

ANÁLISE DE PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR COM USO DE IMAGENS MODIS E NDVI EM ALTO ALEGRE – SP

Victória Hellena Matusевич e de Castro¹, Taya Cristo Parreiras², Édson Luis Bolfe³, Danielle Elis Garcia Furuya³, Gustavo Bayma⁴ e Victória Beatriz Soares⁵

¹ Graduação em Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas-SP; v245192@dac.unicamp.br; ² Programa de Pós Graduação em Geografia, UNICAMP, t234520@dac.unicamp.br; ³ Embrapa Agricultura Digital, Campinas – SP, danielle.furuya@colaborador.embrapa.br, edson.bolfe@embrapa.br; e ⁴ Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna-SP, gustavo.bayma@embrapa; ⁵ Graduação em Geografia, PUCC, Campinas-SP; victoria.soares@unesp.br

RESUMO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, sendo fundamental estimar a produtividade dessa cultura para o planejamento do setor em relação ao uso de insumos, logística para escoamento e comercialização. Assim, este estudo investigou a relação entre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e a produtividade da cana-de-açúcar no município de Alto Alegre (SP), utilizando dados do sensor MODIS (2000-2022) e dados da Produção Agrícola Municipal (PAM), do IBGE. Os resultados indicam que o NDVI do 2º trimestre teve a maior correlação positiva na produtividade (0,3895), refletindo condições favoráveis de crescimento.

Palavras-chave — índices vegetativos, semear digital, geotecnologias, agricultura digital, correlação.

ABSTRACT

Brazil is the largest producer of sugar cane in the world, and it is essential to estimate the productivity of this crop for planning the sector in relation to the use of inputs, logistics for transport and marketing. Thus, this study investigated the relationship between the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and sugarcane productivity in the municipality of Alto Alegre (SP), using data from the MODIS sensor (2000-2022) and data from Production Municipal Agricultural Survey (PAM), from IBGE. The results indicate that the 2nd quarter NDVI had the highest positive correlation with productivity (0.3895), reflecting favorable growth conditions.

Key words — vegetative indices, semear digital, geotechnologies, digital agriculture, correlation..

1. INTRODUÇÃO

De acordo com relatórios da FAO, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com cerca de 720 milhões de toneladas processadas na safra de 2020 [1]. Segundo dados da pesquisa da Produção Agrícola Municipal (PAM), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), cerca

de 0,20% da produção paulista é realizada no município de Alto Alegre. De acordo com dados disponibilizados pelo SEADE [2], o PIB agrícola corresponde a 33,9% do PIB municipal, movimentando 38,5 milhões de reais em 2021, sendo 70% desse valor proveniente do cultivo de cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar, sendo uma das culturas mais importantes para a economia agrícola, requer monitoramento constante para garantir altos níveis de produtividade e eficiência [3]. Nesse contexto, o sensoriamento remoto (SR) tornou-se uma fonte confiável para monitorar diversos indicadores de crescimento de culturas agrícolas e uso de água na agricultura, consistindo em dados quase em tempo real, contínuos, com alta resolução espacial e ampla cobertura geográfica [4]. Além disso, índices de vegetação, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), fornecem uma avaliação detalhada do vigor das plantas, possibilitando previsões mais precisas sobre a produtividade e melhores estratégias de decisão ao longo do ciclo da cultura [5]. Para cana-de-açúcar de 1 ano e meio, Mulianga *et al* [6] explorou o uso de NDVI e imagens MODIS para estimar a produtividade em 6 áreas de manejo durante 9 anos.

Neste sentido, o objetivo deste estudo foi analisar a correlação de métricas de séries temporais de NDVI para explicar a variação temporal da produção de cana-de-açúcar no município de Alto Alegre (SP), um dos Distritos Agrotecnológicos (DATs) do Projeto Semear Digital [7].

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Alto Alegre é um município de 319 km², localizado no noroeste do estado de São Paulo (Figura 1). O solo mais abundante é o Argissolo Vermelho Amarelo [8], e praticamente todo município possui relevo plano [9]. O clima predominante é o tropical, com inverno seco (Aw) [10]. A temperatura média anual é superior a 20°C, dentro de um intervalo ótimo de 28 a 38°C para o cultivo de cana-de-açúcar [11]. De acordo com dados estimados do Global Precipitation Measurements (GPM), disponíveis via Google Earth Engine (GEE), o município apresentou média histórica de precipitação anual acumulada de 1.800 mm entre 2001 e

2020, acima das exigências anuais da cultura, que variam entre 1.200 e 1.400 mm [12].

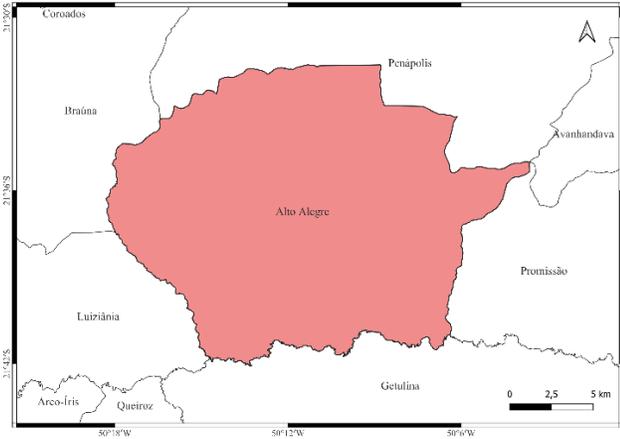


Figura 1: Localização do município de Alto Alegre (SP)

2.2. Aquisição e processamento de dados

Os dados relativos à produção da cana-de-açúcar-de-açúcar (área total colhida e quantidade produzida) foram obtidos da pesquisa de Produção Agrícola Municipal (PAM – IBGE), via portal Sidra, para os anos de 2000 a 2022 [13].

As médias trimestrais e somas anuais de NDVI, foram obtidas do sensor Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS, MOD13Q1), em 250 m e 16 dias de resolução, via GEE, também entre 2000 e 2022. As séries foram geradas desconsiderando *pixels* contaminados indicados pela banda de qualidade.

Para produção do banco de dados de análise, as imagens foram filtradas para áreas efetivamente cultivadas com cana-de-açúcar. Para tanto, dados da oitava coleção do MapBiomas (2023), do mesmo período, foram reclassificados para gerar mapas binários, em que 1 indica a presença de cana-de-açúcar, e 0, outras classes. Esses mapas reclassificados foram convertidos em formato vetorial e, os valores das séries temporais (médias trimestrais e somas anuais) foram extraídos no GEE apenas para *pixels* dentro destes limites. A equação corresponde ao NDVI [14] é:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

A análise dos dados consistiu em correlacionar os índices de NDVI em diferentes escalas temporais, mensal e trimestral, ao longo do período de 2000 a 2020. O objetivo foi identificar os maiores coeficientes de determinação, permitindo uma melhor compreensão das variações sazonais e anuais do NDVI.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos índices trimestrais de NDVI ao longo dos anos

revela uma clara variação sazonal, com os maiores valores de NDVI concentrados no primeiro e segundo trimestres. Essa tendência indica que, nesse período, concentram-se as fases de desenvolvimento e maturação da cana-de-açúcar, no segundo ano fenológico [15]. Nos 3º e 4º trimestres, os valores de NDVI diminuíram consideravelmente, coincidindo nos calendários com os períodos de pousio e desenvolvimento. Os picos nesses períodos estão relacionados com o plantio e desenvolvimento no primeiro ano da cana-de-açúcar [15]. É necessário atentar-se que há diferentes estágios, ocorrendo ao mesmo tempo, pois são plantadas cana-de-açúcar de ano e cana-de-açúcar de ano e meio, com distintos estágios de maturação em um mesmo período, o que afeta a análise do NDVI. Morel *et al* [16] também enfrentaram desafios ao estimar produtividade de cana, por conta de diferentes estágios sobrepostos, enquanto Sudianto, Herdiyeni e Prasetyo [17] combinaram regressão linear e harmônica para minimizar esses picos de confusão, devido às distintas fases fenológicas.

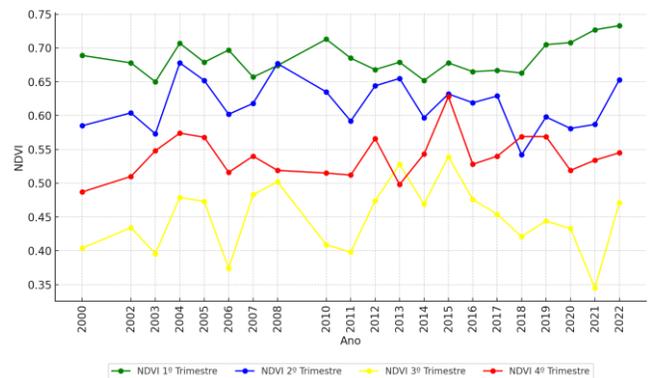


Figura 2 - Variação do NDVI por trimestre ao longo dos anos

Ao relacionar esses dados de NDVI com a produtividade da cana-de-açúcar, figura 3, observa-se uma possível correlação entre os anos de maiores picos de NDVI e uma produtividade mais elevada, como nos anos de 2004, 2008 e 2019, quando a produção foi de 70 mil a 80 mil toneladas. Esse comportamento reforça a hipótese de que a variação do NDVI, especialmente nos primeiros trimestres, pode servir como um bom indicador da produtividade da cana-de-açúcar, já que a cultura parece responder de forma significativa às condições favoráveis de crescimento, refletidas pelos altos índices de vegetação observados nesse período. Além disso, como destacado por Vasconcelos *et al* [18], para predição de produtividade de cana, é necessário um modelo que combine variações de temperatura, precipitação e índices vegetativos.

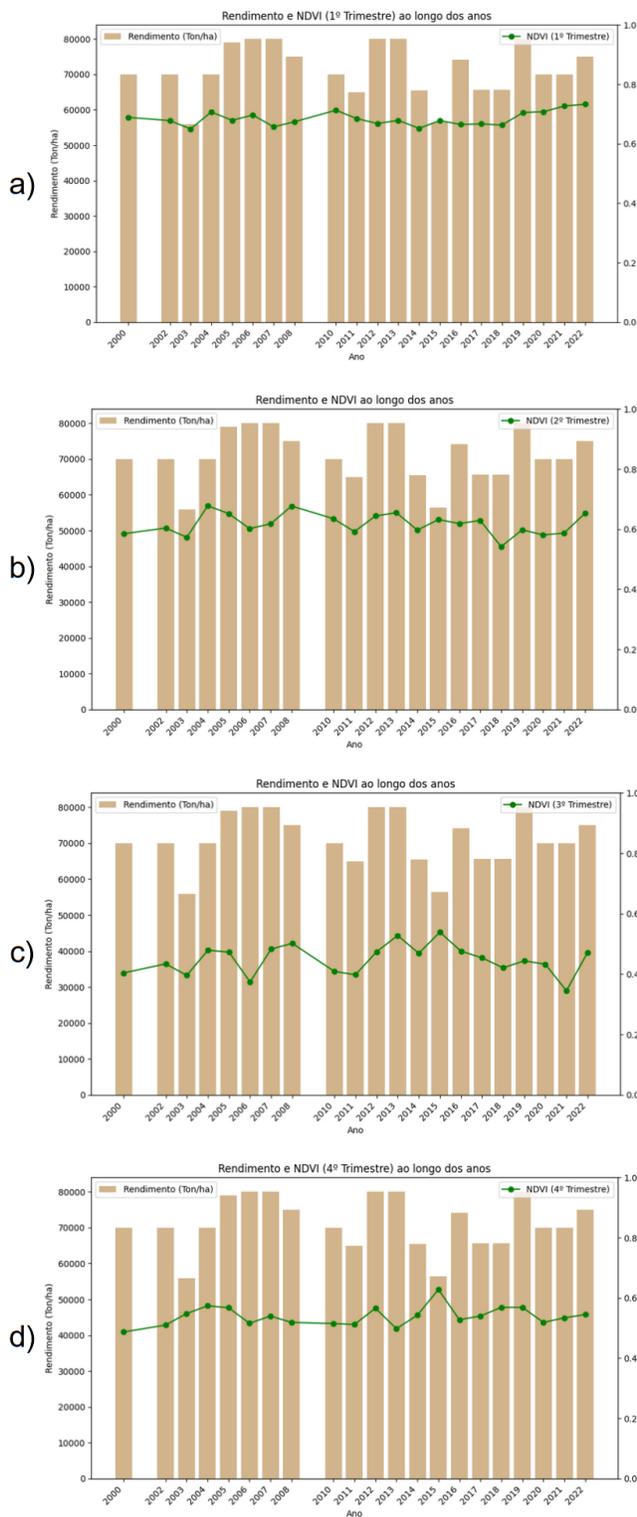


Figura 3. Rendimento e NDVI por ano (2000 a 2022) considerando a) 1º trimestre; b) 2º trimestre; c) 3º trimestre; d) 4º trimestre.

A análise de correlação aplicada aos dados de NDVI por trimestre e a produtividade de cana-de-açúcar revelou que o NDVI do 2º trimestre tem a maior correlação positiva com a

produtividade, com um coeficiente (ρ) de 0,3895. Isso sugere que este período do ano é crucial para o desenvolvimento da cultura, e se o NDVI for ser empregado na tomada de decisão relacionada à produção, este seria o momento ideal. Esses coeficientes, todavia, estão muito distantes da correlação de Spearman de 0,95 encontrada em Gonçalves *et al* [19], que foi encontrada por meio do uso de NDVI, WRSI e diversos dados agrometeorológicos. O 1º trimestre também apresentou uma relação positiva significativa, com um coeficiente de 0,2254, reforçando a importância das condições iniciais de crescimento. Por outro lado, o NDVI do 4º trimestre apresentou um ρ negativo (-0,2692), podendo estar associado com a colheita.

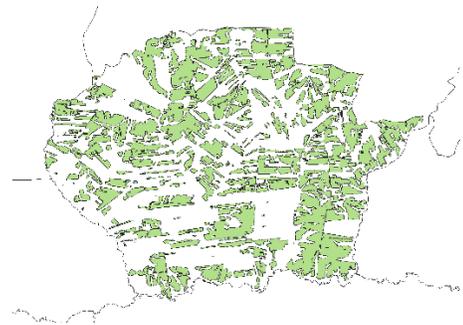


Figura 4(a). Canaviais em 2008 (85.000 ha)



Figura 4(b). Canaviais em 2020 (12.700 ha)

Além disso, observou-se que houve grandes variações na área cultivada de cana-de-açúcar, figura 4, tanto em relação aos dados da PAM [15] quanto em relação aos dados do ano anterior. Essas alterações podem ser explicadas em parte pela expansão do cultivo de grãos e pelos distintos ciclos da cana-de-açúcar (de um ano e meio e de dois anos).

4. CONCLUSÕES

Apesar de o NDVI ser um bom indicador de desempenho produtivo, o modelo destaca a necessidade de incorporar variáveis adicionais, como dados climáticos ou práticas agrícolas, para melhorar a precisão das previsões de produtividade. Diferentes ciclos de cana-de-açúcar devem ser considerados no mapeamento e na produtividade.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de iniciação científica, à Embrapa Agricultura Digital pelo suporte fornecido, à FAPESP (Bolsa 2022/09319-9, Bolsa 2024/05205-4, Bolsa 2024/13150-5).

6. REFERÊNCIAS

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations (2023) – with major processing by **Our World in Data**. “Sugar cane production – FAO” [dataset]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, “Production: Crops and livestock products” [original data]. Disponível em <https://ourworldindata.org/grapher/sugar-cane-production>. Acesso em 13 out 2024
- [2] Fundação SEADE - **Sistema Estadual de Análise de Dados**. Perfil dos municípios paulistas. Disponível em <https://municipios.seade.gov.br/economia/>. Acesso em: 9 out. 2024.
- [3] TEIXEIRA, L. G. V. et al. Monitoring sugarcane productivity using remote sensing and machine learning. **Field Crops Research**, v. 255, p. 107984, 2020. DOI: 10.1016/j.fcr.2020.107984.
- [4] THENKABAIL, P. S. *et al.* Assessing future risks to agricultural productivity, water resources and food security: how can remote sensing help. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 78, p. 773-782, 2012.
- [5] CHEN, B. *et al.* Landslide detection based on time-series Sentinel-1 imagery and deep learning: a case study of Hong Kong. **IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, p. 2381-2384, 2020. DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324395.
- [6] MULIANGA, B. *et al.* Forecasting regional sugarcane yield based on time integral and spatial aggregation of MODIS NDVI. **Remote Sensing**, 2013.
- [7] Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Centro de Ciência para o Desenvolvimento da Agricultura Digital**, 2023
- [8] ROSSI, M. 2017. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. V.1. 118p.
- [9] UGRHI 19: **Mapa de declividade do estado de São Paulo**. São Paulo: Fehidro, Centro Integrado e Gerenciamento de Informações e Governo do Estado de São Paulo, 2013. Escala 1:200.000. Disponível em: [https://smastr16.blob.core.windows.net/cpla/2013/10/Declivida de_UGRHI_19.pdf](https://smastr16.blob.core.windows.net/cpla/2013/10/Declivida_de_UGRHI_19.pdf). Acesso em 28 out 2024.
- [10] C. A. Alvares, J. L. Stape, P. C. Sentelhas, J. L. M. Gonçalves, and G. Spavorek. **Koepfen's climate classification map for Brazil**. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, pp. 711-728, 2013.
- [11] BACCHI, O. O. S. **Ecofisiologia da Cana-de-Açúcar**. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR, 1985. 20 p.
- [12] MARCHIORI, L. F. S. **Influencia da época de plantio e corte na produtividade da cana de açúcar**. 2004. 271 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, Piracicaba. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.11.2004.tde-29112004-153023>. Acesso em: 9 out. 2024
- [13] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal**. Disponível em <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso em: 20 out. 2024.
- [14] Rouse Jr, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1973, **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation** (No. NASA-CR-132982).
- [15] CONAB. **Perfil do Setor do Açúcar e do Etanol no Brasil - Edição para a safra 2014/2015**. 2017
- [16] MOREL, J. et al. Toward a satellite-based system of sugarcane yield estimation and forecasting in smallholder farming conditions: A case study on Reunion Island. **Remote Sensing**, v. 6, n. 7, p. 6620–6635, 2014. DOI: 10.3390/rs6076620. Acesso em: 30 de out. 2024.
- [17] SUDIANTO, S.; HERDIYENI, Y.; PRASETYO, L. B. Early warning for sugarcane growth using phenology-based remote sensing by region. **International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)**, v. 14, n. 2, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0140259>. Acesso em: 30 de out. 2024.
- [18] VASCONCELOS, J.C.S. et al. Development and Validation of a Model Based on Vegetation Indices for the Prediction of Sugarcane Yield. **AgriEngineering**, v. 5, n. 2, p. 698-719, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering5020044>.
- [19] GONÇALVES, R. R. do Valle et al. Numerical models to forecast the sugarcane production in regional scale based on time series of NDVI/AVHRR images. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON THE ANALYSIS OF MULTITEMPORAL REMOTE SENSING IMAGES (MULTI-TEMP), 8., 2015, Annecy, França. **Anais [...]**. Annecy: IEEE, 2015. p. 1-4. DOI: 10.1109/Multi-Temp.2015.7245806.