, R.; ARÉVALO, P.; KAUFMANN, R. K.; MAUS, V.; LESIV, M.; HAVLÍK, P.; FRIEDL, M. A. Sensitivity of global pasturelands to climate variation. *Earth's Future*, v. 7, n. 12, p. 1353–1366, 2019. <https://doi.org/10.1029/2019EF001316>.

VELOSO, G. A.; FERREIRA, M. E.; JÚNIOR, L. G. F.; SILVA, B. B. Modelling gross primary productivity in tropical savanna pasturelands for livestock intensification in Brazil. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 17, p. 100288, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100288>.

ZALLES, V.; HANSEN, M. C.; POTAPOV, P. V.; PARKER, D.; STEHMAN, S. V.; PICKENS, A. H.; KOMMAREDDY, I. Rapid expansion of human impact on natural land in South America since 1985. *Science Advances*, v. 7, n. 14, p. eabg1620, 2021. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abg1620>.

---