RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O
Saber. ISSN: 2675-9128. São Paulo - SP.
Ano VII, v.1 2026 | submissão: 25/09/2026 | aceito: 02/10/2026 | publicação: 07/10/2026

Monitoramento da fertirrigação com vinhaça por imagens ópticas e de radar Sentinel aplicado à produção de cana-de-açúcar

Monitoring vinasse fertigation using Sentinel optical and radar imagery applied to sugarcane production

Monitoreo de la fertirrigación con vinaza mediante imágenes ópticas y de radar Sentinel aplicado a la producción de caña de azúcar

Gustavo Ferreira de Souza
Centro Universitário de Caratinga – UNEC, Curso de Agronomia, Caratinga, Minas Gerais, Brasil.
Cargill Bioenergia, Quirinópolis, Goiás, Brasil.
E-mail: gustsvosalomoni@gmail.com
Formação: Graduação em Geografia, Mestrado em Engenharia Urbana e Doutorado em Geografia.

Resumo:
O sensoriamento remoto tem ampliado as possibilidades de monitoramento agrícola e, neste estudo, avaliamos a aplicação de imagens Sentinel-2 e Sentinel-1 no acompanhamento da fertirrigação com vinhaça em áreas de produção de cana-de-açúcar. A vinhaça, subproduto da fabricação de etanol e açúcar, é rica em matéria orgânica e nutrientes e pode fornecer água e fertilizantes à cultura após a colheita, especialmente durante o período seco. Entretanto, a aplicação insuficiente, excessiva ou desuniforme pode comprometer o desenvolvimento da cana e reduzir a produtividade. Em uma fazenda analisada, a imagem Sentinel-2 de abril de 2019 permitiu identificar efeitos associados à aplicação insuficiente e desuniforme da vinhaça, correspondentes a aproximadamente 21% da área avaliada, ou cerca de 100 ha. Para essa área, estimou-se um impacto de 1.869 toneladas de cana, equivalente a R$ 747.600,00, conforme os parâmetros econômicos adotados no estudo. A análise retrospectiva de uma imagem Sentinel-2 de julho de 2018 indicou setores sem aplicação aparente e elevada desuniformidade espacial. A ocorrência ou ausência de vinhaça foi perceptível nas bandas do visível, enquanto as diferenças de crescimento e estresse da cultura apresentaram relação mais evidente com as bandas de borda vermelha e do infravermelho próximo na imagem de abril de 2019, quando a cana se encontrava em estágio avançado de desenvolvimento. Uma imagem de radar Sentinel-1 de abril de 2019 também foi analisada. Nela, a ausência de vinhaça não foi identificada diretamente, embora seus efeitos sobre o crescimento da cultura pudessem ser interpretados. A avaliação foi ampliada para outros talhões agrícolas e indicou coeficiente de correlação de aproximadamente −0,7 entre o número de colheitas e o índice SAVI, além de identificar falhas de aplicação de vinhaça em 52 talhões. Com base nesses resultados, propomos uma abordagem sistemática de monitoramento da distribuição da vinhaça e do desenvolvimento da cana-de-açúcar por meio de imagens Sentinel-2 e Sentinel-1, com o objetivo de ampliar a eficiência operacional, o controle e a sustentabilidade do processo.

Palavras-chave: cana-de-açúcar; fertirrigação; vinhaça; sensoriamento remoto; Sentinel-2; Sentinel-1; SAVI; NDWI.

Abstract:
Remote sensing has expanded the possibilities for agricultural monitoring, and in this study we evaluate the use of Sentinel-2 and Sentinel-1 imagery to monitor vinasse fertigation in sugarcane production areas. Vinasse, a by-product of ethanol and sugar manufacturing, is rich in organic matter and nutrients and can supply water and fertilizers to the crop after harvesting, particularly during the dry season. However, insufficient, excessive, or uneven application can impair sugarcane development and reduce yield. On one farm analyzed, the Sentinel-2 image

from April 2019 made it possible to identify effects associated with insufficient and uneven vinasse application, affecting approximately 21% of the evaluated area, or about 100 ha. For this area, an impact of 1,869 tonnes of sugarcane was estimated, equivalent to R$ 747,600.00, according to the economic parameters adopted in the study. Retrospective analysis of a Sentinel-2 image from July 2018 indicated sectors with no apparent application and pronounced spatial unevenness. The presence or absence of vinasse was perceptible in the visible bands, whereas differences in crop growth and stress were more clearly related to the red-edge and near-infrared bands in the April 2019 image, when the sugarcane was at an advanced development stage. A Sentinel-1 radar image from April 2019 was also analyzed. In that image, the absence of vinasse was not directly identified, although its effects on crop growth could be interpreted. The evaluation was extended to other agricultural fields and indicated a correlation coefficient of approximately −0.7 between the number of harvests and the SAVI index, while also identifying vinasse application failures in 52 fields. Based on these results, we propose a systematic approach to monitoring vinasse distribution and sugarcane development using Sentinel-2 and Sentinel-1 imagery, aiming to improve the operational efficiency, control, and sustainability of the process.

Keywords: sugarcane; fertigation; vinasse; remote sensing; Sentinel-2; Sentinel-1; SAVI; NDWI.

Resumen:
La teledetección ha ampliado las posibilidades de monitoreo agrícola y, en este estudio, evaluamos la aplicación de imágenes Sentinel-2 y Sentinel-1 en el seguimiento de la fertirrigación con vinaza en áreas de producción de caña de azúcar. La vinaza, subproducto de la fabricación de etanol y azúcar, es rica en materia orgánica y nutrientes y puede aportar agua y fertilizantes al cultivo después de la cosecha, especialmente durante el período seco. Sin embargo, una aplicación insuficiente, excesiva o desigual puede comprometer el desarrollo de la caña y reducir la productividad. En una de las fincas analizadas, la imagen Sentinel-2 de abril de 2019 permitió identificar efectos asociados a la aplicación insuficiente y desigual de vinaza, correspondientes a aproximadamente el 21% del área evaluada, o cerca de 100 ha. Para esta área, se estimó un impacto de 1.869 toneladas de caña, equivalente a R$ 747.600,00, según los parámetros económicos adoptados en el estudio. El análisis retrospectivo de una imagen Sentinel-2 de julio de 2018 indicó sectores sin aplicación aparente y una elevada falta de uniformidad espacial. La presencia o ausencia de vinaza fue perceptible en las bandas del visible, mientras que las diferencias de crecimiento y estrés del cultivo mostraron una relación más evidente con las bandas del borde rojo y del infrarrojo cercano en la imagen de abril de 2019, cuando la caña se encontraba en una etapa avanzada de desarrollo. También se analizó una imagen de radar Sentinel-1 de abril de 2019. En ella, la ausencia de vinaza no se identificó directamente, aunque pudieron interpretarse sus efectos sobre el crecimiento del cultivo. La evaluación se amplió a otras parcelas agrícolas e indicó un coeficiente de correlación de aproximadamente −0,7 entre el número de cosechas y el índice SAVI, además de identificar fallas de aplicación de vinaza en 52 parcelas. A partir de estos resultados, proponemos un enfoque sistemático de monitoreo de la distribución de vinaza y del desarrollo de la caña de azúcar mediante imágenes Sentinel-2 y Sentinel-1, con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa, el control y la sostenibilidad del proceso.

Palabras clave: caña de azúcar; fertirrigación; vinaza; teledetección; Sentinel-2; Sentinel-1; SAVI; NDWI.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O
Saber. ISSN: 2675-9128. São Paulo - SP.
Ano VII, v.1 2026 | submissão: 25/09/2026 | aceito: 02/10/2026 | publicação: 07/10/2026

1. Introdução

A cana-de-açúcar (Saccharum spp., híbrido) é uma planta perene adaptada às regiões tropicais, com elevada capacidade de produzir e armazenar sacarose [1]. O Brasil ocupa posição de destaque na produção mundial da cultura. Na safra 2019/2020, a produção nacional ultrapassou 650 milhões de toneladas [2], correspondendo a mais de 40% do total mundial. A matéria-prima é destinada principalmente à fabricação de açúcar e etanol. Durante décadas, o sistema produtivo esteve associado à queima prévia do canavial, prática com relevantes impactos ambientais. A expansão da colheita mecanizada reduziu essa prática e modificou a gestão dos resíduos gerados. Entre esses resíduos estão o bagaço, de natureza fibrosa, e a vinhaça, efluente líquido com elevada carga orgânica.

Na área de estudo, o processo produtivo inicia-se com o arrendamento de propriedades com aptidão para o cultivo da cana-de-açúcar. Em seguida, são realizadas as etapas de preparo e sistematização do solo, plantio, aplicação de fertilizantes e defensivos, irrigação, colheita, transporte e processamento industrial para a produção de etanol, açúcar e energia elétrica.

Na unidade industrial, a cana colhida é moída, e a fração fibrosa sólida, denominada bagaço, é separada do caldo. Após a fermentação e a destilação, forma-se a vinhaça como resíduo líquido. Considerando a estimativa de produção de 29 bilhões de litros de etanol na safra 2020/2021 e a relação adotada no estudo, seriam gerados aproximadamente 319 bilhões de litros de vinhaça. Em vez de ser descartada, a vinhaça pode ser reaplicada nas áreas agrícolas como fonte de água e nutrientes para o ciclo seguinte. Também existem processos experimentais para seu aproveitamento na produção de biogás. A aplicação agrícola da vinhaça como fertilizante e fonte hídrica é denominada fertirrigação. Sua composição inclui nutrientes de interesse agronômico, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Principais parâmetros da composição química da vinhaça (Fonte: Embrapa).

Parâmetro	**Faixa**
pH	4,4–4,6
Temperatura	80–100 °C
Demanda de oxigênio	19.800 mg/L
Nitrogênio (N)	480–710 mg/L
Fósforo (P_2O_5)	9–200 mg/L
Potássio (K_2O)	3.340–4.600 mg/L
Cálcio (CaO)	1.330–4.570 mg/L
Magnésio (MgO)	580–700 mg/L

Parâmetro	Faixa
Sulfato (SO_4)	3.700–3.730 mg/L
Carbono (C)	8.700–12.100 mg/L
Matéria orgânica	3.800 mg/L

A fertirrigação com vinhaça é realizada logo após a colheita, preferencialmente em até 20 dias, com a finalidade de favorecer a rebrota e reduzir o risco de comprometimento das gemas. Em condições adequadas, o mesmo canavial pode ser colhido por aproximadamente cinco ciclos e, em situações específicas, alcançar até dez cortes.

Entretanto, as colheitas subsequentes tendem a apresentar redução de produtividade, estimada neste estudo em cerca de 10% por ciclo, embora esse comportamento possa variar conforme o ambiente de produção e o manejo adotado.

A vinhaça é transportada até as áreas agrícolas por canais abertos, tubulações ou caminhões. Nas áreas contempladas por canais, são utilizados equipamentos de enrolamento automático, denominados hidro-roll, para distribuir o efluente sobre o canavial, conforme ilustrado na Figura 1. O monitoramento desse processo é complexo e pode variar entre propriedades, embora essa etapa afete diretamente a produtividade dos talhões. Em uma área de 20 ha, por exemplo, o hidro-roll pode ser reposicionado a cada 60 m para fertirrigar uma faixa de aproximadamente 350 m, correspondente ao comprimento da tubulação recolhida automaticamente. Lacunas na distribuição podem reduzir a produtividade e, em situações mais severas, comprometer a sobrevivência das plantas.

A produtividade da cana-de-açúcar também é influenciada por pragas, doenças, condições do solo e qualidade do preparo da área. Ainda assim, no período seco e especialmente após a colheita, a fertirrigação com vinhaça desempenha papel relevante. A ausência da aplicação ou sua realização tardia pode intensificar o estresse da cultura e reduzir o potencial produtivo.

O sistema de fertirrigação pode operar continuamente após a colheita e exige sincronização entre geração, transporte e aplicação da vinhaça. Ritmos inadequados de aplicação podem provocar acúmulo ou transbordamento nos canais e aumentar o risco de impactos ambientais, inclusive sobre cursos d’água e águas subterrâneas.

1.1 Sensoriamento remoto aplicado ao manejo da cana-de-açúcar

O sensoriamento remoto vem sendo utilizado na agricultura de precisão aplicada à cana-de-açúcar desde o final da década de 1970 [4], [5]. A série Landsat constitui uma das fontes de

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O
Saber. ISSN: 2675-9128. São Paulo - SP.
Ano VII, v.1 2026 | submissão: 25/09/2026 | aceito: 02/10/2026 | publicação: 07/10/2026

dados orbitais mais empregadas nesse contexto [5], com aplicações relatadas no Brasil, na Austrália, na África do Sul e na Tailândia. Imagens SPOT (Système Probatoire pour l'Observation de la Terre), com melhor resolução espacial em relação a outros sensores disponíveis à época, também foram utilizadas, sobretudo na Austrália, na África do Sul e na Índia [6]. Dados MODIS, com menor resolução espacial, entre 250 e 1.000 m, foram empregados na classificação de áreas de cana-de-açúcar no Brasil e em Moçambique. Entretanto, apresentaram limitações, como confusão espectral com pastagens, apesar da elevada frequência de revisita.



Figura 1. Esquema da aplicação da vinhaça: transporte pelo canal (a), condução ao hidro-roll (b) e distribuição no campo (c).

Com resolução espacial de aproximadamente 1.000 m, Duveiller et al. [7] utilizaram a Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (FPAR), calculada a partir de dados SPOT VEGETATION, para estimar a produtividade agrícola no Estado de São Paulo, Brasil. Outros estudos investigaram dados SAR (Synthetic Aperture Radar) para o mapeamento e o monitoramento de canaviais. Johnson e Kinsey-Henderson [8], por exemplo, combinaram dados SPOT e ERS-1 para mapear o uso da terra em uma extensa região produtora de cana-de-açúcar na Austrália.

Os dados SAR são frequentemente apontados como alternativa às imagens ópticas quando a cobertura de nuvens limita a observação da superfície, especialmente durante a estação chuvosa. Baghdadi et al. [9] avaliaram o potencial dos sensores TerraSAR-X, ASAR/ENVISAT e PALSAR/ALOS para monitorar canaviais na Ilha da Reunião por meio de abordagens multitemporais. Os autores relacionaram o coeficiente de retroespalhamento SAR (σ^0) ao NDVI, à altura das plantas e à colheita. Entre os principais resultados, observaram que: 1) talhões colhidos podem ser identificados; 2) a altura das plantas apresentou melhor relação com dados adquiridos em maiores ângulos de incidência; 3) as polarizações cruzadas HV ou VH foram ligeiramente superiores às copolarizações HH ou VV na caracterização do estado da cultura; e 4) a banda X mostrou-se potencialmente menos sensível à rugosidade do solo do que

as bandas L e C. Apesar desses avanços, ainda são relativamente poucos os estudos sobre aplicações de SAR em cana-de-açúcar.

As revisões de Moran et al. [4] e Abdel-Rahman e Ahmed [5] identificaram diversas aplicações do sensoriamento remoto no manejo da cana-de-açúcar. A lista a seguir sintetiza essas aplicações:

Nº	Aplicação
1	Classificação de talhões de cana
2	Mapeamento da extensão da área
3	Identificação e idade de maturação
4	Discriminação varietal
5	Medidas pontuais
6	Previsão da estimativa na colheita
7	Variabilidade de solo
8	Monitoramento da safra
9	Identificação das causas de variações produtivas
10	Mapeamento de condições climáticas
11	Avaliação topográfica
12	Identificação de períodos operacionais

Os itens 6, 7, 8, 9 e 12 dessa síntese estão direta ou indiretamente relacionados ao monitoramento da fertirrigação com vinhaça, tema central deste artigo. Os lançamentos dos satélites Sentinel-1, em 2014, e Sentinel-2, em 2015, ampliaram as possibilidades de observação multitemporal dos canaviais. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo avaliar a utilidade dos dados Sentinel-2 e Sentinel-1 na identificação e na quantificação dos efeitos associados à distribuição inadequada da vinhaça em áreas de cana-de-açúcar. Para isso, combinamos séries multitemporais de imagens Sentinel com dados de produtividade dos talhões. Ao final, buscamos propor um método de análise de imagens capaz de apoiar o monitoramento da aplicação de vinhaça e do desenvolvimento da cultura.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O
Saber. ISSN: 2675-9128. São Paulo - SP.
Ano VII, v.1 2026 | submissão: 25/09/2026 | aceito: 02/10/2026 | publicação: 07/10/2026

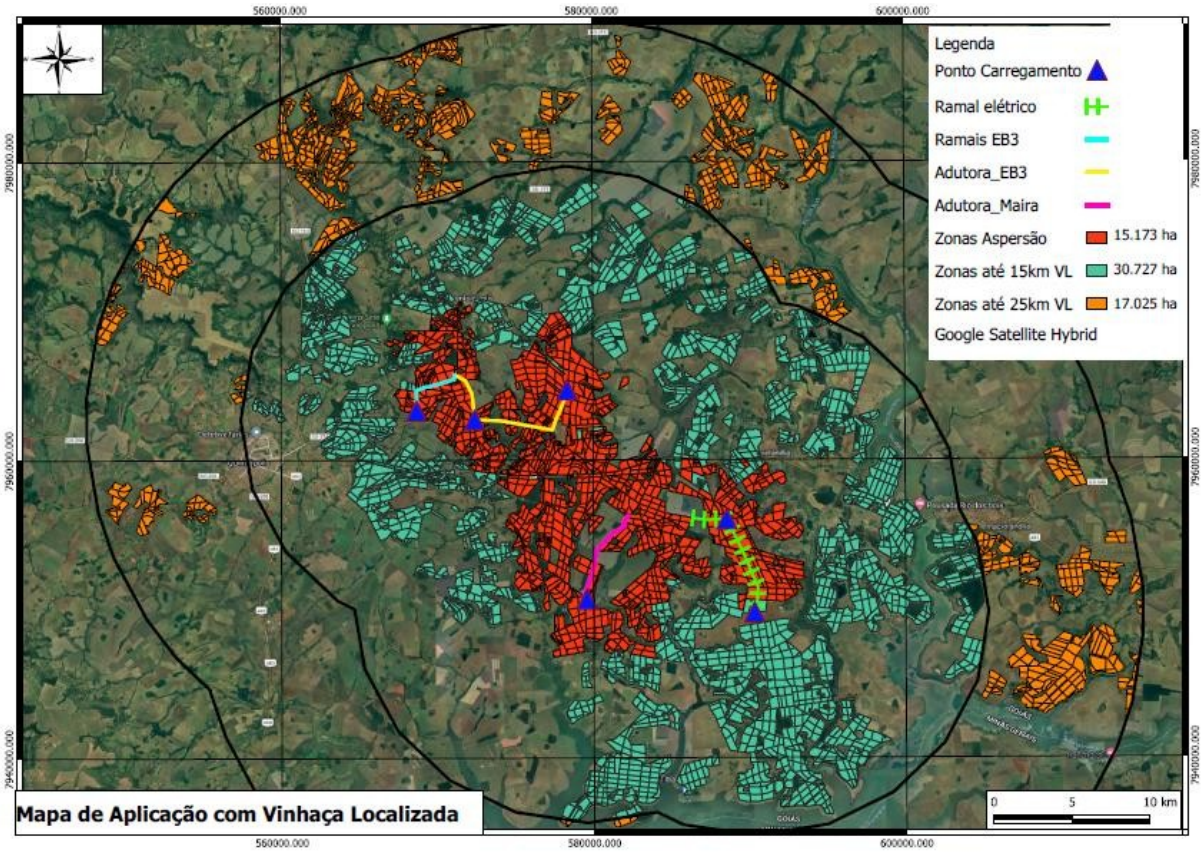

Figura 2. Localização da área de estudo, talhões de cana-de-açúcar e zonas de aplicação de vinhaça. A área de interesse corresponde ao setor fertirrigado por aspersão.

2. Metodologia

2.1 Área de estudo

A área de estudo localiza-se no extremo sul do Estado de Goiás, próxima ao município de Quirinópolis e à divisa com Minas Gerais (Figura 2), e está inserida na bacia do rio Paraná. O conjunto analisado compreende 768 talhões, representados em amarelo na Figura 2, com área média de aproximadamente 16 ha. Esses talhões integram a área de produção da São João Cargill, SJC Bioenergia, empresa que forneceu os dados utilizados neste estudo. Segundo os dados disponibilizados, a operação abrangia cerca de 150 mil ha de cana-de-açúcar e produção aproximada de 15 milhões de toneladas.

A região apresenta precipitação anual aproximada de 1.500 mm, concentrada principalmente entre outubro e abril, e temperatura média em torno de 25 °C. O relevo é suavemente ondulado, com declividades de até 6%. Os solos variam de textura arenosa a franco-argilosa.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O
Saber. ISSN: 2675-9128. São Paulo - SP.
Ano VII, v.1 2026 | submissão: 25/09/2026 | aceito: 02/10/2026 | publicação: 07/10/2026

2.2 Dados auxiliares

Os dados auxiliares foram fornecidos pela SJC Bioenergia e consistiram em planilhas de controle organizadas por talhões, com áreas entre 12 e 60 ha. Esses registros continham informações descritivas utilizadas na seleção das unidades amostrais, conforme os critérios apresentados a seguir.

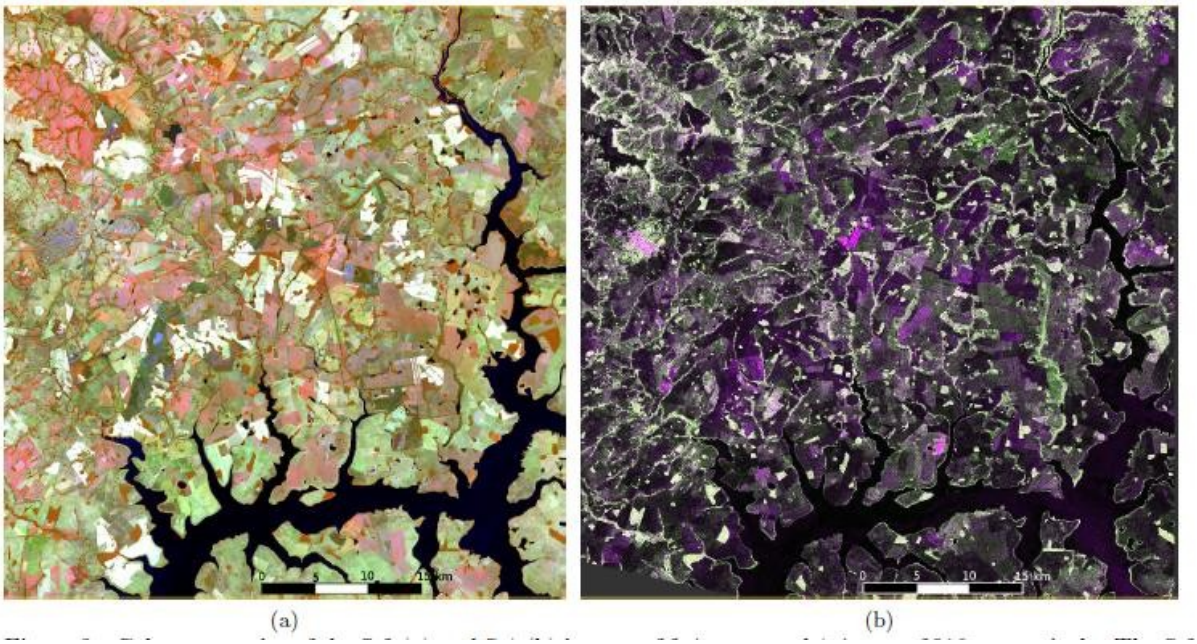

Figura 3. Composição colorida das imagens Sentinel-2 (a), de 2 de agosto de 2018, e Sentinel-1 (b), de 1º de agosto de 2018. A composição Sentinel-2 corresponde ao realce “Vegetação saudável”, disponível no SNAP, com infravermelho em vermelho, SWIR em verde e azul em azul. A composição Sentinel-1 utiliza VV em vermelho, VH em verde e a diferença VV − VH em azul.

Os talhões de produção deveriam:

• estar localizados na área atendida pelo sistema de distribuição de vinhaça por bombas e tubulações longas, excluindo-se áreas sem aplicação ou atendidas por outros métodos, principalmente caminhões;

• pertencer ao quarto ou ao quinto ciclo de colheita; e

• apresentar dados descritivos completos.

O quarto e o quinto ciclos correspondem, neste estudo, ao quarto e ao quinto anos de cultivo do mesmo canavial. Esse critério foi adotado porque a produtividade tende a diminuir ao longo dos cortes sucessivos, com redução média estimada em aproximadamente 10% por ciclo. Após determinado número de cortes, que pode alcançar oito ou nove conforme as condições de cultivo, o canavial é reformado e uma nova implantação é realizada.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O
Saber. ISSN: 2675-9128. São Paulo - SP.
Ano VII, v.1 2026 | submissão: 25/09/2026 | aceito: 02/10/2026 | publicação: 07/10/2026

2.3 Imagens e processamento de imagens

As imagens Sentinel-1 e Sentinel-2 foram obtidas no Sentinel Data Hub da Agência Espacial Europeia para o período de 2018 a 2019, de modo a representar diferentes estágios de desenvolvimento da cultura e permitir a comparação com os dados de colheita de 2019. Uma única cena cobriu toda a área de estudo. As datas de aquisição utilizadas nas análises são apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

As imagens Sentinel-2 foram processadas no software SNAP, a partir de produtos de refletância. O sensor dispõe de 13 bandas espectrais distribuídas em resoluções espaciais de 10, 20 e 60 m. As três bandas de 60 m possuem aplicações específicas: aerossóis costeiros (B1), vapor d'água (B9) e detecção de nuvens cirrus (B10).

Essas três bandas não foram utilizadas. Foram selecionadas imagens com baixa interferência de nuvens sobre a área de interesse. As quatro bandas de 10 m foram mantidas em sua resolução original, enquanto as bandas de 20 m foram reamostradas para 10 m pelo método bilinear. Em seguida, as imagens foram recortadas de acordo com a extensão dos polígonos dos talhões avaliados. A Figura 3 apresenta as imagens de agosto de 2018 em composição colorida, com os polígonos selecionados sobrepostos.

O SNAP também foi empregado no cálculo de índices espectrais. Após a avaliação visual dos produtos, considerando talhões com problemas previamente conhecidos, foram selecionados o SAVI (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo) e o NDWI (Índice de Água por Diferença Normalizada), por apresentarem melhor discriminação das porções com possível desuniformidade na aplicação de vinhaça.

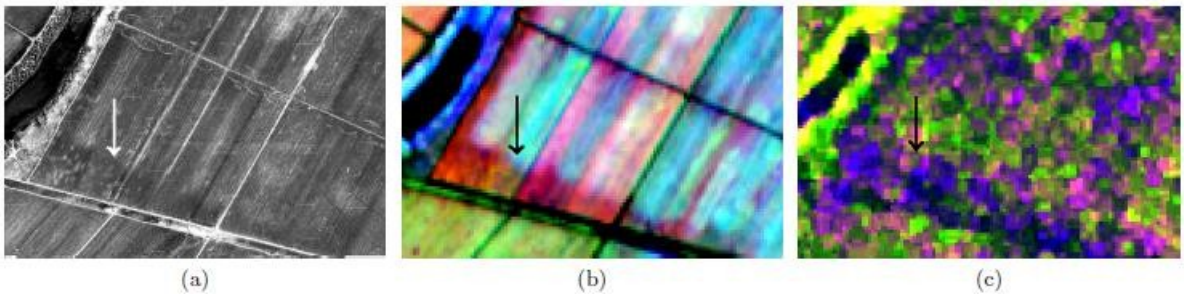

Figura 4. Exemplo de possível estresse nutricional associado à distribuição irregular de vinhaça em talhões de cana-de-açúcar: (a) imagem do Google Earth com discreta diferença tonal; (b) composição multitemporal do SAVI obtida com imagens Sentinel-2 de agosto, setembro e novembro de 2018; e (c) composição colorida Sentinel-1 com VV, VH e razão VV/VH.

As imagens Sentinel-1 também foram processadas no SNAP. O fluxo incluiu remoção de ruído térmico, calibração radiométrica, correção geométrica de terreno pelo método Range-Doppler e filtragem speckle Lee Refinado. Os produtos dispunham das polarizações VV e VH,

e a razão VV/VH foi adicionada como terceira variável. Assim como as imagens Sentinel-2, os dados foram recortados para a área de estudo.

O processamento consistiu principalmente na extração de estatísticas por talhão. Para cada polígono, foram calculados média, desvio padrão, mediana, mínimo e máximo. Essa etapa foi realizada com a ferramenta Objects Radiometric Statistics, da Orfeo ToolBox (OTB; CNES, 2002–2018), a partir do arquivo vetorial dos talhões selecionados.

O processamento das imagens consistia principalmente na extração de parâmetros estatísticos das imagens de cada estande. Para cada talhão foram extraídas as seguintes variáveis: média, desvio padrão, mediana, valor mínimo e valor máximo. Esta operação foi realizada usando “ObjectsRadiometricStatistics "da Orpheo Tool Box (OTB, Copyright © 2002-2018 CNES) e usando um shapefile dos filelds selecionados.

2.4 Teste estatístico

Como o objetivo era definir uma abordagem que facilitasse a identificação de problemas na fertirrigação, três limitações foram consideradas. A primeira refere-se ao período de colheita, que se estende de abril a novembro e exige o uso de várias imagens para representar os diferentes estágios da cultura. A segunda decorre do número de cortes do canavial: como a produtividade tende a diminuir ao longo das colheitas, a tonelagem não pode ser interpretada isoladamente como variável dependente. A terceira, e mais relevante, relaciona-se à escala de registro da produtividade, disponibilizada por fazenda e não por talhão. Essa agregação pode dificultar a identificação de falhas de fertirrigação localizadas, pois uma mesma fazenda pode conter talhões com e sem problemas de aplicação.

Para reduzir essas limitações, foram identificados visualmente talhões com indícios de problemas de fertirrigação, caracterizados por heterogeneidade espacial nas datas observadas, e talhões com distribuição aparentemente homogênea de vinhaça. Esses conjuntos formaram dois grupos de comparação. A Figura 4 apresenta exemplos de áreas com sinais visuais de desuniformidade em imagem do Google Earth, em uma composição multitemporal Sentinel-2 e em uma composição multipolarizada Sentinel-1.

Foram avaliadas duas abordagens estatísticas: 1) correlação de Pearson entre a tonelagem de cana por hectare (TCH) e as bandas e os índices derivados do Sentinel-2, bem como as polarizações e a razão de polarização do Sentinel-1; e 2) análise de variância (ANOVA) para verificar se os talhões com indícios de problemas de fertirrigação apresentavam médias

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O
Saber. ISSN: 2675-9128. São Paulo - SP.
Ano VII, v.1 2026 | submissão: 25/09/2026 | aceito: 02/10/2026 | publicação: 07/10/2026

diferentes das observadas nos talhões sem esses indícios, além de identificar as bandas, polarizações e índices com maior capacidade de separação entre os grupos.

3. Resultados e discussão

A Tabela 2 apresenta as correlações de Pearson entre a tonelagem de cana por hectare (TCH), o número de colheitas (NH) e as bandas individuais de três imagens Sentinel-2.

Tabela 2. Correlação de Pearson entre a tonelagem de cana por hectare (TCH), o número de colheitas (NH) e as bandas individuais do Sentinel-2.
Os coeficientes destacados em negrito são superiores a 0,2 ou inferiores a -0,2 e apresentam significância estatística de $p < 0,01$.
Tabela 2. Correlação de Pearson entre a tonelagem de cana por hectare (TCH), o número de colheitas (NH) e as bandas individuais do Sentinel-2.

Banda S-2	Faixa espectral	04-04-2018 TCH	04-04-2018 NH	09-11-2018 TCH	09-11-2018 NH	18-04-2019 TCH	18-04-2019 NH
2	Azul	-0,01	-0,06	**-0,21**	0,09	0,04	**0,25**
3	Verde	-0,06	0,03	**-0,22**	0,11	0,05	**0,24**
4	Vermelho	-0,03	-0,12	**-0,26**	0,08	-0,02	**0,32**
5	Borda vermelha 1	-0,04	-0,03	**-0,27**	0,08	-0,05	**0,33**
6	Borda vermelha 2	-0,03	0,12	0,10	0,08	**0,41**	**-0,39**
7	Borda vermelha 3	0,06	0,09	0,19	0,09	**0,41**	**-0,46**
8	NIR	0,04	0,10	0,17	0,11	**0,40**	**-0,45**
11	SWIR 1	-0,03	-0,01	**-0,23**	0,18	0,01	**0,33**
12	SWIR 2	0,02	-0,09	**-0,23**	0,15	-0,04	**0,35**

Os números em negrito estão todos acima de 0,2 ou abaixo de -0,2 e são significativos em $p < 0,01$.

Na primeira imagem, adquirida em 4 de abril de 2018, nenhuma banda apresentou correlação relevante, superior a 0,2 ou inferior a -0,2, com TCH ou NH. Esse resultado pode estar associado ao fato de que muitos talhões ainda não haviam sido colhidos e, portanto, refletiam os efeitos do ciclo anterior. Na segunda imagem, de 9 de novembro de 2018, observaram-se correlações significativas, embora fracas a moderadas, entre -0,20 e -0,27, nas bandas do visível, da borda vermelha e do infravermelho de ondas curtas. Embora a maior parte dos talhões provavelmente já tivesse sido colhida, as diferenças de estágio de desenvolvimento entre eles podem ter reduzido a expressão do efeito investigado. Na imagem de 18 de abril de 2019, foram observadas correlações moderadas, em torno de 0,40, entre TCH e as bandas de borda vermelha 2 e 3 e do infravermelho próximo. As bandas também apresentaram correlação com o número de colheitas, compatível com a tendência de redução da produtividade nos cortes sucessivos.

A Tabela 3 apresenta as correlações de Pearson entre TCH, NH, os índices NDWI e SAVI derivados das imagens Sentinel-2 e as polarizações e a razão de polarização das imagens

Sentinel-1. Em termos gerais, o NDWI apresentou maior frequência de resultados significativos, enquanto o SAVI alcançou correlações de maior magnitude, especialmente na imagem de 18 de abril de 2019, correspondente a um estágio mais avançado de desenvolvimento da cultura. A correlação positiva entre TCH e SAVI sugere que o índice responde ao vigor vegetativo e pode auxiliar na estimativa relativa da produtividade. Por outro lado, a correlação negativa entre NH e SAVI indica redução do vigor à medida que aumenta o número de cortes. Nas datas de julho e agosto de 2018, os sinais das correlações também podem ter sido influenciados pelas diferenças entre as datas de colheita e pelos estágios de rebrota dos talhões.

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise de variância utilizada para testar a hipótese nula de igualdade entre as médias dos grupos com e sem indícios visuais de problemas de fertirrigação. Para o NDWI, a hipótese nula foi rejeitada em duas das seis datas, 30 de setembro de 2018 e 18 de abril de 2019, ao nível de 5% de significância, com p = 0,036 e p = 0,046, respectivamente. Para o SAVI, a diferença foi significativa apenas em 30 de setembro de 2018, com p = 0,038.

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise de variância utilizada para testar a hipótese nula de igualdade entre as médias dos grupos com e sem indícios visuais de problemas de fertirrigação. Para o NDWI, a hipótese nula foi rejeitada em duas das seis datas, 30 de setembro de 2018 e 18 de abril de 2019, ao nível de 5% de significância, com p = 0,036 e p = 0,046, respectivamente. Para o SAVI, a diferença foi significativa apenas em 30 de setembro de 2018, com p = 0,038.

4. Conclusão

O estresse nutricional associado à aplicação irregular ou parcial de vinhaça em áreas de cana-de-açúcar mostrou-se visualmente identificável nas imagens Sentinel, particularmente nos produtos ópticos do Sentinel-2. Entretanto, a ampla janela de colheita dificulta a construção de um procedimento sistemático de monitoramento. Variáveis como o número de cortes podem mascarar o efeito da fertirrigação quando a análise se restringe às médias radiométricas dos talhões. A interpretação visual incorpora, simultaneamente, aspectos relacionados à tonalidade, à cor, à forma, ao tamanho, ao contexto espacial e à evolução temporal. Outra limitação refere-se à disponibilidade dos dados de produtividade em escala de fazenda, e não por talhão, o que reduziu a capacidade de relacionar diretamente as falhas locais de aplicação aos resultados produtivos.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O
Saber. ISSN: 2675-9128. São Paulo - SP.
Ano VII, v.1 2026 | submissão: 25/09/2026 | aceito: 02/10/2026 | publicação: 07/10/2026

Tabela 3. Correlação de Pearson entre a tonelagem de cana por hectare (TCH), o número de colheitas (NH), os índices SAVI e NDWI e as variáveis derivadas do Sentinel-1.

Data imagem S-2	TCH-NDWI	TCH-SAVI	NH-NDWI	NH-SAVI
04-04-2018	-0,04	0,11	-0,04	0,11
12-07-2018	-0,17	-0,17	-0,17	**0,37**
01-08-2018	-0,20**	**-0,28***	-0,20**	**0,33****
30-09-2018	-0,05	0,08	-0,05	0,13
09-11-2018	0,31**	**0,36****	**0,31**	-0,11
18-04-2019	0,16	**0,56****	0,16	**-0,73****

Data imagem S-1	VV TCH	VV NH	VH TCH	VH NH	VV/VH TCH	VV/VH NH
07-09-2018	0,20**	-0,17**	0,04	0,12**	**0,22****	**-0,34****
23-04-2019	0,19**	**-0,36****	0,11**	-0,20**	0,15**	**-0,32****

Os coeficientes destacados em negrito são superiores a 0,2 ou inferiores a -0,2. * significativo a 95%; ** significativo a 99%.

Tabela 4. Análise de variância entre talhões com e sem indícios visuais de problemas de fertirrigação, considerando os índices SAVI e NDWI em seis datas de imagens Sentinel-2.

Data imagem S-2	NDWI Teste F	NDWI Significância (p)	SAVI Teste F	SAVI Significância (p)
04-04-2018	1,42	0,24	1,74	0,19
12-07-2018	0,43	0,51	0,29	0,59
01-08-2018	0,38	0,54	0,80	0,37
30-09-2018	4,58	0,036*	4,44	0,038*
09-11-2018	2,28	0,14	3,23	0,08
18-04-2019	4,12	0,046*	3,47	0,07

* significativo a 95%.

Apesar dessas limitações, os resultados permitem destacar quatro aspectos principais: 1) o Sentinel-2, de natureza óptica, apresentou maior capacidade de identificação dos problemas de fertirrigação do que o Sentinel-1, embora os dados SAR permaneçam relevantes em períodos com cobertura de nuvens; 2) os índices SAVI e NDWI sintetizaram melhor os efeitos associados à condição da cultura do que as bandas analisadas isoladamente; 3) as imagens adquiridas no final do ciclo, pouco antes da colheita, tenderam a evidenciar melhor os efeitos acumulados da aplicação irregular, embora essa identificação possa ocorrer tardiamente para a correção operacional; e 4) fatores como preparo do solo, pragas, plantas daninhas e replantios parciais podem produzir padrões semelhantes e devem ser considerados na interpretação.

Como aprimoramento do processo, recomenda-se que os registros de campo sejam organizados por talhão e vinculados às respectivas datas de colheita e de aplicação de vinhaça.

Agradecimentos

Este projeto integra a tese de doutorado de Gustavo Ferreira de Souza, desenvolvida no Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais. Os autores agradecem à SJC Bioenergia pelo fornecimento dos dados de produção de cana-de-açúcar e à Agência Espacial Europeia pela disponibilização das imagens Sentinel.

Referências

[5] ABDEL-RAHMAN, E.; AHMED, F. B. The application of remote sensing techniques to sugarcane (Saccharum spp. hybrid) production: a review of the literature. International Journal of Remote Sensing, v. 29, n. 13, p. 3753-3767, 2008.

[9] BAGHDADI, N.; BOYER, N.; TODOROFF, P.; EL HAJJ, M.; BÉGUÉ, A. Potential of SAR sensors TerraSAR-X, ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS for monitoring sugarcane crops on Reunion Island. Remote Sensing of Environment, v. 113, n. 8, p. 1724-1738, 2009.

[2] DOS SANTOS LUCIANO, A. C.; PICOLI, M. C. A.; ROCHA, J. V.; FRANCO, H. C. J.; SANCHES, G. M.; LEAL, M. R. L. V.; LE MAIRE, G. Generalized space-time classifiers for monitoring sugarcane areas in Brazil. Remote Sensing of Environment, v. 215, p. 438-451, 2018.

[7] DUVEILLER, G.; LÓPEZ-LOZANO, R.; BARUTH, B. Enhanced processing of 1-km spatial resolution FPAR time series for sugarcane yield forecasting and monitoring. Remote Sensing, v. 5, p. 1091-1116, 2013.

[6] EL HAJJ, M.; BÉGUÉ, A.; GUILLAUME, S.; MARTINÉ, J.-F. Integrating SPOT-5 time series, crop growth modeling and expert knowledge for monitoring agricultural practices: the case of sugarcane harvest on Reunion Island. Remote Sensing of Environment, v. 113, n. 10, p. 2052-2061, 2009.

[1] GROF, C. P.; CAMPBELL, J. A. Sugarcane sucrose metabolism: scope for molecular manipulation. Functional Plant Biology, v. 28, n. 1, p. 1-12, 2001.

[8] JOHNSON, A.; KINSEY-HENDERSON, A. Satellite-based remote sensing for monitoring land use in the sugar industry. In: Proceedings of the 19th Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists. Brisbane: Australian Society of Sugar Cane Technologists, 1997. p. 237-244.

[4] MORAN, M. S.; INOUE, Y.; BARNES, E. M. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. Remote Sensing of Environment, v. 61, n. 3, p. 319-346, 1997.

[3] RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo state (Brazil) using Landsat data. Remote Sensing, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010.