



RESEARCH ARTICLE



Estimation of nitrogen content in sugarcane based on vegetation indices derived from Sentinel-2 data

Estimativa do conteúdo de nitrogênio na cana-de-açúcar baseado em índices de vegetação derivados de dados Sentinel-2

Jose Neto Soares Filho¹ ; Douglas Endrigo Perez Pereira² ; Amanda Soares Regis Noronha^{2*} 

¹ Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa, Portugal.

² Instituto de Fosfato Biológico, Goiânia, Goiás, Brasil.

* Corresponding author: amandasoares@grupoifb.com.br (A. S. R. Noronha).

Received: 4 October 2024. Accepted: 28 December 2024. Published: 14 January 2025.

Abstract

Sugarcane occupies a large territorial scale in the world and is constantly searching for mechanisms to monitor nutrients in the crop production cycle, using non-destructive methods. The study aimed to estimate the nitrogen content in the sugarcane leaf was developed in the 2021/2022 harvest on two commercial fields of dryland cultivars (RB867515 = 50.75 ha) and (CVSP7870 = 48.56 ha) at the Serranópolis-Goiás mill, evaluating the efficiency of the biochemical vegetation indices Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (fAPAR) and Canopy Chlorophyll Content (CCC) processed using the radiation transfer model RTM PROSAIL, compared to the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI), processed using mathematical band ratio models. Both were based on a time series of Sentinel-2 data as input variables. The validation of the Agro-Model occurred through analysis of leaf tissue collected in seven interspersed evaluations during the period the crop remained in the field. The functionality of the four indexes was evidenced, highlighting the biochemical index fAPAR from the perspective of descriptive statistics ($R^2 = 0.970$ and $RMSE = 0.46$) for the cultivar RB867515 and ($R^2 = 0.940$ and $RMSE = 0.69$) for the cultivar CVSP7870.

Keywords: agro-model; cultivares; canopy; remote sensing; artificial intelligence.

Resumo

A cana-de-açúcar ocupa grande escala territorial no mundo e busca constantemente por mecanismos para monitorar os nutrientes no ciclo de produção da cultura, utilizando métodos não destrutivos. O estudo com objetivo estimar o teor de nitrogênio na folha da cana-de-açúcar foi desenvolvido na safra 2021/2022 sobre dois talhões comerciais de sequeiro cultivares (RB867515 = 50,75 ha) e (CVSP7870 = 48,56 ha) na Usina Energética Serranópolis-Goiás, avaliando a eficiência dos índices bioquímicos de vegetação *Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation* (fAPAR) e *Canopy Chlorophyll Content* (CCC) processados utilizando modelo de transferência de radiação RTM PROSAIL, comparados aos índices *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Green Normalized Difference Vegetation Index* (GNDVI), processados utilizando modelos matemáticos e razão de bandas. Ambos, baseados em série temporal de dados Sentinel-2 como variáveis de entrada. A validação do Agro-Modelo ocorreu através de análise de tecido foliar coletada em sete avaliações intercaladas durante o período de permanência da cultura no campo. Foi evidenciado a funcionalidade dos quatro índices, destacando o índice bioquímico fAPAR sob a ótica da estatística descritiva ($R^2 = 0,970$ e $RMSE = 0,46$) para o cultivar RB867515 e ($R^2 = 0,940$ e $RMSE = 0,69$) para o cultivar CVSP7870.

Palavras chave: agro-modelo; cultivares; dossel; sensoriamento remoto; inteligência artificial.

DOI: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2025.006>

Cite this article:

Filho, J. N. S., Pereira, D. E. P., & Noronha, A. S. R. (2025). Estimativa do conteúdo de nitrogênio na cana-de-açúcar baseado em índices de vegetação derivados de dados Sentinel-2. *Scientia Agropecuaria*, 16(1), 61-70.

1. Introdução

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) é uma planta semi-perene de metabolismo fotossintético C4, cujo rendimento agroindustrial é função de fatores primários de produção, tais como genética do cultivar, ambiente edafoclimático, nutrientes e energia solar captada pelo dossel ao longo do ciclo de produção (Ribeiro et al., 2013).

Do ponto de vista fisiológico, a nutrição da planta é função da integração de atividades bioquímicas e biofísicas, sendo o conhecimento da marcha de absorção de nutrientes de uma cultura, um fator de produção que orienta o estabelecimento da quantidade de nutrientes requeridos em cada estágio fenológico do ciclo de produção (Cremonesi et al., 2019).

No contexto da nutrição vegetal da cana-de-açúcar, o nitrogênio é o elemento absorvido em maior quantidade, fazendo parte da molécula de clorofila e de funções fundamentais no desenvolvimento da planta, uma vez que é constituinte de proteínas e ácidos nucleicos com participação em diversos processos bioquímicos e enzimáticos (Prado, 2021). Sendo exigido de 1,0 a 1,5 kg por tonelada de colmos produzidos, razão pela qual se destaca no custo de produção (Quaggio et al., 2022). Caracterizando-o como essencial na nutrição vegetal e indispensável para o bom desenvolvimento das culturas, uma vez que é um elemento fundamental no metabolismo vegetal por participar diretamente na biossíntese de proteínas e clorofilas (Andrade et al., 2003).

Contudo, a determinação dos teores de nutrientes nas plantas ocorre predominantemente baseado em operações pontuais em campo para coleta de amostras de tecido foliar utilizando métodos destrutivos, além de demandar tempo de espera para obtenção do resultado da análise em laboratório. Nesse sentido, o uso de métodos não destrutivos no monitoramento e estimativa do teor de nitrogênio na folha (TNF) da cana-de-açúcar baseado em sensoriamento remoto orbital e conceitos de eficiência do uso da radiação, permite detectar de forma precisa, alterações morfológicas e fisiológicas a nível de dossel vegetal que podem ser caracterizadas com bioindicadores do *status* do nutriente nas diferentes fases de crescimento e desenvolvimento da cultura, além de gerar informações para orientar o manejo da cultura, baseado na quantidade necessária de nitrogênio para obtenção de altos rendimentos com baixo custo de produção, associada a uma agricultura ambientalmente sustentável e economicamente viável.

Em geral, os métodos para determinar o TNF baseados em sensoriamento remoto podem ser divididos em quatro principais abordagens: (1) Modelos de Regressão parametrizada baseado em índices de vegetação (VIs), (2) Modelos empíricos usando estatística multivariada (MS), (3) Modelos de Transferência de Radiação (RTM) baseados em índices biofísicos de vegetação e (4) Métodos híbridos combinando RTM e ML (Berger et al., 2020; Verrelst et al., 2019).

A complexidade do uso de dados do sensoriamento remoto na estimativa do *status* nutricional das plantas varia em função da qualidade dos dados espectrais obtidos pelos sensores passivos, algoritmo de processamento e estágio fenológico da cultura, exigindo a calibração dos dados dos sensores com base em dados de

campo (Martins et al., 2021), estando a absorção da radiação pela vegetação diretamente relacionada com conteúdo de clorofila no dossel, fluxos de carbono e água (Ali et al., 2020).

Conforme Bassi et al. (2018) composto como a clorofila classificada como indicador bioquímico está relacionado ao conteúdo de N nas plantas e também ao percentual de radiação solar absorvida pelo dossel da vegetação para incrementar a Produção Primária Bruta através da fotossíntese e sequestro do CO₂ atmosférico.

Diante do exposto, o estudo teve por objetivo avaliar a eficiência dos índices dos índices bioquímicos de vegetação (fAPAR e CCC) comparados aos índices de diferenças normalizadas (NDVI e GNDVI) na estimativa do teor de nitrogênio na cana-de-açúcar a nível de dossel.

2. Metodologia

O estudo foi realizado na safra 2021/2022 em dois talhões comerciais de cultivares cana-de-açúcar RB867515 (50,75 ha) e CVSP7870 (48,56 ha) na Fazenda 120 - Usina Energética Serranópolis-Goiás (Figura 1). O cultivo ocorreu em sequeiro, representa cana-soca em 3º corte no ciclo de produção com manejo padrão-usina e colheita mecanizada de cana-crua realizada em meio de safra.

A adubação de socaria (600 kg/ha fórmula NPK 13-00-21) foi aplicada 30 dias após a última colheita e enterrada no solo a 5,0 cm de profundidade, utilizando adubadeira com disco de corte, o calcário dolomítico foi aplicado a lanço (2,0 t/ha) e os micronutrientes aplicados em adubação foliar com aeronave aos 150 dias após a última colheita.

2.1 Processamento de imagens Sentinel-2

Os satélites Sentinel-2 pertencem a Agência Espacial Europeia (ESA), sendo as imagens caracterizadas como *Open-data*. As imagens Sentinel-2 obtidas através do sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI) conjugam 13 bandas espectrais (Tabela 1) são corrigidas em nível 2A de reflectância, calibração geométrica e ortorectificação. A série temporal de imagens orbita/ponto 22KCE, sem nuvem ou névoa sobre a área do experimento é apresentada na Tabela 2.

O processamento da série temporal de imagens Sentinel-2 foi realizado no *software Sentinel Application Platform* (SNAP), utilizando o modelo de transferência de radiação RTM PROSAIL para determinar os índices bioquímicos de vegetação fAPAR e CCC.

Os modelos de transferência de radiação (RTMs) se orientam nos princípios físicos que descrevem a variação da reflectância espectral/direcional do dossel em função das características da copa das

folhas e do solo, gerando uma conexão entre os parâmetros biofísico e bioquímico baseados na intensidade de resposta espectro-morfofisiológica refletida pelo dossel (Houborg et al., 2007). O RTM PROSAIL é resultante da combinação do modelo de propriedades óticas da folha (Leaf Optical Properties Model – PROSPECT) com o modelo de transferência de radiação a nível de

dossel (Canopy Bidirectional Reflectance Model – SAIL) caracterizando-se como um algoritmo constituído com arquitetura de rede neural composta por um layer com 11 dados de entrada normalizados, conjugando 8 bandas espectrais Sentinel-2, 3 ângulos de visadas e 5 neurônios com funções de transferência sigmoideal integrado no software SNAP (Weiss et al., 2020) (Figura 2).

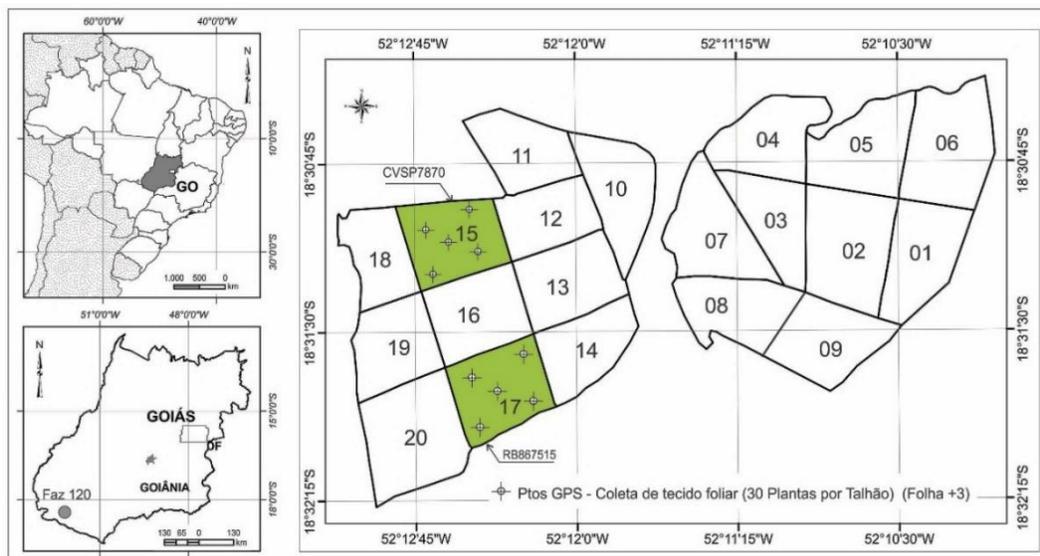


Figura 1. Área de estudo. Fazenda120, Usina Energética Serranópolis, Goiás.

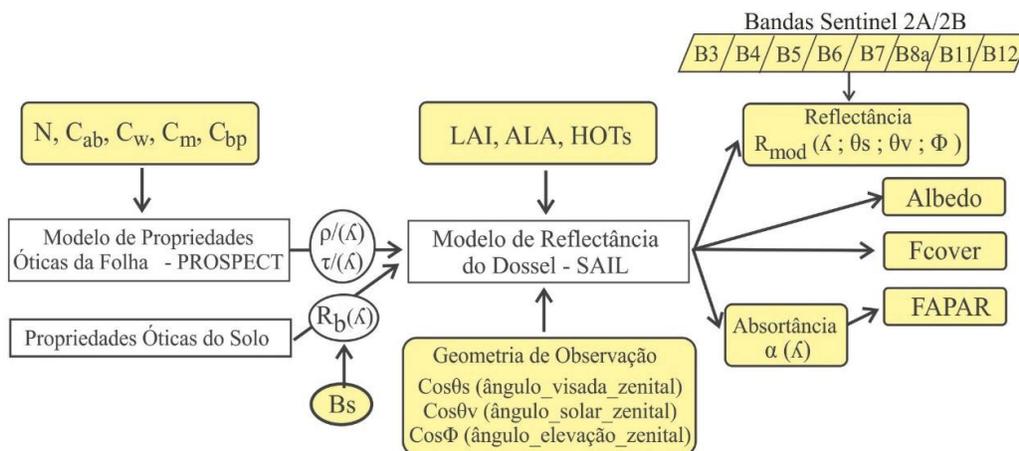


Figura 2. Visão geral do processamento de índices biofísicos no RTM PROSAIL.

Tabela 1

Características das bandas espectrais MSI - Satélite Sentinel-2

Banda	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8a	B9	B10	B11	B12
Centro (nm)	443	490	560	665	705	740	783	842	865	945	1375	1610	2190
Res. Esp. (m)	60	10	10	10	20	20	20	10	20	60	60	20	20

Fonte: <https://earth.esa.int/web/sentinel/home>

Tabela 2

Data das imagens Sentinel-2 utilizadas no estudo – Dia Após Corte (DAC)

DAC	126	156	181	216	257	277	312
IMAGEM	26/11/21	26/12/21	20/01/22	24/02/22	05/04/22	25/04/22	30/05/22

2.2 Fração da Radiação fotossinteticamente Ativa Absorvida (fAPAR – *Fraction of Absorbed Photosyn-thetically Active Radiation*)

O índice bioquímico fAPAR corresponde ao percentual de radiação solar absorvida pelo dossel vegetal para realização da fotossíntese e consequentemente, sequestrar o dióxido de carbono (CO₂) atmosférico para incrementar a biomassa da cana-de-açúcar.

No índice fAPAR, a intensidade de resposta espectro-morfofisiológica é quantificada numa escala que varia de 0,0 a 1,0 onde o valor 0,0 representa áreas sem cobertura vegetal e 1,0 áreas com vegetação em crescimento ativo.

2.3 Conteúdo de clorofila no dossel (*Canopy Chlorophyll Content - CCC*)

A clorofila é o principal pigmento fotossintético das folhas, desempenhando um papel fundamental na conversão da radiação solar em energia química armazenada, razão pela qual o conteúdo de clorofila e o índice de área foliar são importantes bioindicadores da estrutura e características bioquímicas do dossel vegetal, incluindo deficiência de nitrogênio. (Houborg et al. 2007). Sendo a estimativa do CCC determinado ao nível de dossel pelo modelo RTM PROSAIL, uma função de transferência entre a multiplicação o teor de clorofila contido na folha (Clorofila a+b) pelo índice de área foliar (IAF) (Houlès et al., 2001).

O índice bioquímico CCC é uma adaptação do MTCI (*MERIS Terrestrial Chlorophyll Index*) utilizando as bandas do red-edge (B4: 665 nm, B5: 705 nm e B6: 740 nm) para medir a refletância espectral das folhas no dossel vegetal e o montante de clorofila. Diante do desenvolvimento da tecnologia de sensoriamento remoto a estimativa do CCC usando dados de satélite com várias resoluções temporais e espaciais passou a ter garantias de maior acurácia nas aplicações agrícola (Darvishzadeh et al., 2012; Clevers e Kooistra, 2012). Conforme Delloye et al. (2018), estudos com foco métodos baseados RTM PROSAIL para estimatimar índice de área foliar (IAF), Conteúdo de Clorofila na Folha (Ca+b) e Conteúdo de Clorofila no dossel (CCC) pode ter sua acurácia melhorada usando uma relação empírica que exige uma amostra de medições de campo e de laboratório.

2.4 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)

Uma vez que o nitrogênio faz parte da molécula de clorofila, a intensidade de resposta espectral do NDVI permite identificar o estado nutricional das plantas, especialmente em relação ao nitrogênio

(Coelho et al.,2018; Zhao et al., 2018), sendo considerado o índice espectral de vegetação mais popular devido a sua capacidade de delineamento da vegetação associado ao estresse hídrico como importante contribuição para agricultura e outras formas de uso e ocupação do solo (Stamford et al., 2023).

O NDVI foi proposto inicialmente por Rouse et al. (1973), em que o cálculo do NDVI envolve a refletância na faixa do espectro eletromagnéticas do vermelho (600 nm a 700 nm) e infravermelho próximo (700 nm a 1.300 nm) Eq. 1, em que B8: Banda 8 Near Infrared (0,78 nm a 0,90 nm) e B4 – Banda 4 Red (0,65 nm a 0,68 nm).

$$NDVI = \frac{B8-B4}{B8+B4} = \frac{\rho_{842}-\rho_{665}}{\rho_{842}+\rho_{665}} \quad (\text{Eq. 1})$$

2.5 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada Verde - GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*)

O índice GNDVI foi proposto por Gitelson et al. (1996) (Equação 2) é resultante de experimentos onde os autores descobriram que a banda Verde (520 nm – 630 nm) é sensível a toda a faixa de concentração de clorofila foliar (0,3-45 µg/cm²), enquanto a banda Vermelha não é sensível a 3-5 µg/cm² concentração de clorofila.

Conforme Gitelson & Merzlyak (1998) o GNDVI é um indicador da concentração de clorofila na vegetação (Eq.2; Em que B8: Near Infrared (0,78 nm a 0,90 nm) e B3 – Green (0,54 nm a 0,57 nm)) e devido a alta refletância na faixa verde do espectro (540 a 570 nm). Por conseguinte, foi observado que a concentração de clorofila tinha maior correlação com o inverso da refletância na banda Verde em comparação à banda Vermelha, determinando que a sensibilidade do GNDVI é cinco vezes maior para condições estressadas e senescentes de vegetação em comparação ao NDVI.

$$GNDVI = \frac{B8-B3}{B8+B3} = \frac{\rho_{842}-\rho_{560}}{\rho_{842}+\rho_{560}} \quad (\text{Eq. 2})$$

A intensidade de resposta espectral gerada pelos índices NDVI e GNDVI podem variar de -1 a +1, sendo que os valores negativos e próximos a zero representam pouca vegetação ou baixo vigor vegetativo, enquanto os valores positivos e próximos a +1 representam maior vigor vegetativo da cultura (Liu, 2006).

Ambos índices (NDVI e GNDVI) foram processados utilizando o *software* SNAP na ferramenta "Vegetation Radiometric Indices".

2.6 Agro-Modelo de estimativa do teor de nitrogênio na folha da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar denominada cana-soca é cultivada num ciclo médio de 12 meses. Sendo as coletas de

tecido foliar da cana-de-açúcar para análise em laboratório (Teor de Nitrogênio na Folha) a ser correlacionada com dados Sentinel-2, realizadas nos estágios fenológicos de Perfilamento, Crescimento de colmos e Maturação de colmos (Figura 3). A validação do Agro-Modelo de regressão linear simples de previsão de nitro-gênio na cana-de-açúcar com permite avaliar a acurácia na correlação entre as variáveis bioquímicas (fAPAR e CCC) e variáveis por diferença normalizada (NDVI e GNDVI). Também mostra como estas variáveis espectro-morfofisiológicas derivados de imagens Sentinel-2 e dados nutricionais TNF dos cultivares de cana-de-açúcar (RB867515 e CVSP7870) se relacionam, e entender como uma variável influencia no comportamento da outra variável.

2.7 Análise estatística multivariada

As análises da concordância entre dados (fAPAR, CCC, NDVI e GNDVI) obtidos mediante processamento de imagens Sentinel-2 e o balanço nutricional da cana-de-açúcar baseado em dados de análise de tecido foliar realizadas em laboratório, considerou a variância (ANOVA) a 5% de probabilidade ($p < 0,05$) e métricas estatísticas (R^2 - Coeficiente de determinação e RMSE – Raiz quadrada do erro médio) para determinar a significância estatística das hipóteses. Os processamentos estatísticos ocorreram utilizando o *software Open-Source JASP versão 0.18.3 (2024)*.

2.8 Procedimento metodológico

A análise de correlação entre a série de valores multitemporais (fAPAR, CCC, NDVI e GNDVI) obtidos mediante processamento de dados Sentinel-2 e o teor de nitrogênio presente nas folhas dos cultivares de cana-de-açúcar (RB867515 e CVSP7870), determinado através de análise de tecido foliar em laboratório, considerou o ciclo de produção do canavial durante a safra 2021/2022 contemplando coleta de folhas nos estádios feno-

lógicos de Crescimento e alongamento de colmos e Maturação de colmos (Figura 3), sendo as investigações realizadas em três etapas sequenciais:

Etapa I - Sistematização da base de dados: construção da máscara vetorial dos talhões considerando um *buffer* de 20 metros intra-talhões para eliminar efeitos de bordas na média ponderada da intensidade de resposta espectral (fAPAR, CCC, NDVI e GNDVI) dentro do talhão e estruturação do plano de coleta multitemporal da folha +3 da cana-de-açúcar (diagrama de Kuijper), sendo a coleta de tecido foliar em cada talhão, representada através de cinco sub-amostras, cujos pontos foram georreferenciados espacialmente para formar uma amostra composta representativa de 30 folhas por talhão, para análise dos teores de macronutrientes em laboratório.

Etapa II - Coletas de tecido foliar da cana-de-açúcar para análise do balanço nutricional, ocorrendo com intervalo regular de cerca de 30 dias. Especificamente, um dia após a passagem do satélite Sentinel-2 sobre a área de estudo, considerando a necessidade de obtenção de imagens sem nuvens ou névoa e também a sincronização da resposta espectral dos processamentos (fAPAR, CCC, NDVI e GNDVI) com o teor de nitrogênio nas folhas (g/kg). Este último, determinado em laboratório de análise de tecido foliar.

Os valores obtidos pelo processamento da série temporal dos índices de vegetação em abordagem, representam a média ponderada da intensidade de resposta espectro-morfofisiológica das plantas de cana-de-açúcar dentro do limite geográfico definido pela máscara vetorial de cada talhão.

Etapa III - Análise de correlação entre teores de nitrogênio (g/kg) presentes no tecido foliar da cana-de-açúcar dos cultivares (RB867515 e CVSP7870) e parâmetros bioquímicos (fAPAR e CCC) e os dados espectrais gerados pelos índices de diferenças normalizadas (NDVI e GNDVI).

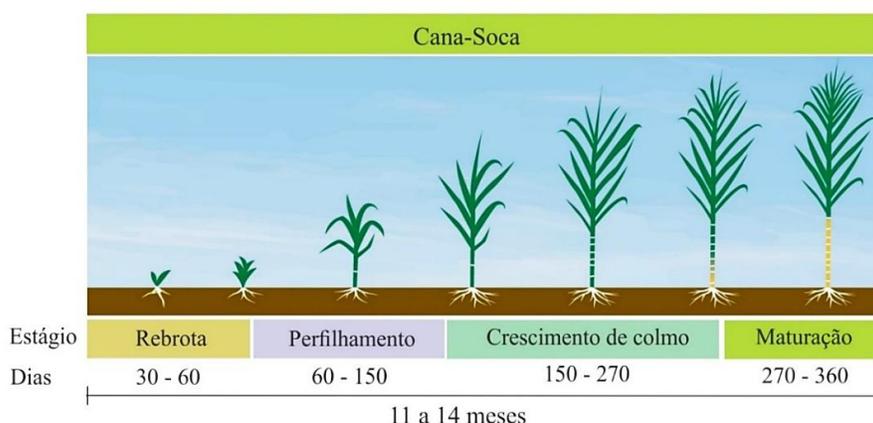


Figura 3. Ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

3. Resultados e discussão

3.1 Análise Estatística Descritiva

As análises das **Tabelas 3 e 4** apresentam as intensidades de respostas espectro-morfofisiológicas geradas pelos índices de vegetação (fAPAR, CCC, NDVI e GNDVI) processados com base em dados Sentinel-2 e teor médio de nitrogênio foliar (TNF) dos cultivares de cana-de-açúcar determinado através de análise de tecido foliar em laboratório, destaca o cultivar RB867515 com TNF = 18,9 g/kg e o cultivar CVSP7870 com TNF = 19,6 g/kg, sinalizando para o cultivar CVSP7870 como mais eficiente na absorção do nitrogênio para atender as necessidades fisiológicas da planta.

Nesta perspectiva de análise de dados (**Tabelas 3 e 4**) sob a ótica da eficiência no uso da radiação para realização da fotossíntese pela vegetação, a parametrização do índice fAPAR sinaliza para o cultivar CVSP7870 como tendo maior capacidade de sequestro de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico para Produção Primária Bruta da cana-de-açúcar (Biomassa) e sacarose em relação ao cultivar RB867515.

Os valores máximos fAPAR obtidos no estudo da Usina Energética Serranópolis – Goiás pelos cultivares RB867515 (fAPAR = 0,7335) e CVSP7870 (fAPAR = 0,8574) são similares aos valores máximos fAPAR encontrados por **Júnior et al. (2012)** em estudo com cana-de-açúcar no município de Rio Largo – Alagoas, com os cultivares RB971755 (fAPAR = 0,730) e RB98710 (fAPAR = 0,880).

3.2 Validação do Agro-Modelo linear de predição de nitrogênio na cana-de-açúcar

Destaca-se alta correlação entres dados fAPAR e o teor de Nitrogênio (N) nas folhas dos cultivares de

cana-de-açúcar (RB67515 e CVSP7870) em sete avaliações multitemporais realizadas durante o período de permanência da cultura no campo, sob a ótica das métricas estatísticas descritivas multifinalitárias ($R^2 = 0,97$ e $RMSE = 0,46$ g/kg e $\rho < 0,001$) e ($R^2 = 0,94$ e $RMSE = 0,70$ g/kg e $\rho < 0,001$) (**Figuras 4 e 5**), garantindo que 97% e 94% da variância foi explicado pela variável dependente, identificando uma relação funcional que garante a eficácia deste índice como variável de entrada no Agro-Modelo de estimativa do Nitrogênio na cana-de-açúcar e conseqüentemente, orientar a prescrição de adubação nitrogenada suplementar ampliando a sustentabilidade econômica e ambiental na cultura da cana-de-açúcar. Os valores de Teor de Nitrogênio Foliar média 18,9 g/kg (RB867515) e 19,6 g/kg (CVSP7870) estão adequados aos níveis de suficiência definidos para o equilíbrio nutricional da cultura (18 a 25 g/kg) (**Vitti et al., 2016**).

A análise de eficiência dos quatro índices de vegetação avaliados no Agro-Modelo, sob a ótica das métricas estatísticas (coeficientes de determinação - R^2 , e Raiz Quadrada do Erro Médio - RMSE), permitiu delinear por ordem decrescente de grandeza o índice que apresentou os parâmetros mais robustos como variáveis de entrada na modelagem de estimativa do teor de nitrogênio na folha da cana-de-açúcar: fAPAR > NDVI > GNDVI > CCC. No que concerne a métricas estatísticas baseadas em coeficiente de determinação, estudos realizados por **Reyes-Trujillo et al. (2021)** sobre a estimativa da Conteúdo de Nitrogênio no Dossel (CCC) da cana-de-açúcar a partir de dados espectrais de reflectância foliar, destacam que encontraram modelos de predição em níveis aceitáveis (R^2 entre 0,50 e 0,75) e bons (R^2 maior que 0,75).

Tabela 3

TNF na folha +3 do cultivar de cana-de-açúcar RB867515

	Dias Após Corte							Estatística		
	126	156	181	216	257	277	312	Média	DP	CV(%)
TNF (g/kg)	24,1	18,0	16,8	18,8	17,8	18,8	18,1	18,9	2,21	11,7
fAPAR	0,342	0,650	0,734	0,604	0,649	0,664	0,669	0,617	0,12	19,1
CCC*	34,61	85,51	112,51	77,26	94,38	92,78	74,00	81,58	22,50	27,58
NDVI	0,421	0,713	0,744	0,699	0,784	0,743	0,691	0,69	0,11	16,31
GNDVI	0,423	0,651	0,666	0,653	0,674	0,679	0,625	0,62	0,08	13,43

*(mg/m²); DP: Desvio Padrão e CV (%): Coeficiente de Variação.

Tabela 4

TNF na folha +3 do cultivar de cana-de-açúcar CVSP7870

	Dias Após Corte							Estatística		
	126	156	181	216	257	277	312	Média	DP	CV(%)
TNF (g/kg)	25,2	19,0	18,0	21,1	18,3	18,9	16,8	19,6	2,58	13,2
fAPAR	0,416	0,797	0,857	0,747	0,791	0,782	0,736	0,732	0,13	18,3
CCC	56,29	145,78	112,51	213,73	132,68	151,52	146,72	137,03	43,76	31,93
NDVI	0,520	0,805	0,822	0,790	0,822	0,805	0,724	0,76	0,10	13,37
GNDVI	0,491	0,710	0,711	0,700	0,721	0,711	0,636	0,67	0,08	11,54

*(mg/m²); DP: Desvio Padrão e CV (%): Coeficiente de Variação.

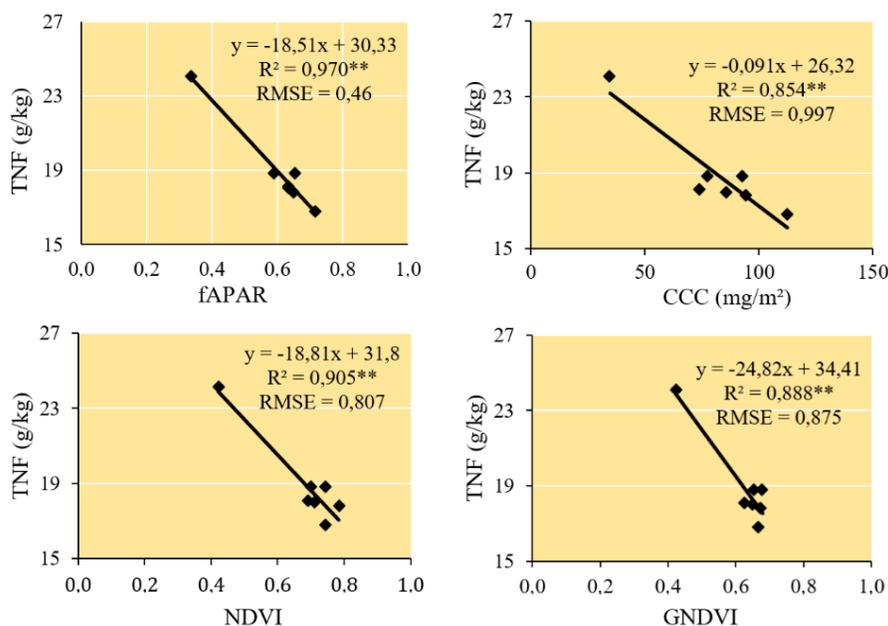


Figura 4. Correlação entre TNF da cana-de-açúcar (RB867515) e os quatro índices. ** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste de Tukey.

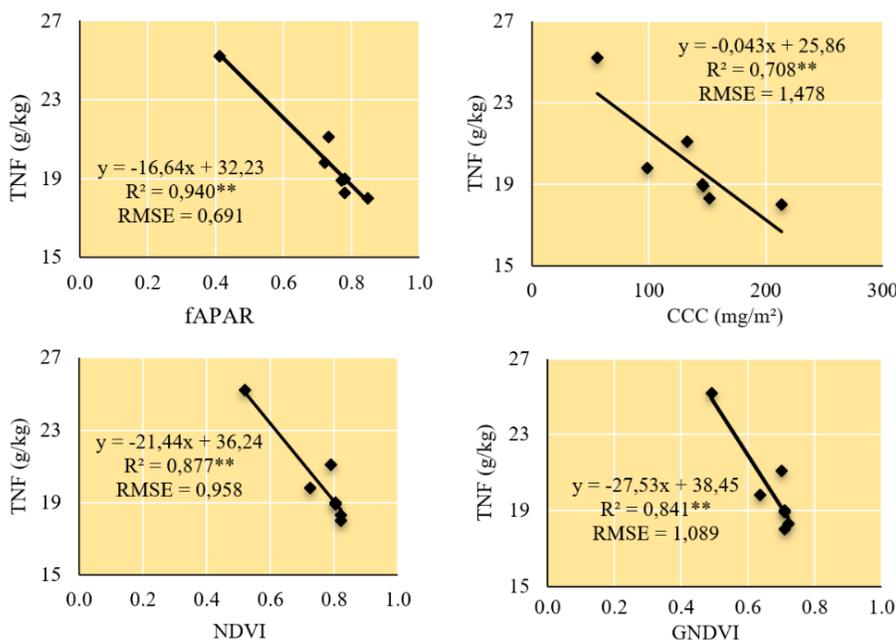


Figura 5. Correlação entre TNF da cana-de-açúcar (CVSP7870) e os quatro índices. ** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Portanto, os valores das métricas estatísticas obtidas no estudo pelos quatro índices de vegetação avaliados pelo Agro-Modelo de predição de nitrogênio na folha da cana-de-açúcar podem ser considerados superiores aos encontrados por Martins et al. (2021) em estudos realizados em três áreas experimentais em São Paulo, utilizando modelo de predição do conteúdo

de nitrogênio na folha da cana-de-açúcar, em sete cultivares, obtiveram $R^2 = 0,52$ e $RMSE = 1,48$ g/kg. Os teores de Nitrogênio (g/kg) na folha dos cultivares de cana-de-açúcar RB867515 e CVSP7870, obtidos no estudo realizado na Usina Energética Serranópolis – Goiás, também foram superiores aos valores encontrados por Barros et al. (2022) quando utilizaram regressão linear para

processamento de dados espectrais obtidos utilizando o sensor hyperspectral *FieldSpec3* e dados de tecido foliar (coleta de 10 folhas em cada plot) em seis cultivares de cana-soca de 3º e 4º corte, em três áreas de cana-de-açúcar da usina Raisen, em áreas localizadas nos municípios de Jaú, Piracicaba e Santa Maria da Serra, ambos no estado de São Paulo, obtiveram ($R^2 = 0,50$ e $RMSE = 1,67$ g/kg). No que concerne ao teor de N na folha (g/kg) dos cultivares de cana-de-açúcar (RB867515 e CVSP7870) obtidos no estudo realizado na Usina Energética Serranópolis - Goiás, excetuando o Nitrogênio (N), foi superior aos valores encontrados por **Calheiros et al. (2011)** em experimento realizado no município de Rio Largo - Alagoas, com os cultivares de cana-de-açúcar RB867515 e RB92579, quando obtiveram respectivamente, N (20,8) e N (22,9). Ambos, cana-soca de 2º corte.

3.3 Radiação Solar Absorvida pela cana-de-açúcar

As interpretações dos dados obtidos neste estudo com os cultivares de cana-de-açúcar CVSP7870 e RB867515, também indicam que o rendimento da cana-de-açúcar (Tonelada de Colmos por Hectare - TCH, Açúcar Total Recuperado - ATR e Tonelada de Açúcar por Hectare - TAH) está diretamente relacionado com a eficiência do uso da radiação (EUR) a partir da capacidade de conversão da Radiação Solar Absorvida (RSA) em fitomassa (**Equações 3 e 4**) que se apoiam no conceito de eficiência do uso da luz estabelecido por **Monteith (1977)** quando afirma que o volume de Produção Primária Bruta (PPB) está linearmente relacionado com o montante de Radiação Solar Absorvida (RSA)

pela vegetação através da fotossíntese durante a permanência da cultura no campo.

$$PPB = TCH = EUR \sum_{dia=1}^{365} (fAPAR \times RFA) \quad (\text{Eq.3})$$

$$RSA = fAPAR \times RFA \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que: Radiação Fotossinteticamente Ativa - RFA (MJ/m^2) como sendo 44% da RG no período de 24 horas (Custódio, Da Silva e Dos Santos, 2021), RG - Radiação solar global incidente ($\text{MJ/m}^2/\text{dia}$) obtida por estações meteorológicas **INMET (2022)**, fAPAR - Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (%) e EUR - Eficiência do uso da Radiação (TCH/MJ).

A **Tabela 5** reporta o rendimento agroindustrial (TCH, ATR e TAH) no 3º Corte (Safrá 2021/2022) pelos talhões de cultivares de cana-de-açúcar (RB867515 e CVSP7870), somatório RSA (MJ/m^2) estimados em sete avaliações inferidas sobre cada um dos talhões durante o monitoramento da cultura no campo e Eficiência do uso da radiação (EUR) na Usina Energética Serranópolis - Goiás.

A análise da **Tabela 5** sob a ótica da eficiência da atividade fotossintética para produção de fotoassimilados, mostra através do valor acumulado RSA que o cultivar de cana-de-açúcar RB867515 absorveu menos $9,15 \text{ MJ/m}^2$ de radiação em relação ao cultivar CVSP7870, além de afirmar que o primeiro utilizou $2,18 \text{ MJ/m}^2$ para produzir uma tonelada de colmos viáveis, enquanto o segundo, necessitou de apenas $1,918 \text{ MJ/m}^2$.

A **Figura 6** reporta a curva de radiação solar absorvida (RSA MJ/m^2) pelos cultivares (CVSP7870 e RB867515) como forma de ilustrar o cescimento e desenvolvimento da cultura no campo.

Tabela 5

Rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar e Eficiência do uso da luz para produção de fotoassimilados (Sacarose)

Cultivar	Área (ha)	TCH	ATR	TAH	Σ RSA (MJ/m^2)	EUR (TCH)
RB867515	50,75	98,48	153,69	15,14	45,20	2,18 MJ
CVSP7870	48,56	104,27	158,13	16,49	54,35	1,98 MJ

Fonte: Relatório Energética Serranópolis - Goiás (Safrá 2021/2022).

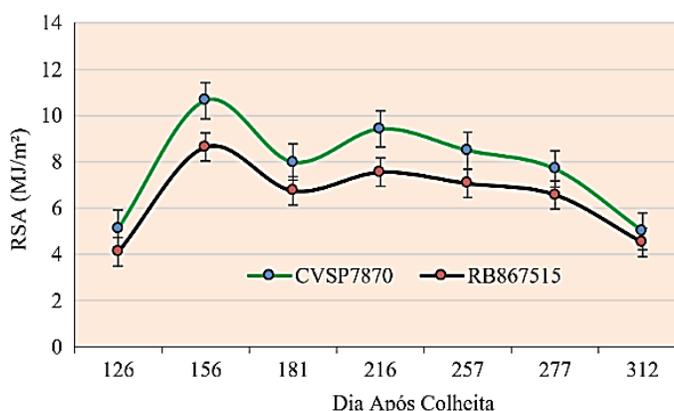


Figura 6. Curva RSA (MJ/m^2) dos cultivares cana-de-açúcar CVSP7870 e RB867515.

A interpretação das curvas RSA no ambiente edafoclimático da Energética Serranópolis-Goiás destaca o cultivar CVSP7870 com maior capacidade de absorção de luz solar para realizar fotossíntese e consequentemente sequestrar dióxido de carbono (CO₂) atmosférico para produzir biomassa (folhas, ponteiros e colmos) e produção de sacarose (açúcar) em relação ao cultivar RB867515 (Figura 6).

Portanto, garantindo ao primeiro, predicados de um material genético que deve ser avaliado no plano estratégico varietal quando da renovação do canavial, além da contribuição do mesmo para os serviços ambientais de descarbonização da atmosfera que a cana-de-açúcar presta ao planeta.

4. Conclusões

O estudo reporta o potencial das geotecnologias *Open-Data* (Imagens Sentinel-2) e *Open-Source* (*software Sentinel Application Platform*) no monitoramento do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar em escala regional de campo propiciando ao segmento sucroenergético, a geração de grande volumes de dados, a baixo custo em curto espaço de tempo e utilizando método não destrutivo.

O Agro-Modelo para estimativa do teor de nitrogênio na cultura da cana-de-açúcar, destacou a acurácia e eficiência do índice bioquímico de vegetação FAPAR pela alta capacidade funcional e operacionalidade para orientar a recomendação de fertilização nitrogenada suplementar, comparado aos demais índices avaliados CCC, NDVI e GNDVI, propiciando maximização de produtividades associadas à redução de doses (kg/ha) e custos da adubação nitrogenada, além de contribuir para o desenvolvimento de uma agricultura canavieira mais sustentável.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Usina Energética Serranópolis-Goiás pela disponibilidade de dados agroindustriais da cana-de-açúcar e suporte logístico durante o estudo.

Conflitos de interesses

Os autores declaram não existir conflitos de interesses.

ORCID

J. N. S. Filho  <https://orcid.org/0000-0003-4247-0812>
D. E. P. Pereira  <https://orcid.org/0009-0006-2413-6211>
A. S. R. Noronha  <https://orcid.org/0000-0002-9227-6973>

Referências bibliográficas

Ali, A.M., Darvishzadeh, R., Skidmore, A., Gara, T. W., O'Connor, B., Roesli, C., Heurich, M., & Paganini, M. (2020). Comparing methods for mapping canopy chlorophyll content in a mixed

mountain forest using sentinel-2 data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 87. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102037>

- Andrade, J. B., Ferrari Junior, E., & Possenti, R. A. (2003). Seleção de 39 variedades de cana-de-açúcar para alimentação animal. *Brazilian of Journal Veterinary Research Animal Science*, 40(4), 287-296. <https://doi.org/10.1590/S1413-95962003000400008>
- Barros, P. P. S., Fiorio, P. R., Demattê, J. A. M., Martins, J. A., Montezano, Z. F., & Dias, F. L. F. (2022). Estimation of leaf nitrogen levels in sugarcane using hyperspectral models. *Ciência Rural, Santa Maria*, 52(7), e20200630. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200630>
- Bassi, M., Menossi, M., & Mattiello, L. (2018). Nitrogen supply influences photosynthesis establishment along the sugarcane leaf. *Sci. Rep.*, 8(1) 2327, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20653-1>
- Berger, K., Verrelst, J., Feret, J.-B., Wang, Z., Wocher, M., Strathmann, M., Danner, M., Mauser, W., & Hank, T. (2020). Crop nitrogen monitoring: Recent progress and principal developments in the context of imaging spectroscopy missions. *Remote Sensing of Environment*, 242, 111758. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111758>
- Calheiros, A. S., Oliveira, M. W., Ferreira, V., Barbosa, G. V. S., Costa, J. P. V., Lima, G. S., & Aristides, E. V. S. (2011). Acúmulo de nutrientes e produção de sacarose de duas variedades de cana-de-açúcar na primeira rebrota, em função de doses de fósforo. STAB. Tecnologia/Pesquisa, p. 26-29.
- Clevers, J. G. P. W., & Kooistra, L. (2012). Using hyperspectral remote sensing data for retrieving canopy chlorophyll and nitrogen content. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. S*, 574-583.
- Coelho, A.P., Rosalen D. L., & Faria, R. T. (2018). Vegetation indices in the prediction of biomass and grain yield of white oat under irrigation levels. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 48(2), 109-117. <https://doi.org/10.1590/1983-40632018v48i5123>.
- Cremonesi, M. V., Ramalho, B., Golfetto, P., Kreпки, L. S., & Pauletti, V. (2019). Marcha de absorção, taxa de acúmulo e exportação de micronutrientes e alumínio pelo tabaco (*Nicotiana tabacum* L.). *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 18(1), 13-23. <https://doi.org/10.5965/223811711812019013>.
- Darvishzadeh, R., Matkan, A. A., & Dashti Ahangar, A. (2012). Inversion of a radiative transfer model for estimation of rice canopy chlorophyll content using a lookup-table approach. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens*, 5, 1222-1230.
- Delloye, C., Weiss, M., & Defourny, P. (2018). Retrieval of the canopy chlorophyll content from sentinel-2 spectral bands to estimate nitrogen uptake in intensive winter wheat cropping systems. *Remote Sensing of Environment*, 216, 245-261. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.037>
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ.*, 58, 289-298. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)
- Gitelson, A. A., & Merzlyak, M. N. (1998). Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. *Adv. Space Res.*, 22, 689-692.
- Houborg, R., Soegaard, H., & Boegh, E. (2007) Combining vegetation index and model inversion methods for the extraction of key vegetation biophysical parameters using Terra and Aqua MODIS reflectance data. *Remote Sens Environ*, 106, 39-58. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.016>
- Houlès, V., Mary, B., Machel, J. M., Guérif, M., & Moulin, S. (2001). Do crop characteristics available from remote sensing allow to determine crop nitrogen status? In G. Grenier, & S. Blackmore (Eds.), *3rd European Conference on Precision Agriculture* (pp. 917-922). Montpellier: Agro Montpellier, Instituto Nacional de Meteorologia - INMET: Banco de dados meteorológicos. <https://tempo.inmet.gov.br/>

- JASP Team (2024). Version 0.18.3 [Computer software]. <https://jasp-stats.org/>
- Junior, R. A. F., De Souza, J. L., Lyra, G. B., Teodoro, I., Dos Santos, M. A., & Porfírio, A. C. S. (2012). Crescimento e fotossíntese de cana-de-açúcar em funções de variáveis biométricas e meteorológicas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(11), 1229-1236. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001100012>.
- Liu, W. T. H. (2006). Aplicações de sensoriamento remoto. *Campo Grande*: Ed. UNIDERP, 908 p.
- Martins, J. A., Fiorio, P. R., Silva Barros, P. P., Demattê, J. A. M., Molin, J. P., Cantarella, H., & Neale, C. M. U. (2021). Potential use of hyperspectral data to monitor sugarcane nitrogen status. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 43, e47632. <https://doi.org/10.4025/actasciagr.v43i1.47632>
- Monteith, J. L. (1977). Climate and Efficiency of Crop Production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society London B*, 281, 277-294.
- Prado, R. M. (2021). Introduction to Plant Nutrition. In: Mineral nutrition of tropical plants (pp.1-38) Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71262-4_1
- Quaggio, J. A., Cantarella, H., van Raji B, Otto, R., Penatti, C. P., Rossetto, R., et al. (2022). Cana-de-açúcar. In: Boletim 100: recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: IAC.
- Reyes-Trujillo, A., Daza-Torres, M. C., Galindez-Jamioy, C. A., Rosero-García, E. E., Muñoz-Arboleda, F., & Solarte-Rodríguez, E. (2021). Estimating canopy nitrogen concentration of sugarcane crop using in situ spectroscopy. *Heliyon*, 7(3), e06566, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06566>
- Ribeiro, R. V., Machado, R. S., Machado, E. C., Machado, D. F. S. P., Magalhães Filho, J. R., & Landell, M. G. A. (2013). Revealing drought-resistance and productive patterns in sugarcane genotypes by evaluating both physiological responses and stalk yield. *Experimental Agriculture, Cambridge*, 49, 212-224. <https://doi.org/10.1017/S0014479712001263>
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19750020419>
- Stamford, J. D., Vialet-Chabrand, S., Cameron, I., & Lawson, T., (2023). Development of an accurate low cost NDVI imaging system for assessing plant health. *Plant Methods*, 30, 19. <https://doi.org/10.1186/s13007-023-00981-8>
- Verrelst, J., Malenovsky, Z., Van der Tol, C., Camps-Valls, G., Gastellu-Etchegorry, J. P., Lewis, P., North, P., & Moreno, J. (2019). Quantifying vegetation biophysical variables from imaging spectroscopy data: A review on retrieval methods. *Surveys in Geophysics*, 40(3), 589-629. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9478-y>
- Vitti, G. C., Luz, P. H. C., & Altran, W. S. (2016). Nutrição e Adubação. p. 66-93. In: Santos, F.; Borém A. Cana-de-Açúcar do Plantio à Colheita. Viçosa: UFV.
- Weiss, M., Baret, F., & Sylvain, J. (2020). Sentinel2 ToolBox Level2 Products. V2.0. https://step.esa.int/docs/extra/ATBD_S2ToolBox_V2.0.pdf
- Zhao, B., Duan, A., Ata-Ul-Karim, S. T., Liu, Z., Gong, Z., Zhang, J., Xiao, J., Liu, Z., Qin, A., & Ning, D. (2018). Exploring new spectral bands and vegetation indices for estimating nitrogen nutrition index of summer maize. *European Journal of Agronomy*, 93, 113-125. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.12.006>